

การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์  
แบบมีเชื้อเลือกผ่าน



นางสาวกาญจนา ชาญวรุฒิ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)  
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TREATMENT OF PULP AND PAPER MILL WASTEWATER BY  
ELECTROCHEMICAL TECHNIQUE IN ELECTROCHEMICAL  
MEMBRANE REACTOR



Miss Kanjana Chanworrawoot

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

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
Graduate School  
Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบมีเชื้อเพลิงผ่าน

โดย

นางสาวกาญจนา ชาญวรุณี

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฉมิตานนท์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ)

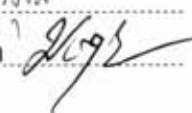
กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กานดา ว่องไวลิขิต)

กาญจนา ชาญวรวุฒิ : การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบมีเยื่อเลือกผ่าน (TREATMENT OF PULP AND PAPER MILL WASTEWATER BY ELECTROCHEMICAL TECHNIQUE IN ELECTROCHEMICAL MEMBRANE REACTOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผศ.ดร. มะลิ หุ่นสม, 96 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษโดยใช้วิธีทางเคมีและเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบมีเยื่อเลือกผ่านชนิดไอออนลบในระดับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้อง พบว่าการบำบัดน้ำเสียทางเคมีโดยใช้กรดซัลฟิวริกสามารถลดค่าบีโอดี ค่าซีโอดี และ ที ได้ร้อยละ 80 42 และ 94 ตามลำดับ ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 แต่สมบัติของน้ำเสียยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน สำหรับการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งตัวแปรที่ศึกษาคือ อัตราการเจือจางน้ำเสีย อัตราการไหลวนของน้ำเสีย ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง พบว่าตัวแปรต่างๆที่ศึกษามีผลต่อการกำจัดสารมลพิษออกจากน้ำเสียอย่างมีนัยสำคัญ โดยภาวะที่เหมาะสมคือ อัตราการเจือจางน้ำเสียเท่ากับ 50 เท่า อัตราการไหลวนน้ำเสียเท่ากับ 3.46 ลิตรต่อนาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2.53 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 0.0428 โมลต่อลิตร โดยสามารถลดค่าบีโอดี ค่าซีโอดี และทีได้ประมาณร้อยละ 90-100 สำหรับการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าแบบต่อเนื่องพบว่าระบบจะเข้าสู่ภาวะสมดุลที่เวลา 7 ชั่วโมง โดยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจะมีสีค่อนข้างใส ไม่นำรังเกียจ และสามารถลดค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ส่วนค่าบีโอดีและของแข็งแขวนลอยจะสูงกว่ามาตรฐาน 3.2 และ 3.1 เท่า ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ต้นทุนในการดำเนินงานพบว่าวิธีการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีเคมีไฟฟ้ามีต้นทุนในการดำเนินงานต่อปริมาณสารมลพิษต่ำกว่าวิธีทางเคมี

# ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สาขาวิชา..... วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม      ลายมือชื่อนิสิต      กาญจนา ชาญวรวุฒิ  
ปีการศึกษา..... 2551      ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก      

## 5087110120 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORD : BLACK LIQUOR / ANION EXCHANGE MEMBRANE / CURRENT DENSITY / ELECTROCHEMICAL

KANJANA CHANWORRAWOOT: (TREATMENT OF PULP AND PAPER MILL WASTEWATER BY ELECTROCHEMICAL TECHNIQUE IN ELECTROCHEMICAL MEMBRANE REACTOR. ADVISOR: ASST. PROF. MALI HUNSOM, Ph.D., 96 pp.

This research was carried out to treat wastewater from pulp and paper mill wastewater by chemical and electrochemical techniques in anionic membrane electrochemical reactor in laboratory scale at ambient temperature. By using the sulfuric acid, it was found that this process can be reduced the level of BOD, COD and color of around 80, 42 and 94%, respectively at the initial pH of 2. However, the properties of the treated wastewater were still higher than the acceptable values of the government standard. By using the electrochemical technique, the optimum condition was found at the dilution times of 50 times, circulating flow rate of 3.46 l/min, current density of 2.53 mA/cm<sup>2</sup> and the concentration of NaCl of 0.0428 M. At this condition, greater than 90-100% of BOD, COD and color were respectively removed. With respect to the continuous treatment process by electrochemical technique, it was found that the system reached the steady state condition within 7 h after start up. The color of the treated wastewater from this process was almost clear and not objectionable, the level of COD and TSS were in the range of the government standard but the level of BOD and TDS were still higher than the acceptable values of approximately 3.2 and 3.1-fold respectively. According to the operating cost of the treatment system, it can be said that the operating cost per unit COD by electrochemical technique was lower than that of the chemical treatment process.

Field of Study : Environmental Science.....

Student's Signature : *Kanjana Chanworrawoot*

Academic Year : 2008.....

Principal Advisor's Signature : *Mali Hunsom*

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ และช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โหมยิตานนท์ ประธานกรรมการ อาจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กานดา ว่องไวลิขิต ที่กรุณาเป็นกรรมการในการสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน รวมทั้งพี่ เพื่อน และน้องๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ คุณอดิคุณ ทรงวัฒนะสิน เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการบริษัท แอดวานซ์อะโกร จำกัด (มหาชน) ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการนำน้ำเสียมาใช้ในการทดลองวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีและให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณพี่ และเพื่อนๆ สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ที่ให้กำลังใจและช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณย์วิทย์ทรัพย์ากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การผลิตเยื่อและกระดาษ.....	3
2.1.1 การเตรียมวัตถุดิบ.....	3
2.1.2 การต้มเยื่อ.....	5
2.1.3 การล้างเยื่อ.....	5
2.1.4 การฟอกเยื่อ.....	5
2.1.5 การผลิตกระดาษ.....	7
2.2 มลพิษจากกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ.....	7
2.3 ลักษณะและองค์ประกอบเคมีของน้ำดำ.....	9
2.4 ลิกนิน.....	11
2.4.1 สมบัติโดยทั่วไปของลิกนิน.....	11
2.4.2 ประโยชน์ของลิกนิน.....	14
2.5 วิธีการจัดการน้ำเสียในอุตสาหกรรม.....	15

บทที่	หน้า
2.5.1 กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ.....	15
2.5.2 กระบวนการบำบัดทางเคมี.....	16
2.6 กระบวนการที่ใช้กำจัดสี.....	17
2.7 กระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานเยื่อและกระดาษในประเทศไทย.....	19
2.8 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเคมีไฟฟ้า.....	20
2.8.1 กระบวนการเคมีไฟฟ้า.....	20
2.8.1.1 ขั้วไฟฟ้า.....	21
2.8.1.2 สารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	23
2.8.1.3 ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า.....	23
2.8.1.4 ศักย์ขั้วไฟฟ้า.....	23
2.8.2 สมการของเนิร์นสต์.....	24
2.8.3 กฎของฟาราเดย์.....	25
2.9 การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า.....	26
2.9.1 กระบวนการเคมีไฟฟ้าที่ใช้เยื่อแผ่น.....	26
2.9.1.1 กระบวนการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า.....	28
2.9.1.2 กระบวนการแยกกรองด้วยกระแสไฟฟ้า.....	31
2.9.2 กระบวนการฟอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า.....	31
2.9.3 กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า.....	32
2.9.4 กระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้า.....	34
2.9.5 กระบวนการลอยตัวด้วยกระแสไฟฟ้า.....	35
2.10 การสำรวจเอกสาร.....	35
3. วิธีดำเนินงานวิจัย.....	38
3.1 รูปแบบการศึกษา.....	38
3.2 เครื่องมือทุกชนิดและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	38
3.2.1. เครื่องปฏิกรณ์ชนิดเชื้อเพลิงผ่านไอออนลบ.....	39
3.3 สารเคมี.....	40
3.3.1 การวิเคราะห์ซีไอดี.....	40
3.3.2 การวิเคราะห์บีไอดี.....	40
3.2.3 การวิเคราะห์สี.....	41



บทที่	หน้า
3.4 ตัวอย่างน้ำเสีย.....	41
3.5 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	42
3.5.1 การทดลองแบบกะ.....	42
3.5.2 การทดลองแบบต่อเนื่อง.....	43
4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	44
4.1 การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี.....	45
4.2 การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า.....	47
4.2.1 การบำบัดน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้า.....	48
4.2.1.1 ผลของการเจือจางน้ำเสีย.....	48
4.2.1.2 ผลของอัตราการไหลวนของน้ำเสีย.....	50
4.2.1.3 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า.....	53
4.2.1.4 ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง.....	54
4.2.2 การบำบัดน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง.....	59
4.3 ต้นทุนในการดำเนินงาน.....	62
5. สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	65
รายการอ้างอิง.....	67
ภาคผนวก.....	70
ภาคผนวก ก.....	71
ภาคผนวก ข.....	75
ภาคผนวก ค.....	87
ภาคผนวก ง.....	90
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	96

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	มลภาวะทางน้ำที่เกิดจากกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษแบบกราฟท์.....	10
2.2	สมบัติโดยทั่วไปของน้ำค้ำ.....	10
2.3	การวิเคราะห์องค์ประกอบของลิกนินในไม้.....	13
2.4	ปริมาณลิกนินที่พบในไม้ประเภทต่างๆ.....	14
2.5	ศักยภาพของตัวออกซิไดซ์ตามสารตั้งต้น.....	34
3.1	วิธีวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง.....	43
4.1	สมบัติของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษที่วิเคราะห์ได้ก่อนทำการ บำบัด.....	44
4.2	ต้นทุนที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยที่ภาวะที่เหมาะสมจากกระบวนการบำบัดน้ำ เสียด้วยวิธีต่างๆ.....	64
ก	มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม.....	71


  
**คุนยวิทยทรพยากร**  
**จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ขั้นตอนต่างๆในกระบวนการผลิตเชื้อและกระดาษ.....	4
2.2	โครงสร้างของลิกนิน.....	12
2.3	โครงสร้างของ Phenylpropane ในลิกนิน.....	12
2.4	สารตั้งต้นของโครงสร้างลิกนิน.....	13
2.5	การบำบัดน้ำเสียของกลุ่มอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษในประเทศไทย.....	20
2.6	การถ่ายโอนมวลสารในสารละลาย.....	22
2.7	กระบวนการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าชนิดที่มีเชื้อเลือกผ่านไอออนลบ.....	30
2.8	กระบวนการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าชนิดที่มีเชื้อเลือกผ่านไอออนบวก.....	30
2.9	กระบวนการแยกกรองด้วยกระแสไฟฟ้า.....	31
3.1	เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าชนิดเชื้อเลือกผ่านไอออนลบที่ใช้ในการทดลองแบบกะ	39
3.2	เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าชนิดเชื้อเลือกผ่านไอออนลบที่ใช้ในการทดลองแบบต่อเนื่อง.....	39
3.3	ลักษณะของน้ำดำ.....	41
4.1	ผลของการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีที่ค่าความเป็นกรด-เบสต่างๆ.....	46
4.2	ผลของค่าความเป็นกรด-เบสต่อปริมาณแข็งแขวนลอยและของแข็งละลายน้ำ....	46
4.3	FTIR spectra ของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษ ก่อนและหลังการบำบัดด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ (ข) 2 (ค) 4 (ง) 6 และ (จ) 8	46
4.4	สีของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยการตกตะกอนด้วยสารเคมี.....	47
4.5	ร้อยละการกำจัดมลพิษของค่า (ก) บีโอดี (ข) ซีโอดี (ค) ดี (ง) ของแข็งละลายน้ำ และ (จ) ของแข็งแขวนลอย กับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่อัตราการเจือจางน้ำเสียต่างๆ.....	49
4.6	ร้อยละการกำจัดมลพิษของค่า (ก) บีโอดี (ข) ซีโอดี (ค) ดี (ง) ของแข็งละลายน้ำ และ (จ) ของแข็งแขวนลอย กับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่อัตราการไหลวนของน้ำเสียต่างๆ.....	51

ภาพที่		หน้า
4.7	ร้อยละการกำจัดมลพิษของค่า (ก) บีโอดี (ข) ซีโอดี (ค) ดี (ง) ของแข็งละลายน้ำ และ (จ) ของแข็งแขวนลอย กับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ.....	55
4.8	ร้อยละการกำจัดมลพิษของประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่น ระดับต่างๆ.....	56
4.9	ร้อยละการกำจัดมลพิษของค่า (ก) บีโอดี (ข) ซีโอดี (ค) ดี (ง) ของแข็งละลายน้ำ และ (จ) ของแข็งแขวนลอย กับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ต่างๆ.....	58
4.10	สีของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยการเติมสาร โซเดียมคลอไรด์ลงไปบนน้ำเสียที่ ระดับความเข้มข้นต่างๆ.....	59
4.11	ร้อยละการกำจัดมลพิษของค่า (ก) บีโอดี (ข) ซีโอดี (ค) ดี (ง) ของแข็งละลายน้ำ และ (จ) ของแข็งแขวนลอย กับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่อัตราการไหลต่างๆ ของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ในการบำบัดแบบต่อเนื่อง.....	61
4.12	FTIR spectra ของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ (ก) ก่อน และ (ข) หลังการบำบัดด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบทางตรง (ค) ทางอ้อม และ (ง) แบบต่อเนื่อง	62
ข (1)	Calibration Curve ของการวัดสีด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer.....	76
ข (2)	กราฟของบีโอดีสำหรับน้ำเสียทั่ว ๆ ไป.....	83
ง (1)	การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-เบสที่ฝั่งแอ โนด และแค โทดของการ บำบัดน้ำเสียที่อัตราการเจือจางต่างๆ.....	90
ง (2)	การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-เบสที่ฝั่งแอ โนด และแค โทดของการ บำบัดน้ำเสียที่อัตราการไหลวนของน้ำเสียต่างๆ.....	90
ง (3)	การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-เบสที่ฝั่งแอ โนด และแค โทดของการ บำบัดน้ำเสียที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ.....	91
ง (4)	การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-เบสที่ฝั่งแอ โนด และแค โทดของการ บำบัดน้ำเสียที่ความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ต่างๆ.....	91
ง (5)	การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-เบสที่ฝั่งแอ โนด และแค โทดของการ บำบัดน้ำเสียแบบต่อเนื่องที่อัตราการไหลต่างๆ.....	92
ง (6)	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ฝั่งแอ โนด และแค โทดของการบำบัดน้ำเสียที่อัตรา การเจือจางต่างๆ.....	92

ภาพที่		หน้า
ง (7)	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ฝั่งแอโนด และแคโทดของการบำบัดน้ำเสียที่อัตราการไหลวนของน้ำเสียต่างๆ.....	93
ง (8)	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ฝั่งแอโนด และแคโทดของการบำบัดน้ำเสียที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ.....	93
ง (9)	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ฝั่งแอโนด และแคโทดของการบำบัดน้ำเสียที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆ.....	94
ง (10)	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ฝั่งแอโนด และแคโทดของการบำบัดน้ำเสียแบบต่อเนื่องที่อัตราการไหลต่างๆ.....	94
ง (11)	FTIR ของลิกนิน.....	95

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษของประเทศไทยเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีพื้นฐานที่แข็งแกร่งและมีความพร้อมที่จะแข่งขันกับประเทศอื่นๆ ในตลาดโลก เนื่องจากผู้ผลิตไทยมีความได้เปรียบผู้ผลิตต่างชาติทั้งทางด้านคุณภาพของสินค้าและภาพลักษณ์ของผู้ผลิตที่ใช้วัตถุดิบจากป่าปลูก ปัจจุบันประเทศไทยมีโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษมากกว่า 90 แห่ง ทำให้มีศักยภาพสูงในการแข่งขันในตลาดโลก อย่างไรก็ตามการผลิตเยื่อและกระดาษเป็นกระบวนการที่ต้องใช้น้ำในกระบวนการผลิตมากถึงประมาณ 40-60 ลูกบาศก์เมตรต่อตันกระดาษ (ปีระพันธ์ สุวรรณเมนะ, 2539) และก่อให้เกิดน้ำเสียในปริมาณมากตามมา โดยน้ำเสียดังกล่าวจะมีการปนเปื้อนสารเคมีและวัตถุอันตรายที่หลีกเลี่ยงจากกระบวนการผลิต เช่น พอลิแซคคาไรด์ ลิกนิน มีสีดำคล้ำ กลิ่นเหม็น มีค่าบีโอดี ค่าซีโอดี ความเป็นกรด-เบส และของแข็งแขวนลอยที่สูงเกินมาตรฐานดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวิธีการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษที่นิยมใช้ส่วนใหญ่จะเป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ (Biological process) ได้แก่ ระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) บ่อฝุ้ง (Oxidation pond) และบ่อเติมอากาศ (Aerated lagoon) หรือการตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical precipitation) ซึ่งกระบวนการบำบัดน้ำเสียเหล่านี้มีประสิทธิภาพดีในการลดค่าบีโอดี ค่าซีโอดี และสารอื่นๆ ในน้ำเสีย แต่กระบวนการดังกล่าวไม่สามารถลดสีหรือพวกสารประกอบคลอรีนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบมีเยื่อเลือกผ่านชนิดไอออนลบ (Anion exchange membrane) เนื่องจากกระบวนการเคมีไฟฟ้ามีข้อดีคือ ดำเนินการง่าย ใช้พื้นที่น้อยในการบำบัด ไม่มีสารเคมีตกค้างในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด และใช้เวลาในการบำบัดสั้น โดยในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบมีเยื่อเลือกผ่านจะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือขั้วแคโทดและขั้วแอโนดวางคร่อมแผ่นเยื่อเลือกผ่าน โดยเยื่อเลือกผ่านไอออนลบนี้จะมีสมบัติในการยอมให้ไอออนลบของสารอิเล็กโทรไลต์เคลื่อนที่ผ่านเนื้อเยื่อเลือกผ่านได้

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบมีเชื้อเพลิงผ่านชนิดไอออนลบ
2. เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ต่อการลดค่าซีโอดี บีโอดี และสีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบมีเชื้อเพลิงผ่านชนิดไอออนลบ
3. เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบมีเชื้อเพลิงผ่านชนิดไอออนลบ

### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาการลดสีของน้ำดำที่ได้จากกระบวนการต้มเยื่อ ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท แอดวานซ์ อะโกร จำกัด (มหาชน) จังหวัดฉะเชิงเทรา
2. ศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้ระยะเวลาทำการทดลองตั้งแต่เดือนตุลาคม 2550 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2552
3. ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าขนาด  $0.10 \times 0.10 \times 0.11$  ลูกบาศก์เมตร แบบมีเชื้อเพลิงผ่านชนิดไอออนลบแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic mode)

### 1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในประเทศและต่างประเทศ
2. จัดหาอุปกรณ์และออกแบบการทดลอง
3. วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำเสีย
4. ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆต่อการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า
5. วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมจากการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า
6. อภิปรายและสรุปผลการทดลอง เขียนวิทยานิพนธ์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า
2. สามารถเป็นแนวทางต่อไปในการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษและอุตสาหกรรมประเภทอื่น

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษถือเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศเป็นอย่างมาก แต่ในขณะที่เดียวกันกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษนี้ก็ยังคงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตมีความเข้มข้นของสารมลพิษสูงและหากไม่ทำการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติก็จะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติเป็นอย่างมาก

#### 2.1 การผลิตเยื่อและกระดาษ

กระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษสามารถแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ การผลิตเยื่อและการผลิตกระดาษ ดังแสดงในภาพที่ 2.1

##### 2.1.1 การเตรียมวัตถุดิบ

- วัตถุดิบในการผลิตเยื่อและกระดาษ

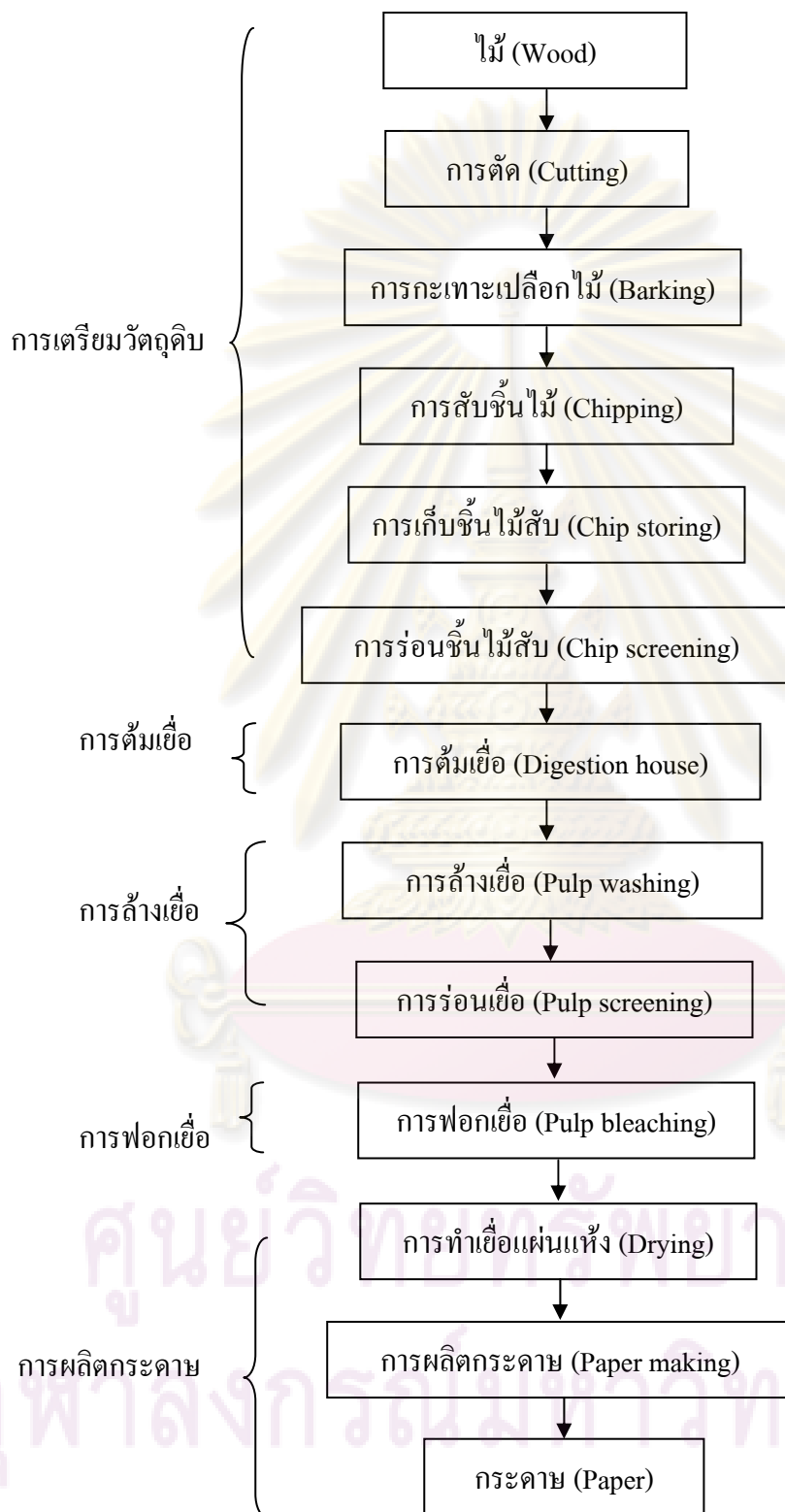
วัตถุดิบหลักในการผลิตเยื่อและกระดาษคือ เซลลูโลส ซึ่งเป็นเส้นใยที่มาจากพืชโดยพืชที่สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบได้จะต้องต้องมีเส้นใยที่แข็งแรง เหมาะสมกับการนำไปผลิตกระดาษ นอกจากนี้จะคำนึงถึงคุณสมบัติของเส้นใยแล้วจะต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ทางธุรกิจอีก เช่น วัตถุดิบต้องหาง่าย ราคาไม่แพง การเก็บและการขนส่งไม่ยุ่งยาก

พืชที่สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) ไม้ยืนต้น (Wood) หมายถึงพืชที่เป็นต้นไม้ที่มีลำต้นแข็งแรง อายุยืน แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง

2) ไม้ล้มลุก (Nonwood) ได้แก่พืชอื่นๆนอกเหนือจากไม้ยืนต้น ที่เส้นใยมีคุณสมบัติเหมาะสมและสามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษได้ ได้แก่ ใผ่ ปอ ฝ้าย หรือเป็นส่วนที่เหลือจากเกษตรและอุตสาหกรรม เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย เป็นต้น





ภาพที่ 2.1 ขั้นตอนต่างๆในกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ (James และ Cassey, 1980)

### 2.1.2 การต้มเยื่อ

การต้มเยื่อเป็นการใช้ความร้อนและโซดาไฟเพื่อทำการละลายลิกนินและส่วนประกอบของต้นไม้ที่ไม่ใช่เซลลูโลสออกมาจากเซลลูโลส ซึ่งลิกนินในพีชจะทำหน้าที่เป็นตัวประสานเส้นใยเซลลูโลสของพีชเข้าด้วยกัน กระบวนการต้มเยื่อเริ่มจากการต้มชิ้นไม้สับด้วยไอน้ำและสารเคมีอย่างต่อเนื่อง ภายใต้อุณหภูมิประมาณ 165-175 องศาเซลเซียสและความดันประมาณ 7-8 บาร์ เป็นเวลา 2-5 ชั่วโมง เมื่อผ่านการต้มเสร็จแล้วชิ้นไม้สับจะกลายเป็นเยื่อแขวนลอยอยู่ในน้ำ เรียกว่าน้ำที่ผ่านการต้มนี้ว่า น้ำดำเขียว (Green liquor) จากนั้นของที่ได้จะถูกส่งเข้าสู่ถังลดความดัน (Blow tank) เพื่อลดความดันให้เท่ากับความดันบรรยากาศและเพื่อให้ระเหยไอน้ำและระบายความร้อนออกจากระบบก่อนนำเข้าสู่เครื่องกรองเพื่อแยกเอาสิ่งเจือปน เช่น ขี้ของชิ้นไม้ที่ต้มไม่สุก เลียน หินทราย และเศษพลาสติกออกจากเยื่อ

### 2.1.3 การล้างเยื่อ

เยื่อที่ผ่านการต้มแล้วจะถูกล้างด้วยน้ำ เพื่อแยกสิ่งสกปรกและสิ่งเจือปนออก จากนั้นจะถูกล้างให้สะอาดด้วยระบบการใช้น้ำหมุนเวียนแบบย้อนกลับ (Counter current) ทำให้ได้เยื่อที่สะอาด ชิ้นส่วนน้ำที่ได้จากการล้างเยื่อซึ่งมีสารเคมีปนอยู่ก็จะถูกส่งไปเข้าสู่ระบบการนำน้ำยาเคมีกลับคืนต่อไป

### 2.1.4 การฟอกเยื่อ

การฟอกเยื่อ (Pulp bleaching) เป็นกระบวนการที่ทำให้เยื่อมีสีขาวเหมาะกับการใช้เป็นกระดาษเพื่อการสื่อสารต่างๆ การฟอกเยื่อแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การฟอกเยื่อเพื่อกำจัดเอาลิกนินออกและการฟอกเยื่อเพื่อเปลี่ยนสีของลิกนินให้อยู่ในรูปที่ไม่มีสี (Bleaching lignin) โดยการฟอกเยื่อชนิดหลังนี้เยื่อจะถูกฟอกโดยใช้สารเคมีซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับลิกนินแล้วจะทำให้ลิกนินอยู่ในรูปที่ไม่มีสี (Loras, 1980) การผลิตเยื่อสามารถแบ่งประเภทของกระบวนการผลิตออกเป็น 3 ประเภทคือ

#### 1) การผลิตเยื่อเชิงกล

การผลิตเยื่อเชิงกล (Mechanical pulping) เป็นการใช้พลังงานกลในการแยกเส้นใยออกจากกัน กระบวนการนี้เน้นที่การบด (Grinding) ซึ่งจะดำเนินการโดยการนำไม้มาบดกับหิน เส้นใยในเนื้อไม้จะถูกหินบดจนหลุดออกมา ความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้ลิกนินอ่อนตัว เส้นใยจึงแยกออกจากกันได้ง่าย เยื่อไม้บดที่ได้ซึ่งมีลักษณะเป็นไม้แท้อยู่มากและมีสมบัติไม่ดีเพราะไม่ใช่เยื่อเซลลูโลส

บริสุทธิ์ โดยเยื่อที่ได้จากกระบวนการนี้มีปริมาณเซลลูโลสร้อยละ 85-95 และเยื่อที่ได้จะมีความทึบแสงสูง ราคาถูก จึงนิยมใช้ทำกระดาษหนังสือพิมพ์ กระดาษอนามัยบางชนิด และกระดาษกันสำหรับบรรจุสิ่งของเพื่อป้องกันการกระแทก

## 2) กระบวนการผลิตเยื่อกึ่งเคมี

กระบวนการนี้จะคล้ายกับกระบวนการเชิงกลแต่มีการใช้สารเคมีร่วมด้วยและมีการใช้พลังงานในการบดเยื่อน้อยกว่า ชิ้นไม้สับจะถูกต้มด้วยสารเคมีโดยสภาพกึ่งดิบกึ่งสุก แล้วจึงนำไปบดด้วยเครื่องบดเยื่อ คุณภาพของเยื่อที่ได้จะอยู่ระหว่างเยื่อที่ได้จากกระบวนการผลิตเชิงกลและเชิงเคมี จึงนิยมใช้เยื่อที่ได้ทำกระดาษลูกฟูก

## 3) กระบวนการผลิตเยื่อเคมี (Chemical pulping)

กระบวนการนี้จะให้เยื่อที่มีปริมาณลิกนินเจือปนอยู่น้อยมากจึงเหมาะสำหรับทำกระดาษคุณภาพดี และมีความเหนียว แต่ปริมาณเยื่อที่ได้จะมีปริมาณน้อยกว่ากระบวนการผลิตเยื่อกระดาษเชิงกล กระบวนการผลิตเยื่อเคมีแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

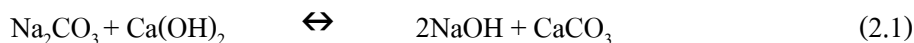
3.1) กระบวนการซัลไฟต์ (Sulphite process) กระบวนการนี้เหมาะสำหรับการผลิตเยื่อที่ได้จากพันธุ์ไม้เนื้อแข็ง และพันธุ์ไม้จำพวกหญ้า น้ำยาต้มที่ใช้มีฤทธิ์เป็นกรด มักใช้กรดซัลฟิวริกและสารประกอบไบซัลไฟต์ ( $\text{HSO}_3$ ) เยื่อที่ได้เรียกว่าเยื่อซัลไฟต์ มีสมบัติเป็นกรด เส้นใยที่ได้จากกระบวนการนี้จึงมีความแข็งแรงต่ำ แต่ข้อดีคือน้ำยาต้มเยื่อมีราคาถูก

3.2) กระบวนการแบบแอลคาไลน์ (Alkaline process) กระบวนการนี้แบ่งย่อยได้เป็น 2 กระบวนการคือ

### - กระบวนการแบบโซดา (Soda process)

เป็นกระบวนการที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวทำละลายลิกนินในการต้มเยื่อ กระบวนการโซดาใช้สำหรับผลิตเยื่อกระดาษแบบบางๆ เช่น ฟางข้าวและไม้เนื้อแข็งบางชนิดซึ่งบางครั้งอาจเติมแอนทราควิโนน (Anthraquinone) เพื่อลดการย่อยสลายคาร์โบไฮเดรต เยื่อกระดาษที่ได้เมื่อนำไปฟอกขาวแล้วจะเหมาะสำหรับทำกระดาษพิมพ์เขียน กระดาษจดหมายและกระดาษที่ต้องการความนุ่ม

สำหรับสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการแบบโซดามีองค์ประกอบหลักคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งโซเดียมคาร์บอเนตที่ใช้ในกระบวนการนี้มาจากการทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคาร์บอเนต ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงในสมการ



โดยพบว่าที่จุดสมดุลจะเกิดปฏิกิริยาไปทางขวาเพราะความสามารถในการละลายของแคลเซียมคาร์บอเนตต่ำ อย่างไรก็ตามปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีข้อจำกัดในเรื่องความสามารถของการละลายและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะไม่สมบูรณ์ ซึ่งพบว่าร้อยละ 80-85 ของโซเดียมจะอยู่ในรูปโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนอีกร้อยละ 15-20 จะเกิดในรูปคาร์บอเนต

- กระบวนการแบบคราฟท์

กระบวนการแบบคราฟท์ (Kraft process) หรือเรียกว่า กระบวนการแบบซัลเฟต (Sulphate process) เป็นกระบวนการที่พัฒนาต่อมาจากกระบวนการโซดาโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ เยื่อที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีความแข็งแรงกว่าเยื่อที่ได้จากกระบวนการแบบโซดา เยื่อที่ได้ชนิดไม่ฟอกสีนิยมใช้ทำถุงกระดาษ กระดาษห่อของ และกระดาษเคลือบผิวกล่อง ส่วนเยื่อชนิดฟอกขาวนิยมใช้ทำกระดาษพิมพ์เขียน กระดาษหนังสือคุณภาพดี

### 2.1.5 การผลิตกระดาษ

ขั้นตอนนี้จะป็นขั้นตอนที่เยื่อถูกส่งเข้าเครื่องจักรผลิตกระดาษเพื่อทำเป็นแผ่นกระดาษที่ยาวต่อเนื่องกัน เรียกว่า เว็บบเปเปอร์ (Web paper) เครื่องจักรที่ใช้ผลิตกระดาษมีหลายแบบส่วนใหญ่เป็นแบบโฟร์ดรีนียร์ (Fourdrinier) และแบบทรงกระบอก (Cylinder) เครื่องจักรผลิตกระดาษทุกแบบจะมีส่วนประกอบต่างๆ เพื่อทำหน้าที่หลัก 3 ประการ คือ

- การแยกน้ำ (Draining) โดยองค์ประกอบนี้มีลักษณะเป็นตะแกรงรองรับน้ำเยื่อ น้ำจะลอดผ่านตะแกรง ทำให้เยื่อก่อตัวเป็นแผ่นเปียก
- การรีดน้ำ (Dressing) โดยจะกดหรือบีบน้ำออกจากแผ่นเปียก ทำให้เกิดการยึดติดแน่นระหว่างเส้นใยภายในกระดาษ การอบกระดาษ (Drying) แผ่นกระดาษจะถูกอบให้แห้งเพื่อไล่น้ำออกจนกระดาษแห้งเหลือความชื้นประมาณร้อยละ 4-6

## 2.2 มลพิษจากกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ

การผลิตเยื่อและกระดาษเป็นกระบวนการที่มีการใช้น้ำและสารเคมีเป็นจำนวนมาก ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำ ทางเสียง ทางอากาศ และกากของเสีย การปล่อยสารมลพิษในการผลิตเยื่อและกระดาษขึ้นอยู่กับกระบวนการและมาตรฐานในการผลิต ทุกขั้นตอนของการผลิตเยื่อและกระดาษจะมีสารอินทรีย์ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ซึ่งเกิดขึ้นจากเส้นใยของวัตถุดิบ สารอินทรีย์จะมีผลต่อความต้องการออกซิเจนในการย่อยสลายของแหล่งน้ำที่รองรับ ซึ่งผลกระทบต่อ

สิ่งแวดล้อมจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะของแหล่งน้ำ สารมลพิษที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ดังนี้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

- สารที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก

สารที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากสามารถวัดได้ในรูปของค่าบีโอดี ส่วนใหญ่ที่พบคือส่วนประกอบของไม้ที่ละลายน้ำได้ หรือส่วนประกอบที่เกิดจากกระบวนการทำเยื่อและการฟอก เช่น เฮมิเซลลูโลสที่มีโมเลกุลเล็ก เมทานอล กรดแอซิดิก และกรดฟอร์มิก ในการย่อยสลายสารเหล่านี้ต้องใช้ออกซิเจนที่ละลายน้ำ (Dissolve oxygen) ซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนละลายในแหล่งน้ำลดลงและอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำได้ ส่วนสารที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างช้าๆ ในน้ำทิ้งจากโรงงาน ส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารลิกนินและคาร์โบไฮเดรต ปริมาณสารเหล่านี้จะวัดอยู่ในรูปของอัตราส่วนระหว่างค่าบีโอดีต่อค่าซีโอดี อัตราส่วนที่ต่ำแสดงถึงปริมาณสารที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ช้ามีปริมาณสูง สารประกอบเหล่านี้ส่วนใหญ่จะมีสีและลดการส่องผ่านของแสง จึงลดกิจกรรมทางชีววิทยาของสิ่งมีชีวิตในน้ำ

- สารประกอบที่มีสี

สีของน้ำเสียเกิดจากสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ได้แก่ ลิกนินที่ออกมาจากวัตถุดิบโดยการต้มและการฟอกเยื่อด้วยวิธีทางเคมี ผลกระทบของสีคือความสามารถในการส่องผ่านของแสงในแหล่งน้ำลดลง ทำให้ลดผลผลิตทางชีวภาพในแหล่งน้ำ ซึ่งจะส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในแหล่งน้ำด้วย แหล่งน้ำเสียที่มีลิกนินเจือปนอยู่ได้แก่

- น้ำทิ้งจากการย่อยเยื่อและล้างเยื่อ (Digester and water) น้ำทิ้งชนิดนี้จะเรียกว่า น้ำดำ (Black liquor) เพราะว่ามีลักษณะสีดำคล้ำหรือมีสีน้ำตาลเข้มมากซึ่งเกิดจากกลุ่มอะมอฟอริก (Amorphoric group) ของลิกนิน

- น้ำขาว (White water) เกิดขึ้นจากการแยกเยื่อ และการทำเยื่อให้ข้น (Screening , cleaning and thickening) น้ำจากแหล่งนี้มีปริมาณมาก ในกระบวนการผลิตเยื่อแบบคราฟท์ น้ำทิ้งส่วนใหญ่เป็นส่วนใหญ่ที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ นอกจากนี้ยังประกอบด้วยสารแขวนลอยซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกเส้นใย

- น้ำทิ้งจากเครื่องล้างเยื่อในระบบฟอกเยื่อ (Bleach plant washer) น้ำทิ้งจากการฟอกเยื่อจะมีปริมาณสารอินทรีย์ประเภท สารประกอบคลอรีเนตแอโรแมติก (Chlorinated aromatic) อยู่มาก ซึ่งแหล่งที่ก่อให้เกิดสารอินทรีย์เหล่านี้ส่วนใหญ่มาจากขั้นตอนคลอรีเนชัน (Chlorination) และการ

สกัดด้วยสารแอลคาไลน์ (Alkaline extraction) น้ำที่จางจากขั้นตอนทั้งสองนี้จะมีค่าซีไอดี บีไอดี และความเข้มข้นของสีสูงมาก

- สารที่เป็นพิษ

สารประกอบที่มีพิษ (Toxic material) จากการปล่อยน้ำเสียออกจากโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ คือสารประกอบที่มาจากฟอกเยื่อ ได้แก่ สารประกอบประเภทคลอรีน เช่น พอลิคลอริเนตฟีโนล (Polychlorinated phenols) และ ไดออกซิน (Dioxin) ซึ่งเป็นสารชนิดหนึ่งที่มีผลข้างเคียงอันตรายที่สุด เนื่องจากการใช้สารดังกล่าวก่อให้เกิดสารประกอบพอลิคลอริเนต (Polychlorinated) ซึ่งมีความเป็นพิษและสามารถตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้หลายปี ทำให้เกิดการสะสมในสิ่งมีชีวิตและก่อให้เกิดการเป็นมะเร็งได้

- เกลืออนินทรีย์

เกลืออนินทรีย์ (Inorganic salt) ที่ละลายน้ำได้ในน้ำทิ้งส่วนใหญ่มาจากกระบวนการต้มเยื่อและฟอกเยื่อ คือเกลือที่ประกอบไปด้วยไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ซึ่งไม่ค่อยมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากนัก แต่จะเป็นเหมือนปุ๋ยในแหล่งน้ำซึ่งอาจทำให้เกิดการเจริญเติบโตที่มากเกินไปของพืชน้ำในแหล่งน้ำนั้น

- ของแข็งในน้ำทิ้ง

ของแข็งในน้ำทิ้งประกอบไปด้วยเส้นใยต่างๆ เปลือกไม้ เศษไม้ และเกลืออนินทรีย์เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้จะวัดอยู่ในรูปสารแขวนลอย (Suspended solid)

ตารางที่ 2.1 แสดงมลพิษในน้ำเสียที่เกิดขึ้นในขั้นตอนต่างๆ ของกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษแบบคราฟท์ พบว่าเกือบทุกขั้นตอนการผลิตจะมีการปลดปล่อยน้ำเสียออกมา

## 2.3 ลักษณะและองค์ประกอบเคมีของน้ำดำ

น้ำดำ คือน้ำทิ้งจากกระบวนการทางเคมีของการต้มเยื่อกระดาษซึ่งมีสีดำ องค์ประกอบของน้ำดำจะเปลี่ยนแปลงไปตามวัตถุดิบที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเยื่อกระดาษ และกรรมวิธีที่ใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษ แต่โดยเฉลี่ยแล้วน้ำดำจากทุกกระบวนการทางเคมีในการต้มเยื่อจะมีสมบัติโดยทั่วไปดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 มลภาวะทางน้ำที่เกิดจากกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษแบบกราฟท์

ขั้นตอน	มลพิษที่เกิดขึ้น
การเตรียมวัตถุดิบ	เศษดิน เปลือกไม้ และน้ำเสียที่มีค่าบีโอดีและของแข็งแขวนลอยสูง
การต้มเยื่อ	น้ำเสียที่เรียกว่า น้ำดำ ประกอบด้วยสารเคมี ลิกนิน เรซิน กรด ไซมันน์ สี และสารจำพวกที่ระเหยได้ เช่น แอลกอฮอล์ ฟีนอล แอซิโตน เมทานอล เป็นต้น
การล้างเยื่อ	น้ำเสียที่มีความเป็นกรด-เบส สารเคมี ของแข็งแขวนลอย และสีในปริมาณสูง
การฟอกเยื่อ	น้ำเสียที่มีส่วนประกอบของลิกนิน คาร์โบไฮเดรต สี สารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ของคลอรีน สารระเหยได้ เช่น แอซิโตน เมทิลคลอไรด์ คาร์บอนไดซัลไฟด์ คลอโรฟอร์ม เป็นต้น
การผลิตกระดาษ	น้ำเสียที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ สี สารเคมี แอซิโตนและเศษเยื่อ

ตารางที่ 2.2 สมบัติโดยทั่วไปของน้ำดำ (Britt, 1970 และ Sangita, Siddhartha และ Chiranjib, 2006)

สมบัติหรือส่วนประกอบ	ปริมาณ
ความเป็นกรด-เบส	8
ค่าบีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	6,600
ค่าซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	16,800
ของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	12,340
ลิกนิน (ร้อยละ)	12-20
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (ร้อยละ)	2.44
โซเดียมคาร์บอเนต (ร้อยละ)	2.76
อื่นๆ (ร้อยละ)	74.80

ในการผลิตเยื่อแบบกราฟท์ น้ำดำที่ได้ออกมาบางส่วนจะถูกส่งไปผสมกับน้ำยาที่ใช้ในการต้มเยื่อเพื่อให้ น้ำยาต้มเยื่อมีปริมาณมากพอสำหรับต้มเยื่อ น้ำดำส่วนที่เหลือจะถูกนำเข้ากระบวนการนำสารเคมีกลับคืน ซึ่งจะเริ่มต้นจากหน่วยทำให้ระเหยเพื่อทำให้น้ำดำมีความเข้มข้นมากขึ้น จากนั้นจึงป้อนน้ำดำเข้มข้นเข้าสู่หม้อนำสารกลับคืน สารอินทรีย์ในน้ำดำเข้มข้นจะติดไฟและให้พลังงานความร้อนออกมา สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่เหลือจะละลายเป็นของเหลวไหลลงสู่ด้านล่างของหม้อนำสารกลับคืน ผสมกับน้ำดำเจือจางในสารละลายกลายเป็นของเหลวสีเขียว ซึ่งจะถูกส่งไปยังถังตกตะกอนเพื่อแยกสิ่งเจือปนที่เป็นของแข็งออก แล้วถูกส่งไปยังหน่วยทำด่าง (Alkaline pulping) เพื่อทำปฏิกิริยากับปูนขาวกลายเป็นน้ำยากลับเข้าสู่การผลิตเยื่อต่อไป พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผา น้ำดำเข้มข้น ในหม้อนำสารเคมีกลับคืนจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของไอน้ำและนำไปใช้ในหน่วยระเหย (Evaporation unit) ต่อไป

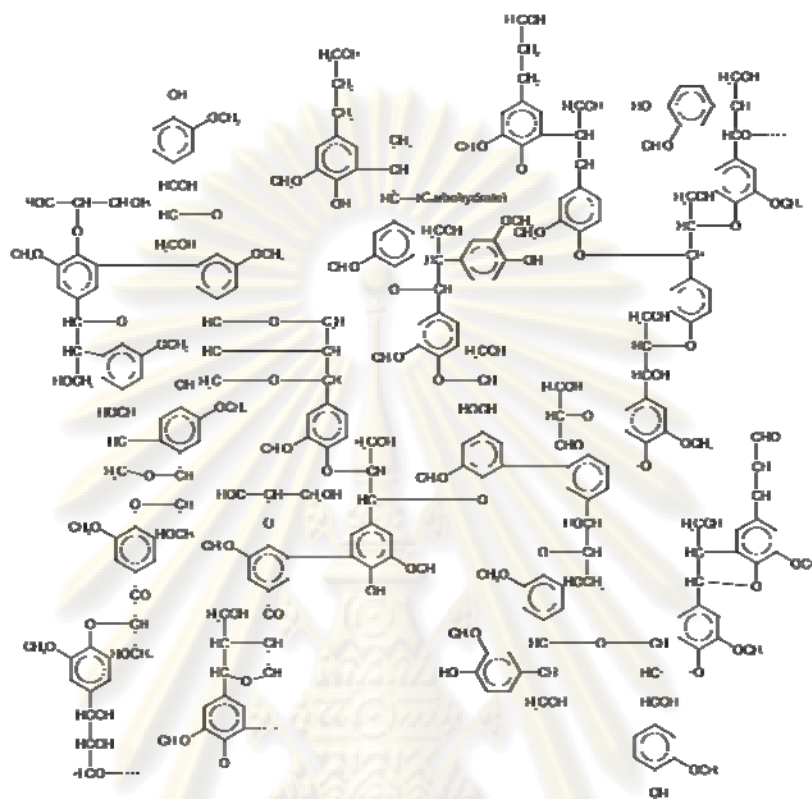
## 2.4 ลิกนิน (Lignin )

สารลิกนินเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในเนื้อไม้ พบมากในผนังเซลล์ของพืชที่มีระบบลำเลียงจริง โดยทั่วไปในเนื้อไม้จะประกอบไปด้วยเซลลูโลสร้อยละ 30-40 ลิกนินร้อยละ 18-30 และเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 30 โดยลิกนินจะรวมกันอยู่อย่างหนาแน่นทั้งภายในและภายนอกของเส้นใยและยังทำหน้าที่เป็นตัวให้พอลิเมอร์ที่เป็นเทอร์โมพลาสติกโดยธรรมชาติ ซึ่งจะทำให้โครงสร้างของเนื้อไม้มีความแข็งแรง โครงสร้างของลิกนินประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจนรวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิดซึ่งเป็นสารแอโรแมติกมีสมบัติไม่ละลายน้ำและมีโครงสร้างที่ไม่ยืดหยุ่น (ภาพที่2.2) และส่วนใหญ่จะพบว่าลิกนินมีโมเลกุลเป็นวงแหวนซึ่งประกอบด้วยหน่วยฟีนีลโพรเพน (Phenylpropane unit) และไม่มีโครงสร้างโมเลกุลที่แน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การรวมตัวของหน่วยฟีนีลโพรเพน แสดงดังภาพที่2.3 โดยหน่วยฟีนีลโพรเพนมีสมบัติคือไม่ละลายน้ำ และมีความสามารถในการดูดซึมสูง

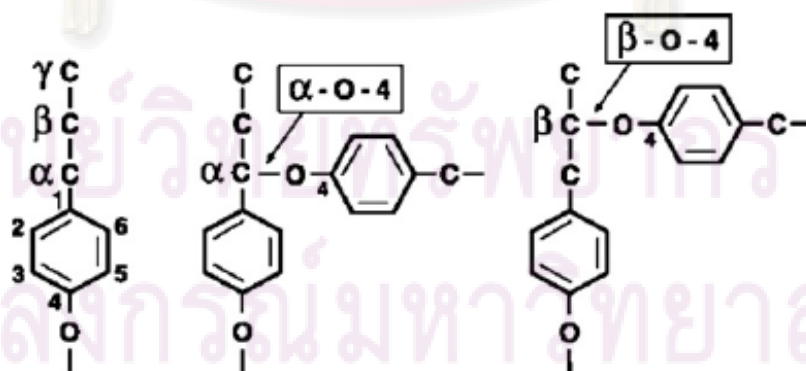
### 2.4.1 สมบัติโดยทั่วไปของลิกนิน

ลิกนินที่แยกได้จากการทดลองและลิกนินในเชิงพาณิชย์มีลักษณะเป็นของแข็งชิ้นเล็กๆ โดยปกติเป็นผงสีขาวตาล ไม่ละลายน้ำ มีความหนาแน่น 1.3-1.4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และดัชนีการหักเหของแสง (Refractive index) เท่ากับ 1.6 โดยทั่วไปใช้สมบัติของลิกนินที่ไม่ละลายในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 72 จะใช้เป็นตัวบอกความแตกต่างระหว่างลิกนิน เซลลูโลสและคาร์โบไฮเดรตอื่นๆ ในไม้ ลิกนินส่วนมากละลายในสารละลายเบสบางชนิดละลายใน Oxygenated organic compound และเอมีน (amine) (วิชา พืชพรรณฯ, 2545)





ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของลิกนิน (Hammel, 1995)



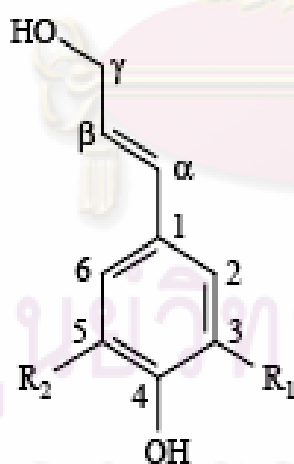
ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของหน่วยฟีนิวโพรเพนในลิกนิน (Shirkolaee และคณะ, 2008)

ตารางที่ 2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของลิกนินในไม้ (วิชา พืชพรรณรงค์, 2545)

ชนิด	องค์ประกอบของลิกนินในไม้ (ร้อยละ)			
	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ออกซิเจน	เมทอกซี (OCH <sub>3</sub> )
ไม้สน	63.8	6.3	29.9	15.8
ไม้ผลัดใบ	59.8	6.4	33.7	21.4

สารประกอบลิกนินสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มหลัก ซึ่งแสดงในภาพที่ 2.4 โดยพิจารณาจากลำดับส่วนของสารตั้งต้น (Precursors) ได้แก่

- ลิกนินจากไม้เนื้อแข็ง มีสารตั้งต้นเป็น Coniferyl alcohol ประมาณร้อยละ 50-70 และ Sinapyl alcohol ประมาณร้อยละ 20-25
- ลิกนินจากไม้เนื้ออ่อนมีสารตั้งต้นเป็น Coniferyl alcohol เพียงอย่างเดียว โดยพบว่าในไม้เนื้ออ่อนจะมีปริมาณลิกนินอยู่ประมาณร้อยละ 20-29 แสดงดังตารางที่ 2.4
- ลิกนินจากพืชล้มลุกมีสารตั้งต้นเป็น Coniferyl alcohol, Sinapyl alcohol และ Coumaryl alcohol ซึ่ง Coumaryl alcohol นี้ให้ *p*-hydroxyphenyl unit ในโครงสร้างของพอลิเมอร์



Coniferyl alcohol/guaiacyl: R<sub>1</sub>=OMe, R<sub>2</sub>=H

Sinapyl alcohol/syringyl: R<sub>1</sub>=R<sub>2</sub>=OMe

*p*Coumaryl alcohol: R<sub>1</sub>=R<sub>2</sub>=H

ภาพที่ 2.4 สารตั้งต้นของโครงสร้างลิกนิน (Chakar and Ragauskas, 2004)

ตารางที่ 2.4 ปริมาณลิกนินที่พบในไม้ประเภทต่างๆ (วิชา พืชพรรณศาสตร์, 2545)

ไม้เนื้ออ่อน	ปริมาณลิกนิน (ร้อยละ)
Douglas fir	27.2
Noble fir	29.3
Engelmann	26.3
Jack pine	26.7
Slash pine	28.0
Western hemlock	27.8
Beech	21.0
Trembling aspen	19.3
White birch	20.0
Yellow birch	22.7
Chestnut oak	24.3
Red maple	22.8

ถึงแม้ว่าแหล่งของลิกนินมีอยู่มากในธรรมชาติแต่ในบางแหล่งยังไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์ เช่น ไม้และเปลือกไม้จากอุตสาหกรรมโรงเลื่อย ไม้ที่เหลือจากการทำเกษตรกรรมและเศษเชื้อไม้จากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ

#### 2.4.2 ประโยชน์ของลิกนิน

ในทางการค้า ลิกนินจะอยู่ในรูปต่าง ๆ กัน แต่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้คล้ายคลึงกัน เช่น ใช้ผสมกับหินเพื่อลดฝุ่นที่ฟุ้งกระจาย ใช้เป็นสารช่วยในการเกาะติดโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการซ่อมผิวหน้าของถนนลาดยางมะตอย ใช้ผสมกับดินทรายในอุตสาหกรรมการหล่อ เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรง ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตผงคาร์บอน (Carbon black) เครื่องเซรามิกส์ สีย้อมต่างๆ เม็ดสี ยาฆ่าวัชพืช และยาฆ่าแมลง ใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงในยางที่ต้องการให้มีน้ำหนักเบา ใช้ผลิตแทนนิน (Tannin) เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมฟอกหนัง ใช้ในการกำจัดไขมันที่ลอยอยู่บนผิวหน้าของน้ำ ใช้ในการกำจัดเกลือในน้ำที่ทำให้เกิดความกระด้าง ใช้เป็นสารที่ทำให้เกิดรูพรุนในแผ่นยิปซัม (บุญรัชต์ กิตยานันท์ และวินทร์ พลานันท์กุลธร, 2535) ลิกนินสามารถตกตะกอนร่วมกับโปรตีน ด้วยคุณสมบัติขี้ลิกนินจึงถูกใช้สำหรับทำน้ำให้บริสุทธิ์ นอกจากนี้ลิกนินยังใช้ในการ

สังเคราะห์สารเคมีต่างๆ เช่น วานิลลิน (Vanillin) และสารประกอบฟีนอล เป็นต้นในปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการนำลิกนินไปใช้ประโยชน์อีกมากมาย เช่น ได้มีการศึกษาการนำลิกนินใช้ในการลดความเป็นพิษของอะลูมิเนียม (Al) ที่มีมากเกินไปในดินและน้ำ (Katsumata, Marruyama และ Meshitsuka, 2001)

## 2.5 วิธีการจัดการน้ำเสียในอุตสาหกรรม (เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์, 2542)

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมมักประกอบด้วยสิ่งเจือปนหรือความสกปรกหลายชนิดขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา ประเภทของโรงงาน วัตถุประสงค์ ตลอดจนกระบวนการผลิตที่ใช้ ซึ่งในอุตสาหกรรมการผลิตเชื้อและกระดาษพบว่าน้ำเสียที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นสีดำคล้ำ มีค่าซีโอดีสูง นอกจากนี้ยังมีเศษตะกอนที่เกิดจากกระบวนการผลิต มีสารอินทรีย์ในรูปของสารแขวนลอยและสารอนินทรีย์ปะปนอยู่ โดยวิธีการจัดการน้ำเสียจากอุตสาหกรรมประเภทนี้นิยมใช้กันอยู่ 2 วิธี คือ

### 2.5.1 กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ

การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ (Biological treatment process) มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ คือ บีโอดีและซีโอดีเป็นหลัก นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดสารอนินทรีย์บางชนิด เช่น ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ออกจากน้ำเสีย โดยอาศัยจุลินทรีย์ซึ่งมีอยู่ในธรรมชาติจะเปลี่ยนเป็นสารอินทรีย์หรือสิ่งสกปรกให้อยู่ในรูปของแก๊สและของแข็ง (เซลล์ใหม่ของจุลินทรีย์) เพื่อแยกแ่กการแยกออกจากน้ำเสียโดยกระบวนการทางกายภาพในขั้นต่อไป ทำให้ปริมาณสารอินทรีย์หรือความสกปรกในน้ำลดลงหรือหมดไป ปัจจุบันพบว่ากระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีววิทยา ซึ่งจะได้กากตะกอนน้ำเสียหรือที่เรียกว่าสลัดจ์ (Sludge) ออกมาเป็นจำนวนมากและจะต้องทำการบำบัดเสียก่อนที่จะนำไปกำจัดต่อไป โดยทั่วไปสลัดจ์ที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีววิทยาเมื่อทำการปรับสภาพแล้วก็สามารถนำมาใช้ถมที่ ปรับปรุงดิน หรือหมักทำปุ๋ยใช้ประโยชน์ได้อีก ปัจจุบันนี้สลัดจ์ได้เพิ่มปริมาณมากขึ้นตามจำนวนโรงงานอุตสาหกรรมจึงได้มีการหาทางเลือกใหม่ในการใช้ประโยชน์จากสลัดจ์ให้ได้มากที่สุด คือเมื่อผ่านการปรับปรุงคุณภาพให้เหมาะสมแล้วสามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งได้ สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานในกระบวนการผลิตของโรงงานได้อีก เพื่อทดแทนพลังงานชนิดอื่นๆ เช่น น้ำมัน ถ่านหิน นอกจากจะเป็นการลดต้นทุนแล้วยังสามารถที่จะลดปริมาณซัลเฟอร์ที่จะปล่อยออกสู่บรรยากาศได้อีกทางหนึ่ง

## 2.5.2 กระบวนการบำบัดทางเคมี

การบำบัดด้วยวิธีทางเคมี (Chemical treatment process) เป็นการใส่สารเคมีหรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเพื่อบำบัดน้ำเสีย โดยมีวัตถุประสงค์

- เพื่อรวมตะกอนหรือของแข็งแขวนลอยขนาดเล็กในน้ำเสียให้มีขนาดโตพอที่จะตกตะกอนได้ง่าย ซึ่งเรียกตะกอนดังกล่าวว่า ฟล็อก (Floc) โดยกระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการรวมตะกอน (Coagulation process)

- เพื่อให้ของแข็งที่ละลายในน้ำเสียให้กลายเป็นตะกอน หรือทำให้ไม่สามารถละลายน้ำได้ เรียกกระบวนการดังกล่าวว่า การตกตะกอน (Precipitation)

- เพื่อทำการปรับสภาพน้ำเสียให้มีความเหมาะสมที่จะนำไปบำบัดด้วยกระบวนการอื่นต่อไป เช่น การทำให้น้ำเสียมีความเป็นกลางก่อนแล้วนำไปบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพ เป็นต้น

- เพื่อทำลายเชื้อโรคในน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ หรือก่อนที่จะบำบัดด้วยวิธีการอื่น ๆ ต่อไป

โดยทั่วไปแล้วการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมีนี้มักจะทำร่วมกันกับหน่วยบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ ตัวอย่างเช่น กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมีโดยการใช้สารเคมีเพื่อทำให้ตกตะกอน เป็นต้น ในปัจจุบันนี้มีการใช้หน่วยบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมีหลายอย่างด้วยกัน แต่ที่ส่วนใหญ่นิยมใช้กัน คือ การตกตะกอนโดยใช้สารเคมี การทำให้เป็นกลาง และการทำลายเชื้อโรค

การตกตะกอนโดยใช้สารเคมี เป็นการใส่สารเคมีช่วยตกตะกอนโดยการเติมสารเคมีหรือสารรวมตะกอนลงไป เพื่อเปลี่ยนสถานะทางกายภาพของของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดเล็กให้รวมกันมีขนาดใหญ่ขึ้นเรียกกระบวนการดังกล่าวว่า กระบวนการจับตัวเป็นก้อน (Flocculation process)

การทำให้เป็นกลาง (Neutralization) เป็นการปรับสภาพค่าความเป็นกรด-เบสให้อยู่ในสภาพที่เป็นกลาง เพื่อให้เกิดความเหมาะสมที่จะนำไปบำบัดน้ำเสียในขั้นอื่นต่อไป โดยเฉพาะกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีวภาพซึ่งต้องการน้ำเสียที่มีค่าความเป็นกรด-เบสอยู่ในช่วง 6.5-8.5 แต่ก่อนที่จะปล่อยน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดดีแล้วลงสู่ธรรมชาติ ต้องปรับสภาพค่าความเป็นกรด-เบสอยู่ในช่วง 5-9 ถ้าค่าความเป็นกรด-เบสต่ำจะต้องปรับสภาพด้วยด่าง ด่างที่นิยมนำมาใช้คือ โซดาไฟ ปูนขาว หรือ แอมโมเนีย เป็นต้น และถ้าน้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-เบสสูงต้องทำการปรับสภาพค่าความเป็นกรด-เบสให้เป็นกลางโดยใช้กรด กรดที่นิยมนำมาใช้ ได้แก่ กรดกำมะถัน กรดเกลือ หรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

การทำลายเชื้อโรค (Disinfection) การทำลายเชื้อโรคในน้ำเสียเป็นการทำลายจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคโดยใช้เคมีหรือสารอื่น ๆ โดยมีวัตถุประสงค์คือ เพื่อป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อโรคมายังคนและเพื่อทำลายห่วงโซ่ของเชื้อโรคและการติดเชื้อมาก่อนที่จะถูกปล่อยลงแหล่งน้ำ

ธรรมชาติ ซึ่งสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรค ได้แก่ คลอรีน และสารประกอบคลอรีน โบรมีน ไอโอดีน โอโซน ฟีนอลและสารประกอบของฟีนอล แอลกอฮอล์ เป็นต้น ซึ่งคลอรีนเป็นสารเคมีที่นิยมใช้มาก

## 2.6 กระบวนการที่ใช้กำจัดสี (จิรภรณ์ อารยเมธาเลิศ, 2542)

### ● การตกตะกอนด้วยสารเคมี

การรวมตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical coagulation) เป็นกระบวนการที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมักใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรด-เบส และสามารถใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้นโดยนิยมใช้ปูนขาว สารส้ม เพอร์รัสคลอไรด์ หรือเพอร์รัสซัลเฟต เป็นต้น การกำจัดสีโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้ม เป็นผลจากการทำให้โมเลกุลของสีถูกดูดซับบนอนุภาคของสารส้ม ทำให้เกิดตะกอนของสีจมตัวลงในน้ำทิ้ง จากนั้นทำให้น้ำทิ้งเป็นกลางก่อนปล่อยลงท่อน้ำทิ้ง เทคนิคนี้สามารถกำจัดสีออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากน้ำทิ้งจะมีลักษณะแตกต่างไปตามชนิดของโมเลกุลสีย้อม ถ้าสีย้อมมีโมเลกุลเล็ก เช่น สีประเภทสีแอซิด สีรีแอคทีฟ การเกิดตะกอนของสีโดยใช้สารส้มจะไม่สามารถทำได้ ดังนั้นต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการตกตะกอนให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอนเช่น พอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) ซึ่งต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากความเข้มข้นของพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งหากมีปริมาณมากจะส่งผลเสียต่อกระบวนการไนตริฟิเคชันในน้ำทิ้ง ซึ่งเป็นกระบวนการออกซิไดซ์แอมโมเนียที่มีความเป็นพิษสูงให้กลายเป็นไนเตรทและไนเตรท

### ● กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา

กระบวนการนี้อาศัยจุลินทรีย์ในการลดสีโดยจุลินทรีย์ที่เติบโตขึ้นมาใหม่จะมีการดูดซับสีไปด้วยทำให้สามารถบำบัดสีได้ แบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ

- ระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ (Activated sludge) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาซึ่งอาศัยจุลินทรีย์ในการทำลาย กิน ดูดซับ หรือเปลี่ยนแปลงของมวลสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสีย ให้มีค่าความสกปรกลดลง

- ระบบที่ 2 คือระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated lagoon) ดัดแปลงจากการบำบัดน้ำเสียแบบที่มีอากาศและไม่มีอากาศรวมกัน โดยเพิ่มเครื่องเติมอากาศที่ผิวน้ำ ระบบนี้คล้ายกับระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ต่างกันเพียงบ่อนี้จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ขุดจากพื้นดินโดยตรง คุณภาพของน้ำเมื่อผ่านกระบวนการนี้จะมีค่าบีโอดี ลดลงประมาณร้อยละ 30-50

- **การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์**

การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นกระบวนการดูดซับที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย สามารถใช้กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัดที่น้ำหนักโมเลกุลของของเสียที่จะถูกดูดซับ ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 400 ซึ่งโดยทั่วไปน้ำหนักโมเลกุลของของเสียในอุตสาหกรรมสีจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 400 และสูงกว่า 1200 ดังนั้นก่อนการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์จะต้องมีการปรับขนาดโมเลกุลของของเสียให้เหมาะสมก่อน โดยการไฮโดรไลซิสด้วยปูนขาว ซึ่งต้องใช้ปูนขาวปริมาณมากในการปรับค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายให้อยู่ในช่วง 10-11 ซึ่งส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสูง ดังนั้นก่อนปล่อยน้ำเสีกลงสู่สิ่งแวดล้อมจะต้องมีการปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้เป็นกลางเสียก่อน กระบวนการดูดซับสีบนถ่านกัมมันต์เป็นกระบวนการ ที่ทำให้โมเลกุลของสีดูดติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นประสิทธิภาพการดูดซับสีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์เพราะพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้นนั่นเอง แต่การทำให้โมเลกุลของสีหลุดออกจากผิวของถ่านนั้นทำได้ยาก ต้นทุนการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่จึงสูงมาก เพราะต้องผ่านการเผาและการกำจัดกากซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง รวมถึงค่าใช้จ่ายในส่วนที่มีการปรับค่าความเป็นกรด-เบสก่อนปล่อยออกจากโรงงานด้วย ทำให้เทคนิคนี้ไม่เป็นที่นิยมแม้จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงก็ตาม

- **การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน**

โดยทั่วไปโมเลกุลสีจะมีหมู่โครโมฟอร์ (Chromophore) ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์จำพวกวงแหวนกับพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยว ดังนั้นการที่จะทำลายโมเลกุลของสีนั้นจะต้องทำลายหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยวก่อนซึ่งการบำบัดทางชีววิทยาไม่สามารถทำได้จะเห็นได้ว่ากระบวนการกำจัดสีโดยใช้โอโซนเป็นเทคนิคที่นำมาใช้ไม่นานนัก ซึ่งอาจได้รับความนิยมเมื่อมาตรฐานการปล่อยน้ำทิ้งเข้มงวดขึ้น การโอโซนชัน (Ozonation) เป็นการออกซิไดซ์พันธะคู่ที่เป็นพันธะเคมีของหมู่โครโมฟอร์ของโมเลกุลด้วยโอโซน แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมากจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำทิ้งอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โมเลกุลของสีย้อมซึ่งส่วนใหญ่มักประกอบด้วยไนโตรเจนคลอรีน หรือซัลเฟอร์จะเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ ที่อาจเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารเริ่มต้นเดิม

- **เทคโนโลยีเยื่อแผ่น**

กระบวนการกำจัดสีด้วยเยื่อแผ่น (Membrane) สามารถใช้ในการกำจัดสีน้ำเอาสารเคมีที่ใช้ในการย้อมสีและสีย้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ แบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังนี้

- **ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration)** ใช้ในการกำจัดสิ่งขุ่นที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (Colloid) ที่ถูกปล่อยออกจากหม้อต้มหลังจากผ่านการล้าง โดยใช้กำจัดสิ่งประเภทดีสเพอร์สที่ใช้ขุ่นเส้นใยประเภทพอลิเอสเทอร์และสิ่งขุ่นประเภทซีลเฟอร์ สิวาต และสิ่งขุ่นที่ขุ่นเส้นใยฝ้ายและวิสคอส (Viscose) สิ่งขุ่นดีสเพอร์สเมื่อผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชันแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

- **ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis)** เหมาะสำหรับการใช้กำจัดไอออนของสิ่งขุ่นและโมเลกุลของสิ่งขุ่นที่มีขนาดใหญ่ เป็นกระบวนการที่จะต้องผ่านเยื่อแผ่น 2 ชั้นตอน คือเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อยและเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำทะเล ซึ่งเยื่อแผ่นชนิดแรกจะสามารถกำจัดสิ่งได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสิ่งที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปยังเยื่อแผ่นที่สองและสามารถกำจัดสิ่งได้ถึงร้อยละ 94 วิธีนี้ไม่สามารถใช้ในการกำจัดสิ่งขุ่นที่ใช้ขุ่นเส้นใยประเภทฝ้ายได้

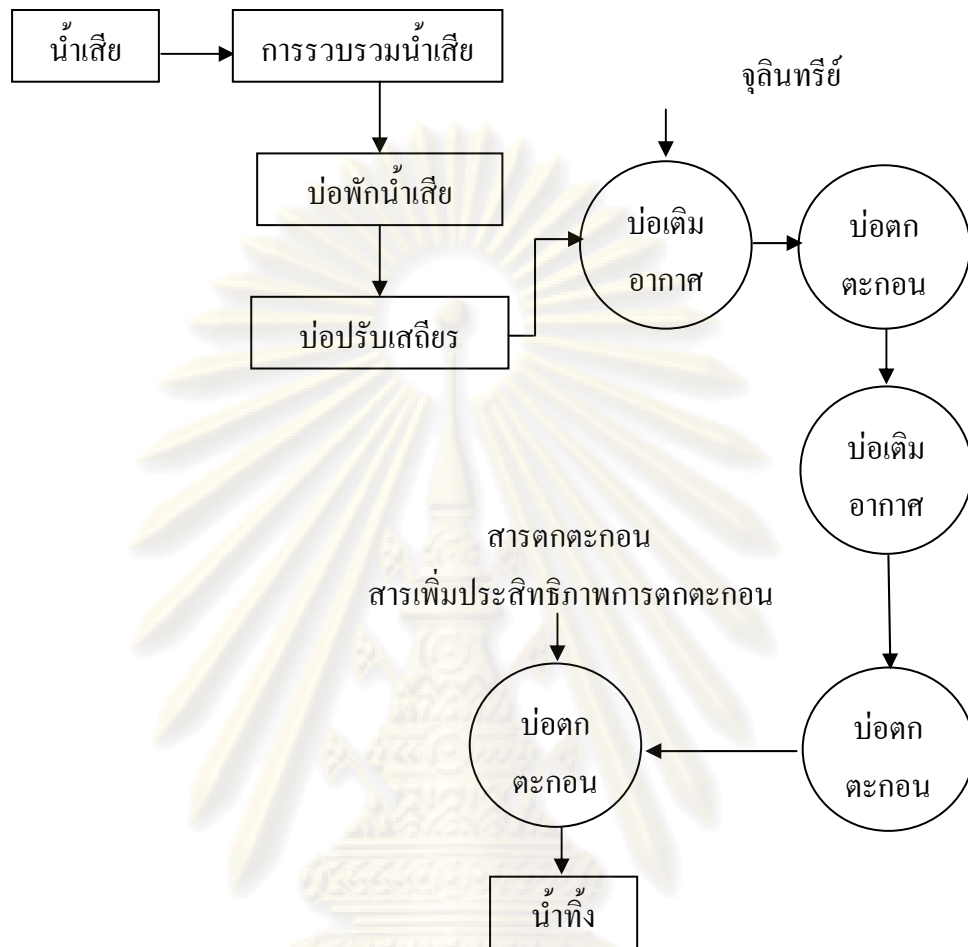
- **ไดนามิก เมมเบรน (Dynamic membrane)** ใช้กำจัดสิ่งขุ่นที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่โดยใช้ตัวรองรับที่มีรูพรุน เช่นเหล็ก แสตนเลส วัสดุคาร์บอน หรือเซรามิก ซึ่งต่อมาได้พัฒนามาใช้ Hydrous zirconium (IV) oxide และกรดพอลิอะคริลิก (Zr/PAA) เพื่อปรับปรุงขนาดของรูพรุน กระบวนการนี้สามารถกำจัดสิ่งได้ถึงร้อยละ 95 หรือมากกว่า

## 2.7 กระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานเยื่อและกระดาษในประเทศไทย

ระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษโดยทั่วไปนิยมใช้กระบวนการแอกทิเวตเต็ดสลัดจ์ (Activated sludge process) ซึ่งแสดงดังรูป 2.5 โดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียจะเริ่มจากการรวบรวมน้ำเสียทั้งหมดลงสู่รางน้ำ ส่งไปยังบ่อพักน้ำเสียที่มีการตกตะกอนขั้นต้น น้ำใสส่วนบนจะถูกนำเข้าสู่บ่อปรับความเสถียรเพื่อปรับให้มีความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมจากนั้นจะถูกส่งไปยังบ่อเติมอากาศขั้นที่ 1 ที่มีการใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ น้ำใสส่วนบนจะเข้าสู่ถังคอนกรีตกลมเพื่อตกตะกอนครั้งที่สอง แล้วจะเข้าสู่บ่อเติมอากาศขั้นที่ 2 ที่มีการใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ น้ำใสส่วนบนจะเข้าสู่ถังคอนกรีตกลมเพื่อตกตะกอนครั้งที่สาม จากนั้นจะเข้าสู่บ่อตกตะกอนที่มีการเติมสารช่วยในการตกตะกอน ได้แก่ สารตกตะกอนและสารเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอน เพื่อเป็นการรวมตะกอนให้มีขนาดใหญ่ แล้วน้ำใสจะถูกสูบออกลงสู่รางระบายน้ำ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวตเต็ดสลัดจ์นี้มีประสิทธิภาพดีในการลดค่าบีโอดี ค่าซีโอดี แต่กระบวนการดังกล่าวมีประสิทธิภาพต่ำมากในการลดสีซึ่งเกิดขึ้นจากสารจำพวกกลีโกลิน ส่งผลให้ต้องมีการบำบัดต่อเนื่องซึ่งจะเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและพลังงานเป็นอย่างมาก





ภาพที่ 2.5 การบำบัดน้ำเสียของกลุ่มอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษในประเทศไทย  
(สุบัญญัติ นิมรัตน์, 2548)

## 2.8 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเคมีไฟฟ้า

เคมีไฟฟ้า (Electrochemistry) เป็นศาสตร์แขนงหนึ่งของวิชาเคมีซึ่งว่าด้วยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงทางเคมี หลักการของเคมีไฟฟ้าได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาต่างๆ ของเคมีมากมาย เช่น การศึกษากลไกและจลศาสตร์ของปฏิกิริยาการสังเคราะห์สารอินทรีย์ สารอินทรีย์ด้วยกระแสไฟฟ้า และกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมีไฟฟ้า

**2.8.1 กระบวนการเคมีไฟฟ้า** เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า (Electrode) การเปลี่ยนแปลงทางเคมีนี้เกิดขึ้น โดยการอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าภายนอก กระแสไฟฟ้าจะไหล

ผ่านขั้วไฟฟ้าโดยขั้วไฟฟ้าจะทำหน้าที่เป็นตัวนำในการรับหรือส่งอิเล็กตรอน ซึ่งเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ส่วนประกอบที่สำคัญของการวิเคราะห์ด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้ามีทั้งหมด 3 ส่วนคือ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ขั้วไฟฟ้า และอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า โดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์และขั้วไฟฟ้ามักถูกเรียกเป็นเซลล์เคมีไฟฟ้า (Prentice, 1991)

### 2.8.1.1 ขั้วไฟฟ้า (Electrode)

ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าในระบบ โดยการเชื่อมต่อระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และอุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอก ขั้วไฟฟ้ามีอยู่ 3 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) หรือขั้วไฟฟ้าชี้บอก (Indicating electrode) ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary electrode) หรือขั้วไฟฟ้าร่วม (Counter electrode) และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) โดยขั้วไฟฟ้าใช้งานจะทำหน้าที่เป็นขั้วทดลองของเซลล์ ขั้วไฟฟ้าช่วยจะทำหน้าที่เป็นตัวช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอนหรือกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งาน ส่วนขั้วไฟฟ้าอ้างอิงทำหน้าที่ช่วยให้ครบวงจรของเซลล์เคมีไฟฟ้า สำหรับวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าใช้งานหรือขั้วไฟฟ้าช่วย และมักนิยมใช้ในระบบที่มีการวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้าเท่านั้น ลักษณะเฉพาะของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงคือ ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ไม่มีปฏิกิริยาตอบสนองต่อสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ ไม่แปรตามปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร และไม่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ จัดเป็นขั้วไฟฟ้าแบบนอนโพลารีซันในอุดมคติ (Ideal nonpolarization)

ในการใช้งานทั่วไป ระบบเซลล์เคมีไฟฟ้าจะต้องประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว คือ ขั้วไฟฟ้าใช้งานและขั้วไฟฟ้าช่วย ซึ่งในระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ขั้วไฟฟ้าใช้งานจะทำหน้าที่เป็นขั้วลบซึ่งมักเรียกว่าขั้วแคโทด และขั้วไฟฟ้าช่วยจะทำหน้าที่เป็นขั้วบวกซึ่งมักเรียกว่าขั้วแอโนด (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2549)

#### วัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า

1. ขั้วแอโนด วัสดุที่นำมาใช้ต้องไม่แตกตัวให้โลหะไอออน ( $M^+$ ) หรือทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับระบบ โดยขั้วไฟฟ้าที่นิยมนำมาใช้จะทำจากโลหะออกไซด์เคลือบบนผิวของไทเทเนียม เช่น  $Ti/RuO_2$
2. ขั้วแคโทด พบว่าในการบำบัดน้ำเสียจะนิยมใช้แกรไฟต์หรือคาร์บอนที่มีลักษณะเป็นเส้น (Carbon fiber) เนื่องจากมีราคาถูก

### ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า (Bard และ Faulkner, 2001)

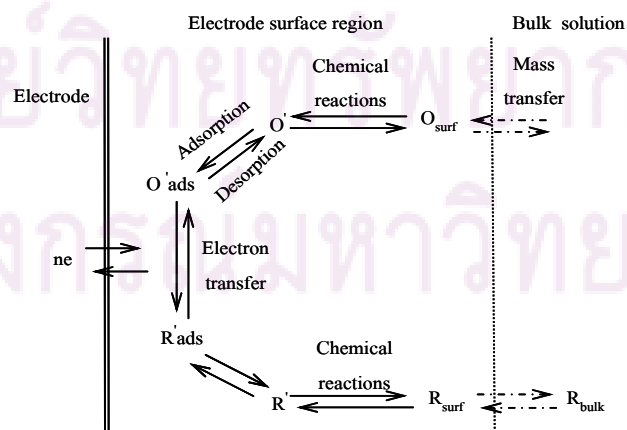
การเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าประกอบด้วยขั้นตอนที่เปลี่ยนตัวออกซิไดซ์ที่ละลายอยู่ในสารละลายให้กลายเป็นตัวรีดิวซ์ ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังนี้

1) การถ่ายโอนมวลสาร (ถ่ายโอนตัวออกซิไดซ์ในสารละลายสู่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า) การถ่ายโอนมวลสารในสารละลายประกอบด้วย 3 กลไกด้วยกันคือไมเกรชัน (Migration) การแพร่ (Diffusion) และการพา (Convection) ซึ่งสามารถอธิบายแต่ละกระบวนการดังนี้ (ภาพที่ 2.6)

- **ไมเกรชัน** เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสารละลายนั้น โดยไอออนบวกจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแคโทด และไอออนลบจะเคลื่อนที่เข้าหาแอโนด ความเร็วของการเคลื่อนที่ของไอออนเข้าหาหรือเคลื่อนที่ออกจากผิวหน้าขั้วไฟฟ้าอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความต่างศักย์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้านั้น ซึ่งมีผลให้การไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรนั้นเพิ่มขึ้นหรือลดลงไปด้วย นอกจากนี้ถ้ามีไอออนที่ประจุเท่ากันจำนวนมากอยู่รวมกันจะเกิดการแย่งการเคลื่อนที่แบบไมเกรชัน ทำให้มีการสูญเสียกระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งไปในการเคลื่อนที่ของไอออนที่ไม่ต้องการในการเกิดปฏิกิริยา

- **การแพร่** เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ จนกว่าจะไม่เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นในสารละลาย อัตราเร็วในการแพร่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น

- **การพา** เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือโมเลกุลเข้าหาหรือออกจากขั้วไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิหรือความหนาแน่นของสารละลาย โดยอาจจะเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ เช่น การถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า การเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอนและปฏิกิริยาอื่นๆ ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า เช่น ปฏิกิริยาการดูดซับ (Adsorption) ปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า



ภาพที่ 2.6 การถ่ายโอนมวลสารในสารละลาย (Bard และ Faulkner, 2001)

### 2.8.1.2 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

ทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้าโดยผ่านทางไอออนต่างๆ ที่อยู่ในสารละลาย ไอออนเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งผ่านกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ในกระบวนการเคมีไฟฟ้า สมบัติของสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยาและกระบวนการ เช่น ความเข้มข้น องค์ประกอบ ค่าความเป็นกรด-เบส และอุณหภูมิ

### 2.8.1.3 ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ( $E^0$ )

ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (Standard potential) เป็นสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเฉพาะตัวของปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ค่า  $E^0$  ได้จากการวัดค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วของเซลล์ซึ่งเกิดจากครึ่งเซลล์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้างดกล่าวกับครึ่งเซลล์มาตรฐานของไฮโดรเจนและสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีแอกทิวิตี (Activity) เป็นหนึ่ง ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ถือเป็นศักย์ขั้วไฟฟ้า (เพราะศักย์ไฟฟ้าไฮโดรเจนเป็นศูนย์โวลต์) โดยศักย์ไฟฟ้านี้คือศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า โดยลักษณะที่เฉพาะที่สำคัญของค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน มีดังนี้ (Hunsom, 2001)

- ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน คือเป็นค่าศักย์มาตรฐานสัมพัทธ์ เพราะเป็นค่าที่ได้เมื่อขั้วไฟฟ้าขั้วหนึ่งของเซลล์ต้องเป็นขั้วไฮโดรเจนเสมอ
- ตามสัญนิยมของเคมีไฟฟ้า ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้าต้องได้จากการเขียนปฏิกิริยาครึ่งเซลล์เป็นแบบรีดักชันเท่านั้น ค่าศักย์ไฟฟ้าจึงอาจถือได้ว่าเป็นศักย์รีดักชันสัมพัทธ์ (Relative reduction potential)
- ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเป็นค่าที่ไม่แปรผันตามจำนวนโมลที่ใช้ในการปรับสมดุลของสมการครึ่งเซลล์
- ค่าศักย์ไฟฟ้าจะแปรผันไปตามอุณหภูมิ ดังนั้นค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานจะวัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
- ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ จะเป็นค่าบ่งชี้ถึงความแรงของการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน คือ เมื่อศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานมีค่าสูงกว่าจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ดีกว่า

### 2.8.1.4 ศักย์ขั้วไฟฟ้า (Electrode potential, E)

ค่าศักย์ไฟฟ้าของวงจรเซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆ เป็นค่าศักย์สัมพัทธ์ ซึ่งจะนำมาหาค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้าได้ ต่อเมื่อรู้ศักย์ของขั้วไฟฟ้าอ้างอิง หรือเมื่อศักย์ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงอาจ

กำหนดเป็นคำจำกัดความของศักย์ขั้วไฟฟ้าได้ว่า คือ “ค่าศักย์ของเซลล์ที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่ต้องการรู้ค่าศักย์ทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด และขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด”

การที่ต้องมีการกำหนดหน้าที่ของขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิงไว้อย่างชัดเจนก็เพื่อให้สามารถอธิบายถึงผลของศักย์ขั้วไฟฟ้าได้ในความหมายเดียวกัน โดยสัจนิยมของการกำหนดเครื่องหมายศักย์ขั้วไฟฟ้าตาม IUPAC (The International Union of Pure and Applied Chemistry) กำหนดไว้ว่า “ในวงจรเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนกับขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์ ค่าผลลัพท์ของวงจรถือเป็นค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้านั้น โดยเครื่องหมายของศักย์ที่ได้ถ้าเป็นบวกแสดงว่าวงจรเซลล์เคมีไฟฟ้างกล่าวเป็นการต่อเซลล์แบบแกลวานิก การดำเนินไปของปฏิกิริยารีดักชันเป็นไปอย่างต่อเนื่องโดยมีขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์ทำหน้าที่เป็นแคโทด ในทางกลับกันถ้าผลลัพท์ศักย์ของวงจรเป็นลบแสดงว่าปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนแทน และขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์กลับทำหน้าที่เป็นแอโนด”

### 2.8.2 สมการของเนินสต์

ความสัมพันธ์ของศักย์ขั้วไฟฟ้ากับแอกทิวิตีของตัวทำปฏิกิริยา และผลของปฏิกิริยาในทางทฤษฎีแสดงได้ด้วยสมการที่เรียกว่า สมการของเนินสต์ รูปแบบของสมการของเนินสต์ เป็นดังนี้

$$E = E' - \frac{RT}{nF} \cdot \ln \frac{a_{\text{prod}}}{a_{\text{react}}} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $E$  เป็นศักย์ขั้วไฟฟ้า

$E'$  เป็นศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า

$R$  เป็นค่าคงที่ของแก๊สเท่ากับ 8.314 จูลต่อโมลต่อเคลวิน

$T$  เป็นอุณหภูมิ (เคลวิน)

$n$  เป็นจำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องในครึ่งปฏิกิริยา

$F$  เป็นค่าคงที่ฟาราเดย์ เท่ากับ 96,500 (คูลอมบ์ต่อโมล)

$a_{\text{prod}}/a_{\text{react}}$  เป็นอัตราส่วนแอกทิวิตีของสารปฏิกิริยา

ที่มาของสมการเนินสต์

การได้มาซึ่งสมการเนินสต์ (สมการ 2.2) อธิบายได้ดังนี้

ถ้าให้ปฏิกิริยาทั่วไปของเซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆ เป็น



เมื่อ A และ B เป็นสารตั้งต้น  
C และ D เป็นผลิตภัณฑ์  
a, b, c และ d เป็นตัวเลขปรับสมดุลของปฏิกิริยา

โดยธรรมชาติแล้ว การเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ขนาดจำเพาะหนึ่งของสาร ณ อุณหภูมิ และความกดดันหนึ่งๆ ย่อมสิ้นสุดหรือหยุดเมื่อมีสมดุลของปฏิกิริยาเกิดขึ้น ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาจนถึงสมดุลนี้ ทำให้เกิดงานขึ้น งานสุทธิที่มากที่สุดที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิและความกดดันที่คงที่ หาได้จากการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ของปฏิกิริยา (Gibbs free energy) เขียนแทนด้วย ( $\Delta G$ ) พลังงานอิสระมีค่าลดลง ( $\Delta G$  เป็นลบ) ถ้าปฏิกิริยาดำเนินไปได้ดี และจะมีค่าเป็นศูนย์ ( $\Delta G=0$ ) เมื่อปฏิกิริยาเข้าสู่ภาวะสมดุล

การเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระบ่งบอกถึงความเป็นไปได้ของการดำเนินไปของปฏิกิริยา ซึ่งสัมพันธ์กับเอกทวิติของทั้งสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์แสดงได้ในรูปของสมการ

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \cdot \ln \frac{a_{prod}}{a_{react}} \quad (2.4)$$

เมื่อ R และ T มีความหมายเช่นเดียวกับที่กล่าวในสมการเน็นสต์  
 $G^0$  เป็นพลังงานอิสระของสารที่สภาวะมาตรฐาน  
a แทนเอกทวิติของสาร

### 2.8.3 กฎของฟาราเดย์

ไมเคิล ฟาราเดย์ ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับปริมาณสารที่เปลี่ยนแปลงที่ขั้วไฟฟ้า (เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับระยะเวลาที่ปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านซึ่งกฎของฟาราเดย์มี 2 ข้อ คือ

กฎข้อที่ 1 ปริมาณของสาร (m) ที่เกิดที่อิเล็กโทรดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณประจุไฟฟ้า (Q) ที่ผ่านเข้าไปในสารละลาย

กฎข้อที่ 2 ถ้าผ่านปริมาณไฟฟ้าจำนวนเท่าๆ กันลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างชนิดกัน ปริมาณของสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดเป็นสัดส่วน โดยตรงกับน้ำหนักสมมูลของสารเหล่านั้น

กฎการแยกสลายด้วยไฟฟ้าของฟาราเดย์ ได้กล่าวไว้ว่า “ปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าเซลล์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณการเปลี่ยนแปลงสมมูลเคมีของสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์นั้น” ซึ่งเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$Q = F \cdot (NO. \text{equivalents}) \quad (2.5)$$

เมื่อ F เป็นค่าคงที่ของฟาราเดย์มีค่าเท่ากับ  $6.022 \times 10^{23}$  อิเล็กตรอน หรือ 96,485 คูลอมบ์ (C) ต่อหนึ่งกรัมสมมูลของสาร

Q แทนปริมาณประจุไฟฟ้าที่ถูกพาเข้าสู่เซลล์ โดยการไหลของกระแสคงที่ (I) ในเวลา 1 วินาที (s) มีหน่วยเป็น C (คูลอมบ์) ซึ่งเขียนสมการได้ดังนี้

$$Q = It \quad (2.6)$$

## 2.9 การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า

### 2.9.1 กระบวนการเคมีไฟฟ้าที่ใช้เยื่อแผ่น

ในกระบวนการเคมีไฟฟ้าบางกระบวนการที่ใช้เยื่อแผ่นจะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เช่น กระบวนการแยกกรองด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrodialysis) ในกระบวนการนี้ ไอออนจะถูกทำให้เคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นที่มีความจำเพาะ (Ion selective membrane) โดยการให้ศักย์ไฟฟ้าเข้าไป เยื่อแผ่นที่ใช้ในทางทฤษฎีจะยอมให้เฉพาะแคทไอออนหรือแอนไอออนผ่านเท่านั้น ส่วนอนุภาคที่ไม่มีประจุจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นไม่ได้

สิ่งสำคัญของกระบวนการเยื่อแผ่นคือ ต้องมีแรงขับเคลื่อนที่ทำให้สารละลายไหลผ่านเยื่อแผ่นและเกิดการแยก เช่น ผลต่างของความเข้มข้นหรือผลต่างของความดัน ลักษณะที่สำคัญที่สุดของเยื่อแผ่นคือ มีสมบัติในการเลือกผ่านสารหนึ่งมากกว่าอีกสารอื่น การเลือกผ่านสารเป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมี หรือทางกายภาพ ซึ่งอาจพิจารณาได้จากการมีสัมพรรคภาพ (Affinity) ของเยื่อแผ่นต่อสารนั้นๆ หรือจากขนาดของรูพรุนหรือจากการมีประจุของเยื่อแผ่น เป็นต้น

### ข้อดีของกระบวนการเยื่อแผ่น

กระบวนการเยื่อแผ่นมีข้อได้เปรียบกระบวนการอื่นๆ เช่น

1. เป็นการแยกตามขนาดโมเลกุล (รูปร่างหรือชนิดของประจุ) ซึ่งทำให้สามารถดำเนินการได้ที่อุณหภูมิปกติ จึงเหมาะสำหรับแยกสารที่สามารถเสื่อมสภาพเพราะความร้อนได้
2. กระบวนการเยื่อแผ่นส่วนใหญ่ใช้พลังงานในการแยกค่อนข้างต่ำเพราะสามารถแยกได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนเฟส ตัวอย่างเช่น กระบวนการแยกเกลือออกจากน้ำกร่อยหรือน้ำทะเล
3. ไม่ก่อให้เกิดของเหลือทิ้ง เพราะกระบวนการเยื่อแผ่นสามารถแยกผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ แล้วยังนำสารที่ผ่านการแยกเรียกว่า เพอเมเตต (Permeate) และสารที่เหลือจากการแยกเรียกว่า รีเทนเตต (Retentate) ไปใช้ต่อได้อีก เช่น การผลิตน้ำสะอาดจากน้ำทะเลได้เพอเมเตตคือน้ำจืด ส่วนสารละลายเกลือเข้มข้นสามารถนำไปต้มระเหยตกผลึกเพื่อผลิตเกลือได้ หรือในกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งบางชนิดที่นำน้ำสะอาดกลับไปใช้ในกระบวนการและได้ผลิตภัณฑ์เข้มข้นซึ่งใช้ประโยชน์ต่อไปได้
4. สามารถขยายขนาดจากระดับต้นแบบให้เป็นระดับอุตสาหกรรมได้ไม่ยาก เนื่องจากชุดเยื่อแผ่นมีลักษณะเป็นชุด (Modular) หรือหน่วยและสามารถนำหน่วยย่อยมาต่อกันเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการแยก
5. สามารถดำเนินการแบบกะหรือแบบต่อเนื่องตลอดจนติดตั้งระบบควบคุมงานอัตโนมัติได้ไม่ยาก
6. มีขนาดกะทัดรัดไม่เปลืองพื้นที่ เพราะอุปกรณ์เยื่อแผ่นมีการออกแบบให้มีพื้นที่ในการกรองต่อหน่วยปริมาตรของอุปกรณ์สูง

### ข้อจำกัดของกระบวนการเยื่อแผ่น

แม้ว่ากระบวนการเยื่อแผ่นจะมีประสิทธิภาพหรือศักยภาพในการประยุกต์ใช้แต่มีข้อจำกัดหรือข้อเสียเช่นเดียวกับกระบวนการอื่นๆ ดังนี้

1. การโพลาไรซ์เข้มข้นเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration polarization) หมายถึงการสะสมของโมเลกุลหรืออนุภาคของตัวถูกละลายที่ไม่สามารถผ่านเยื่อแผ่นได้ทำให้ความเข้มข้นบริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นสูงกว่าในสารละลาย (หรือบริเวณที่อยู่ห่างออกไป) การลดการโพลาไรซ์เข้มข้นเนื่องจากความเข้มข้นในระดับหนึ่งทำได้โดยออกแบบอุปกรณ์ให้มีการป้อนสารผ่านเยื่อแผ่นแบบไหลขวางและที่ความเร็วสูงซึ่งจะช่วยให้ตัวถูกละลายที่สะสมเกิดการแพร่กลับไปในสารละลาย



2. อาจเกิดการสะสมหรืออุดตันของตัวถูกละลายทั้งบริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นและภายในรูพรุน ซึ่งทำให้ฟลักซ์ของสารละลายลดลงและยังส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการเยื่อแผ่นด้วย

3. ความคงตัวของเยื่อแผ่น เยื่อแผ่นที่ผลิตจากพอลิเมอร์จะมีความคงตัวจำกัด เช่น เยื่อแผ่นพวกเซลลูโลส (Cellulosics) จะคงตัวช่วงค่าความเป็นกรด-เบส 4-8 ส่วนพอลิซัลโฟน (polysulfone) สามารถใช้งานในช่วงกว้างกว่า คือ ค่าความเป็นกรด-เบส 1-13 อุณหภูมิก็มีผลต่อเยื่อแผ่น ปัจจุบันการพัฒนาเยื่อแผ่นบางชนิดทนอุณหภูมิได้ถึง 60-80 องศาเซลเซียส เยื่อแผ่นบางชนิดความคงตัวของเยื่อแผ่นจะไม่ทนต่อคลอรีนหรือตัวทำละลายอินทรีย์ ส่วนเยื่อแผ่นเซรามิก (Ceramics) มีความคงตัวต่ออุณหภูมิและสารเคมีดีมาก สามารถฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำได้ ทนต่อจุลินทรีย์ แต่ความสามารถในการแยกยังด้อยกว่าเยื่อแผ่นพอลิเมอร์การพัฒนาที่ยังค่อนข้างจำกัดและมีราคาแพง

จะเห็นได้ว่าปัจจุบันมีการนำกระบวนการเคมีไฟฟ้าที่ใช้เยื่อแผ่นมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียอย่างแพร่หลาย โดยเยื่อแผ่นนี้สามารถนำมาใช้ในกระบวนการเคมีไฟฟ้าได้ ยกตัวอย่างเช่น

### 2.9.1.1 กระบวนการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า

กระบวนการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า (Electro-precipitation) เป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะของสารที่ละลายได้ไปอยู่ในรูปที่ไม่ละลาย โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้ไอออนประจุบวกและลบรวมตัวกันเป็นตะกอนของแข็ง (เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์, 2542) กระบวนการนี้ได้นำเอาหลักการทางเคมีไฟฟ้าเข้ามาช่วย คือ กระบวนการอิเล็กโทรไลซิส กระบวนการนี้จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นในสารละลาย อิเล็กโทรไลต์หรือเกลือที่หลอมเหลวโดยอาศัยไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งกำเนิดภายนอก เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในเซลล์จะมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นบริเวณขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองที่สัมผัสกับสารละลาย ส่วนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่แอโนดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของตัวถูกละลายและวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรด ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH<sup>-</sup>) ที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายเพิ่มสูงขึ้น จนทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของอนุภาคลดลงและสามารถเกิดพันธะกับไฮดรอกไซด์ไอออนกับน้ำเกิดเป็นตะกอนของแข็งไม่ละลายน้ำแล้วตกตะกอนลงมาได้ เรียกขั้นตอนนี้ว่า การตกตะกอนร่วมกับไฮดรอกไซด์ (Hydroxide precipitation) จากนั้นจึงทำการกรองเพื่อแยกเอาตะกอนนั้นออกมา ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการนี้ได้แก่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าความเป็นกรด-เบส อุณหภูมิ กำลังไฟฟ้า อัตราการไหลวน ชนิดและพื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับน้ำเสีย ข้อดีของการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีนี้คือ เกิดกากตะกอนที่มีปริมาณและขนาดใหญ่ทำให้ง่ายต่อการแยกออกจากน้ำเสีย ค่าใช้จ่ายในการบำบัดแต่ละครั้งไม่สูง

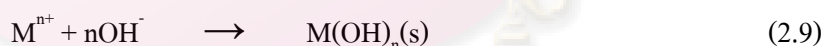
มากนัก เนื่องจากไม่ต้องมีระบบควบคุมค่าความเป็นกรด-เบส และไม่ต้องเปลี่ยนขั้วอิเล็กโทรดบ่อยครั้งอีกด้วย

กระบวนการตกตะกอนโดยวิธีเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าชนิดมีเยื่อเลือกผ่านประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือ ขั้วแคโทดกับขั้วแอโนดวางคร่อมแผ่นเยื่อเลือกผ่านโดยเยื่อเลือกผ่านที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียมี 2 ชนิด คือ เยื่อเลือกผ่านไอออนบวก (Cation exchange membrane: CEM) และเยื่อเลือกผ่านไอออนลบ (Anion exchange membrane: AEM) แสดงดังภาพที่ 2.7 และภาพที่ 2.8 ตามลำดับ

เยื่อเลือกผ่านไอออนลบจะมีสมบัติในการยอมให้ไอออนลบของสารอิเล็กโทรไลต์เคลื่อนที่ผ่านเนื้อเยื่อเลือกผ่านได้แต่ไอออนบวกจะผ่านไม่ได้ สำหรับเยื่อเลือกผ่านไอออนบวกจะมีลักษณะตรงกันข้ามคือไอออนบวกในสารอิเล็กโทรไลต์เคลื่อนที่ผ่านเนื้อเยื่อเลือกผ่านได้แต่ไอออนลบจะผ่านไม่ได้ ซึ่งปฏิกิริยาของกระบวนการตกตะกอนด้วยเคมีไฟฟ้าในการกำจัดออกจากน้ำเสียจะเกิดขึ้นในฝั่งแคโทดแสดงตามสมการ



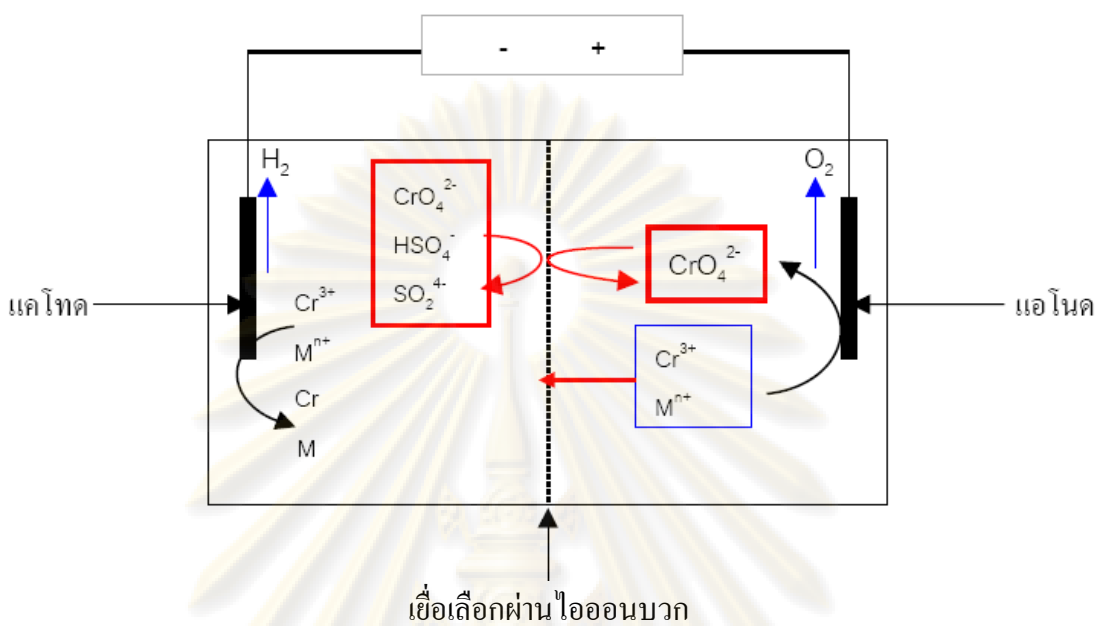
และจะเกิดการตกตะกอนของไฮดรอกไซด์ของโลหะตามมา



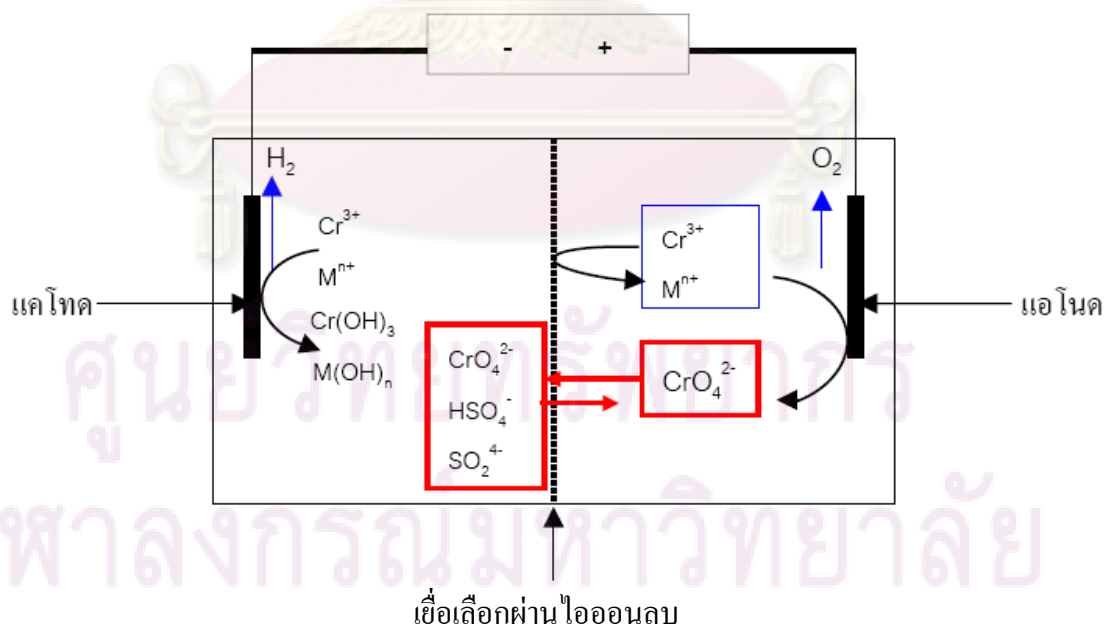
ส่วนที่ฝั่งแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำ



จากปฏิกิริยาข้างต้นพบว่าที่ฝั่งแคโทดมีความเป็นกรด-เบสเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) เกิดขึ้นตลอดเวลาและไฮดรอกไซด์ไอออนก็เกิดปฏิกิริยากับโลหะและตกตะกอนในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของโลหะที่ฝั่งแคโทดลดลง



ภาพที่ 2.7 กระบวนการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าชนิดที่มีเยื่อเลือกผ่านไอออนบวก  
(Hunsom, 2005)

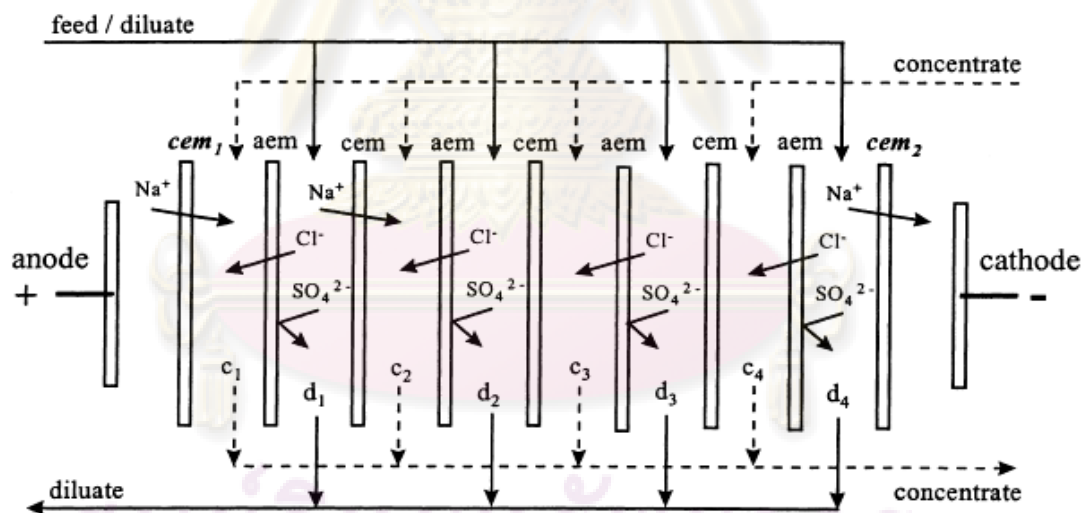


ภาพที่ 2.8 กระบวนการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าชนิดที่มีเยื่อเลือกผ่านไอออนลบ  
(Hunsom, 2005)

### 2.9.1.2 กระบวนการแยกกรองด้วยกระแสไฟฟ้า (Chen, 2004)

กระบวนการแยกกรองด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrodialysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกประจุหรือไอออนออกจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยทำการต่อเชื่อมเมมเบรนในลักษณะอนุกรมกัน และวางอยู่ระหว่างแท่งอิเล็กโทรด 2 ชนิด คือ แท่งที่มีประจุเป็นบวกเรียกว่า ขั้วบวกและแท่งที่มีประจุเป็นลบ เรียกว่า ขั้วลบ จากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านแท่งอิเล็กโทรดทั้ง 2 แท่ง จะทำให้เกิดการไหลของประจุไฟฟ้าไหลผ่านเยื่อเมมเบรนของไอออนลบไปยังขั้วบวก และจากไอออนบวกไปยังขั้วลบ (ภาพที่ 2.9) ซึ่งจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในกระบวนการดังกล่าว

กระบวนการแยกกรองด้วยกระแสไฟฟ้านี้ปัจจุบันมีการนำไปใช้ในด้านต่างๆ เช่น การผลิตน้ำดื่มจากน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย การแยกเอาไอออนของโลหะออกจากน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ยังมีข้อเสียคือกระบวนการผลิตเยื่อแผ่นค่อนข้างยุ่งยาก ต้องควบคุมความสม่ำเสมอของขนาดรูและความพรุนของเยื่อแผ่นเมมเบรน



ภาพที่ 2.9 กระบวนการแยกกรองด้วยกระแสไฟฟ้า (Hans และ Peter, 1998)

### 2.9.2 กระบวนการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า (Hunsom, 2001)

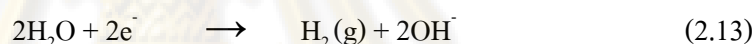
การพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrodeposition) จะเหมาะสมกับการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักผสมอยู่ การแยกโลหะด้วยกระบวนการนี้มีความรวดเร็ว แม่นยำเพราะมีค่าในการเลือกเกิดปฏิกิริยาได้สูง และข้อได้เปรียบของกระบวนการนี้คือ แยกโลหะได้ในรูปของโลหะบริสุทธิ์ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นได้ หลักการทำงานของกระบวนการมีดังนี้

เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าภายนอกสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบด้วยไอออนบวกและลบจะก่อให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองที่จมอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าเดินทางครบวงจร

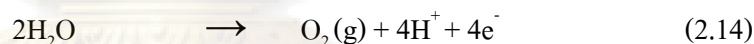
กระบวนการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นที่พื้นที่ขั้วไฟฟ้ามีดังนี้

- กระบวนการรีดักชันของไอออนโลหะที่ขั้วแคโทด
- เกิดรีดักชันของน้ำได้แก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด
- เกิดออกซิเดชันของน้ำได้แก๊สออกซิเจนที่ขั้วแอโนด

ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด



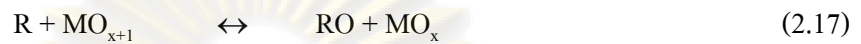
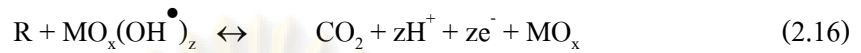
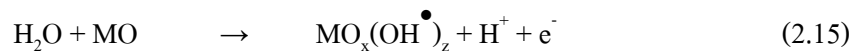
ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด



ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อลักษณะการพอกพูนของผลปฏิกิริยา ได้แก่ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า การเคลื่อนไหวตลอดเวลาด้วยแรงกวนสารละลายหรือการหมุนของขั้วไฟฟ้า และอุณหภูมิ เป็นต้น

### 2.9.3 กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า (Israilides และคณะ, 1997)

กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า (Electro-oxidation) สามารถลดปริมาณของสารอินทรีย์และสารมลพิษในน้ำเสียได้ โดยสารอินทรีย์และสารมลพิษจะถูกทำลายด้วยอนุพันธ์ของไฮดรอกไซด์เรดิคัล (Hydroxyl radicals,  $OH^\bullet$ ) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง (Strong oxidizing agent) เรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าแบบทางตรง (Direct electrooxidation) โดยสารอินทรีย์จะถูกออกซิไดซ์ด้วยอนุพันธ์ของไฮดรอกไซด์เรดิคัลทำให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลงจนกระทั่งกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดังปฏิกิริยา (2.15 – 2.17) ตามลำดับ และศักยภาพของตัวออกซิไดซ์แสดงตามตาราง 2.5



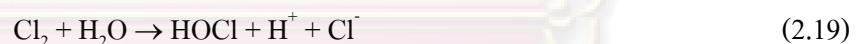
เมื่อ R คือสารอินทรีย์

MO คือโลหะออกไซด์ที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด

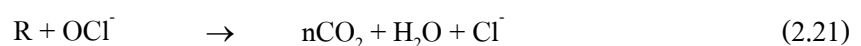
$\text{MO}_x(\text{OH}^\bullet)_z$  คือไฮดรอกไซด์เรดิคัล  $\text{OH}^\bullet$  ที่ถูกดูดซับบนผิวของขั้วแอโนด

RO คือผลิตภัณฑ์ของสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์

ในกรณีที่น้ำเสียมีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบหรือเมื่อมีการเติมเกลือคลอไรด์ เช่น โซเดียมคลอไรด์หรือโพแทสเซียมคลอไรด์ลงในระบบ พบว่าจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของคลอไรด์ไอออนได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคลอรีนซึ่งสามารถละลายน้ำอยู่ในรูปของไฮโปคลอไรต์ (HOCl) ซึ่งสามารถแตกตัวเป็นไฮโปคลอไรต์ไอออน (OCl<sup>-</sup>) ดังแสดงโดยปฏิกิริยาที่ (2.18) - (2.20) ตามลำดับ



โดยไฮโปคลอไรต์ไอออนที่เกิดขึ้นในระบบจะมีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ (Chen, 2004) จึงสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำเสียได้เช่นเดียวกับไฮดรอกไซด์เรดิคัล และหากทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์อย่างสมบูรณ์จะได้ผลิตภัณฑ์คือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและคลอไรด์ไอออน แสดงดังปฏิกิริยาที่ 2.21 ทำให้น้ำเสียมีสารมลพิษลดลง กระบวนการออกซิเดชันแบบนี้ว่า กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าแบบทางอ้อม (Indirect electrooxidation)



ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบศักยภาพของตัวออกซิไดซ์ตามสารตั้งต้น จะเห็นได้ว่าอนุพันธ์ของ  $\text{OH}^\bullet$  จะมีศักยภาพสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวออกซิไดซ์อื่นๆ และสามารถเตรียมได้โดยใช้น้ำเป็นสารตั้งต้น

ตารางที่ 2.5 ศักยภาพของตัวออกซิไดซ์ตามสารตั้งต้น (Chen, 2004)

Oxidant	Formation potential
$\text{H}_2\text{O}/\bullet\text{OH}$ (hydroxyl radical)	2.80
$\text{O}_2/\text{O}_3$ (ozone)	2.07
$\text{SO}_4^{2-}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ (peroxodisulfate)	2.01
$\text{MnO}_2/\text{MnO}_4^-$ (permanganate ion)	1.77
$\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}_2$ (hydrogen peroxide)	1.77
$\text{Cl}^-/\text{ClO}_2$ (chlorine dioxide)	1.57
$\text{Ag}^+/\text{Ag}^{2+}$ (silver (II) ion)	1.50
$\text{Cl}^-/\text{Cl}_2$ (chlorine)	1.36
$\text{Cr}^{3+}/\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ (dichromate)	1.23
$\text{H}_2\text{O}/\text{O}_2$ (oxygen)	1.23

#### 2.9.4 กระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้า (สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ, 2551)

การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrocoagulation) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้กันอยู่แพร่หลาย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สะดวกและมีประสิทธิภาพสูงในการลดสารมลพิษในน้ำเสีย ซึ่งกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของไขมัน น้ำมัน สีขุ่น สารแขวนลอย สารอินทรีย์และโลหะหนัก เป็นต้น กระบวนการจับก้อนเป็นกระบวนการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์และของแข็งแขวนลอยด้วยการเติมสารเคมีที่ให้ไอออนที่มีประจุตรงข้าม เช่น สารส้มหรือเฟอริกคลอไรด์ ซึ่งทำให้ประจุของคอลลอยด์เป็นกลางและเกิดการรวมตัวกัน จากนั้นเติมพอลิเมอร์เพื่อให้ได้ตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และกำจัดออกด้วยการใช้ถังตกตะกอน การใช้สารเคมีช่วยในการตกตะกอนนี้เป็นกระบวนการที่รู้จักกันและใช้อยู่โดยทั่วไปในการบำบัดน้ำและน้ำเสีย สำหรับกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้านั้นใช้หลักการเดียวกันในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ แต่ใช้สารจับก้อนในรูปของไอออนโลหะที่เกิดจากการละลายโลหะออกจากอิเล็กโทรดด้วยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่

ขี้วัวและคอลลอยด์ยังถูกกำจัดได้ด้วยเกลือไฮดรอกไซด์ของโลหะที่ไม่ละลายน้ำที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาต่อเนื่องของไอออนโลหะในน้ำ นอกจากนี้แก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบจะช่วยทำให้คอลลอยด์ที่รวมตัวเป็นตะกอนลอยตัวขึ้น และสามารถกำจัดออกด้วยการกวาดทิ้งจากผิวน้ำ ซึ่งกระบวนการนี้นิยม เรียกว่าการทำให้ตะกอนลอยด้วยกระแสไฟฟ้า (Electroflotation)

### 2.9.5 กระบวนการลอยตัวด้วยกระแสไฟฟ้า (Chen, 2004)

กระบวนการลอยตัวด้วยกระแสไฟฟ้า (Electroflotation) เป็นกระบวนการที่แยกสารมลพิษในน้ำเสียโดยการผลิตฟองออกซิเจนและไฮโดรเจนด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า ฟองเหล่านี้จะทำให้เกิดการลอยตัวของสารมลพิษในน้ำทำให้สามารถแยกสารมลพิษในน้ำออกมาได้ นอกจากนี้อาจต้องมีการเติมสารลดแรงตึงผิวเพื่อให้เกิดการจับตัวของฟองและสารมลพิษในน้ำเสียให้ดีขึ้น ประสิทธิภาพของกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของฟองแก๊สซึ่งจะสอดคล้องกับค่าความเป็นกรด-เบส ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ชนิดของขั้วไฟฟ้า และการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์

### 2.10 การสำรวจเอกสาร

#### การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีชีวภาพ

He และคณะ (1995) ศึกษาการกำจัดสารมลพิษออกจากน้ำค้ำที่มาจากกระบวนการต้มเชื้อกระดาษแบบโซดาที่มีการเติมแอนทราควิโนน (Anthraquinone) เพื่อลดการย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตโดยวัตถุดิบที่ใช้ในการทำเชื้อกระดาษคือฟางข้าวสาลี ทำการบำบัดน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้ระบบยูเอเอสบี (Upflow anaerobic sludge blanket: UASB) ที่อุณหภูมิ  $35 \pm 1$  องศาเซลเซียส โดยน้ำค้ำนี้มีค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นประมาณ 10.0 จากการทดลองพบว่าค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจะมีประมาณ 8.0-9.0 ค่าซีไอดีและบีไอดีลดลงร้อยละ 40-46 และ 56-65 ตามลำดับ

Wu และคณะ (2005) ศึกษาการลดสีของน้ำค้ำจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษโดยดูจากสลายของ ลิกนินในน้ำค้ำ ในการทดลองนี้ศึกษาเชื้อราทั้งหมด 5 ชนิด คือ *Phanerochaete chrysosporium* *Pleurotus ostreatus* *Lentinus edodes* *Trametes versicolor* และ S22 จากการทดลองพบว่า *P. chrysosporium* *P. ostreatus* และ S22 มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการสลายของ ลิกนิน โดยสามารถลดได้ถึงร้อยละ 71 และค่าซีไอดีลดลงร้อยละ 48 ในเวลา 10 วัน ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายลิกนินของเชื้อรา ได้แก่ ความเป็นกรด-เบส ความเข้มข้นของคาร์บอน ไนโตรเจน และธาตุอาหารที่มีอยู่ในน้ำเสีย โดยภาวะที่เหมาะสมคือความเป็นกรด-เบสที่ 9.0-11.0 นอกจากนี้



พบว่า การเติมกลูโคส 1 กรัมต่อลิตร และแอมโมเนียมทาร์เทท (Ammonium tartrate) 0.2 กรัมต่อลิตร ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายลิกนินของเชื้อราดีขึ้น

### การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีเคมี

Mohamed และคณะ (2003) ศึกษาการสลายลิกนินในน้ำค้ำโดยใช้ระบบ UV/TiO<sub>2</sub> โดยลิกนินเริ่มต้นจะถูกเตรียมจากการตกตะกอนด้วยกรดซัลฟิวริกที่ค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 2 จากนั้นละลายลิกนินที่ได้ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากผลการทดลองพบว่าปริมาณลิกนินจะลดลงร้อยละ 56 เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงเป็นเวลา 7 ชั่วโมง และหากใช้วิธีสลายลิกนินด้วยแสงแบบธรรมดาพบว่าลิกนินลดลงเพียงร้อยละ 3.3 นอกจากนี้ยังพบว่าค่าซีโอดีจะลดลงจากเริ่มต้นถึงร้อยละ 81.72 และ 38 ตามลำดับ ในเวลา 7 ชั่วโมง

Mussatto และคณะ (2007) ศึกษาการแยกลิกนินจากน้ำค้ำที่มาจากกระบวนการต้มเยื่อแบบโซดา โดยน้ำค้ำมีความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 12.56 จากผลการทดลองพบว่าที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2.15 จะสามารถตกตะกอนลิกนินได้สูงสุดคิดเป็นร้อยละ 81.43 และยังทำให้สีของน้ำค้ำเปลี่ยนจากสีน้ำตาลคล้ำเป็นสีเหลืองอ่อน นอกจากนี้ยังช่วยลดสารประกอบฟีนอลในน้ำค้ำจากร้อยละ 74.4 เหลือเพียงร้อยละ 32.1

Sangita และคณะ (2006) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษที่ใช้ฟางข้าวเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิต โดยในกระบวนการบำบัดน้ำเสียนั้นใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีเมมเบรน ซึ่งตัวแปรที่ศึกษาคือ อัตราเร็วในการกวนสารต่อการลดค่าซีโอดีและค่าบีโอดี ในช่วง 0-1,000 รอบต่อนาที จากผลการทดลองพบว่าอัตราเร็วในการกวนสารดังกล่าวให้ผลไม่แตกต่างกันต่อการลดค่าซีโอดีและบีโอดีของน้ำเสีย โดยสามารถลดค่าซีโอดีและบีโอดีได้ร้อยละ 67 และ 70 ตามลำดับ

Sun และคณะ (1999) ศึกษาค่าความเป็นกรด-เบสในการแยกลิกนินออกจากน้ำค้ำที่ได้มาจากกระบวนการต้มเยื่อกระดาษของลำต้นปาล์มน้ำมัน โดยการตกตะกอน 2 ขั้นตอน โดยขั้นแรกเป็นการปรับค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำค้ำให้มีค่าประมาณ 6 ด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น เพื่อตกตะกอนสารที่ได้จากการย่อยสลายพอลิแซคคาไรด์แล้วนำไปกรอง และศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-เบส ในช่วง 1.5-4.8 ต่อการตกตะกอนของลิกนิน จากผลการทดลองพบว่าค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 1.5 ทำให้ตกตะกอนได้ ลิกนินสูงสุดโดยได้ลิกนินที่มีความบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 99.5 และค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4.8 ได้ลิกนิน น้อยสุด

### การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

สิทธิโชค คันชอทอง (2548) ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการลดสีและสารมลพิษของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและแบบต่อเนื่อง โดยตัวแปรที่ศึกษาคือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นของน้ำเสีย ชนิดของสารเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอน และอัตราการไหลวนของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ จากการทดลองพบว่าสารเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนไม่มีผลต่อการลดสารมลพิษในน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า โดยภาวะที่เหมาะสมของงานวิจัยนี้คือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20.7 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นของน้ำเสียประมาณ 7.58 อัตราการไหลวนของน้ำเสียประมาณ 2.6 ลิตรต่อนาที และเวลาในการทำงาน 45 นาที โดยสามารถลดค่าสี ซีโอดี บีโอดี ของแข็งแขวนลอย และของแข็งที่ละลายน้ำ ได้ร้อยละ 97.0 87.8 80.4 89.8 และ 37.5 ตามลำดับ

El-Ashtoukhy และคณะ (2008) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบกะที่มีการกวนโดยตัวแปรที่ศึกษาคือ อัตราเร็วในการกวนในช่วง 200-1,000 รอบต่อนาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วง 2.2-11 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ความเป็นกรด-เบสในช่วง 6-8 ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในช่วง 0.5-2.5 กรัมต่อลิตร และอุณหภูมิในช่วง 25-60 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราเร็วในการกวน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ความเป็นกรด-เบส และความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์จะทำให้ร้อยละการลดลงของค่าซีโอดีและสีเพิ่มสูงขึ้น ส่วนการเพิ่มอุณหภูมินั้นไม่ส่งผลต่อการลดค่าพารามิเตอร์ของน้ำเสีย

จากงานวิจัยข้างต้นพบว่าน้ำเสียจากอุตสาหกรรมประเภทนี้เนื่องจากมีลักษณะเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งเป็นสารที่สลายได้ยากทางชีวภาพ ดังนั้นวิธีการบำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่จึงมีทั้งการกระบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ เคมี และเคมีไฟฟ้า โดยจะพบว่ากระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพนั้นเป็นวิธีที่ลดสารอินทรีย์ต่างๆ ได้มีประสิทธิภาพเช่นกันแต่จะใช้ระยะเวลาในการบำบัด และเนื่องจากลักษณะนั้นมีสมบัติในการตกตะกอนที่ภาวะเป็นกรดจึงส่งผลให้งานวิจัยส่วนใหญ่จะทำการแยกลักษณะออกมาด้วยการตกตะกอนด้วยสารเคมี แต่อย่างไรก็ดีก็ยังพบว่าหากทำการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีนี้ควรมีการกำจัดสารเคมีต่างๆ ที่ตกค้างในน้ำเสียเพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับในงานวิจัยนี้ส่วนแรกจะทำการตกตะกอนด้วยสารเคมีโดยใช้กรดซัลฟิวริกแล้วจึงวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ หลังจากนั้นจะทำการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบมีเยื่อเลือกผ่านชนิดไอออนลบเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการซื้อสารเคมี และทำการหาภาวะที่ดีที่สุดเพื่อทำให้น้ำเสียหลังทำการบำบัดมีสมบัติที่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

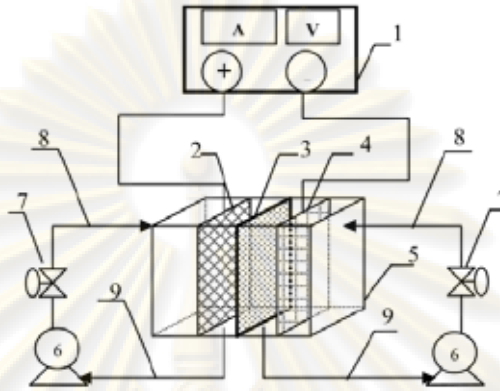
#### 3.1 รูปแบบการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบมีเยื่อเลือกผ่านชนิดไอออนลบ โดยอาจนำมาเป็นข้อมูลในระดับขยายส่วนหรือใช้ประโยชน์ในการศึกษาต่อไป

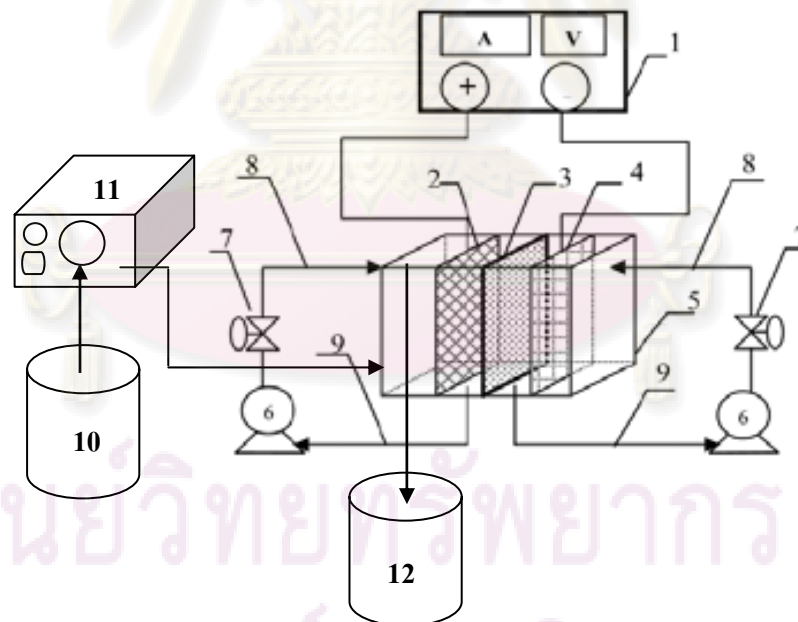
#### 3.2 เครื่องมือทุกชนิดและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FTIR) รุ่น DF 3 C206A
2. เครื่อง UV Spectrophotometer ยี่ห้อ Jasco รุ่น V-530
3. เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส ยี่ห้อ Horiba รุ่น F-22
4. เครื่องชั่งละเอียด ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP 301S
5. เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า ยี่ห้อ CONSORT รุ่น C832
6. ตู้อบ (Oven) ยี่ห้อ Binder รุ่น ED 115
7. นาฬิกาจับเวลา
8. กระดาษกรองเบอร์ 1
9. กระดาษกรอง GF/C
10. จานแก้ว (plate)
11. เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ
12. หลอดย่อย (Digestion Vessels) เป็นหลอดแก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate) ขนาด 20×150 หรือ 25×150 มิลลิเมตร มีพลาสติกเททราฟลูออเอทิลีนซึ่งทำด้วยทีเอฟอี (Tetrafluoroethylene, TFE)
13. ขวดบีโอดี (BOD Bottle) ขนาด 250-300 มิลลิลิตร พร้อมจุกปิด
14. ตู้ควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งควบคุมอุณหภูมิได้ที่  $20 \pm 1$  องศาเซลเซียส ยี่ห้อ VELP Scientifica รุ่น FOC 225I
15. ปั๊มดูดจ่ายน้ำตัวอย่าง (Peristaltis pump) ยี่ห้อ Masterflex รุ่น 77200-60

3.2.1. เครื่องปฏิกรณ์ชนิดเยื่อเลือกผ่านไอออนลบ (Anion exchange membrane) แสดง  
 ดังรูปที่ 3.1 (Hunsom, 2005)



ภาพที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าชนิดเยื่อเลือกผ่านไอออนลบที่ใช้ในการทดลองแบบกะ  
 (1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (2) ขั้วแคโทด (3) เยื่อเลือกผ่านไอออนลบ (4) ขั้วแอโนด  
 (5) เครื่องปฏิกรณ์ (6) ปั๊ม (7) วาล์ว (8) ทางน้ำออก (9) ทางน้ำเข้า



ภาพที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าชนิดเยื่อเลือกผ่านไอออนลบที่ใช้ในการทดลองแบบ  
 ต่อเนื่อง

- (1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (2) ขั้วแคโทด (3) เยื่อเลือกผ่านไอออนลบ (4) ขั้วแอโนด  
 (5) เครื่องปฏิกรณ์ (6) ปั๊ม (7) วาล์ว (8) ทางน้ำออก (9) ทางน้ำเข้า (10) ถังน้ำเข้า (11) ปุ่มควบคุมจ่าย  
 น้ำตัวอย่าง (12) ถังน้ำออก

3.2.1.1 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าขนาด  $0.10 \times 0.10 \times 0.11$  ลูกบาศก์เมตร ที่มีเชื้อเลือกผ่านชนิดไอออนลบ ชนิด IONAC มีพื้นที่ผิว  $7.74 \times 10^{-3}$  ตารางเมตร

3.2.1.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (Power Supply) รุ่น GPS-3030DD

3.2.1.3 ป้อนน้ำ ยี่ห้อ SANSO รุ่น PMD-0311

3.2.1.4 ป้อนน้ำด้วยตัวอย่าง (Peristaltis pump) ยี่ห้อ Masterflex รุ่น 77200-60

3.2.1.5 ขั้วไฟฟ้าแคโทดทำจากสแตนเลส ขนาด  $0.085 \times 0.095 \times 0.001$  เมตร มีรูปกลม 100 รู และเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.06 เมตร มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 0.0141 ตารางเมตร

3.2.1.6 ขั้วไฟฟ้าแอโนดทำจากไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ ( $\text{Ti/RuO}_2$ ) มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 0.0011 ตารางเมตร

### 3.3 สารเคมี

3.3.1 การวิเคราะห์ COD	(บริษัท, ความบริสุทธิ์)
1. โพแทสเซียมไดโครเมต ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ )	(Merck, AR grade)
2. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น ( $\text{Conc. H}_2\text{SO}_4$ )	(Fisher, 98%)
3. ซิลเวอร์ซัลเฟต ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ )	(POCh. S.A., AR grade)
4. เฟอร์รัส (II) แอมโมเนียมซัลเฟต ( $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )	(Unilab, AR grade)
5. สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ (Ferroun indicator)	(Labchem, AR grade)
6. โปแตสเซียมไฮโดรเจนแพทาเลต (KHP)	(Merck, AR grade)

#### 3.3.2 การวิเคราะห์ BOD

1. โปแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )	(Univer, AR grade)
2. โซเดียมฟอสเฟตเฮปตะไฮเดรต ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )	(Univer, AR grade)
3. ไดโปแตสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{K}_2\text{HPO}_4$ )	(Univer, AR grade)
4. แอมโมเนียมคลอไรด์ ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ )	(Univer, AR grade)
5. แมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )	(Univer, AR grade)
6. แมงกานีสซัลเฟตโมโนไฮเดรต ( $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )	(Univer, AR grade)
7. ไอรอน (III) คลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )	(Univer, AR grade)
8. แคลเซียมคลอไรด์ปราศจากน้ำ (Anhydrous $\text{CaCl}_2$ )	(Univer, AR grade)
9. โซเดียมโซอิลเฟตเพนตะไฮเดรต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )	(Univer, AR grade)
10. โซเดียมไอโอดด์ (NaI)	(Labchem, AR grade)

11. โซเดียมเอไซด์ ( $\text{NaN}_3$ ) (Labchem, AR grade)
12. โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) (Univer, AR grade)
13. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น ( $\text{Conc. H}_2\text{SO}_4$ ) (Fisher, 98%)
14. น้ำแข็ง

### 3.2.3 การวิเคราะห์สี

1. โคบอลต์ (II) คลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ( $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) (Merck, AR grade)
2. โพแทสเซียมเฮกซะคลอโรโรแพลททินेट ( $\text{K}_2\text{PtCl}_6$ ) (Carlo, AR grade)
3. ไฮโดรคลอริก ( $\text{HCl}$ ) (Carlo, AR grade)

### 3.4 ตัวอย่างน้ำเสีย

น้ำเสียตัวอย่างที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทแอดวานซ์ อะโกร จำกัด (มหาชน) จังหวัดฉะเชิงเทรา โดยน้ำที่นำมาทำการทดลองคือน้ำดำที่ได้จากกระบวนการต้มเยื่อ มีลักษณะสีดำคล้ำ มีกลิ่นเหม็น ค่าความเป็นกรด-เบสสูง และมีความเข้มข้นของสารมลพิษเจือปนอยู่ในปริมาณมาก



ภาพที่ 3.3 ลักษณะของน้ำดำ

### 3.5 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

#### 3.5.1 การทดลองแบบกะ (Batch experiment)

1. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ-เคมีของน้ำดำ โดยทำการเจือจางน้ำตัวอย่าง 100 เท่า และใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น ปรับค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 4 6 และ 8 โดยใช้ตัวอย่างปริมาณ 20 มิลลิลิตร กรองด้วยกระดาษกรอง และวิเคราะห์ค่าซีไอดี บีไอดี และสี

2. ศึกษาอัตราการเจือจางน้ำตัวอย่าง โดยทำการเจือจางน้ำตัวอย่าง ทั้งหมด 3 ค่าคือ 10 50 และ 100 เท่า ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบมีเชื้อเพลิงผ่านชนิดไอออนลบที่มีขั้วแคโทดเป็นสแตนเลส และขั้วแอโนดเป็นไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ แสดงดังภาพที่ 3.1 โดยฝั่งแอโนดใช้น้ำตัวอย่าง ปริมาตร 800 มิลลิลิตร และฝั่งแคโทดใช้น้ำกลั่นปริมาตร 800 มิลลิลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.9 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เก็บน้ำตัวอย่างครั้งละ ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ทุกชั่วโมงเป็นเวลา 7 ชั่วโมง และกรองด้วยกระดาษกรองและทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ความเป็นกรด-เบส อุณหภูมิ ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ของแข็งละลายน้ำ ค่าซีไอดี บีไอดี และสี ของน้ำตัวอย่างหลังการบำบัด

3. ศึกษาอัตราการไหลวนของน้ำตัวอย่างในช่วง 2.64 3.46 และ 3.95 ลิตรต่อนาที โดยใช้น้ำตัวอย่างที่เจือจางได้มีประสิทธิภาพดีจากข้อ 2 ปริมาตร 800 มิลลิลิตร มาบำบัดในเครื่องปฏิกรณ์ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.9 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยเก็บน้ำตัวอย่างครั้งละ 30 มิลลิลิตร ที่เวลา 0-5 ชั่วโมง และกรองด้วยกระดาษกรองแล้วทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ความเป็นกรด-เบส อุณหภูมิ ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ของแข็งละลายน้ำ ค่าซีไอดี บีไอดี และสี ของน้ำตัวอย่างหลังการบำบัด

4. ศึกษาความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในช่วง 1.9-3.8 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยเก็บน้ำตัวอย่างครั้งละ 30 มิลลิลิตร ที่เวลา 0-5 ชั่วโมง และกรองด้วยกระดาษกรอง แล้วทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ความเป็นกรด-เบส อุณหภูมิ ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ของแข็งละลายน้ำ ค่าซีไอดี บีไอดี และสี ของน้ำตัวอย่างหลังการบำบัด

5. ศึกษาผลของการเติมสารเติมแต่งคือ โซเดียมคลอไรด์ในช่วงความเข้มข้น 0-3.75 กรัมต่อลิตร โดยเก็บน้ำตัวอย่างครั้งละ 30 มิลลิลิตร ที่เวลา 0-5 ชั่วโมง แล้วทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ความเป็นกรด-เบส อุณหภูมิ ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ของแข็งละลายน้ำ ค่าซีไอดี บีไอดี และสี ของน้ำตัวอย่างหลังการบำบัด

### 3.5.2 การทดลองแบบต่อเนื่อง (Continuous experiment)

ศึกษาประสิทธิภาพที่เหมาะสมในบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบมีเชื้อเพลิงผ่านชนิดไอออนลบแบบต่อเนื่อง แสดงดังภาพที่ 3.2 โดยใช้ปั๊มดูดจ่ายน้ำตัวอย่างป้อนน้ำตัวอย่างเข้าเครื่องปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหล 240 270 และ 300 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและอัตราการไหลวนของน้ำเสียที่เหมาะสมจากข้อ 3.5.1 เพื่อหาประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมที่สุดต่อการนำไปใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

#### ตารางที่ 3.1 วิธีวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง (ภาคผนวก ข)

พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา	วิธีการวิเคราะห์ (APHA, 1989)
1. ค่าความเป็นกรด-เบส	pH meter
2. อุณหภูมิ	Thermometer
3. ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	Gravimetric method
4. ของแข็งละลายน้ำ	Gravimetric method
5. ค่าซีโอดี	Closed Reflux, Titrimetric Method
6. ค่าบีโอดี	Incubation Method
7. สี (Pt-Co unit)	UV-visible Spectrophotometer

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้สนใจการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ จากการเก็บน้ำเสีย ตัวอย่างจากโรงงานเป็นจำนวน 3 ครั้ง แล้วทำการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของน้ำเสีย พบว่าน้ำเสียดังกล่าวมีสมบัติที่สูงเกินมาตรฐานน้ำทิ้ง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยจะพบว่าน้ำเสียจะมีค่าคลอรีน มีความเป็นกรด-เบสสูง มีค่าบีโอดีและค่าซีโอดีสูงกว่ามาตรฐานประมาณ 1,650 และ 334 เท่าตามลำดับ ส่วนค่าของแข็งละลายน้ำและของแข็งแขวนลอยพบว่าสูงกว่ามาตรฐานประมาณ 423 และ 7 เท่าตามลำดับ ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องทำการบำบัดน้ำเสียน้ำเสียให้มีสมบัติที่ดีขึ้นเพื่อสามารถปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมโดยไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และเพื่อการนำน้ำที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิต โดยในการทดลองจะแบ่งการบำบัดน้ำเสียออกเป็น 2 ส่วน คือ การตกตะกอนด้วยสารเคมี โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ ความเป็นกรด-เบสของระบบการบำบัด และการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบมีเชื้อเพลิงผ่านชนิดไอออนลบ โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ อัตราการเจือจางน้ำเสีย อัตราการไหลวนของน้ำเสีย ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง โดยจะทำการทดลองทั้งในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและแบบต่อเนื่อง

**ตารางที่ 4.1** สมบัติของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษที่วิเคราะห์ได้ก่อนทำการบำบัด (กระทรวง วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2539)

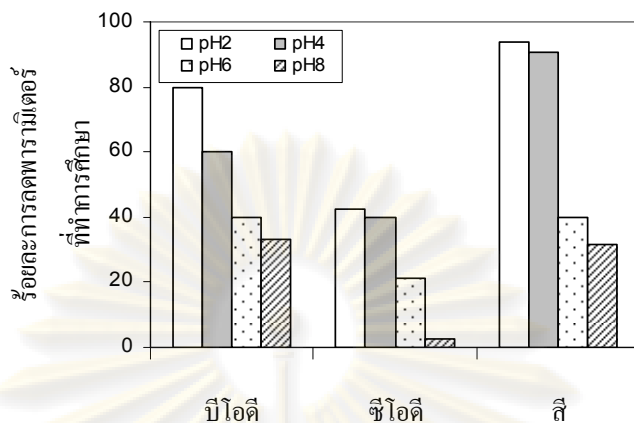
สมบัติของน้ำเสีย	ค่าที่วิเคราะห์ได้	ค่ามาตรฐาน
ค่าความเป็นกรด-เบส	12.8-12.94	5.5-9.0
ค่าซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	129,600-137,600	≤ 400
ค่าบีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	90,000-108,000	≤ 60
คลอรีน (หน่วยของแพลทินัม-โคบอลต์)	1,030,650-1,505,000	ไม่พึงรังเกียจ
ของแข็งละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	169,108-178,540	≤ 3,000
ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	995-1,020	≤ 150
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	25-29	≤ 40
ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	193.3-199.5	ไม่ได้กำหนด

#### 4.1 การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี

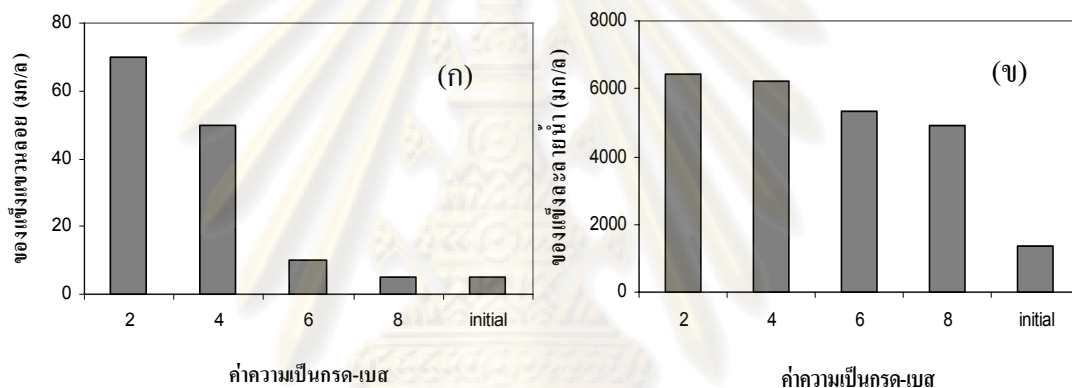
การทดลองในส่วนนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของความเป็นกรด-เบสต่อการลดลงของสารมลพิษในน้ำดำ โดยในการทดลองจะปรับค่าความเป็นกรด-เบสด้วยกรดซัลฟิวริก ให้มีค่าความเป็นกรด-เบสที่ 2 4 6 และ 8 โดยน้ำเสียที่จะทำการเจือจางประมาณ 100 เท่า ซึ่งมีสมบัติเริ่มต้นดังนี้ คือมีค่าบีโอดี 900 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีโอดี 1,280 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าสี 15,050 หน่วยของแพลทินัม-โคบอลต์ ค่าของแข็งละลายน้ำ 1,435 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าของแข็งแขวนลอย 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

ภาพที่ 4.1 แสดงผลของค่าความเป็นกรด-เบส ต่างๆ ต่อร้อยละการลดค่าบีโอดี ซีโอดี และสี พบว่าค่าความเป็นกรด-เบสต่างกันจะทำให้ร้อยละการลดลงของสารมลพิษต่างกัน โดยค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 8 จะให้ผลในการลดสารมลพิษในน้ำเสียได้น้อยที่สุด และเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสลดลงจาก 8 เป็น 2 จะสามารถเพิ่มร้อยละการลดลงของค่าบีโอดีจาก 33 ไป 80 เพิ่มร้อยละการลดค่าซีโอดีจาก 2.5 ไป 42.5 และสีจาก 31 ไป 94 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sun, Tomkinson และ Bolton (1999) เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรด-เบสต่ำ กรดซัลฟิวริกจะทำปฏิกิริยาซัลโฟเนชันกับอนุพันธ์ของฟีนีลโพรเพน (Phenylpropane) ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของลิกนินในน้ำเสียดังแสดงโดยปฏิกิริยาที่ (4.1) (ศุภเจตน์ ผ่องใส, 2547) ทำให้เกิดการตกตะกอนของลิกนินส่งผลให้ค่าบีโอดี ซีโอดี และสีของน้ำเสียลดลง สำหรับค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (ภาพที่ 4.2 ก) พบว่าการลดค่าความเป็นกรด-เบสจาก 8 เป็น 2 ส่งผลให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยเพิ่มสูงขึ้นจาก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 70 มิลลิกรัมต่อลิตรหรือเพิ่มขึ้นประมาณ 6 เท่า ส่วนปริมาณของแข็งละลายน้ำพบว่าการลดค่าความเป็นกรด-เบสจาก 8 เป็น 2 ส่งผลให้ปริมาณของแข็งละลายน้ำเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยจะเพิ่มขึ้นจาก 4,915 มิลลิกรัมต่อลิตร ไป 6,440 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาพที่ 4.2 ข) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อกรดซัลฟิวริกทำปฏิกิริยากับลิกนินหรือสารอินทรีย์ต่างๆ ในน้ำเสียจะทำให้เกิดการตกตะกอนเป็นอนุภาคขนาดเล็กแขวนลอยอยู่ในน้ำ และในขณะเดียวกันก็ส่งผลให้มีปริมาณไอออนในน้ำเสียเพิ่มสูงขึ้น ค่าของแข็งละลายน้ำและของแข็งแขวนลอยจึงเพิ่มขึ้นเช่นกัน

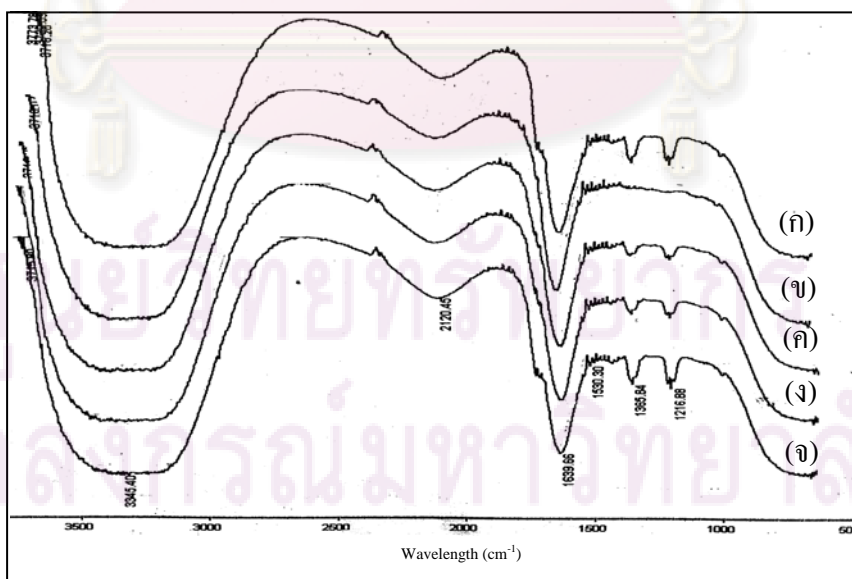




ภาพที่ 4.1 ผลของการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีที่ค่าความเป็นกรด-เบสต่างๆ



ภาพที่ 4.2 ผลของค่าความเป็นกรด-เบสต่อปริมาณ (ก) แข็งแขวนลอยและ (ข) ของแข็งละลายน้ำ



ภาพที่ 4.3 FTIR spectra ของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษ (ก) ก่อนและหลังการบำบัดด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ (ข) 2 (ค) 4 (ง) 6 และ (จ) 8

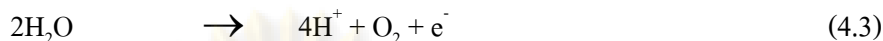
ภาพที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในน้ำเสียด้วยเครื่อง FTIR พบว่าน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษก่อนทำการบำบัดจะปรากฏพีคในช่วงความยาวคลื่น  $2,700-3,600\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงหมู่  $\text{-OH}$  พีคที่ความยาวคลื่น  $1,698\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงหมู่คาร์บอนิลแต่พบเพียงเล็กน้อย และพีคที่ความยาวคลื่น  $1,640$  และ  $1,530\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างของวงแหวนโรแมติก (Aromatic skeletal vibration) นอกจากนี้ยังพบว่าในน้ำค้ำจะประกอบด้วยหน่วยย่อยของลิกนิน คือ Syringyl ( $1,366$  และ  $1,216\text{ cm}^{-1}$ ) และ Guaiacyl ( $1,275$  และ  $1,030\text{ cm}^{-1}$ ) ดังแสดงในภาพที่ 4.3 (ก) สำหรับหมู่ฟังก์ชันของน้ำเสียที่เป็นกรด-เบสต่างๆ พบว่าจะปรากฏหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่ตำแหน่งใกล้เคียงกันคือพีค  $\text{-OH}$  ที่ตำแหน่ง  $2,700-3,600\text{ cm}^{-1}$  พีคของหมู่คาร์บอนิลที่ตำแหน่ง  $1,698\text{ cm}^{-1}$  พีคที่แสดงถึงโครงสร้างของวงแหวนโรแมติกที่ตำแหน่ง  $1,640$  และ  $1,530\text{ cm}^{-1}$  ส่วนพีคที่แสดงตำแหน่งหน่วยย่อยของลิกนินคือ Syringyl และ Guaiacyl จะลดลงเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสลดลง แสดงว่ากรดทำให้เกิดการตกตะกอนของสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ ทำให้สารมลพิษต่างๆ ลดลง สำหรับภาพที่ 4.4 แสดงลักษณะสีของน้ำเสียหลังการบำบัดพบว่าน้ำเสียที่ปรับค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 จะมีสีที่ค่อนข้างใส แต่ยังมีปริมาณสารมลพิษมากกว่ามาตรฐาน กล่าวคือค่าบีโอดีสูงกว่ามาตรฐานประมาณ 3 เท่า ส่วนค่าซีโอดีสูงกว่าประมาณ 2 เท่า (ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งแสดงดังภาพผนวก ก)



ภาพที่ 4.4 สีของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยการตกตะกอนด้วยสารเคมีที่ค่าความเป็นกรด-เบส-ต่างๆ

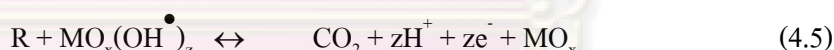
#### 4.2 การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าซึ่งทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบมีเยื่อเลือกผ่านชนิดไอออนลบที่มีขั้วแคโทดเป็นแผ่นสแตนเลสและขั้วแอโนดเป็นไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ โดยฟุ้งแอโนดจะบรรจุน้ำเสียปริมาตร 800 มิลลิลิตร และขั้วแคโทดจะบรรจุน้ำกลั่นปริมาตร 800 มิลลิลิตร โดยปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดและแอโนดเกิดขึ้นดังสมการ



โดยที่ฝั่งแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮดรอกไซด์ไอออนและแก๊สไฮโดรเจน ดังสมการ (4.2) ส่งผลให้เมื่อเวลาผ่านไปค่าความเป็นกรด-เบสของฝั่งแคโทดจะเพิ่มขึ้น (ภาคผนวก ง) ส่วนที่ขั้วแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำได้ผลิตภัณฑ์เป็นโปรตอนและแก๊สออกซิเจนดังสมการ (4.3) โดยโปรตอนที่ถูกผลิตขึ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับลิกนินในน้ำเสีย ส่งผลให้ปริมาณลิกนินและสารมลพิษในน้ำเสียน้อยลง ค่าบีโอดี ค่าซีโอดี และสีจึงลดลงตามไปด้วย

นอกจากการลดลงของสารอินทรีย์เนื่องจากการทำปฏิกิริยาซัลโฟเนชันแล้ว ในระบบยังมีการผลิตไฮดรอกไซด์เรดิคัล ( $\text{OH}^\bullet$ ) โดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าแบบทางตรง ดังแสดงโดยสมการ (4.4) โดยไฮดรอกไซด์เรดิคัลที่ถูกผลิตขึ้นจะมีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงซึ่งจะไปออกซิไดซ์สารอินทรีย์เกิดเป็นสารอื่นที่มีขนาดเล็กและมีความเป็นพิษลดลง หรือเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในกรณีที่เกิดการออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์ ดังสมการ (4.5)

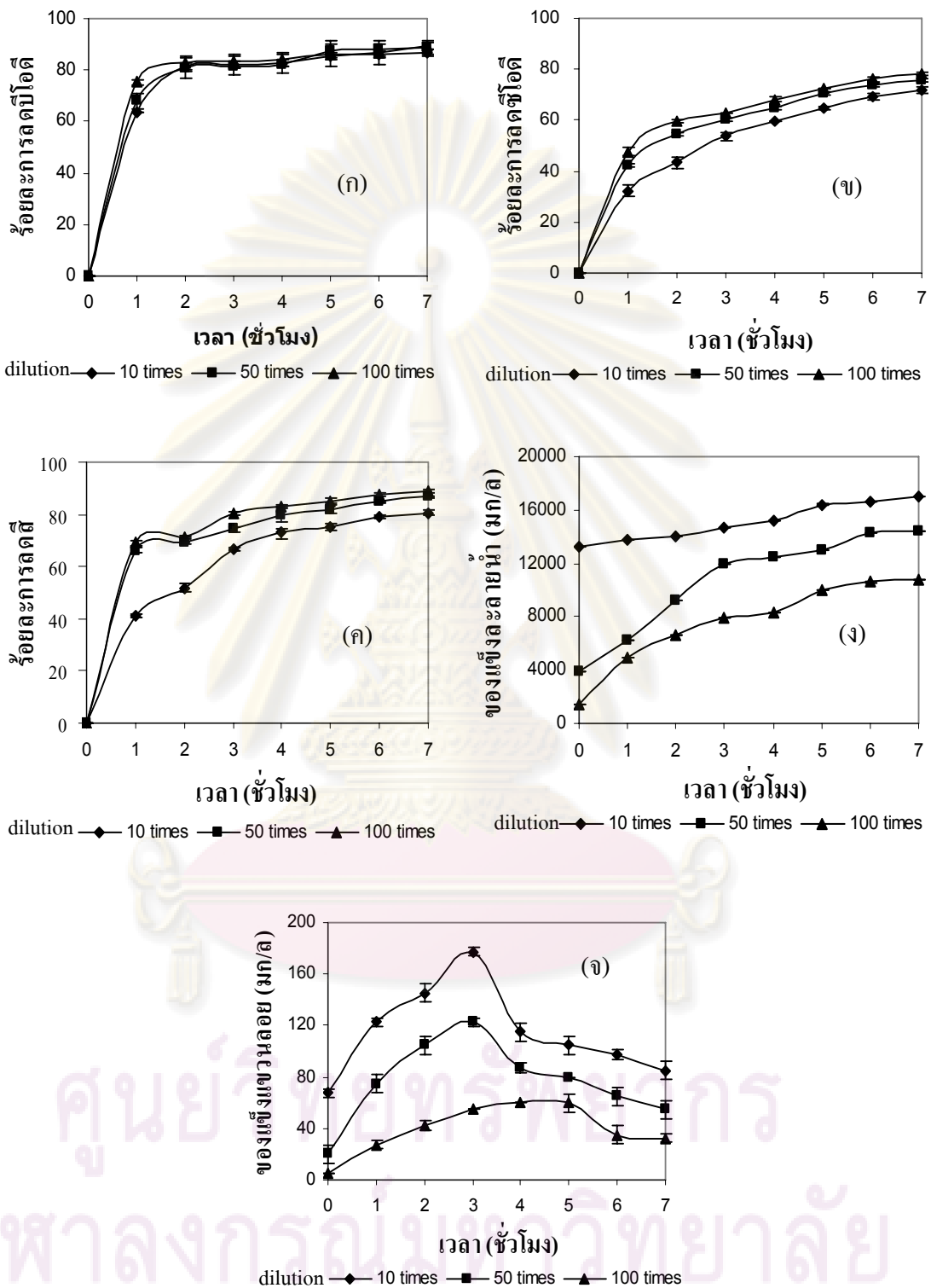


การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือการทดลองแบบกะ และการทดลองแบบต่อเนื่อง โดยการทดลองแบบกะตัวแปรที่ศึกษา คือ การเจือจางน้ำเสีย อัตราการไหลวนของน้ำเสีย ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง

## 4.2.1 การบำบัดน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้า

### 4.2.1.1 ผลของการเจือจางน้ำเสีย

เนื่องจากน้ำเสียที่นำมาใช้ในการทดลองนี้มีความเข้มข้นของสารมลพิษสูง ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการศึกษาผลของการเจือจางน้ำเสียโดยอัตราการเจือจางที่ศึกษาคือ 10 50 และ 100 เท่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1.90 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำเริ่มต้นเท่ากับ 12.94 และใช้เวลาในการทดลอง 7 ชั่วโมง ภาพที่ 4.5 (ก-ค) แสดงความสัมพันธ์



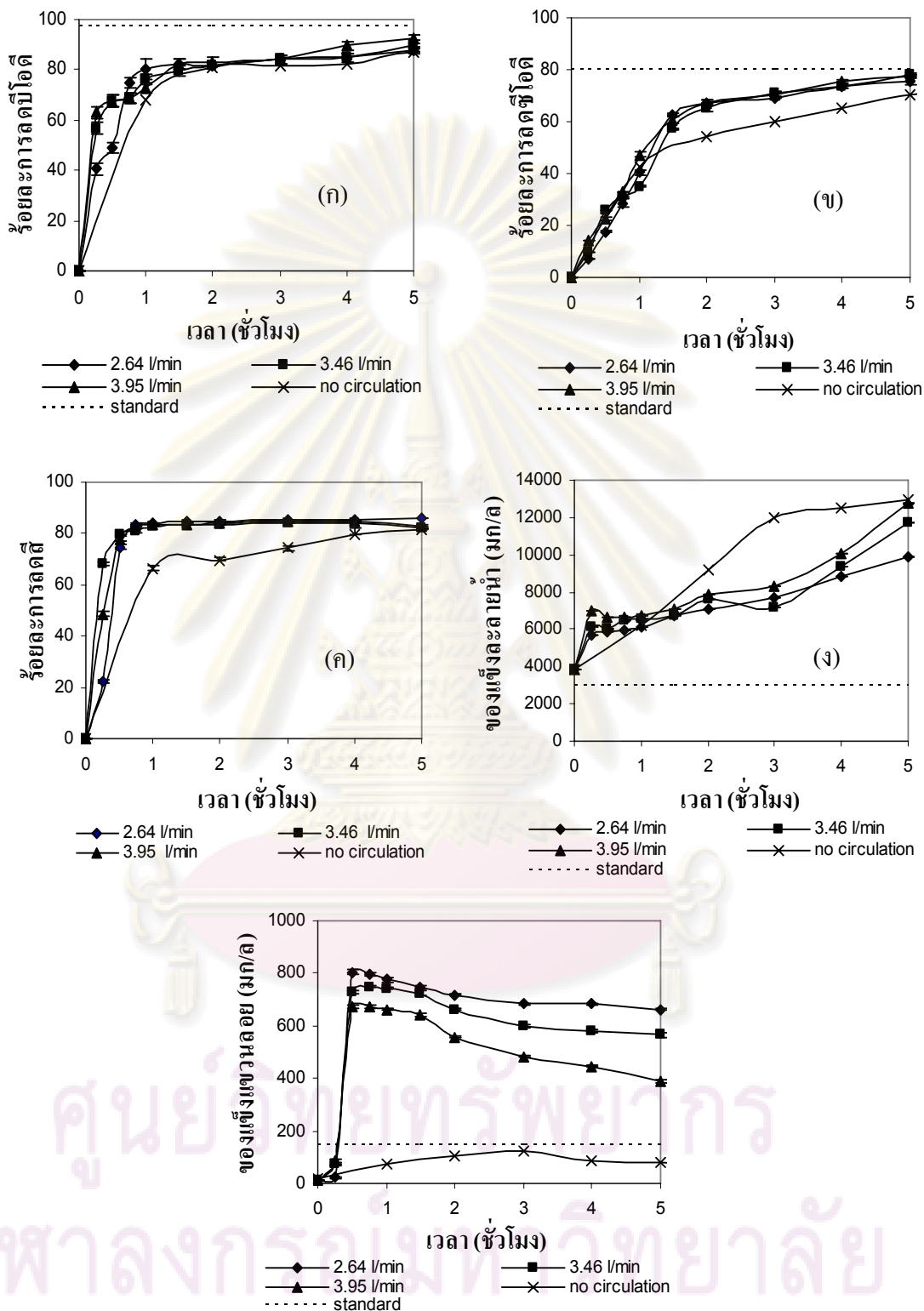
ภาพที่ 4.5 ร้อยละการกำจัดมลพิษของค่า (ก) บีโอดี (ข) ซีโอดี (ค) ที (ง) ของแข็งละลายน้ำ และ (จ) ของแข็งแขวนลอย กับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่อัตราการทำงานน้ำเสียต่างๆ

ระหว่างร้อยละการลดลงของบีโอดี ซีโอดี และสีกับเวลาที่ค่าการเจือจางต่างๆ พบว่าการเจือจางจะมีผลต่อการลดค่าบีโอดีเพียงเล็กน้อย โดยการเจือจางในช่วง 10-100 เท่า สามารถลดค่าบีโอดีได้ถึงร้อยละ 80 ในเวลา 2 ชั่วโมง ส่วนค่าซีโอดีและสีในช่วงอัตราการเจือจางเท่ากับ 10-100 เท่า พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่าซีโอดีเพิ่มขึ้นร้อยละ 72 76 และ 78 ตามลำดับ ส่วนค่าสีเพิ่มขึ้นร้อยละ 80 87 และ 89 ตามลำดับ ในเวลา 7 ชั่วโมง จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าร้อยละของการกำจัดสารมลพิษที่อัตราการเจือจางน้ำเสีย  $10 < 50 < 100$  เท่า ทั้งนี้เนื่องจากที่อัตราการเจือจางสูงน้ำเสียจะมีความเข้มข้นของสารมลพิษต่ำทำให้ปริมาณโปรตอนที่เกิดขึ้นในระบบมีปริมาณเพียงพอ ที่จะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ต่างๆในน้ำเสียทำให้เกิดการตกตะกอนขึ้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการลดสารมลพิษในน้ำเสียที่อัตราการเจือจางสูงดีกว่าที่อัตราการเจือจางต่ำ สำหรับค่าของแข็งละลายน้ำซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.5 (ง) พบว่าทุกอัตราการเจือจางส่งผลให้ค่าของแข็งละลายน้ำเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นโดยเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 5 ชั่วโมง พบว่าค่าของแข็งละลายน้ำเพิ่มสูงมากกว่า 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อระยะเวลาผ่านไปสารอินทรีย์ในระบบจะมีการแตกตัวเพิ่มสูงขึ้น จึงส่งผลให้มีปริมาณไอออนในระบบสูง ส่วนค่าของแข็งแขวนลอยจะมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นในช่วงเวลาเริ่มต้นคือชั่วโมงที่ 3 และจะลดลงเมื่อเวลามากกว่า 3 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 4.5 (จ) การลดลงเมื่อเวลาผ่านไปนั้นเนื่องจากสารอินทรีย์ที่ชั่วโมงท้ายๆ อาจถูกออกซิไดซ์จนเหลืออยู่น้อยในระบบ โดยหลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 3 ชั่วโมง ลดลงเหลือประมาณ 32.5-115.0 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการทดลองในส่วนนี้พบว่าร้อยละการลดลงของสารมลพิษที่อัตราการเจือจางเท่ากับ 50 และ 100 มีประสิทธิภาพสูงใกล้เคียงกัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้อัตราการเจือจางน้ำเสียเท่ากับ 50 เท่า และใช้เวลา 5 ชั่วโมงในการทดลองส่วนต่อไปเนื่องจากเป็นเวลาเข้าสู่ภาวะสมดุล

#### 4.2.1.2 ผลของอัตราการไหลวนของน้ำเสีย

การศึกษาอัตราการไหลวนของน้ำเสียเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารมลพิษจะทำการศึกษาที่อัตราการไหลวน 0-3.95 ลิตรต่อนาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1.90 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร อัตราการเจือจางน้ำเสียเท่ากับ 50 เท่า โดยน้ำเสียมีค่าบีโอดีเริ่มต้นเท่ากับ 1,800 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีโอดีเท่ากับ 2,592 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าสีเท่ากับ 20,613 หน่วยของแพลทินัม-โคบอลต์ ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำเริ่มต้นเท่ากับ 11.87 เวลาในการทดลอง 5 ชั่วโมง

ภาพที่ 4.6 (ก-ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของค่าบีโอดี ซีโอดี และสีกับเวลาที่อัตราการเจือจางต่างๆ โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการทดลองที่ไม่มีการไหลวนของน้ำเสียและที่มีการไหลวนของน้ำเสียพบว่าการไหลวนของน้ำเสียจะมีผลต่อการลดค่าซีโอดีและสีอย่าง



ภาพที่ 4.6 ร้อยละการกำจัดมลพิษของค่า (ก) บีโอดี (ข) ซีโอดี (ค) บีโอดี (ง) ของแข็งละลายน้ำ และ (จ) ของแข็งแขวนลอย กับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่อัตราการไหลวนของน้ำเสียต่างๆ



มีนัยสำคัญ จะเห็นได้จากที่อัตราการไหลวนของน้ำเสียเท่ากับ 2.64 ลิตรต่อนาที สามารถลดค่าซีโอดีและสีได้สูงกว่าที่ไม่มีการไหลวนของน้ำเสียถึงร้อยละ 12 และร้อยละ 18 ตามลำดับ ในเวลา 2 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากภาวะที่มีอัตราการไหลวนของน้ำเสียส่งผลให้มีการถ่ายเทของมวลสารในระบบ ทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ในน้ำเสียเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาและมีการสัมผัสกับโปรตอนและไฮดรอกไซด์แรดิคัลที่ผลิตขึ้นที่ฝั่งแอโนด ทำให้เกิดการตกตะกอนและการออกซิไดซ์ของสารอินทรีย์ต่างๆ ในน้ำเสียขึ้น อย่างไรก็ตามการไหลวนหรือการไม่ไหลวนของน้ำเสียจะมีผลต่อร้อยละการลดลงของค่าบีโอดีเพียงเล็กน้อยโดยสามารถลดได้ร้อยละ 80 ในเวลา 2 ชั่วโมง และเมื่อพิจารณาถึงการไหลวนของน้ำเสียที่อัตรา 2.64-3.95 ลิตรต่อนาที พบว่าทุกอัตราการไหลวนของน้ำเสียให้ผลไม่แตกต่างกันต่อการลดสารมลพิษในน้ำเสีย โดยสามารถลดค่าบีโอดี ค่าซีโอดี และสีได้ประมาณร้อยละ 84 70 และ 84 ตามลำดับ ในเวลา 3 ชั่วโมง แต่เมื่อพิจารณาปริมาณของแข็งละลายน้ำและของแข็งแขวนลอยในระบบพบว่าค่าของแข็งละลายน้ำสูงขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.6 (ง) เนื่องจากในระบบจะมีการแตกตัวของไอออนอยู่ตลอดเวลา ส่วนค่าของแข็งแขวนลอยจะมีปริมาณของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้นในชั่วโมงต้นๆ และลดลงในเวลาต่อมา โดยที่เวลา 5 ชั่วโมงค่าของแข็งแขวนลอยจะลดลงเหลือประมาณ 390-663 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองสามารถกล่าวได้ว่าอัตราการไหลวนของน้ำเสียในช่วง 2.64-3.95 ลิตรต่อนาที จะให้ผลในการกำจัดสารมลพิษในน้ำเสียไม่ต่างกัน แต่การไหลวนของน้ำเสียทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียดีกว่าระบบที่ไม่มี การไหลวน ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกอัตราการไหลวนเท่ากับ 3.46 ลิตรต่อนาที ไปใช้ในการทดลองส่วนต่อไป

#### 4.2.1.3 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

การทดลองในส่วนนี้จะศึกษาถึงกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดสารมลพิษออกจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษ โดยทำการทดลองผ่านกระแสไฟฟ้าในช่วง 1.5-3 แอมแปร์ หรือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1.90-3.80 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร อัตราการไหลวนของน้ำเสียเท่ากับ 3.46 ลิตรต่อนาที และอัตราการเจือจางน้ำเสียเท่ากับ 50 เท่า โดยค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำเริ่มต้นเท่ากับ 11.87 เวลาในการทดลอง 5 ชั่วโมง โดยน้ำเสียเริ่มต้นมีค่าบีโอดีเท่ากับ 1,800 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีโอดีเท่ากับ 2,592 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าสีเท่ากับ 20,613 หน่วยของแพลทินัม-โคบอลต์ จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.7 (ก-ค) พบว่าร้อยละของการลดค่าบีโอดี ซีโอดี และสี เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยที่เวลา 3 ชั่วโมงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วง 1.90-2.53 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร สามารถลดค่าบีโอดี ซีโอดี และสีได้ร้อยละ 82-91 70-76 และ 84-92 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากที่ความหนาแน่น

กระแสไฟฟ้าสูง ระบบจะมีการผลิตโปรตอนและสารจะออกซิไดซ์ได้มากตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday 's law) จึงสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ต่างๆ ในน้ำเสียได้สูงขึ้นดังนั้นสารมลพิษในน้ำเสียจึงลดลง แต่อย่างไรก็ตามที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วง 3.16-3.80 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีและสีลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยที่เวลา 5 ชั่วโมง การลดค่าซีโอดีและสีลดลงจากร้อยละ 74 เหลือ 57 และร้อยละ 90 เหลือ 46 ตามลำดับ โดยการลดลงของร้อยละของการกำจัดสารมลพิษในน้ำเสียนั้น อาจมีสาเหตุมาจากที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงระบบจะมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน ทำให้ระบบมีอุณหภูมิสูงถึงประมาณ 50 องศาเซลเซียส (ภาคผนวก ง) ส่งผลให้สารอินทรีย์ในน้ำเสียที่เกิดการตกตะกอนแล้วละลายกลับคืนสู่ระบบอีกครั้งทำให้ปริมาณสารมลพิษในน้ำเสียเพิ่มสูงขึ้น (วิบูลย์ และคณะ, 2549) สำหรับปริมาณของแข็งละลายน้ำ (ภาพที่ 4.7 (ง)) พบว่าจะมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวจะเกิดการแตกตัวของโมเลกุลสารอินทรีย์ทำให้เกิดการตกตะกอนอยู่ตลอดเวลา จึงส่งผลให้ค่าของแข็งละลายน้ำเพิ่มสูงขึ้น (Ram และคณะ, 1999) ส่วนค่าของแข็งแขวนลอยในระบบพบว่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและลดลงเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 1 ชั่วโมงดังแสดงในภาพที่ 4.7 (จ) โดยค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วง 1.90-3.80 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร จะทำให้เกิดของแข็งแขวนลอยประมาณ 555-82.5 มิลลิกรัมต่อลิตรในเวลา 5 ชั่วโมง

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมจะพิจารณาจากค่าประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.6) (Rajkumar และคณะ, 2005) ภาพที่ 4.8 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้ากับเวลาที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ พบว่าที่เวลา 15 นาที และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 2.53 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร จะให้ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าสูงสุดในการกำจัดสารมลพิษในน้ำเสียประมาณร้อยละ 15 และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่าประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าจะลดลงเนื่องจากเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นทำให้ตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบไปเคลือบอยู่ที่ผิวของขั้วไฟฟ้า จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ ในน้ำเสียลดน้อยลงเช่นกัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าพบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำ ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าก็จะต่ำด้วยเนื่องจากที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำจะเกิดปฏิกิริยาจะดำเนินไปอย่างช้าๆ เพราะมีปริมาณไอออนถ่ายเทไปที่ขั้วไฟฟ้าได้เพียงพอกับปริมาณอิเล็กตรอนที่จะเกิดปฏิกิริยา ทำให้ระบบถูกควบคุมด้วยการถ่ายเทประจุและเมื่อให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยา ก็จะเร็วขึ้น แต่ในขณะเดียวกันเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นจนเกินค่าสูงสุดของการเกิดปฏิกิริยา กระแสไฟฟ้าส่วนเกินจะทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง (Bard และ Faulkner, 2001) เช่น การเกิดแก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทดหรือการ

เกิดออกซิเจนที่ขั้วแอโนด ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ให้กับระบบไม่ได้ถูกนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ในน้ำเสียเพียงอย่างเดียว จึงทำให้ค่าประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าลดลง ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 2.53 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม ซึ่งภาวะดังกล่าวสามารถลดค่าบีโอดี ซีโอดีและเอส 5 ได้ร้อยละ 93.82 และ 89 ตามลำดับ ในเวลา 5 ชั่วโมง โดยน้ำเสียหลังการบำบัดจะมีค่าซีโอดี ของแข็งแขวนลอยกับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่อัตราการไหลวนของน้ำเสียต่างๆ และค่าของแข็งแขวนลอยผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง ส่วนค่าของแข็งละลายน้ำพบว่ายังสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานประมาณ 3 เท่า

$$CE(\%) = \frac{(COD)_t - (COD)_{t+\Delta t}}{8I\Delta t} \cdot FI100 \quad (4.6)$$

$COD_t$  = ปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เวลา  $t$  ชั่วโมง (มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร)

$COD_{t+\Delta t}$  = ปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เวลา  $t+\Delta t$  ชั่วโมง (มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร)

$F$  = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (คูลอมบ์ต่อโมลของออกซิเจน)

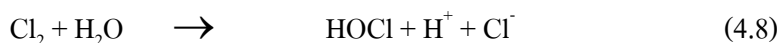
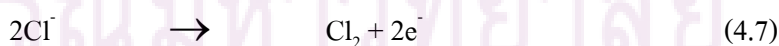
$L$  = ปริมาตรของอิเล็กโทรไลต์ (ลิตร)

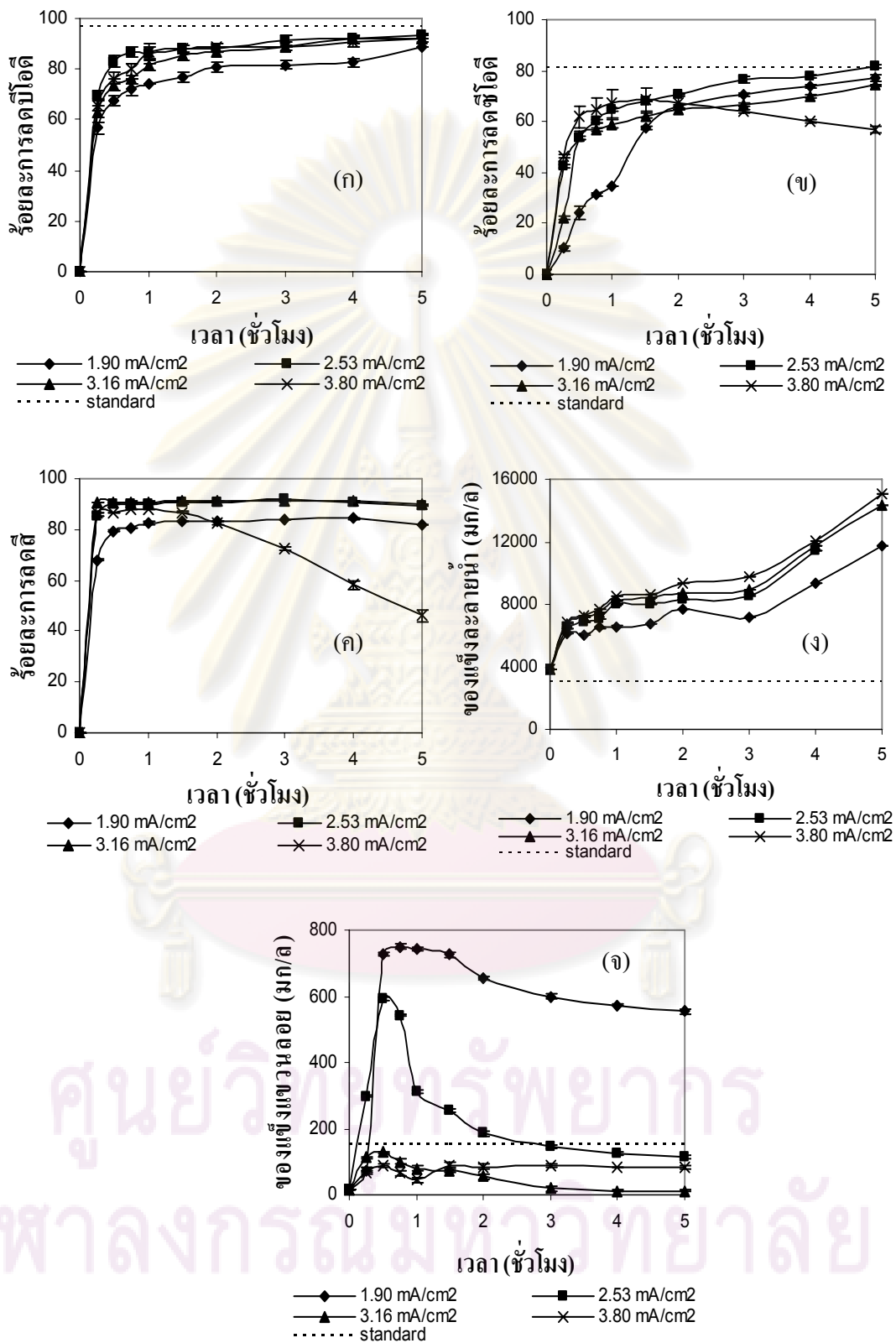
$I$  = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

$\Delta t$  = เวลาที่เปลี่ยนไป (ชั่วโมง)

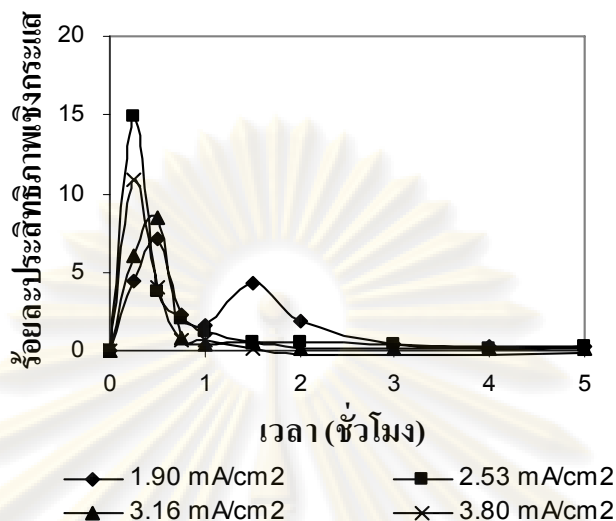
#### 4.2.1.4 ความเข้มข้นของสารเติมแต่ง

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดสารมลพิษต่างๆ ในน้ำเสีย ในหัวข้อนี้จะศึกษาผลของความเข้มข้นของสารเติมแต่งโดยสารที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ โซเดียมคลอไรด์ เนื่องจากมีราคาถูกและมีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ดี (Rajkumar และคณะ, 2005) โดยปฏิกิริยาเกิดขึ้นแสดงสมการที่ (4.7)-(4.9) ตามลำดับ



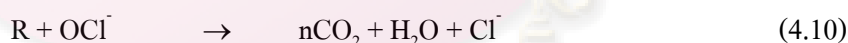


ภาพที่ 4.7 ร้อยละการกำจัดมลพิษของค่า (ก) บีโอดี (ข) ซีโอดี (ค) ดี (ง) ของแข็งละลายน้ำ และ (จ) ของแข็งแขวนลอย กับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ



ภาพที่ 4.8 ร้อยละการกำจัดมลพิษของประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าระดับต่างๆ

เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับระบบจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของคลอไรด์ไอออนได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคลอรีนที่สามารถละลายน้ำอยู่ในรูปของไฮโปคลอไรต์ (HOCl) ซึ่งสามารถแตกตัวเป็นไฮโปคลอไรต์ไอออน โดยไฮโปคลอไรต์ไอออนที่เกิดขึ้นในระบบจะมีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์เช่นเดียวกับไฮดรอกไซด์เรดิคัลจึงสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ดังปฏิกิริยา 4.10 ทำให้น้ำเสียมีสารมลพิษลดลง

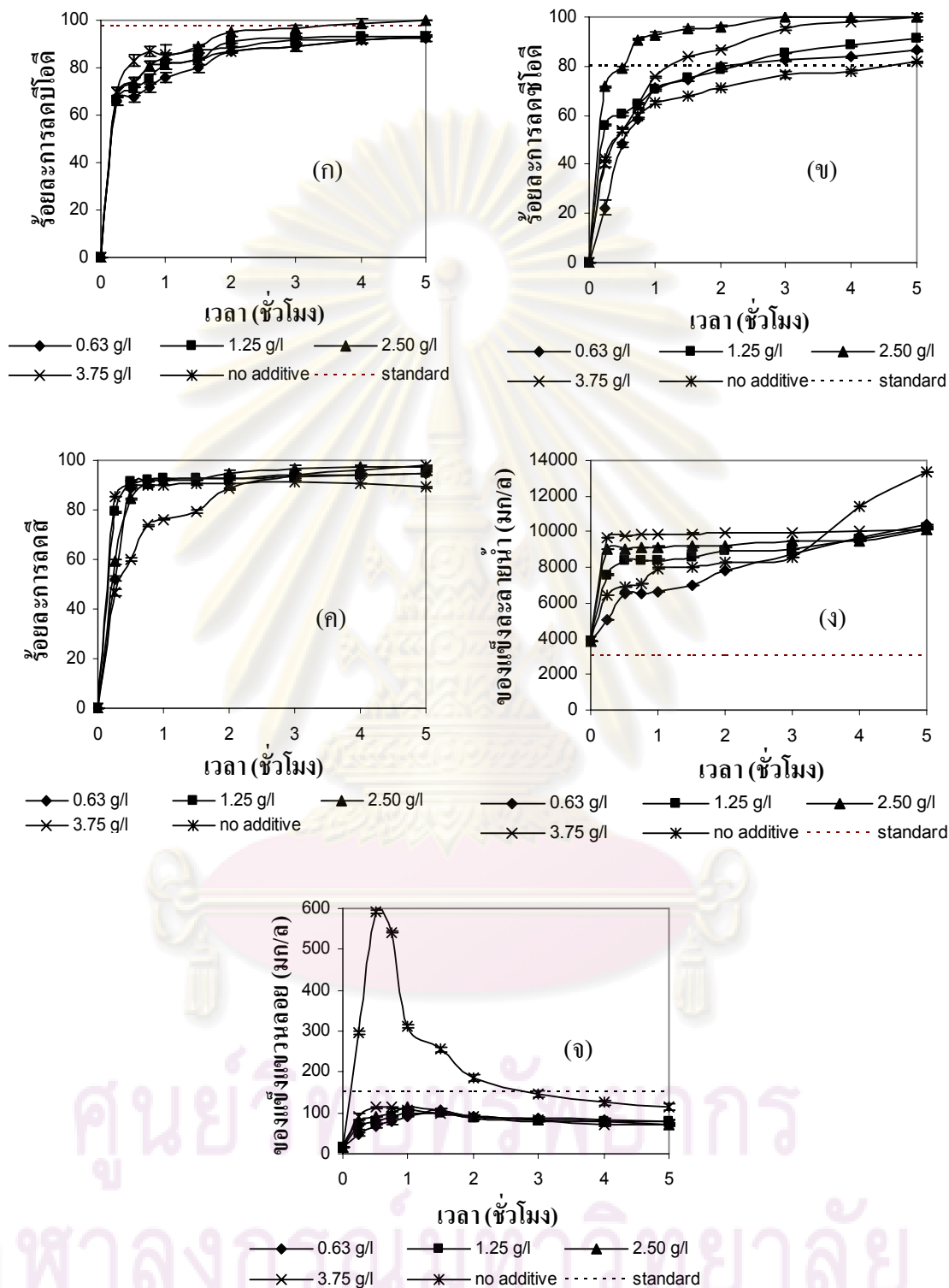


ในการทดลองศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในช่วง 0-3.75 กรัมต่อลิตร ทำการทดลองผ่านกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2.53 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร อัตราการไหลวนของน้ำเสียเท่ากับ 3.46 ลิตรต่อนาที ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำเริ่มต้นเท่ากับ 11.87 ใช้เวลาในการทดลอง 5 ชั่วโมง โดยน้ำเสียที่ใช้มีค่าบีโอดีเท่ากับ 2,160 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีโอดีเท่ากับ 2,752 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าสีเท่ากับ 30,100 หน่วยของแพลทินัม-โคบอลต์ ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.9 (ก-ค) พบว่าการเติมโซเดียมคลอไรด์ลงไปให้น้ำเสียจะส่งผลต่อการลดค่าบีโอดีและค่าซีโอดีอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์จาก 0 ไป 2.50 กรัมต่อลิตร พบว่าการลดค่าบีโอดีเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 92 ไป 98 ส่วนการลดค่าซีโอดีเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 77 ถึงร้อยละ 100 ในเวลา 3 ชั่วโมง สำหรับค่าสีพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดทั้งนี้เนื่องจากคลอไรด์

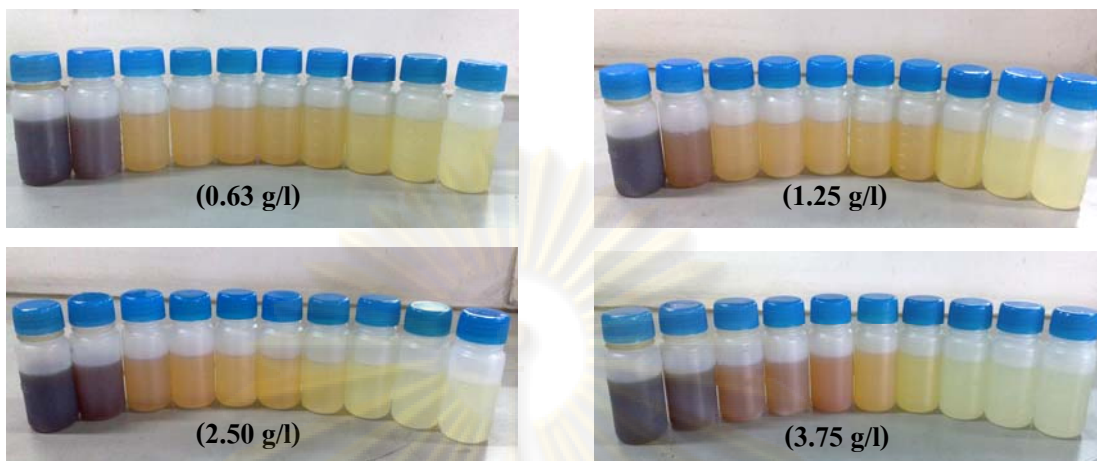
ไอออนนั้นมีสมบัติในการฟอกสีจึงส่งผลให้ลักษณะสีของน้ำเสียหลังทำการทดลองมีลักษณะใสขึ้น (El-Ashtouky และคณะ, 2008) ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไปสีของน้ำเสียจะเปลี่ยนจากสีคากดำไปเป็นสีที่ค่อนข้างใสใช้เวลา 5 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 4.10 โดยที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 2.50 และ 3.75 กรัมต่อลิตร ให้ผลใกล้เคียงกันโดยสามารถลดสีได้สูงสุดประมาณร้อยละ 97 ส่วนที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 0.63 และ 1.25 กรัมต่อลิตร ให้ผลต่อการลดสีได้ใกล้เคียงกันโดยลดได้ประมาณร้อยละ 94 จากผลการทดลองข้างต้นพบว่าค่าบีโอดีที่ผ่านมาตรฐานใช้ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 2.50 กรัมต่อลิตร ที่เวลา 3 ชั่วโมง ส่วนค่าซีโอดีพบว่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในช่วง 2.50-3.75 กรัมต่อลิตร ที่เวลา 2 ชั่วโมง สามารถลดค่าซีโอดีได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง

สำหรับค่าของแข็งละลายน้ำซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.9 (ง) พบว่าที่ทุกความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่เติมลงไป ในน้ำเสีย จะทำให้ปริมาณของแข็งละลายน้ำเพิ่มขึ้นจากปริมาณของแข็งละลายน้ำเริ่มต้น โดยจะมีของแข็งละลายน้ำอยู่ประมาณ 3,800-10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนการทดลองที่ไม่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ลงไป พบว่าจะทำให้เกิดปริมาณของแข็งละลายน้ำที่สูงกว่าภาวะที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์โดยสูงมากกว่า 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 4 ของการทำงาน เพราะภาวะที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เป็นไฮโปคลอไรต์ ซึ่งจัดได้ว่าเป็นตัวออกซิไดซ์สารอินทรีย์ต่างๆ ได้ดีจึงส่งผลให้สารมลพิษในน้ำเสียลดลง (Chen, 2004) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าของแข็งแขวนลอยในระบบที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ทุกความเข้มข้นจะให้ผลการทำงานที่ไม่แตกต่างกันโดยหลังจากเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมงปริมาณของแข็งแขวนลอยลดลงเหลือประมาณ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาพที่ 4.9 (จ)) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับภาวะที่ไม่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ลงไป ในน้ำเสียพบว่า การทดลองที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ลงไป ในน้ำเสียจะส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการลดค่าของแข็งแขวนลอยได้สูงกว่า

จากผลการทดลองจะพบว่าภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองนี้คือความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 2.50 กรัมต่อลิตร โดยที่เวลา 3 ชั่วโมงทำให้ค่าบีโอดี ซีโอดี และของแข็งแขวนลอยมีค่าผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง (ภาคผนวก ก) โดยลักษณะสีของน้ำเสียหลังการบำบัดแล้วพบว่า มีสีที่ไม่พึงรังเกียจ ลักษณะสีค่อนข้างจะใส ส่วนค่าของแข็งละลายน้ำพบว่ายังสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง ประมาณ 3 เท่า เนื่องจากในระบบที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ลงในน้ำเสียนั้นจะทำให้เกิดการออกซิเดชันกับสารอินทรีย์ต่างๆ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคลอไรด์ไอออน จึงส่งผลให้ปริมาณไอออนในน้ำเสียเพิ่มขึ้น ค่าของแข็งละลายน้ำจึงสูงขึ้นเช่นกัน



ภาพที่ 4.9 ร้อยละการกำจัดมลพิษของค่า (ก) บิโอดี (ข) ซีโอดี (ค) สี (ง) ของแข็งละลายน้ำ และ (จ) ของแข็งแขวนลอย กับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆ



ภาพที่ 4.10 สีของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยการเติมสาร โซเดียมคลอไรด์ลงไป ในน้ำเสียที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

#### 4.2.2 การบำบัดน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

การทดลองการบำบัดน้ำเสียแบบต่อเนื่องของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษจะดำเนินการโดยใช้ภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองแบบกะคือ อัตราการเจือจางน้ำเสียเท่ากับ 50 เท่า อัตราการไหลวนของน้ำเสียเท่ากับ 3.46 ลิตรต่อนาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2.53 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 0.0428 โมลต่อลิตร โดยในการทดลองจะมีปั๊มดูดจ่ายน้ำตัวอย่างจากถังพักเพื่อป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ ตัวแปรที่จะศึกษาคือ อัตราการไหลของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 240 270 และ 300 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง โดยในการทดลองจะเริ่มจากการทำงานแบบกะประมาณ 3 ชั่วโมง จากนั้นจะเริ่มป้อนน้ำเสียจากถังเก็บเข้าสู่ระบบและทำการทดลองจนระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล

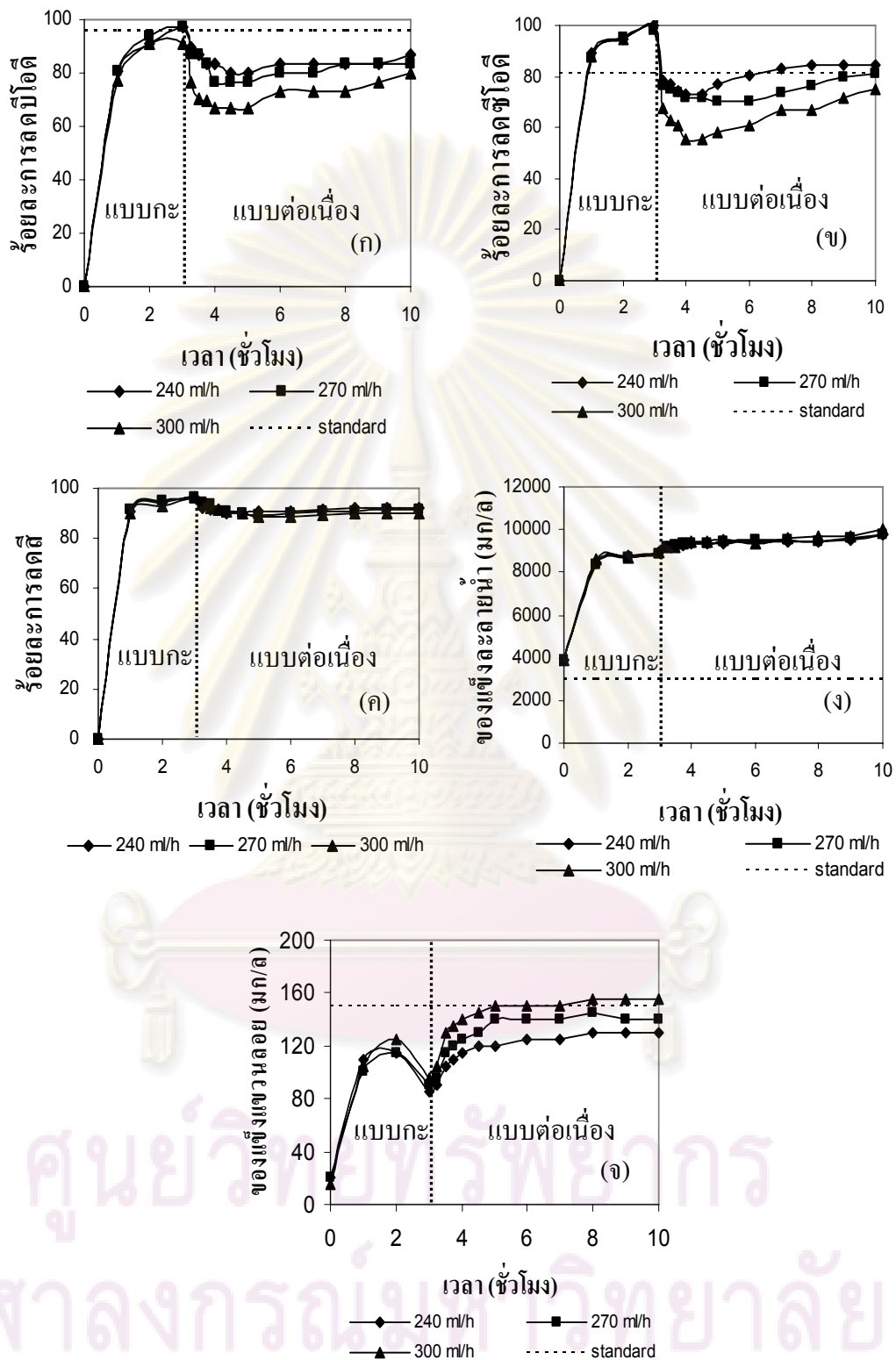
ภาพที่ 4.11 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสารมลพิษกับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ ของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ ผลการทดลองพบว่า การป้อนน้ำเสียเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ที่อัตราการไหลต่างๆ จะมีผลต่อการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียเล็กน้อย โดยเมื่อป้อนน้ำเสียเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ที่อัตราการไหลต่ำๆ จะทำให้สามารถลดสารมลพิษในน้ำเสียได้สูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลที่ต่ำๆ สารอินทรีย์ในระบบมีโอกาสทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์-แรดิคัล หรือ ไฮโปคลอไรต์ไอออน (OCI) ได้มากขึ้นจึงทำให้สารมลพิษในน้ำเสียลดลง จากผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.11 (ก-ค) พบว่าหลังจากเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่เริ่มป้อนน้ำเสียเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์จะทำให้ร้อยละของการลดสารมลพิษในน้ำเสียลดลงทันที แต่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ร้อยละการลดลงของสารมลพิษจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งคงที่ที่เวลา 7 ชั่วโมง โดย



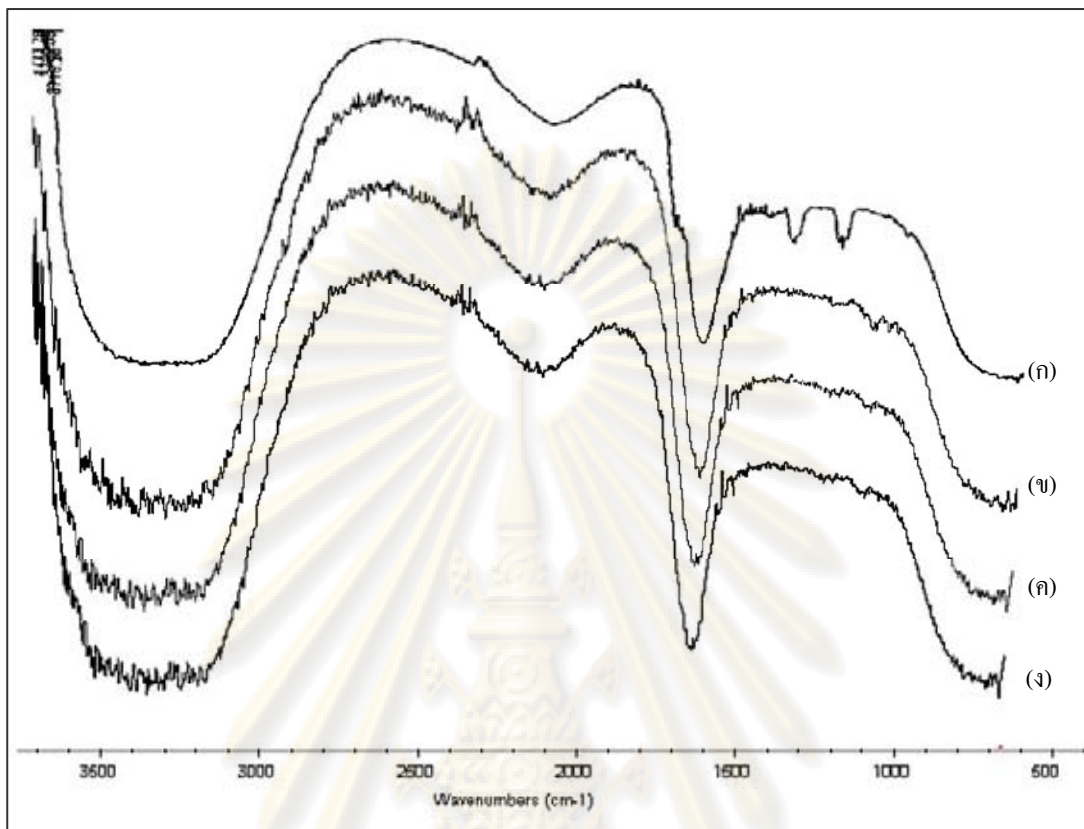
สามารถลดค่าบีโอดี ซีโอดี และสีได้ถึงร้อยละ 83 83 และ 92 ตามลำดับ สำหรับค่าของแข็งละลาย น้ำและของแข็งแขวนลอยหลังจากทำการบำบัดน้ำเสียแล้ว พบว่าทุกอัตราการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ เครื่องปฏิกรณ์ให้ผลไม่แตกต่างกันมากนักต่อการลดสารมลพิษในน้ำเสีย โดยค่าของแข็งละลายน้ำ (ภาพที่ 4.11 (ง)) ที่อัตราการไหลเท่ากับ 240 270 และ 300 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนคงที่ในเวลา 7 ชั่วโมง ซึ่งจะมีของแข็งละลายน้ำในน้ำเสียหลังการบำบัดแล้วเท่ากับ 9,465 9,535 และ 9,610 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ส่วนปริมาณของแข็งแขวนลอยจะมีแนวโน้ม เพิ่มขึ้นจากเวลาเริ่มต้นและลดลงต่ำสุดในเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นเมื่อจ่ายน้ำเสียเข้าสู่เครื่อง ปฏิกรณ์ส่งผลให้ค่าของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนคงที่ที่เวลา 5 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพ ที่ 4.11 (จ) โดยที่เวลาดังกล่าวจะมีปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียหลังการบำบัดแล้วเท่ากับ 120 140 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

จากการทดลองการบำบัดน้ำเสียแบบต่อเนื่อง พบว่าระบบจะเข้าสู่ภาวะสมดุลภายใน 7 ชั่วโมง ซึ่งน้ำที่ผ่านการบำบัดมาแล้วจะมีสีค่อนข้างใส ไม่พึงรังเกียจ มีค่าซีโอดีและค่าของแข็งแขวนลอยผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง ส่วนค่าบีโอดีสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานประมาณ 3.2 เท่า ซึ่ง จากวิเคราะห์น้ำเสียเริ่มต้นมีค่าบีโอดีต่อซีโอดีเท่ากับ 0.69 และเมื่อทำการบำบัดน้ำเสียแล้วพบว่าค่า บีโอดีต่อซีโอดีลดลงเหลือ 0.58 แสดงให้เห็นว่าระบบมีประสิทธิภาพในการลดสารมลพิษแต่ก็ยังมี ค่าบีโอดีที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน เนื่องจากน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งลักษณะนั้นจะย่อยสลายได้ยากทางชีวภาพจึงส่งผลให้มีค่าบีโอดียังสูงอยู่ ส่วนค่าของแข็งละลาย น้ำพบว่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน 3.1 เท่า เนื่องจากในระบบนั้น ไอออนจะมีการแตกตัวอยู่ตลอดเวลา

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในน้ำเสียด้วยเครื่อง FTIR พบว่าน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อ และกระดาษก่อนทำการบำบัดซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.12 (ก) จะปรากฏพีกในช่วงความยาวคลื่น 2,700-3,600  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงหมู่ -OH พีกที่ความยาวคลื่น 1,698  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงหมู่คาร์บอนิลแต่พบเพียง เล็กน้อย พีกที่ความยาวคลื่น 1,640 และ 1,530  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงโครงสร้างของวงแอโรแมติก และพีกที่ ความยาวคลื่น 1,366 และ 1,216  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงหน่วยย่อยของลิกนินคือ Syringyl ส่วนภาพที่ 4.12 (ข)-(ค) เป็นน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยพีกในช่วงความยาวคลื่น 2,700-3,600  $\text{cm}^{-1}$  จะ แสดงถึงหมู่ -OH พีกที่ความยาวคลื่น 1,698  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงหมู่คาร์บอนิลแต่พบเพียงเล็กน้อยเช่นกัน โดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบทางตรง ทาง อ้อม และแบบต่อเนื่องพบว่ากระบวนการบำบัดน้ำเสียทั้งสามมีประสิทธิภาพดีในการลดสารมลพิษ ในน้ำเสียเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียก่อนทำการบำบัด โดยจะเห็นได้ว่าพีกที่ความยาวคลื่น 1,366 และ 1,216  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นสารอนุพันธ์ของลิกนินที่เป็นองค์ประกอบหลักในน้ำเสียจากอุตสาหกรรม ประเภทนี้มีปริมาณลดลงอย่างเห็นได้ชัด (โครงสร้างของลิกนินแสดงในภาคผนวก ง)



ภาพที่ 4.11 ร้อยละการกำจัดมลพิษของ (ก) บีโอดี (ข) ซีโอดี (ค) ที (ง) ของแข็งละลายน้ำ และ (จ) ของแข็งแขวนลอย กับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่อัตราการไหลต่างๆ ของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ในการบำบัดแบบต่อเนื่อง



ภาพที่ 4.12 FTIR spectra ของน้ำเสี้ยวจากอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษ (ก) ก่อน และ (ข) หลังการบำบัดด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบทางตรง (ค) ทางอ้อม และ (ง) แบบต่อเนื่อง

#### 4.3 ต้นทุนในการดำเนินงาน

ต้นทุนในการดำเนินงานการบำบัดน้ำเสี้ยวจากอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษจะพิจารณาจากค่าใช้จ่ายเนื่องจากกระแสไฟฟ้า สารเคมี และค่าใช้จ่ายในการจัดการตะกอนที่เกิดขึ้นเป็นหลัก ตารางที่ 4.2 แสดงถึงต้นทุนในการดำเนินงานที่ภาวะที่เหมาะสมของทุกการทดลอง (วิธีคำนวณแสดงในภาคผนวก ค) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบการบำบัดน้ำเสี้ยวด้วยวิธีเคมี เคมีไฟฟ้าแบบทางตรง และเคมีไฟฟ้าแบบทางอ้อม พบว่าการบำบัดด้วยวิธีเคมีจะมีค่าใช้จ่ายในการฝังกลบตะกอนสูงสุดเท่ากับ 0.93 บาทต่อลูกบาศก์เมตรน้ำเสี้ยว สำหรับค่าสารเคมีที่ใช้ในการทดลองพบว่าการบำบัดน้ำเสี้ยวด้วยวิธีเคมีจะมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการบำบัดน้ำเสี้ยวด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบทางอ้อม เนื่องจากสารเคมีที่ใช้ในวิธีดังกล่าวมีราคาต่ำกว่าจึงส่งผลให้ค่าใช้จ่ายเนื่องจากสารเคมีน้อยกว่าเช่นกัน สำหรับค่ากระแสไฟฟ้าพบว่าการบำบัดน้ำเสี้ยวด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบทางตรงจะมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการบำบัดน้ำเสี้ยวด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบทางอ้อมอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากวิธีดังกล่าวจะใช้ศักย์ไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสี้ยวสูงกว่าจึงส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายเนื่องจากกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นเช่นกัน ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า

วิธีการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบทางตรงจะใช้ต้นทุนในการดำเนินงานต่ำที่สุดเท่ากับ 222 บาทต่อลูกบาศก์เมตรน้ำเสีย หรือ 138 บาทต่อกิโลกรัมของค่าซีโอดี แต่ทั้งนี้สมบัติของน้ำเสียหลังการบำบัดมาแล้วยังสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด ส่วนการบำบัดด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบทางอ้อมที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ลงไปให้น้ำเสีย พบว่าจะมีต้นทุนในการบำบัดสูงถึง 651 บาทต่อลูกบาศก์เมตร หรือ 314 บาทต่อกิโลกรัมของค่าซีโอดีซึ่งสูงกว่าการบำบัดด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบทางตรงถึง 3 เท่า แต่อย่างไรก็ดีการบำบัดด้วยวิธีดังกล่าวจะทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีคุณภาพดีกว่าและมีค่าบีโอดี ซีโอดี และของแข็งแขวนลอยผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน

สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนในการดำเนินงานของการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบต่อเนื่องจะพิจารณาจากภาวะที่เหมาะสมจากการทดลอง โดยอัตราการป้อนน้ำเสียเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ที่เหมาะสมคือ 240 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง โดยใน 1 หน่วยชั่วโมงพบว่ามีตะกอนเกิดขึ้นประมาณ  $7.8 \times 10^{-3}$  กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็นค่าใช้จ่ายเท่ากับ  $1.95 \times 10^{-2}$  บาทต่อกิโลกรัมของตะกอน โดยเมื่อพิจารณาจากค่าใช้จ่ายทั้งหมดแล้วพบว่าใน 1 ชั่วโมงจะมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียประมาณ 290 บาทต่อลูกบาศก์เมตร หรือ 172 บาทต่อกิโลกรัมของค่าซีโอดี ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้พบว่ามีประสิทธิภาพดีต่อการลดค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอย เป็นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 ต้นทุนที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยที่ภาวะที่เหมาะสมจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีต่างๆ

รายการ	วิธีการบำบัดน้ำเสีย									
	เคมี		เคมีไฟฟ้าแบบทางตรง		เคมีไฟฟ้าแบบทางอ้อม			เคมีไฟฟ้าโดยทดลองแบบต่อเนื่อง		
	สารเคมี (149.8 บาทต่อ ลิตร)	ค่าฝัง กลบ (2.5 บาท/ กก. ของ ตะกอน)	ค่าฝัง กลบ (2.5 บาท/ กก.ของ ตะกอน)	ค่าไฟฟ้า (2.5 บาท ต่อ กิโลวัตต์ ชั่วโมง)	ค่าฝังกลบ (2.5 บาท/ กก.ของ ตะกอน)	ค่าไฟฟ้า (2.5 บาท ต่อ กิโลวัตต์ ชั่วโมง)	สารเคมีแต่ง (192.6 บาท ต่อกิโลกรัม)	ค่าฝังกลบ (2.5 บาท/กก. ของตะกอน)	ค่าไฟฟ้า (2.5 บาทต่อ กิโลวัตต์ ชั่วโมง)	สารเคมีแต่ง (192.6 บาท ต่อกิโลกรัม)
ข้อมูล	2000 มล./ ลบ.ม	0.37 กก./ลบ.ม	0.24 กก./ลบ.ม	88.5 กิโลวัตต์ ชั่วโมง/ ลบ.ม	0.15 กก./ลบ.ม	67.5 กิโลวัตต์ ชั่วโมง/ ลบ.ม	2.5 กก./ลบ.ม	$7.8 \times 10^{-3}$ กก./ลบ.ม	79.2 กิโลวัตต์ ชั่วโมง/ลบ.ม	0.48 กก./ลบ.ม
ราคา (บาท/ลบ.ม)	299.6	0.93	0.60	221	0.38	169	482	$1.95 \times 10^{-2}$	198	92.4
รวม (บาท/ลบ.ม)	300.5		222		651			290		
ราคา (บาท/ กก. ซีโอดี)	552		138		314			172		

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

จากการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมี โดยการปรับค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำเสียด้วยกรดซัลฟิวริก พบว่าค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยกระบวนการนี้คือ ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำเสียเท่ากับ 2 โดยสามารถลดค่าบีโอดี ซีโอดี และสี ได้สูงถึงร้อยละ 80 42 และ 94 ตามลำดับ และมีต้นทุนในการดำเนินงาน 300.5 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งน้ำเสียหลังทำการบำบัดแล้วพบว่ายังไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของประเทศไทย โดยมีค่าบีโอดีและค่าซีโอดีสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งประมาณ 2 และ 3 เท่า ตามลำดับ โดยลักษณะสีของน้ำเสียหลังการบำบัดแล้วพบว่ามียีสก่อนข้างใส ไม่น่ารังเกียจ

สำหรับการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบมีเชื้อเลือกผ่านชนิดไอออนลบ พบว่ากระบวนการนี้มีประสิทธิภาพดีในการลดสารมลพิษในน้ำเสีย ซึ่งวิธีการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพสูงคือ วิธีการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบทางอ้อมโดยการเติมโซเดียมคลอไรด์ลงไปลงในน้ำเสีย ซึ่งภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยกระบวนการนี้คือ อัตราการเจือจางน้ำเสียเท่ากับ 50 เท่า อัตราการไหลวนน้ำเสียเท่ากับ 3.46 ลิตรต่อนาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2.53 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 2.50 กรัมต่อลิตร โดยสามารถลดค่าบีโอดี ค่าซีโอดี และสีได้ประมาณร้อยละ 90-100 ที่เวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งจากการวิเคราะห์ต้นทุนในการดำเนินงานพบว่าวิธีการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบทางอ้อมมีต้นทุนในการดำเนินงานประมาณ 651 บาทต่อลูกบาศก์เมตร โดยสามารถกำจัดสารมลพิษในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของประเทศไทยยกเว้นค่าของแข็งละลายน้ำ และเมื่อนำผลการทดลองแบบกะไปประยุกต์ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง พบว่าอัตราการป้อนน้ำเสียเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ที่เหมาะสมคือ 240 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง โดยใช้ต้นทุนในการดำเนินงานเท่ากับ 290 บาทต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง สามารถลดค่าบีโอดี ซีโอดี และสีได้ถึงร้อยละ 83 83 และ 92 ตามลำดับ ในเวลา 7 ชั่วโมง ซึ่งน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วพบว่ามียีสโอดี และของแข็งแขวนลอยผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง ส่วนค่าบีโอดีและของแข็งละลายน้ำพบว่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานประมาณ 3.2 และ 3.1 เท่า ตามลำดับ โดยลักษณะสีของน้ำเสียหลังการบำบัดแล้วพบว่ามียีสก่อนข้างใส ไม่พึงรังเกียจ ซึ่งกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบต่อเนื่องนี้พบว่าสามารถกำจัดสารที่ย่อยสลายง่ายทางชีวภาพได้มีประสิทธิภาพสูงเช่นกัน ดังนั้นหากผู้ประกอบการจะนำวิธีการบำบัดน้ำเสียแบบต่อเนื่องมาประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมควรมี

การศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับวิธีการกำจัดสารมลพิษในน้ำเสียให้มีสมบัติผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง โดยอาจจะนำน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีดังกล่าวไปบำบัดต่อด้วยวิธีอื่นๆ ที่เหมาะสมต่อไป

#### ข้อเสนอแนะ

- ในขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนน้ำเสียโดยใช้กรดซัลฟิวริก จะเกิดฟองก๊าซจำนวนมากและมีกลิ่นเหม็น ดังนั้นหากนำไปใช้ในโรงงานควรมีการออกแบบระบบให้เหมาะสมเพื่อควบคุมกลิ่นที่เกิดขึ้น
- น้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษนี้มีลิกนินเป็นองค์ประกอบหลัก และเนื่องจากลิกนินสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง ดังนั้นควรมีการศึกษาต่อไปเพื่อการนำลิกนินนำไปใช้ประโยชน์ต่อ เช่น การนำไปผลิตเป็นวานิลิน (Vanilin) หรือสารประกอบฟีนอล เป็นต้น
- ควรมีการศึกษาต่อไปถึงวิธีการกำจัดค่าของแข็งละลายน้ำในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมประเภทนี้ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2542. การบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2 สยามสเตชันเนอรีซ์พบลายส์ กรุงเทพฯ. หน้า 120-177.
- ควบคุมมลพิษ, กรม. 2545. โครงการจัดทำดัชนีด้านสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร. กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.
- จิรภรณ์ อารยเมธาเลิศ. 2542. การกำจัดสีโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดควอร์เทอร์ไนซ์ โครอสต์ลิงก์เซลลูโลสที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บุญรัชต์ กิตยานันท์ และ รวิินทร์ พลานันทกุลธร. 2535. ซัลโฟเนชันของลิกโนเซลลูโลส. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. 2539. ฉบับที่ 3 ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงาน อุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539.
- ปิยะนันท์ สุวรรณเมณะ. 2539. อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ: เส้นทางและโอกาสการส่งออก และผลกระทบจากการมีเขตการค้าเสรีอาเซียน. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร. หน้า 5-22.
- เพ็ญศรี ทองนพเนื่อ. 2549. เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิชา พิชัยณรงค์. 2545. การแยกลิกนินออกจากน้ำดำในกระบวนการทำเยื่อกระดาษจากยูคาลิปตัส. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศุภเจตน์ ผ่องใส. 2547. การเตรียมลิกโนซัลโฟเนตจากลิกนินในน้ำดำของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบกราฟต์จากไม้ยูคาลิปตัส. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมี และวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สิทธิโชค คันชอทอง. 2548. การลดสีของน้ำเสียโรงงานเยื่อและกระดาษในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.



สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ, 2551. กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยไฟฟ้า. เอกสารตีพิมพ์ในวารสารเทคนิค ฉบับที่ 283 เดือนมกราคม.

สุบัณฑิต นิมรัตน์. 2548. จุลชีววิทยาของน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุรพงษ์ สุวจิตตานนท์. 2531. ไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry). กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.

### ภาษาอังกฤษ

Bard, A.J. and Faulkner, L.R. 2001. Electrochemical Method: Fundamental and Application. 2<sup>nd</sup> edition (n.p.): John Wiley & Sons.

Britt, K.W. 1970. Hand book of Pulp and Paper Technology. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Liton Educational Publishing, pp. 135-143.

Chakar, F.S. and Ragauskas, A.J. 2004. Review of current and future softwood kraft lignin process Chemistry. Industrial Crops and Products. 20: 131–141.

Chen G. 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment. Separation and Purification Technology 38: 11 - 44.

El-Ashtoukhy E.S.Z., Amin N.K. and Abdelwahab O. 2008. Treatment of paper mill effluents in a batch-stirred electrochemical tank reactor. Chemical Engineering Journal. *In press*

Hammel, K.E. 1995. Organopollutant degradation by lignolytic fungi. In Lily Y. Young and Carl E. Cerniglia. Microbial Transformation and Degradation of Toxic Organic Chemicals. New York: John wiley and sons. pp. 331-346.

Hans, J.R. and Peter, H.P. 1998. Electrodialysis for chloride removal from the chemical recovery cycle of a Kraft pulp mill. Journal of Membrane Science. 146: 249-261.

He Y.L., Geng X.L and Yang S.H. 1995. Sludge granulation in a UASB reactor for the treatment of soda-anthraquinone chemical wheat-straw pulp black liquor. Bioresource Technology. 51: 213-215.

Hunsom M. 2001. Recovery of copper, chromium and nickel from electroplating effluent by electrochemical technique. Doctoral Dissertation. Program in Chemical Technology Department of chemical technology Faculty of Science Chulalongkorn university, Bangkok, Thailand.

- Hunsom M., Pruksathorn K., Damronglerd S., Vergnes H. and Duverneuil P. 2005. Electrochemical treatment of heavy metals ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{6+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ) from industrial effluent and modeling of copper reduction. Water Research. 39: 610 - 616.
- Israilides C.J., Vlyssides A.G., Mourafeti V.N. and Karvouni G. 1997. Olive oil wastewater treatment with the use of an electrolysis system. Bioresource Technology. 61: 163 - 170.
- James P. and Cassey. 1980. Pulp and paper Chemistry and Chemical Technology. Volumn 1. Third Edition. New York: A Wiley-Interscience Publication.
- Katsumata, K.S., Maruyama, M. and Meshitsuka, G. 2001. Reduction of Aluminum to Radish by alkaline Oxygen Treated Kraft Lignin. Journal of wood Science. 47(2): 129-134.
- Leatham. 1986. The ligninolytic activities of *Lentinus edodes* and *Phanerocheate chrysoporum*. EEMS Microbial Letter. 24: 51-58.
- Loras V. 1980. Bleaching. In James P. Pulp and Paper. John wiley and sons, New York, 1(3): 633-702.
- Mohamed K., Sarra B.A., Semia C and Elimame E. 2003. Photodegradation of lignin from black liquor using a UV/TiO<sub>2</sub> system. Photochemistry and Photobiology. 154: 211–218.
- Prentice G. 1991. Electrochemical Engineering Principles (n.p.): Prentice – Hall.
- Rajkumar, D., Kim, J.G. and Palanivelu, K. 2005. Indirect Electrochemical oxidation of phenol in the presence of chloride or wastewater treatment. Chemical Engineering Technology. 28: 98-105.
- Ram B., Bajpai P.K. and Parwana H.K. 1999. Kinetics of chome-tannery effluent treatment by the activated-sludge system. Process Biochemistry 35: 255 - 265.
- Sangita B., Siddhartha D. and B. Chiranjib. 2006. Performance study during ultrafiltration of Kraft black liquor using rotating disk membrane module. Journal of cleaner production. 14: 497-504.
- Shirkolae, Y.Z., Rovshandeh, J.M., Charani, P.R. and Khajeheian, M.B. 2008. Influence of dimethyl formamide pulping of wheat straw on cellulose degradation and comparison with Kraft process. Bioresource Technology. 99: 3568–3578.
- Sun R.C., Tomkinson J. and Bolton J. 1999. Effects of precipitation pH on the physico-chemical properties of the lignins isolated from the black liquor of oil palm empty fruit bunch fibre pulping. Polymer Degradation and Stability. 63: 195-200.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

## มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรด-เบส (pH value)	5.5-9.0	pH Meter
2. ของแข็งละลายได้ (Total dissolved solids)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ไม่เกิน 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตรหรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร</li> <li>● น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตรหรือลงสู่ทะเลค่าของแข็งละลายได้ในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าของแข็งละลายได้ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร</li> </ul>	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103 - 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. สารแขวนลอย (Suspended solids)	ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตรหรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มิลลิกรัมต่อลิตร	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass fiber filter disc)

4. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส	เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะ ทำการเก็บตัวอย่างน้ำ
5. สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่ได้กำหนด
6. ซัลไฟด์ (Sulfide as H <sub>2</sub> S)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	ไทเทรต
7. ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร	กลั่นและตามด้วยวิธี Pyridine Barbituric Acid
8. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease )	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตรหรืออาจ แตกต่างกันในแต่ละประเภทของแหล่ง รองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของ โรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะ กรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 15 มิลลิกรัมต่อลิตร	สกัดด้วยตัวทำละลายแล้ว แยกหาน้ำหนักของน้ำมัน และไขมัน
9. ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Spectrophotometry
10. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	กลั่นและตามด้วยวิธี 4- Aminoantipyrine
11. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	Iodometric Method
12. สารที่ใช้ป้องกัน หรือกำจัดศัตรูพืชหรือ สัตว์ (Pesticide)	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่ กำหนด	Gas-Chromatography
13. ค่าบีโอดี (5 วัน ที่อุณหภูมิ 20 องศา เซลเซียส (Biochemical Oxygen Demand:BOD)	ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตรหรือ แตกต่างกันในแต่ละประเภทของแหล่ง รองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงาน อุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการ	Azide Modification ที่ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน

	ควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	
14. ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen)	ไม่เกิน 100 มิลลิกรัมต่อลิตรหรืออาจแตกต่างกันแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร	Kjeldahl
15. ค่าซีโอดี (Chemical oxygen demand : COD)	ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตรหรืออาจแตกต่างกันแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อลิตร	Potassium dichromate digestion
16. โลหะหนัก (Heavy metal)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	
16.1. สังกะสี (Zn)		
16.2. โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร	Atomic absorption Spectrophotometry ชนิด Direct
16.3. โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร	Aspiration หรือวิธี Plasma emission Spectroscopy ชนิด Inductively coupled
16.4. ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	plasma : ICP
16.5. แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร	
16.6. แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	
16.7. ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร	

16.8. นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	Atomic absorption Spectro photometry ชนิด Direct Aspiration หรือวิธี Plasma emission Spectroscopy ชนิด Inductively coupled plasma : ICP
16.9. แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	
16.10. อาร์เซนิก (As)	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร	
16.11. เซเลเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร	
16.12. ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร	- Atomic absorption cold vapour technique

แหล่งที่มา : ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

### การหาค่าคุณสมบัติของน้ำเสีย

#### 1. pH

วิธีวิเคราะห์: วิเคราะห์โดยตรงด้วยเครื่องวัดความเป็นกรด-เบส ยี่ห้อ Horiba รุ่น F-22

#### 2. การนำไฟฟ้า (Conductivity)

วิธีวิเคราะห์: วิเคราะห์โดยตรงด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า ยี่ห้อ CONSORT รุ่น C832

#### 3. สี (Color)

การวัดสีของน้ำเสีย วิธีการหนึ่งคือ การใช้วิธีเปรียบเทียบโดยใช้หลอดเนสเลอร์ (Nessler Tube) ซึ่งนำตัวอย่างที่ต้องการวัดสีจะถูกเปรียบเทียบกับสารละลายสีมาตรฐาน ที่ทราบความเข้มข้น ในการวัดสีครั้งนี้ใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Jasco รุ่น V-530 ในการหาความสำคัญระหว่างค่า Absorbance กับค่าหน่วยสีของสารละลายสีมาตรฐาน ซึ่งจะใช้เป็น Calibration curve ในการหาหน่วยสีของน้ำเสียที่ต้องการวัด

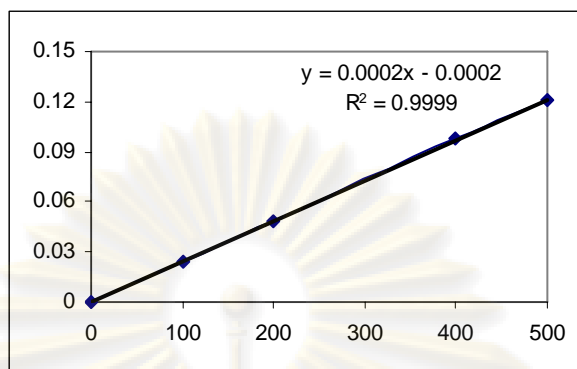
##### สารเคมีที่ใช้

สารละลายสีมาตรฐาน เตรียมโดยละลายโพแทสเซียมเฮกซะคลอโรโรแพลทินेट ( $K_2PtCl_6$ ) 1.246 กรัม และโคบอลต์ (II) คลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ( $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ ) 1.00 กรัม ในน้ำกลั่นซึ่งเติมกรดไฮโดรคลอริก 100 มิลลิลิตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ซึ่งจะได้สารละลายที่มีความเข้มข้นของสีเท่ากับ 500 หน่วย

##### วิธีวิเคราะห์

1. เตรียมอนุกรมสารละลายสีมาตรฐานที่มีสี 100 200 400 และ 500 หน่วย โดยทำการเจือจาง ปริมาตรสารละลายสีมาตรฐานด้วยน้ำกลั่นให้เป็นปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. นำอนุกรมสีทั้งหมดมาทำการวัด Absorbance ด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer โดยใช้ ความยาวคลื่นในการวัดคือ 465 นาโนเมตร





ภาพที่ ข (1) Calibration Curve ของการวัดสีด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer

#### 4. การวิเคราะห์หาของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)

ของแข็งที่แขวนลอยทั้งหมดหมายถึงส่วนของของแข็งที่เหลือค้างอยู่บนกระดาษกรองใยแก้วหลังจากการกรองน้ำตัวอย่างที่ทราบปริมาตรแน่นอน แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียสและทำให้เย็นใน โถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นคือน้ำหนักของของแข็งแขวนลอยทั้งหมดต่อปริมาตรตัวอย่างน้ำที่ใช้

##### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. โถดูดความชื้น (Desiccator)
2. ตู้อบ (Oven) ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 103 -105 องศาเซลเซียส
3. เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance) สามารถชั่งได้ถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง
4. กระดาษกรอง GF/C (Glass fiber filter) เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 เซนติเมตร
5. เครื่องดูดสุญญากาศ (Suction pump) พร้อมขวดดูดสุญญากาศ
6. ถ้วยระเหย (Evaporating dishes)

##### วิธีวิเคราะห์

1. นำกระดาษกรอง GF/C ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 - 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นใน โถดูดความชื้น
2. ชั่งน้ำหนักกระดาษกรอง GF/C สมมุติมีน้ำหนัก A กรัม

3. ต่อชุดเครื่องมือสำหรับกรอง ใช้ปากคีบกระดาษกรอง GF/C วางบนกรวยบุคเนอร์ เปิดเครื่องดูดสุญญากาศ ล้างกระดาษกรองด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง โดยใช้ครั้งละ 20 มิลลิลิตร เปิดเครื่องดูดสุญญากาศต่อให้คุดน้ำออกจนแห้ง ทิ้งน้ำล้างไป
4. เลือกปริมาตรตัวอย่างน้ำที่จะใช้ ซึ่งควรเลือกให้มีค่าของแข็งแขวนลอยที่คิดบนกระดาษกรองไม่เกิน 200 มิลลิกรัม และไม่ควรมากกว่า 1 มิลลิกรัมเมื่อเลือกปริมาตรแล้ว ทำการเขย่าตัวอย่างน้ำให้เข้ากันอย่างดี เทตัวอย่างน้ำที่ทราบปริมาตรลงกรองโดยค่อย ๆ เททีละน้อยอย่างต่อเนื่องจนหมด ใช้น้ำกลั่นชนิดล้างภาชนะที่ใช้ตวงตัวอย่างและน็ดน้ำกลั่นที่ด้านข้างของกรวยบุคเนอร์รวมทั้งบนกระดาษกรอง GF/C ปล่อยให้เครื่องดูดสุญญากาศคุดน้ำออกจนแห้ง ปิดเครื่อง
5. นำกระดาษกรองใยแก้วไปอบที่อุณหภูมิ 103 - 105 องศาเซลเซียส อย่างน้อยเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักกระดาษกรอง สมมุติมีน้ำหนัก B กรัม
6. ทำข้อ 5 ซ้ำ จนได้น้ำหนักคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักน้อยกว่าร้อยละ 4 ของน้ำหนักครั้งก่อน

#### การคำนวณ

$$\text{ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(B - A)}{C} \times 10^6$$

A = น้ำหนักกระดาษกรองอย่างเดียว (กรัม)

B = น้ำหนักกระดาษกรองและของแข็ง (กรัม)

C = ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)

#### 5. การวิเคราะห์หาของแข็งละลายน้ำ (TDS)

ของแข็งละลายน้ำ หมายถึงส่วนที่ผสมในน้ำตัวอย่างที่กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้วแล้วนำไปใส่ถ้วยระเหยที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน และนำไประเหยด้วยไอน้ำจนแห้งแล้วจึงนำไปอบแห้งที่ 103 - 105 องศาเซลเซียส น้ำหนักส่วนที่เพิ่มคือน้ำหนักของของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. โถดูดความชื้น (Desiccator)
2. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 103 - 105 องศาเซลเซียส
3. เครื่องชั่งละเอียด สามารถชั่งได้ถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง

4. กระจายกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 เซนติเมตร
5. เครื่องดูดสุญญากาศ (Suction pump) พร้อมขวดดูดสุญญากาศ
6. ถ้วยระเหย (Evaporating dishes)

#### วิธีวิเคราะห์:

1. นำน้ำตัวอย่างมากรองเอาสารแขวนลอยทั้งหมดออกก่อน โดยกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้วและเครื่องกรองสุญญากาศ
2. นำน้ำตัวอย่างที่ได้จากการกรองใส่ถ้วยระเหยนำไปอบแห้งที่ 103 – 105 องศาเซลเซียส ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้นชั่งน้ำหนัก

#### การคำนวณ:

$$\text{ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(B - A)}{C} \times 10^6$$

A = น้ำหนักถ้วยระเหยอย่างเดียว (กรัม)

B = น้ำหนักถ้วยระเหยและของแข็ง (กรัม)

C = ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)

## 6. ซีโอดี (Chemical oxygen demand, COD)

การวิเคราะห์หาค่าซีโอดีเป็นการวัดความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย โดยคิดเปรียบเทียบในรูปของปริมาณออกซิเจนที่เทียบเท่ากับปริมาณของสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายด้วยสารเคมีภายใต้ภาวะที่เป็นกรด การวิเคราะห์หาค่าซีโอดีสามารถทำได้หลายวิธี แต่ในที่นี้จะใช้วิธี Closed Reflux และ Titration

### 6.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ภาชนะที่ใช้ในการย่อยสลาย (Digestion vessel) ควรใช้หลอดทดสอบที่เป็น Borosilicate ซึ่งมีขนาด 16 x 150 มิลลิเมตร พร้อมฝาจุกเกลียวที่ทำด้วย TFE (Tetrafluoroethylene)
2. เตาอบที่สามารถให้ความร้อนระหว่าง  $150 \pm 2$  องศาเซลเซียส
3. ไมโครปิเปต (Micro pipet) ขนาด 1-5 มิลลิลิตร
4. ถังมือกันกรด
5. ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 100 และ 1000 มิลลิลิตร

6. กระบอกตวง (Cylinder) ขนาด 200 มิลลิลิตร
7. ปิเปต(Pipet) ขนาด 20 มิลลิลิตร

## 6.2 สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate digestion,  $K_2Cr_2O_7$ ) 0.0167 โมลต่อลิตร ออบสารโพแทสเซียมไดโครเมตที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำสารโพแทสเซียมไดโครเมต ที่อบแล้วมา 4.913 กรัม เติมน้ำกลั่นให้ได้ประมาณ 500 มิลลิลิตร เติม กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 167 มิลลิลิตรและสารปรอทซัลเฟต ( $HgSO_4$ ) 33.3 กรัม เมื่อสารต่างๆละลายจนหมด เติมน้ำกลั่นให้ได้ 1,000 มิลลิลิตร

2. สารละลายผสม Sulfuric acid – Silver sulfate เตรียมสารละลายผสมระหว่างซิลเวอร์ซัลเฟต ( $Ag_2SO_4$ ) และ กรดซัลฟิวริกเข้มข้น ในอัตราส่วน 5.5 กรัมของซิลเวอร์ซัลเฟตต่อ 1 กิโลกรัม ของกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ตั้งทิ้งไว้ 1-2 วันให้ ซิลเวอร์ซัลเฟตละลาย

3. สารละลาย Ferroin indicator ละลายสาร 1,10-Phenanthroline monohydrate จำนวน 1.485 กรัม และสาร  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  จำนวน 695 มิลลิกรัมในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร

4. สารละลายมาตรฐาน Ferrous ammonium sulfate (FAS) 0.10 โมลต่อลิตร นำสาร  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$  มา 39.2 กรัม ละลายในน้ำกลั่น เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร ทำให้เย็น แล้วเติมน้ำกลั่นให้ได้ 1,000 มิลลิลิตร หาความเข้มข้นที่แน่นอน (Standardize) ของสารละลายมาตรฐาน FAS ทุกครั้งที่ใช้ ดังนี้

4.1. นำหลอดทดสอบมา 3 หลอด เติมสารต่าง ๆ ตามลำดับในแต่ละหลอดดังนี้

1) น้ำกลั่น 2.5 มิลลิลิตร

2) สารละลายมาตรฐาน Potassium dichromate digestion 0.0167M 1.5 มิลลิลิตร

3) สารละลายผสม Sulfuric acid - Silver sulfate 3.5 มิลลิลิตร

4.2. ปิดฝาให้สนิท กลับหลอดไปมาหลายๆ ครั้งเพื่อให้สารผสมเข้ากัน

4.3. ทำให้เย็นเท่าอุณหภูมิห้อง แล้วเติมสารละลาย Ferroin indicator 1-2 หยด

4.4. นำไปไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน FAS

Molarity ของสารละลายมาตรฐาน FAS =  $\frac{\text{ปริมาตรของ } 0.0167 \text{ M } K_2Cr_2O_7 \text{ ที่ใช้ (ml)} \times 0.1}{\text{ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ในการ titrate (มิลลิลิตร)}}$

5. สารละลายมาตรฐาน Potassium hydrogen phthalate (KHP) บดสาร Potassium hydrogen phthalate ( $\text{HOOC}_6\text{H}_4\text{COOK}$ ) ให้ละเอียดแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส จนได้น้ำหนักคงที่ นำสารที่อบแล้วมา 4,250 มิลลิกรัม เติมน้ำกลั่นให้ได้ 1,000 มิลลิลิตร จะได้สารมาตรฐานที่มีค่าซีไอดีเท่ากับ 5,000 มิลลิกรัมของออกซิเจนต่อลิตร เก็บไว้ในตู้เย็นได้ 3 เดือน

#### 6. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น

### 6.3 การเก็บและรักษาตัวอย่าง

เก็บตัวอย่างในขวดแก้วหรือขวด Polyethylene หรือเทียบเท่า ถ้าไม่สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทันทีให้เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นในปริมาณที่จะให้ค่าความเป็นกรด-เบสของตัวอย่างน้อยกว่า 2 (สำหรับตัวอย่างที่มีค่าความเป็นกรด-เบสเป็นกลางให้เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2 มิลลิลิตร ต่อน้ำตัวอย่าง 1 ลิตร) แล้วนำตัวอย่างแช่เย็นไว้โดยให้วิเคราะห์ตัวอย่างภายใน 28 วัน

### 6.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์

#### 1. ข้อควรระวัง

1.1 ควรใส่ถุงมือกันกรดขณะเขย่าหลอดทดสอบ

1.2 ในกรณีตัวอย่างมีตะกอนขนาดใหญ่ ให้ปั่นตัวอย่างเพื่อให้ตะกอนมีขนาดเล็กลงเป็นเนื้อเดียวกันก่อน

1.3 ในการทดสอบให้ใช้ไมโครปิเปตขนาด 1-5 มิลลิลิตร

1.4 เลือกตัวอย่างอย่างน้อยร้อยละ 10 ของจำนวนตัวอย่างทั้งหมดมาทำ Spiked duplicate recovery

2. เขียนชื่อตัวอย่างน้ำ หรือเขียนหมายเลขแทนตัวอย่างน้ำก็ได้ ติดไว้ข้างหลอดทดสอบ

จดหมายเลขและชื่อตัวอย่างลงในสมุดบันทึกให้ตรงกับหมายเลขในหลอดทดสอบ

#### 3. การเตรียมตัวอย่าง

3.1. หลอดทดสอบ 3 หลอดสำหรับ Blank ให้ใส่น้ำกลั่นหลอดละ 2.5 มิลลิลิตร

3.2. ทำตัวอย่างให้เย็นเท่าอุณหภูมิห้อง เขย่าให้ตัวอย่างผสมกันดี แล้วนำมา 2.5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดสอบ 1 หลอดต่อ 1 ตัวอย่าง

3.3. สำหรับตัวอย่างที่ทำ Spike duplicate recovery ให้ใส่ตัวอย่างที่เลือกไว้สำหรับทำ Spike Duplicate Recovery ใน 3 หลอด ๆ ละ 2.5ml แล้วนำ 2 หลอดมาเติมสารละลาย Standard KHP หลอดละ 0.050 มิลลิลิตร

3.4 ทำ Quality Control Check โดยนำน้ำกลั่นมา 2.5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดสอบ 1 หลอด เติมสารละลายมาตรฐาน KHP 0.050 มิลลิลิตร

4. เติมสารละลายมาตรฐาน Potassium dichromate digestion 0.0167 M จำนวน 1.5 มิลลิลิตร ทุก ๆ หลอดทดสอบ

5. เติมสารละลายผสม Sulfuric acid - Silver sulfate จำนวน 3.5 มิลลิลิตร ลงในทุก ๆ หลอดทดสอบโดยค่อย ๆ ใส่ให้กรดไหลลงตามข้างหลอดไปอยู่ด้านล่างน้ำตัวอย่างและสาร Digestion

6. ปิดฝาหลอดให้สนิท แล้วกลับหลอดไปมาหลายๆ ครั้ง เพื่อให้สารผสมเข้ากันดี

7. นำหลอดทดสอบที่เตรียมได้ใส่ในเตาอบที่มีอุณหภูมิคงที่เท่ากับ  $150 \pm 2$  องศาเซลเซียส

8. เมื่อครบ 2 ชั่วโมง ให้นำหลอดทดสอบออกจากเตาอบ ทำให้เย็นเท่ากับอุณหภูมิห้อง

9. ใส่แท่งแม่เหล็กกวนสารลงในหลอดทดสอบ เติมสารละลาย Ferroin Indicator 1-2 หยด ในหลอด

ทดสอบ แล้วนำไปไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน FAS

10. เมื่อถึงจุดสิ้นสุด สารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวแกมน้ำเงิน ไปเป็นสีน้ำตาลปนแดง

11. บันทึกปริมาตรของ Standard FAS ที่ใช้ในการไทเทรต

12. นำค่าที่ได้ไปคำนวณ ตามสูตร

## 6.5 การคำนวณ

$$\text{COD (mg O}_2\text{/l)} = \frac{(A - B) \cdot M \cdot 8,000}{\text{ปริมาตรของตัวอย่าง, มิลลิลิตร}}$$

A = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน FAS ที่ใช้สำหรับ Blank, มิลลิลิตร

B = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน FAS ที่ใช้สำหรับ ตัวอย่าง, มิลลิลิตร

M = molarity ของสารละลายมาตรฐาน FAS ที่คำนวณได้จากการ Standardize

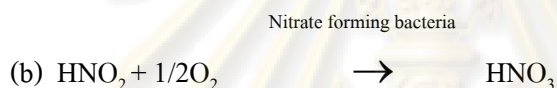
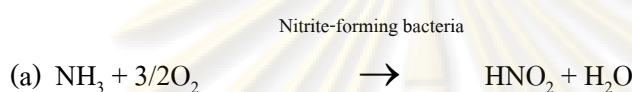
## 7. บีโอดี (Biochemical oxygen demand, BOD)

ค่า BOD หมายถึง ค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และไม่มีแสงสว่าง การใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบ่งออกเป็น 2 ระยะ ดังภาพที่ ข (2)

ระยะที่ 1 เป็นการออกซิไดซ์ของสารประกอบคาร์บอน ดังสมการ



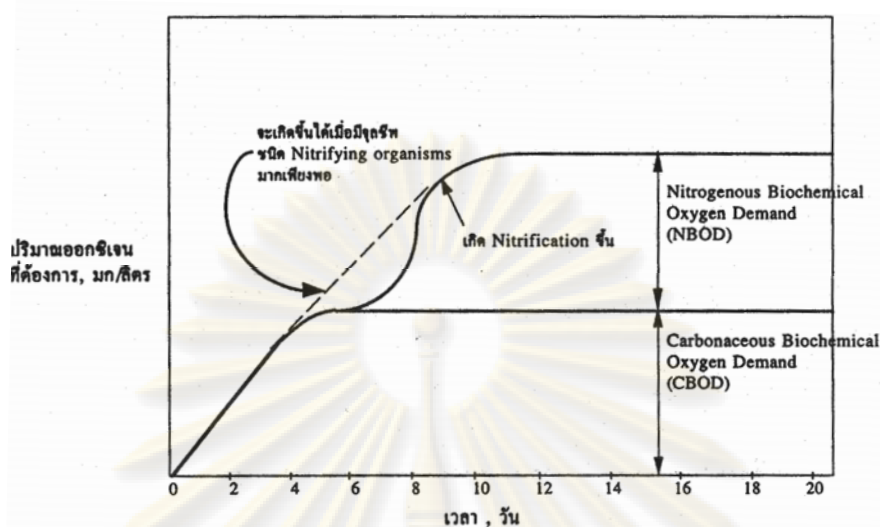
ระยะที่ 2 เป็นการออกซิไดซ์ของแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) ให้เป็นไนไตรท์ ( $\text{NO}_2^-$ ) และไนเตรท ( $\text{NO}_3^-$ ) ตามลำดับ โดยพวก Autotrophic Bacteria ชื่อ Nitrifying Bacteria ดังสมการ



ค่า BOD จะบ่งบอกถึงค่าความสกปรกของน้ำ ในรูปของออกซิเจนที่ต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ในการหาค่าบีโอดีของน้ำต้องคำนึงถึงค่าต่าง ๆ ดังนี้

1. อุณหภูมิ  $20 \pm 1$  องศาเซลเซียส ในการบ่มระยะเวลา 5 วัน
2. ไม่มีแสงสว่าง
3. การใช้ออกซิเจนต้องมากกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. ค่าออกซิเจนละลายน้ำต้องเหลือไม่น้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
5. น้ำที่สกปรกมากต้องทำการเจือจางก่อน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ ข (2) กราฟของบีโอดีสำหรับน้ำเสียทั่วไป

### 7.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ขวด BOD ขนาด 250-300 มิลลิลิตร พร้อมจุกปิดสนิทแบบ ground joint ส่วนใหญ่ใช้ขวดที่ทำพิเศษเพื่อการหาออกซิเจนละลายน้ำโดยเฉพาะ
2. ตู้ควบคุมอุณหภูมิซึ่งควบคุมอุณหภูมิได้ที่  $20 \pm 1$  องศาเซลเซียส และต้องมีฝาเพื่อป้องกันการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายในตัวอย่าง
3. อุปกรณ์สำหรับเติมอากาศในน้ำ
4. ปิเปต
5. กระบอกตวง
6. อุปกรณ์สำหรับการไทเทรต
7. ขวดวัดปริมาตร

### 7.2 สารเคมี

#### 1. สารละลาย Phosphate Buffer

นำสาร  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  มา 8.5 กรัม สาร  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  มา 21.75 กรัม สาร  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  มา 33.4 กรัมและสาร  $\text{NH}_4\text{Cl}$  มา 1.7 กรัม ละลายสารทั้งหมดในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร

#### 2. สารละลาย Magnesium Sulfate

นำสาร  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  มา 22.5 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร



## 3. สารละลาย Calcium Chloride

นำสาร  $\text{CaCl}_2$  มา 27.5 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร

## 4. สารละลาย Ferric Chloride

นำสาร  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  มา 0.25 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร

5. สารละลายกรดและเบส 1 N เพื่อใช้ในการปรับค่าความเป็นกรด-เบสของตัวอย่างให้เป็นกลาง

## 6. สารละลาย Sodium Sulfite

นำสาร  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  มา 1.575 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร สารละลายนี้ไม่อยู่ตัว ต้องเตรียมในวันที่จะใช้

## 7. สารป้องกันการเกิด Nitrification : 2chloro-6-(trichloromethyl) pyridine

## 8. สารละลาย Glucose-Glutamic acid

อบ Glucose (Reagent grade) และ Glutamic acid (Reagent grade) ที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำ Glucose มา 150 มิลลิกรัม และ Glutamic acid มา 150 มิลลิกรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร สารละลายนี้เก็บไว้ในตู้เย็นได้ 3 สัปดาห์

## 9. สารละลาย Manganous sulfate

นำสาร  $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  มา 480 กรัม หรือสาร  $\text{MnSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  มา 400 กรัม หรือสาร  $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  มา 364 กรัม ละลายในน้ำกลั่น กรอง แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร สารละลายที่เตรียมได้ไม่ควรให้สัมผัสกับน้ำแข็ง เมื่อนำไปเติมลงไปในการละลาย Potassium iodide (KI) ที่มีสภาพเป็นกรด

## 10. สารละลาย Alkali-Iodide-Azide

นำสาร NaOH มา 500 กรัม (หรือสาร KOH 700 กรัม) และสาร NaI มา 135 กรัม (หรือสาร KI 150 กรัม) ละลายในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร หลังจากนั้นนำสาร  $\text{NaN}_3$  มา 10 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร แล้วนำไปเติมในสารละลายที่เตรียมขึ้น

## 11. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น

## 12. น้ำเป้ง

ละลาย Soluble Starch 2 กรัม และ Salicylic acid 0.2 กรัม ลงในน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ทำให้ร้อน

## 13. สารละลายมาตรฐาน Potassium bi-iodate (0.025 N)

ละลาย  $\text{KH}(\text{IO}_3)_2$  812.4 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่น แล้วทำให้เจือจางเป็น 1 ลิตร

## 14. สารละลายมาตรฐาน Sodium thiosulfate (0.025 N)

นำสาร  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  มา 6.205 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วเติม  $\text{NaOH}$  6 N จำนวน 1.5 มิลลิลิตร หรือสาร  $\text{NaOH}$  จำนวน 0.4 กรัม แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร ให้ทำการ Standardize สารละลายนี้ด้วยสารละลาย Bi-iodate ที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน

## 7.3 วิธีวิเคราะห์

วิธีการหาโดยตรง

ในกรณีที่ตัวอย่างมีค่าบีโอดีไม่เกิน 7 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่จำเป็นต้องเจือจางตัวอย่าง ส่วนใหญ่จะได้แก่น้ำจากแม่น้ำลำคลอง ให้วิเคราะห์ตัวอย่างตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. ปรับอุณหภูมิตัวอย่างให้ได้ประมาณ 20 องศาเซลเซียส
2. เติมอากาศให้ตัวอย่างมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำใกล้จุดอิ่มตัว
3. เติมตัวอย่างในขวดบีโอดีจำนวน 2 ขวด
4. วิเคราะห์หาปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำในขวดที่ 1 ทันที
5. นำขวดที่ 2 เข้าเก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน
6. หลังจาก 5 วัน วิเคราะห์หาปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำที่เหลืออยู่ในขวดที่ 2

การหาค่า DO เริ่มต้นและสุดท้าย

การหาค่า DO สามารถทำได้ 2 วิธี คือวิธี Winkler (Azide modification) และ วิธี Membrane electrode ในการทดลองนี้ใช้วิธี Winkler ขั้นตอนการหา DO โดยวิธี Winkler มีดังนี้

1. เทน้ำที่หล่อจุกขวดตัวอย่างออก
2. เปิดจุก เติมสารละลาย Manganese sulfate 1 มิลลิลิตร โดยขณะเติมให้ปลายปิเปตอยู่ใต้ผิวน้ำ
3. เติมสารละลาย Alkali-iodide-azide 1 มิลลิลิตร โดยให้ปลายปิเปตอยู่ใต้ผิวน้ำขณะเติม
4. ปิดจุกโดยอย่าให้มีฟองอากาศภายในขวด คว่ำขวดไปมาหลาย ๆ ครั้งเพื่อให้สารผสมกัน
5. ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนจนได้ปริมาณน้ำใส เกินครึ่งหนึ่งของขวด
6. เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 มิลลิลิตร โดยให้กรดค่อย ๆ ไหลลงไปข้าง ๆ คอขวด ปิดจุกคว่ำขวดขึ้นลงหลายครั้งจนกระทั่งตะกอนละลายหมด
7. ตวงน้ำตัวอย่างปริมาตร 201 มิลลิลิตร นำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐาน Sodium thiosulfate (0.025 N) จนได้สีเหลืองอ่อน

8. เติมน้ำแข็ง 2-3 หยดจะได้สีน้ำเงินเข้มทำการไตรเตรตต่อไปจนกระทั่งสีน้ำเงินหายไป ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน Sodium thiosulfate ที่ใช้จะเทียบเท่ากับปริมาณของออกซิเจน (DO) ของน้ำตัวอย่างโดยมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

#### 7.4 การคำนวณ

$$BOD = \frac{DO_0 - DO_5}{P}$$

โดยที่  $BOD_5$  = ค่า BOD ที่ระยะเวลาที่เก็บตัวอย่าง 5 วัน มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

$DO_0$  = ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำในตัวอย่างที่หาได้ทันที (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$DO_5$  = ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำในตัวอย่างหลังจากเก็บไว้เป็นเวลา 5 วัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)

P = สัดส่วนปริมาณของตัวอย่างที่ใช้เจือจาง โดยคิดปริมาณทั้งหมดเป็น 1 ส่วน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

## ตัวอย่างการคำนวณ

## การคำนวณต้นทุนในการดำเนินงาน

ให้ ค่ากระแสไฟฟ้า (Electricity cost) = 2.50 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง  
 ค่าฝังกลบตะกอน (Landfill cost) = 2500 บาทต่อตัน  
 ปริมาณน้ำตัวอย่าง = 1 ลิตร  
 อัตราแลกเปลี่ยนเงินตรา 35 บาทต่อ 1 เหรียญสหรัฐ

พิจารณาค่าใช้จ่ายเนื่องจากกระแสไฟฟ้าและตะกอนที่เกิดขึ้นเป็นหลักของกระบวนการ  
 บำบัดน้ำเสียแบบการออกซิเดชันแบบทางตรง (Direct oxidation)

กระแสไฟฟ้า ( $I$ ) = 2 แอมแปร์

ปริมาณน้ำตัวอย่าง ( $L$ ) = 1 ลิตร

ศักย์ไฟฟ้า ( $V$ ) = 11.8 โวลต์

ชั่วโมง ( $t$ ) = 3 ชั่วโมง

ตะกอนที่เกิดขึ้น = 0.24 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

- กำลังไฟฟ้า (Electricity consumption) =  $(I \times V \times t)$   
 =  $(2 \times 11.8 \times 3) / 1000$  กิโลวัตต์-ชั่วโมง  
 = 0.0708 กิโลวัตต์-ชั่วโมง  
 =  $(0.0708 \times 1000 / 0.8) / 1$  กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์  
 เมตร  
 = 88.5 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร

- ค่ากระแสไฟฟ้ารวม (Electricity cost) = กำลังไฟฟ้า  $\times$  ค่ากระแสไฟฟ้า  
 =  $88.5 \times 2.5$   
 = 221 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

- ค่าฝังกลบตะกอนรวม (Landfill cost) = ตะกอนที่เกิดขึ้น  $\times$  ค่าฝังกลบตะกอน  
 =  $(0.24 / 1000) \times 2500$  บาทต่อลูกบาศก์เมตร  
 = 0.6 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

$$\begin{aligned}
 \text{ต้นทุนในการดำเนินงาน} &= \text{ค่ากระแสไฟฟ้า} + \text{ค่าฝังกลบตะกอน} \\
 &= 221 + 0.6 \\
 &= 222 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร} \\
 &= 6.33 \text{ เหรียญสหรัฐต่อลูกบาศก์เมตรของสารตัวอย่าง}
 \end{aligned}$$

พิจารณาค่าใช้จ่ายเนื่องจากกระแสไฟฟ้าและตะกอนที่เกิดขึ้นเป็นหลักของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบการออกซิเดชันแบบทางอ้อม (Indirect oxidation)

$$\begin{aligned}
 \text{กระแสไฟฟ้า (I)} &= 2 \text{ แอมแปร์} \\
 \text{ปริมาณน้ำตัวอย่าง (L)} &= 1 \text{ ลิตร} \\
 \text{ศักย์ไฟฟ้า (V)} &= 9.0 \text{ โวลต์} \\
 \text{ชั่วโมง (t)} &= 3 \text{ ชั่วโมง} \\
 \text{ตะกอนที่เกิดขึ้น} &= 0.15 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร} \\
 \text{โซเดียมคลอไรด์ 2 กรัม} &= (10^6 \times 10^{-3} \times 2) / 800 \\
 &= 2.5 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร} \\
 \text{โซเดียมคลอไรด์ 1 กิโลกรัม} &= 192.6 \text{ บาท} \\
 &= 192.6 \times 2.5 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร} \\
 &= 482 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร} \\
 \text{- กำลังไฟฟ้า (Electricity consumption)} &= (I \times V \times t) \\
 &= (2 \times 9.0 \times 3) / 1000 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมง} \\
 &= 0.054 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมง} \\
 &= (0.081 \times 1000 / 0.8) / 1 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร} \\
 &= 67.5 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร} \\
 \text{- ค่ากระแสไฟฟ้ารวม (Electricity cost)} &= \text{กำลังไฟฟ้า} \times \text{ค่ากระแสไฟฟ้า} \\
 &= 67.5 \times 2.5 \\
 &= 169 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร} \\
 \text{- ค่าฝังกลบตะกอนรวม (Landfill cost)} &= \text{ตะกอนที่เกิดขึ้น} \times \text{ค่าฝังกลบตะกอน} \\
 &= (0.15 / 1000) \times 2500 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร} \\
 &= 0.38 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร} \\
 \text{ต้นทุนในการดำเนินงาน} &= \text{ค่ากระแสไฟฟ้า} + \text{ค่าฝังกลบตะกอน} + \text{ค่าสารเคมี} \\
 &= 169 + 0.38 + 482
 \end{aligned}$$

$$= 651 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร}$$

$$= 18.6 \text{ เหรียญสหรัฐต่อลูกบาศก์เมตรของสารตัวอย่าง}$$

พิจารณาค่าใช้จ่ายเนื่องจากกระแสไฟฟ้าเป็นหลักของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบต่อเนื่อง (Continuous process)

$$\text{กระแสไฟฟ้า (I)} = 2.0 \text{ แอมแปร์}$$

$$\text{ปริมาณน้ำตัวอย่าง (L)} = 1 \text{ ลิตร}$$

$$\text{ศักย์ไฟฟ้า (V)} = 9.5 \text{ โวลต์}$$

$$\text{ชั่วโมง (t)} = 1 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{ตะกอนที่เกิดขึ้น} = 7.8 \times 10^{-3} \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร}$$

$$\text{โซเดียมคลอไรด์} = 0.48 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เมตร}$$

$$\text{โซเดียมคลอไรด์ 1 กิโลกรัม} = 192.6 \text{ บาท}$$

$$= 192.6 \times 0.48 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร}$$

$$= 92.4 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร}$$

$$\text{- ค่าล้างไฟฟ้า (Electricity consumption)} = (I \times V \times t)$$

$$= (2.0 \times 9.5 \times 1) / 1000 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมง}$$

$$= 0.019 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมง}$$

$$= (0.019 \times 1000 / 0.24) / 1 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อ}$$

ลูกบาศก์เมตร

$$= 79.2 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร}$$

$$\text{- ค่าฝังกลบตะกอนรวม (Landfill cost)} = \text{ตะกอนที่เกิดขึ้น} \times \text{ค่าฝังกลบตะกอน}$$

$$= (7.8 \times 10^{-3} / 1000) \times 2500 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร}$$

$$= 1.95 \times 10^{-2} \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร}$$

$$\text{- ค่ากระแสไฟฟ้ารวม (Electricity cost)} = \text{ค่าล้างไฟฟ้า} \times \text{ค่ากระแสไฟฟ้า}$$

$$= 79.2 \times 2.5$$

$$= 198 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร}$$

ต้นทุนในการดำเนินงาน

$$= \text{ค่ากระแสไฟฟ้า} + \text{ค่าฝังกลบตะกอน} + \text{ค่าสารเคมี}$$

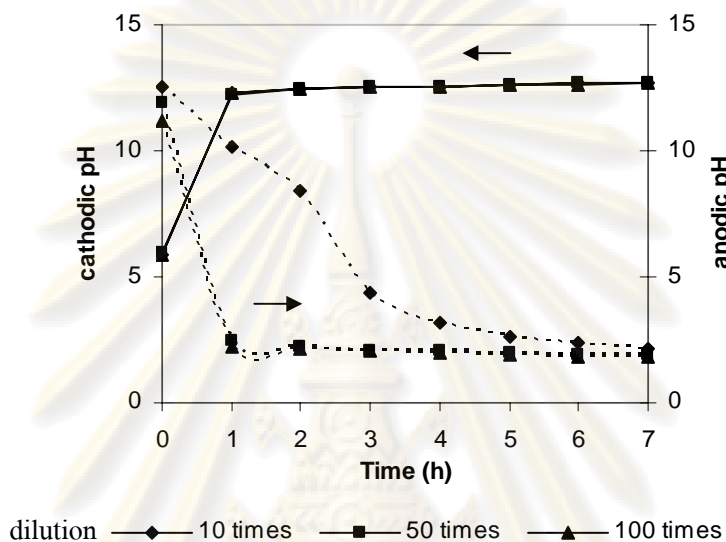
$$= 198 + 1.95 \times 10^{-2} + 92.4$$

$$= 290 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร}$$

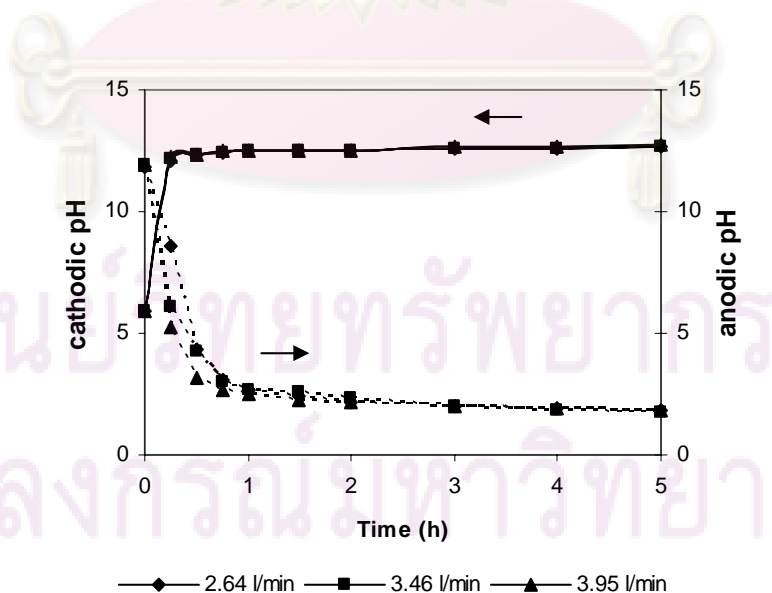
$$= 8.3 \text{ เหรียญสหรัฐต่อลูกบาศก์เมตรของสารตัวอย่าง}$$

ภาคผนวก ง

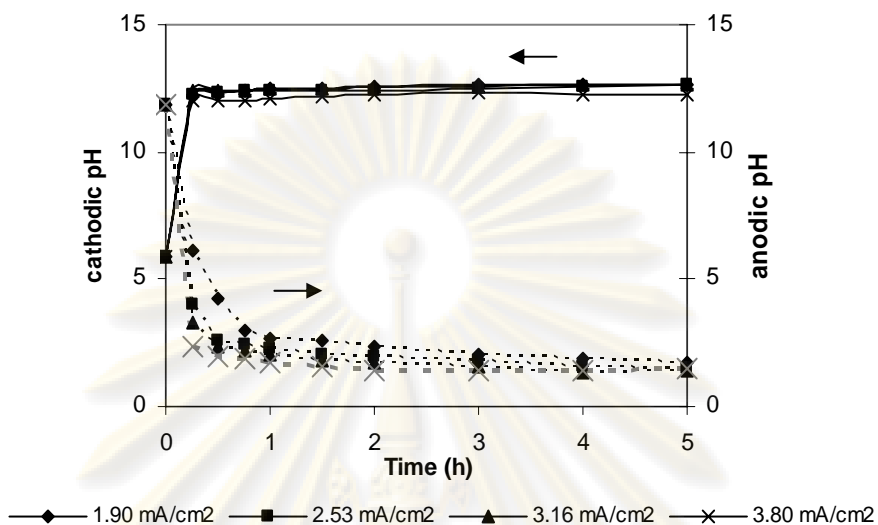
1. ผลของค่าความเป็นกรด-เบส



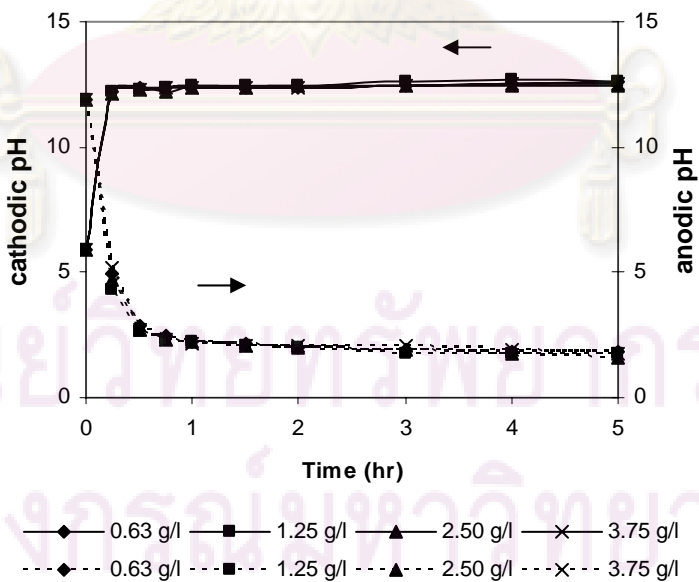
ภาพที่ ง (1) การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-เบสที่ฝั่งแอโนด และแคโทดของการบำบัดน้ำเสียที่อัตราการเจือจางต่างๆ



ภาพที่ ง (2) การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-เบสที่ฝั่งแอโนด และแคโทดของการบำบัดน้ำเสียที่อัตราการไหลวนของน้ำเสียต่างๆ

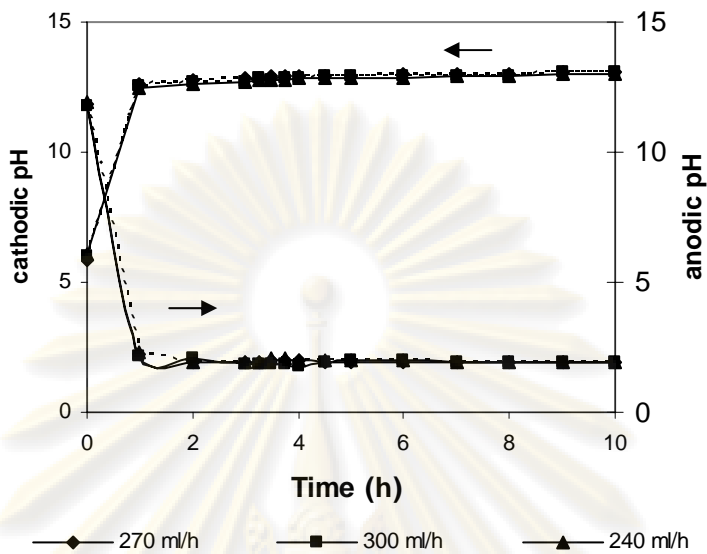


ภาพที่ ง (3) การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-เบสที่ฝั่งแอโนด และแคโทดของการบำบัดน้ำเสียที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ



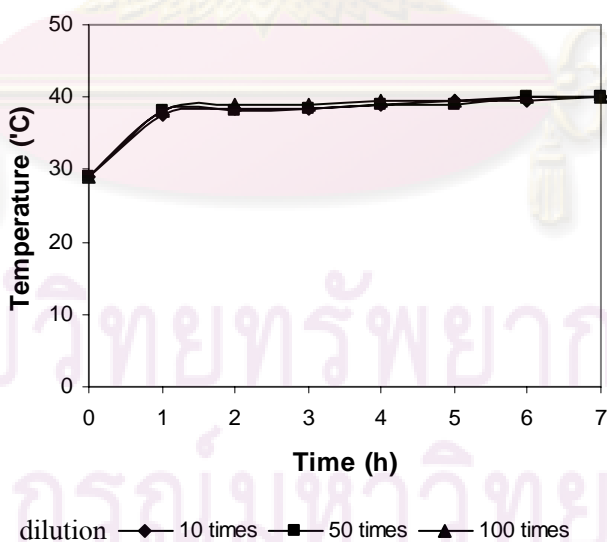
ภาพที่ ง (4) การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-เบสที่ฝั่งแอโนด และแคโทดของการบำบัดน้ำเสียที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆ



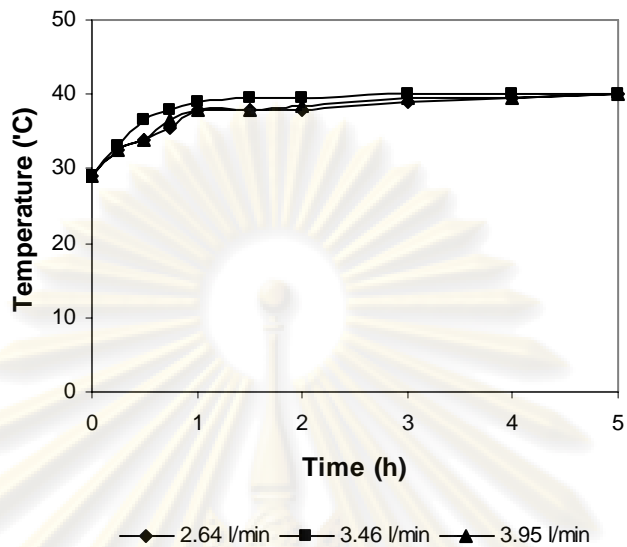


ภาพที่ ๕ (5) การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-เบสที่ฝั่งแอโนด และแคโทดของการบำบัดน้ำเสียแบบต่อเนื่องที่อัตราการไหลต่างๆ

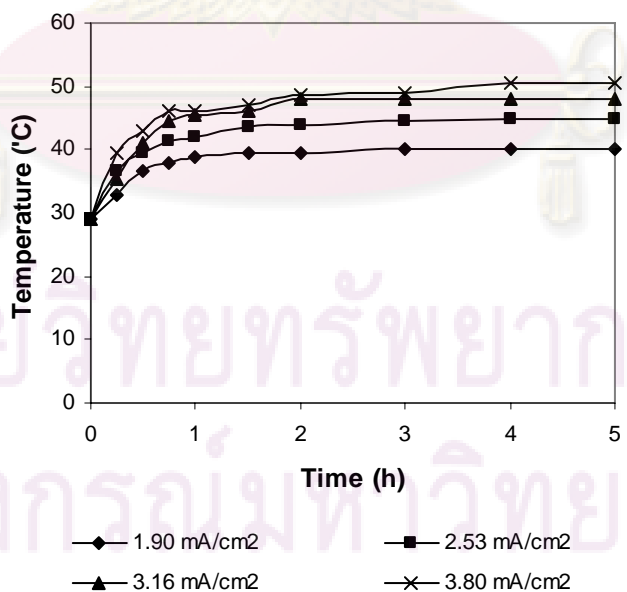
2. ผลอุณหภูมิ



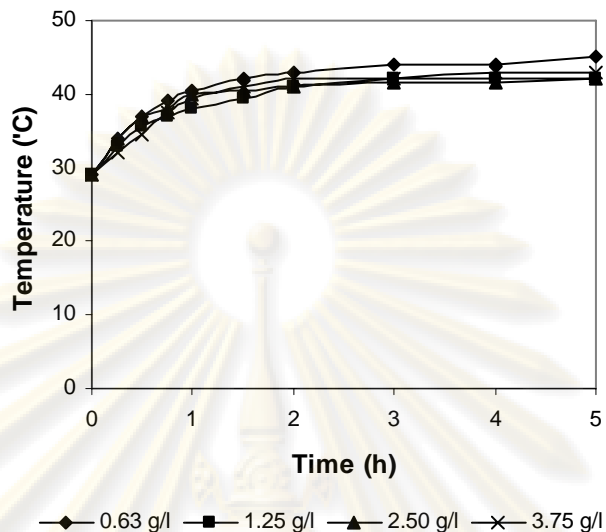
ภาพที่ ๖ (6) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ฝั่งแอโนด และแคโทดของการบำบัดน้ำเสียที่อัตราการเจือจางต่างๆ



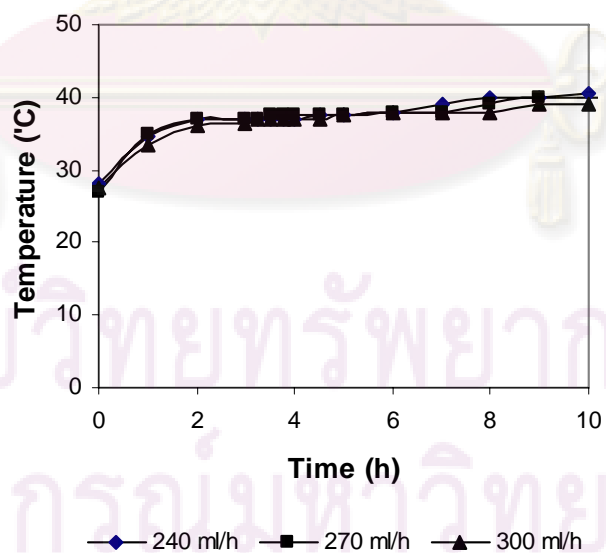
ภาพที่ ง (7) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ฝั่งแอโนด และแคโทดของการบำบัดน้ำเสียที่อัตรา  
การไหลวนของน้ำเสียต่างๆ



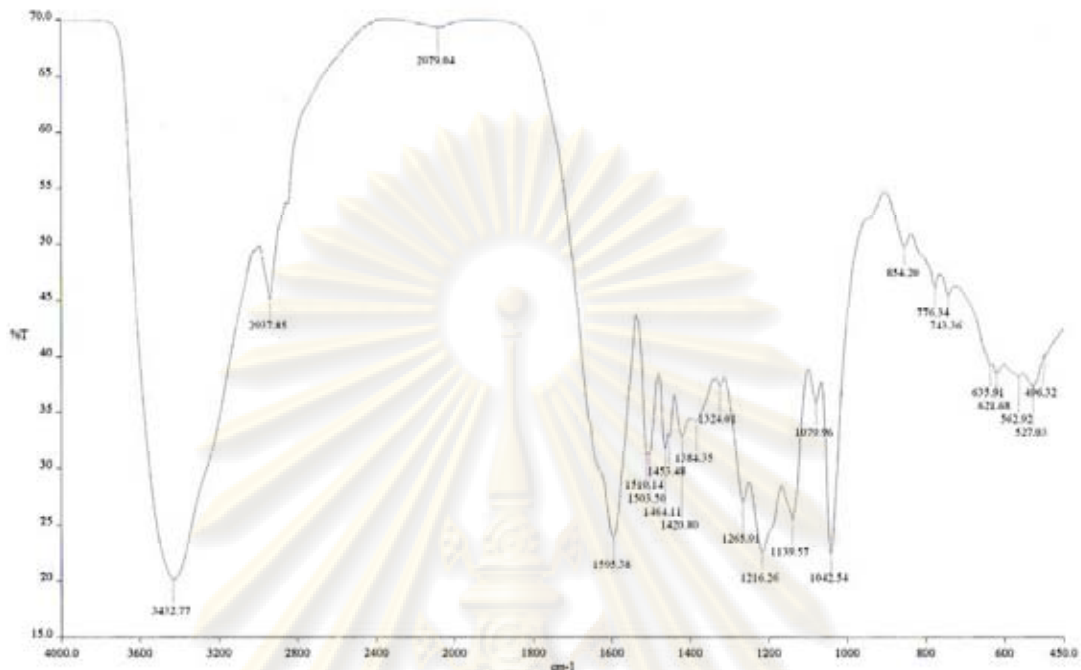
ภาพที่ ง (8) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ฝั่งแอโนด และแคโทดของการบำบัดน้ำเสียที่  
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ



ภาพที่ ง (9) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ฟังก์แอโนด และแคโทดของการบำบัดน้ำเสียที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆ



ภาพที่ ง (10) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ฟังก์แอโนด และแคโทดของการบำบัดน้ำเสียแบบต่อเนื่องที่อัตราการไหลต่างๆ



ภาพที่ ง (11) FTIR ของลิกนิน

ความยาวคลื่น (เซนติเมตร<sup>-1</sup>)

หมู่ฟังก์ชันของสาร

2700-3600

-OH

2079.04

Alkyl, C≡N

1450-1600

Aromatic skeletal, C=O stretching

1260-1425

Alcohols and Phenols, O-H and C-O

1040-1220

Aliphatic, C-H (Syringyl and Guaiacyl)

800-835

CH=C

700-780

Aromatic skeletal, C-H

~ 630

Alkyne, C-H

~ 500

Halogen compounds, C-X

จากภาพที่ ง (11) พบว่าโครงสร้างของลิกนินนั้นจะประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจนรวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิด โดยโครงสร้างส่วนใหญ่จับกันเป็นวงแอโรแมติกซึ่งเป็นสารที่มีโมเลกุลสลับซับซ้อนและยากแก่การย่อยสลายทางชีวภาพ

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกาญจนา ชาญวรุฒิ เกิดวันที่ 5 ธันวาคม 2527 ณ จังหวัดระยอง สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี ในปีการศึกษา 2549 และเข้ารับการศึกษต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรสหสาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย