การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอน

นายมารุต โปราณานนท์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

WASTEWATER TREATMENT FROM TEXTILE INDUSTRY BY ELECTROFENTON PROCESS

Mr. Marut Porananont

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology
Department of Chemical Technology
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2006

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอน
โดย	นายมารุต โปราณานนท์
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พฤกษาทร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พฤกษาทร)

.... กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ)

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานดา ว่องไวลิขิต)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มารุต โปราณานนท์ : การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอน. (WASTEWATER TREATMENT FROM TEXTILE INDUSTRY BY ELECTROCFENTON PROCESS) อ. ที่ปรึกษา: ผศ.ดร. มะลิ หุ่นสม, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ.ดร. เก็จวลี พฤกษาทร 96 หน้า.

น้ำเสียที่เกิดจากเครื่องทอผ้าแบบใช้น้ำของอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นน้ำเสียที่มีน้ำมันและไขมันในปริมาณมาก งานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนทอผ้าด้วยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอน ซึ่งจะแบ่งการทำงานออกเป็นสองส่วน คือ การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนในระบบกะ ตัวแปรที่ศึกษาคือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมัน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า อัตราการไหลวนของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ผลการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียระบบกะคือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลวน 6 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตร โดยที่ภาวะดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันและไขมันเริ่มต้น 150-450 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ใกล้เคียงกันกล่าวคือสามารถลดปริมาณน้ำมันและไขมัน ซีโอดี และบีโอดี ที่เวลา 45 นาที ได้ร้อยละ 93.9 89.2 และ 88.9 ตามลำดับ ส่วนที่สองจะเป็นการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนในระบบต่อเนื่อง ตัวแปรที่ศึกษาคือ อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบ ลักษณะการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และอัตราการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ผลการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมในระบบต่อเนื่องคือ อัตราการไหลของน้ำเสีย 0.1 ลิตรต่อนาที ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตร ป้อนแบบเป็นจังหวะด้วยอัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที โดยระบบจะเข้าสู่ภาวะคงตัวเมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที สามารถลดน้ำมันและไขมัน ซีโอดี และบีโอดีได้ร้อยละ 92.5 79.6 และ 69.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา............เคมีเทคนิค ....ลายมือชื่อนิสิต..

สาขาวิชา...........เคมีเทคนิค......................... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา............................

ปีการศึกษา.........2549...............................ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.........................

477 24286 23: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: OIL AND GREASE / TREATMENT / ELECTROFENTON

MARUT PORANANONT: WASTEWATER TREATMENT FROM TEXTILE INDUSTRY BY ELETROFENTON. THESIS ADVISOR: ASST.PROF. MALI HUNSOM, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR: ASSOC.PROF. KEJVALEE PRUKSATHORN, Ph.D., 96 pp.

Wastewater from textile industry was consisted of large quantity of oil and grease. In this work, the treatment of wastewater from textile industry by using the electrofenton has been studies. This study was divide in two parts. The first part was the wastewater treatment in bacth process. The studied parameters in this part were initial concentration of oil and grease, current density, circulating flowrate, and concentration of hydrogen peroxide. The optimum condition in batch process was found at initial concentration of oil and grease 450 mg/l, current density of 22 A/m^2, circulating flowrate of 6 l/min, and concentration of hydrogen peroxide of 0.5 M. According to this condition the removal efficiency of oil and grease in the range of 150-450 mg/l was similar. The removal percentages of oil and grease, COD, and BOD in 45 minute were obtained 93.9%, 89.2%, and 88.9% respectively. The second part was the wastewater treatment with electrofenton in continuous process. The studied parameters in this part were flowrate of wastewater, mode of hydrogen peroxide feed, and feed rate of hydrogen peroxide. The results indicated that the optimum condition in continuous process found at the flowrate of 0.1 l/min by using 0.5 M H_20_2 in pulse feed with feed rate of 2 ml/min. Approximately 92.5%, 79.6%, and 69.8% of oil and grease, COD, and BOD were respectively removed within 60 minute.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.......Chemical Technology...........	Student's signature......Marut Porananont......
Field of study.....Chemical Technology...........	Advisor's signature......Mali Hunsom......
Academic year...2006................................	Co-Advisor's signature......K. Pruksathorn......

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และรองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พฤกษาทร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งท่านทั้งสองได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ด้วยดีตลอดมารวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สาร ประธานกรรมการ ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานดา ว่องไวลิขิต ที่กรุณารับเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ บริษัท ไทยเอเชียไฟเบอร์ จำกัด (มหาชน) จ.สมุทรปราการ ที่กรุณาเอื้อเฟื้อน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอเพื่อใช้ในการทดลองโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้าง ซ่อมแซมเครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นกำลังใจอย่างดีและให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ชาวเคมีเทคนิคทุกคนที่ให้กำลังใจ ช่วยเหลือและให้คำแนะนำด้วยดีเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูปภาพ	ฏ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. วารสารปริทัศน์	4
2.1 กระบวนการทอผ้า	4
2.1.1 การทอ	4
2.1.2 การเตรียมการทอ	7
2.1.2.1 การกรอด้าย	7
2.1.2.2 การสาวด้ายยืน	7
2.1.2.3 การลงแป้งด้ายยืน	7
2.1.2.4 การสอดฟันหวี	10
2.1.2.5 การร้อยตะกอ	11

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

2.2 วิธีการจัดการน้ำเสีย.. 11
2.2.1 กระบวนการบำบัดทางกายภาพ.. 11
2.2.2 กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ.. 12
2.2.2.1 การบำบัดไม่ใช้อากาศ... 12
2.2.2.2 การบำบัดแบบใช้อากาศ.. 12
2.2.3 กระบวนการบำบัดทางเคมี.. 13
2.3 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเคมีไฟฟ้า.. 13
2.3.1 องค์ประกอบของเซลล์เคมีไฟฟ้า.. 13
2.3.2 ปฏิกิริยาในเซลล์เคมีไฟฟ้า.. 14
2.3.3 ชนิดของเซลล์เคมีไฟฟ้า... 14
2.3.4 ลักษณะของเซลล์เคมีไฟฟ้า.. 15
2.3.5 ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า.. 15
2.3.6 ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์.. 16
2.3.7 หลักการอุณหพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า.. 16
2.3.8 สมการเนินสท์... 17
2.3.9 กฎของฟาราเดย์.. 19
2.3.10 การควบคุมการทำงานของกระบวนการเคมีไฟฟ้า... 19
2.3.10.1 การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่... 20
2.3.10.2 การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่.. 20
2.4 การประยุกต์ใช้หลักการเคมีไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสีย... 21
2.4.1 กระบวนการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า.. 21
2.4.2 กระบวนการตกตะกอนด้วยเคมีไฟฟ้า... 23
2.4.3 กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า... 25
2.4.4 กระบวนการรวมด้วยกระแสไฟฟ้า.. 26
2.4.5 ปฏิกิริยาเฟนตอนและกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอน....................................... 30
2.5 หลักการในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้า... 32
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.. 33

หน้า

3.วิธีดำเนินการวิจัย... 35
3.1 รูปแบบการศึกษา... 35
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย... 35
3.2.1 เครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าและกระบวนการ
อิเล็กโตรเฟนตอนในระบบกะ... 36
3.2.2 เครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าในระบบต่อเนื่อง..... 37
3.2.3 เครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการอิเล็คโตรเฟนตอนในระบบต่อเนื่อง............ 38
3.3 สารเคมี.. 39
3.4 น้ำตัวอย่าง.. 39
3.5 ขั้นตอนการวิจัย.. 40
3.5.1 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ...... 40
3.5.2 ศึกษาการกำจัดปริมาณน้ำมันและไขมันจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดย
กระบวนการรวมอิเล็กโตรเฟนตอน.. 40
3.5.2.1 ศึกษาการกำจัดปริมาณน้ำมันและไขมันจากน้ำเสียโดยกระบวนการ
อิเล็กโตรเฟนตอนในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ.. 40
3.5.2.2 ศึกษาการกำจัดปริมาณน้ำมันและไขมันจากน้ำเสียโดยกระบวนการ
อิเล็กโตรเฟนตอนในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง.................................. 41

4. ผลและอภิปรายผลการทดลอง... 43
4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ......................... 43
4.2 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอน.............. 43
4.2.1 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอน
ในระบบกะ.. 44
4.2.1.1 ผลของปริมาณน้ำมันและไขมันเริ่มต้น.. 45
4.2.1.2 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 45

4.2.1.3 ผลของอัตราการไหลวนของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์............................. 49
4.2.1.4 ผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์... 51
4.2.2 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอน
ในระบบต่อเนื่อง.. 55
4.2.2.1 ผลของอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์................................. 55
4.2.2.2 ผลของลักษณะการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์................................... 57
4.2.2.3 ผลกระทบของอัตราการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์............................ 59
4.3 สมการจลนพลศาสตร์... 61
4.4 ต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ.. 65
4.5 เปรียบเทียบกับงาน วิจัยอื่นๆ.. 66

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.. 67

รายการอ้างอิง 68

ภาคผนวก 71
ภาคผนวก ก.. 72
ภาคผนวก ข.. 75
ภาคผนวก ค 79
ภาคผนวก ง 92

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์... 96

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำทิ้ง.. 44
ตารางที่ 4.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอก่อน และหลังการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอน.. 54
ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยากับอุณหภูมิ.….......... 64
ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ ในการบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันและไขมันปนอยู่... 66

ตารางที่ ค (1) ปริมาณน้ำตัวอย่างและอัตราเจือจางที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์หาซีโอดี......... 86
ตารางที่ ค (2) ขนาดของหลอดแก้ว ปริมาตรตัวอย่างน้ำและสารเคมีที่เหมาะสม................... 86
ตารางที่ ค (3) การเลือกปริมาณน้ำตัวอย่างและอัตราเจือจางสำหรับช่วงบีโอดี...................... 89

สารบัญรูปภาพ

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 2.1 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้า...... 20

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่...... 20

รูปที่ 2.2 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบไฟฟ้าคงที่............ 21

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่.. 21

รูปที่ 2.3 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Tank cell.. 22

รูปที่ 2.4 กระบวนการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าชนิดที่มีเยื่อเลือกผ่านไอออนลบ…………..... 24

รูปที่ 2.5 กระบวนการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าชนิดที่มีเยื่อเลือกผ่านไอออนบวก…………...... 24

รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของ Poly-nuclear hydroxyl aluminum (III) complexes

(ก) Dimeric Al^{3+} hydroxo complexes (ข) Polymeric Al^{3+} hydroxo complexes... 27

รูปที่ 2.7 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ - เซลล์เดี่ยว………..……………………… 29

รูปที่ 2.8 การจัดเรียงของขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบขนาน………………..………………….. 29

รูปที่ 2.9 แสดงการจัดเรียงของขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบอนุกรม... 29

รูปที่ 2.10 แสดงการจัดเรียงของขั้วไฟฟ้าไบโพลาร์…………………………………………... 30

รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในระบบกะ…………………………………………... 36

รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้า

ในระบบต่อเนื่อง……………………………………………………………………… 37

รูปที่ 3.3 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองด้วยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนในระบบต่อเนื่อง.. 38

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมัน (ก) ซีโอดี (ข)

บีโอดี (ค) กับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมันค่าต่าง ๆ....................... 46

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมัน (ก) ซีโอดี (ข)

บีโอดี (ค) กับเวลา ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ…………………………….. 48

รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้ากับค่าความหนาแน่น

กระแสไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ……………………………………………………………..... 49

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน (ก) ซีโอดี (ข) บีโอดี (ค) กับเวลา ที่ค่าอัตราการไหลวนต่างๆ.. 50
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมัน (ก) ซีโอดี (ข) บีโอดี (ค) กับเวลา ที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างๆ…………………... 52
รูปที่ 4.6 ค่าความเข้มข้นของไอออนของเหล็กในสารละลายกับเวลา…………………………… 53
รูปที่ 4.7 ลักษณะของน้ำเสีย (ก) ก่อนบำบัด (ข) หลังบำบัด.. 54
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมัน (ก) ซีโอดี (ข) บีโอดี (ค) กับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ ในระบบต่อเนื่อง.. 56
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน (ก) ซีโอดี (ข) บีโอดี (ค) กับเวลาที่ลักษณะการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์……………... 58
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน (ก) ซีโอดี (ข) บีโอดี (ค) กับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์...................... 60
รูปที่ 4.11 ปฏิกิริยาอันดับต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส……………........…............... 61
รูปที่ 4.12 ปฏิกิริยาอันดับต่างๆ ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส……………........…............... 62
รูปที่ 4.13 ปฏิกิริยาอันดับต่างๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส……………........…............... 63
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างล็อกกาลิทึมฐานอีของค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยากับส่วนกลับของอุณหภูมิ...…….............................. 65

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญในการส่งออกและนำรายได้เข้าสู่ประเทศเป็นจำนวนมาก กล่าวคือสามารถสร้างรายได้จากการส่งออกเป็นอันดับหนึ่งตั้งแต่ปี พ.ศ. 2539 เป็นต้นมา โดยพบว่าในปี พ.ศ. 2540 มูลค่าการส่งออกของอุตสาหกรรมสิ่งทอมีมากกว่า 170,289.8 ล้านบาท[1] หรือคิดเป็นร้อยละ 9.4 ของมูลค่าการส่งออกรวมทั้งประเทศ และในปี พ.ศ. 2546 มีมูลค่าการส่งออกถึง 2,298,198.8 ล้านบาท อุตสาหกรรมสิ่งทอประกอบด้วยอุตสาหกรรมต่อเนื่องหลายอุตสาหกรรมได้แก่ อุตสาหกรรมการผลิตเส้นด้าย การปั่นด้าย การทอผ้า การฟอกย้อมและการพิมพ์ตกแต่งสำเร็จรวมถึงอุตสาหกรรมการตัดเย็บเสื้อผ้าสำเร็จรูป อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่มีความต้องการใช้น้ำและสารเคมีในปริมาณสูง จากสถิติพบว่าอุตสาหกรรมสิ่งทอจะใช้น้ำโดยเฉลี่ยประมาณ 21-377 ลิตร/กิโลกรัมผ้า ซึ่งปริมาณน้ำที่ใช้จะขึ้นอยู่กับชนิดของผ้าและกระบวนการผลิต[2] กระบวนการทอผ้าเริ่มจากการนำเส้นด้ายจากหลอดม้วนลงบีม (Beam) เพื่อกำจัดจุดบกพร่องของเส้นด้ายและเพื่อให้เส้นด้ายมีความเป็นระเบียบ จากนั้นจะลงแป้งเพื่อเพิ่มความทนทานต่อแรงดึงและการขัดสีในขณะทอผ้า ทำให้ด้ายมีความยืดหยุ่นดีขึ้น ในกระบวนการทอผ้าเส้นด้ายจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ เส้นด้ายพุ่ง (Warper yarn) และเส้นด้ายยืน (Weft yarn) โดยเครื่องทอผ้าที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่เครื่องทอผ้าแบบใช้น้ำ (Water jet machine) โดยเส้นด้ายพุ่งจะถูกนำไปสอดและขัดสานกับเส้นด้ายยืนด้วยกระแสน้ำ โดยน้ำจะถูกปั๊มด้วยปั๊มความดันสูง (Ultra-high pressure pump) ที่ความดันประมาณ 40,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้วหรือประมาณ 2,760 บาร์ ทำให้น้ำที่ออกมามีความเร็วประมาณ 2.5 เท่าของเสียง[3] ด้วยความเร็วและแรงของกระแสน้ำทำให้น้ำมีพลังงานมากพอที่จะตัดเส้นด้ายให้ขาดออกจากกันได้เมื่อเส้นด้ายทั้งสองชนิดขัดสานกันแล้ว จากข้อมูลของบริษัทแห่งหนึ่งซึ่งประกอบกิจการเกี่ยวกับสิ่งทอ พบว่าปริมาณน้ำที่ใช้ในเครื่องทอผ้าแบบใช้น้ำประมาณ 400 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน น้ำเหล่านี้จะประกอบด้วยสารจำพวกแป้ง ได้แก่ อะคริลิกหรือพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA) น้ำมันและสารหล่อลื่น รวมถึงสารเคมีอื่นๆ น้ำเสียจากกระบวนการนี้จะถูกนำไปรวมกับน้ำเสียจากกระบวนการอื่นของโรงงานและผ่านการบำบัดเบื้องต้น (Pretreatment process) ด้วยการเติมสารเคมีซึ่งได้แก่ $FeCl_3$ และสารส้ม เพื่อลดความเป็นพิษและส่งสู่หน่วยงานที่รับบำบัดของเสียต่อไป ซึ่งวิธีนี้มีต้นทุนที่ค่อนข้างสูง ต้องการพื้นที่ในการทำงานมาก และมีสารเคมีตกค้างในน้ำที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นแล้ว

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการลดสารมลพิษในน้ำดังกล่าวได้แก่ น้ำมันและไขมัน ซีโอดี และบีโอดี รวมถึงสารแขวนลอยต่างๆ ด้วยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอน (Electro-Fenton) ซึ่งเป็นกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrocoaguation process) และกระบวนการเฟนตอน (Fenton process) โดยกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าเป็นกระบวนการสร้างสารก่อการจับตัว (Coagulant) ซึ่งสารก่อการจับตัวเหล่านี้จะไปจับกับสารมลพิษกลายเป็นตะกอน ส่วนกระบวนการเฟนตอนจะเป็นการสร้างอนุมูลอิสระของ $OH^{\bullet}$ จากเฟอรัสไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งอนุมูลอิสระของ $OH^{\bullet}$ จะเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงจึงสามารถลดสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้

1.2 วัตถุประสงค์ของวิจัย

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนในระบบต่อเนื่อง
2. เพื่อนำน้ำที่ผ่านกระบวนการกลับมาใช้ใหม่

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ
2. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนในระบบต่อเนื่อง

1.4 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

1. ค้นคว้าข้อมูล ทฤษฎี และรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. จัดหาอุปกรณ์การทดลอง ออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์ในระบบต่างๆ
3. วิเคราะห์สมบัติของน้ำเสียจากเครื่องทอผ้าแบบใช้น้ำของอุตสาหกรรมสิ่งทอ เช่น
    - น้ำมันและไขมัน
    - ค่าบีโอดี
    - ค่าซีโอดี
    - ความเป็นกรด-เบส
    - ปริมาณของแข็งแขวนลอย
4. ทำการทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการลดสารมลพิษในน้ำเสียจากเครื่องทอผ้าแบบใช้น้ำในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ
    - ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
    - ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมัน
    - อัตราการไหลวนของน้ำเสีย
    - ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. ทำการทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการลดสารมลพิษในน้ำเสียจากเครื่องทอผ้าแบบใช้น้ำในระบบต่อเนื่อง
6. วิเคราะห์ผลทางด้านเศรษฐศาสตร์และความเป็นไปได้ในการขยายขนาดระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อใช้ในอุตสาหกรรม
7. สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ระบบและภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากเครื่องทอผ้าแบบใช้น้ำของอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า
2. สามารถนำน้ำที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ใหม่ซึ่งจะเป็นการลดต้นทุนในการผลิต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

อุตสาหกรรมสิ่งทอมีบทบาทสำคัญยิ่งต่อเศรษฐกิจไทย เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดการจ้างงานและสร้างรายได้จากการส่งออกให้กับประเทศไทย ปัจจุบันอุตสาหกรรมดังกล่าวได้ขยายตัวมากขึ้นตามความต้องการของตลาด อุตสาหกรรมสิ่งทอในประเทศไทยมีกระบวนการผลิตที่ครบวงจรตั้งแต่การผลิตเส้นด้ายไปจนถึงการผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูป ก่อนที่จะผลิตเป็นเสื้อผ้าสำเร็จได้นั้นจะต้องมีการนำเส้นด้ายมาผลิตเป็นผ้าผืนเสียก่อน ในการทำผ้าผืนมีหลายกระบวนการด้วยกัน กระบวนการที่นิยมใช้คือกระบวนการทอผ้า เทคโนโลยีในปัจจุบันนั้นทำให้การทอผ้ามีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นแต่ก็ทำให้เกิดของเสียมากเช่นกัน เช่น น้ำเสีย จึงต้องมีการบำบัดก่อนปล่อยสู่ธรรมชาติ

2.1 กระบวนการทอผ้า

2.1.1 การทอ[4]

ลักษณะของผ้าทอจะประกอบไปด้วยด้าย 2 หมู่ หมู่หนึ่งขึงไปตามยาวของผ้า เรียกว่า ด้ายยืน (Warp) อีกหมู่หนึ่งขัดเส้นด้ายยืนเป็นมุมฉาก ทำให้เป็นผืนได้ เรียกว่า ด้ายพุ่ง (Filing หรือ Weft) เวลาทอเมื่อสอดด้ายพุ่งแต่ละเส้น ต้องสอดให้ออกมาจนถึงเส้นริมสุดของด้ายยืนแล้วจึงกลับวกสอดเข้าไปใหม่ ทำให้มีริมผ้าเป็นเส้นตรงทั้งด้านยืนและด้านพุ่ง แนวเส้นตรงที่ด้ายทั้งสองหมู่ขัดกัน เรียกว่า เกรน (Grain)

ขนาดกว้างของผ้าที่นิยมผลิตกันมากในเวลานี้ คือ

ผ้าฝ้าย	กว้าง	90-100	เซนติเมตร
ผ้าขนสัตว์	กว้าง	120-150	เซนติเมตร (ผ้าใยสังเคราะห์)
ผ้าไหม	กว้าง	72-105	เซนติเมตร (ผ้าใยสังเคราะห์)

และผ้าขนาดกว้างพิเศษเพื่อประโยชน์เฉพาะอย่าง เช่น ผ้าปูที่นอน พรม ผ้าห่มนอน ม่านหน้าต่าง

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องทอมี 3 อย่างได้แก่ ฟันหวี ตะกอ และกระสวย และมีเครื่องประกอบอื่นๆ ได้แก่ เครื่องประกอบด็อบบี้ (Dobby) เครื่องประกอบสวิฟเวล (Swivel) และเครื่องประกอบดู๊ป (Doup) ที่ทำให้ทอได้รวดเร็วและสวยงามยิ่งขึ้น

1. ฟันหวี (Weed) ภาษาไทยแท้เรียกว่า ฟืม ใช้โลหะเป็นซี่เล็กๆ ให้อยู่ห่างกันตามความต้องการ สมัยโบราณทำด้วยไม้ไผ่ผูกด้วยเชือก แล้วขนาบด้วยกรอบไม้จริงแต่ละช่องจะให้เส้นด้ายยืนสอดเข้าไปหนึ่งเส้น เป็นการจัดเส้นด้ายยืนให้อยู่ห่างกันตามความละเอียดของผ้า

2. ตะกอ (Harness) คือส่วนที่ใช้สอดด้ายเป็นด้ายยืน และแบ่งด้ายยืนออกเป็นหมู่ๆ ตามต้องการ เพื่อที่จะพุ่งกระสวยเข้าหากันได้สะดวก ตะกอมีอยู่ 2 อัน แต่ละอันเวลาสอดด้ายต้องสอดสลับกันไปเส้นหนึ่งเว้นเส้นหนึ่ง ที่ตะกอจะมีเชือกผูกแขวนไว้กับด้านบน โดยผูกเชือก เส้นเดียวสามารถจะเลื่อนไปมาได้ ส่วนล่างผูกเชือกติดกับคานเหยียบหรือตีนเหยียบไว้ เพื่อเวลาต้องการดึงด้ายให้เป็นช่องก็ใช้เท้าเหยียบคานเหยียบนี้ คานเหยียบจะเป็นตัวดึงตะกอให้เลื่อนขึ้นลง ถ้าหากต้องการทอเป็นลายๆ ก็ต้องใช้คานเหยียบหลายอัน เช่น ลายสองใช้คานเหยียบ 4 อัน เรียก ทอ 4 ตะกอ ลายสามใช้คานเหยียบ 6 อัน เรียก ทอ 6 ตะกอ จำนวนตะกอที่ช่างทอผ้าเกาะยอใช้ มีตั้งแต่ 2–12 ตะกอ ผ้าผืนใดที่ทอหลายตะกอถือว่ามีคุณภาพดีมีลวดลายที่ละเอียดสวยงาม และมีราคาแพง

3. กระสวย คือไม้ที่เป็นรูปเรียวตรงปลายทั้งสองข้าง ตรงกลางใหญ่ และมีร่องสำหรับใส่หลอดด้ายพุ่ง ใช้สำหรับพุ่งสอดไปในช่องด้ายยืนระหว่างการทอผ้า หลังจากที่ช่างทอเหยียบคาน เหยียบให้ตะกอแยกเส้นด้ายยืนแล้ว

ส่วนประกอบอื่นๆ มีหลอดม้วนด้ายยืน หลอดม้วนผ้า และเครื่องยกตะกอเหล่านี้เป็นส่วนประกอบของเครื่องทอผ้าธรรมดา จะใช้ทอได้แต่ผ้าลายเบื้องต้น 3 ลายเท่านั้น คือ ทอลายขัด (Plain weave) ทอลายสอง (Twill weave) และทอต่วน (Satin weave)

เมื่อต้องการให้มีลวดลายในเนื้อผ้าจะต้องมีเครื่องประกอบพิเศษช่วย หรือมิฉะนั้นก็ใช้เครื่องทอยกดอก (Jacquard)

เครื่องประกอบพิเศษ (Attachment) เครื่องนี้จัดทำขึ้นเป็นพิเศษสำหรับติดเข้ากับเครื่องทอธรรมดาช่วยยกตะกอแยกด้ายยืนออกเป็นหมวดหมู่ แต่ละเครื่องจะยกตะกอได้ตามที่กำหนดไว้เท่านั้น ที่ใช้กันมากมี 3 ชนิด

- เครื่องประกอบด็อบบี้ ใช้ยกตะกอได้ 25 ตะกอ เวลาทอผ้าที่มีลวดลายเล็กๆ เช่น ลายต่วนในผ้าทอธรรมดา
- เครื่องประกอบสวิฟเวล ใช้สำหรับทอผ้าที่มีจุดในเส้นด้ายในผ้าทอธรรมดา เช่น ผ้าป่านจุด
- เครื่องประกอบดู๊ป ใช้สำหรับยกเส้นด้ายยืนให้ข้ามไขว้กันได้เอง ใช้สำหรับทอผ้าก๊อซแบบเลโนหรือผ้าโปร่ง

เครื่องทอยกดอกเป็นเครื่องทอแบบพิเศษ ด้ายยืนแต่ละเส้นมีตะกอของตัวเองจะแยกยกครั้งละกี่เส้นก็ได้ ลวดลายที่ใช้ทอจะเป็นลวดลายที่สวยงามขนาดใหญ่และต่อเนื่อง มีอุปกรณ์

สำหรับแยกยกเส้นด้ายยืนเป็นเชือกผูกต่อกับลวดตะกอและตุ้มน้ำหนัก ลวดลายเจาะเป็นรูบนกระดาษแข็ง กระดาษแต่ละแผ่นควบคุมการแยกเส้นด้ายยืนเพื่อสอดด้ายพุ่งเพียงเส้นเดียว กระดาษแข็งเจาะนี้จะผูกต่อเนื่องกันเป็นวงกลมหลายสิบแผ่นจนกว่าจะครบรอบวงจรของลาย ปัจจุบันเครื่องทอบางแบบใช้เป็นแผ่นกระดาษยาวแผ่นเดียวเจาะรูจนครบวงจรของลายแล้วจึงผนึกติดกันเป็นวงกลม การสืบด้ายยืนต้องทำด้วยมือทั้งหมด เสียเวลามาก บางลายใช้เวลาหลายเดือนแต่เวลาทอจะทอได้เร็วเหมือนเครื่องทอธรรมดา

เนื่องจากเครื่องทอมีกระสวยทอได้ช้า แม้จะปรับปรุงให้กลวิธีสอดกระสวยทำได้เร็วขึ้น แต่ยังคงมีขั้นตอนมากตามเคย การวิจัยเพื่อพัฒนาการทอผ้าให้เร็วขึ้น จึงมุ่งไปในทางเครื่องทอไม่มีกระสวย ปัจจุบันมี 3 แบบ

1. เครื่องทอผ้าแบบด้ายพุ่ง (Water-jet loom) ใช้น้ำที่มีความดันสูงเป็นตัวขับดันให้ด้ายพุ่งสอดเข้าไปในด้ายยืนแบบต่อเนื่อง ด้ายพุ่งและด้ายยืนต้องไม่ดึงให้ตึงจนเกินไป ด้ายพุ่งใช้ทั้งที่เป็นม้วนใหญ่จัดวางไว้ข้างๆเครื่องทอ ส่งผ่านเข้าอุปกรณ์รูปกลองสำหรับควบคุมความยาวของด้ายพุ่งส่งผ่านเข้าไปในช่องของอุปกรณ์รูปแตร (Nozzle) น้ำจะขับดันด้ายพุ่งให้สอดเข้าไปในระหว่างด้ายยืน เมื่อกระทบฟันหวีให้ด้ายพุ่งแน่นแล้วด้ายพุ่งจะถูกตัดออก ถ้าเป็นด้ายใยสังเคราะห์จะถูกตัดโดยใช้โลหะร้อน ใช้เป็นริมผ้าได้

น้ำที่ใช้ส่งด้ายพุ่งนี้จะทำให้ผ้าเปียก จะถูกดูดออกโดยเครื่องซัคซันทำให้ผ้าแห้ง กระบวนการเช่นนี้จะเพิ่มต้นทุนการผลิตขึ้นอีก ยิ่งไปกว่านั้นน้ำนี้จะทำให้แป้งที่ลงเส้นด้ายยืนไว้อ่อนตัว บางครั้งจะละลายหลุดออก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกสารลงแป้งที่ทนน้ำได้พอสมควร แต่ต้อง ซักออกได้ง่าย ผ้าที่ทอจากเครื่องทอชนิดนี้จะมีเนื้อเรียบแน่นและสม่ำเสมอ นอกจากนี้เครื่องทอ ยังมีขนาดกระทัดรัด ไม่เกะกะและไม่เปลืองเนื้อที่ ทำงานเงียบ ทอเร็วมากประมาณนาทีละ 400-600 เส้น การซ่อมแซมและบำรุงรักษาเครื่องทำได้ง่าย

2. เครื่องทอแบบ Air-jet ประดิษฐ์โดยวิศวกรสิ่งทอชาวสวีเดน กระบวนการเชิงกลแรกๆ เหมือนกับเครื่องทอผ้าแบบด้ายพุ่ง เมื่อเส้นด้ายผ่านช่องออกมาแล้วจะถูกลมผลักส่งเข้าไปสอดระหว่างด้ายยืน เครื่องทอผ้าแบบนี้ทอได้เร็วนาทีละ 320 เส้น และได้ผ้าหน้าไม่กว้างจนเกินไปนักเพราะแรงลมจะสูญหายไปในระหว่างการส่งด้ายจากริมถึงริม

3. เครื่องทอผ้าไม่มีกระสวยแบบ Repair เหมาะสำหรับการทอด้ายใยสั้น ทอได้นาทีละ 300 เส้น มีอุปกรณ์สำหรับจับด้ายพุ่ง ทำด้วยเหล็กไม่เป็นสนิมอยู่ที่ริมผ้าทั้งสองด้าน พร้อมกับอุปกรณ์สำหรับตัดด้ายพุ่งตามขนาดกว้างของผ้า อุปกรณ์สำหรับจับด้ายพุ่งจะพบกันที่กึ่งกลางของเครื่องทอ อุปกรณ์จับด้ายพุ่งด้านซ้ายจะส่งเส้นด้ายให้อุปกรณ์ด้านขวาแล้วดึงให้ด้ายพุ่งสอดตลอดหน้ากว้างของผ้า ตัดด้ายพุ่งที่ริมผ้าอีกด้านหนึ่งพันปลายด้ายสอดกลับเข้ากับเส้นยืนเส้นริมเพื่อให้ริมผ้าแข็งแรง เครื่องทอผ้าชนิดนี้นิยมใช้ทอผ้าฝ้ายและผ้าขนสัตว์

2.1.2 การเตรียมการทอ

เพื่อให้สามารถทำงานได้สะดวก รวดเร็วและได้ผ้าที่มีคุณภาพดี ก่อนกระบวนการทอผ้าต้องเตรียมเส้นด้ายดังนี้

2.1.2.1 การกรอด้าย ด้ายที่ส่งมาจากโรงงานปั่นด้ายหรือซื้อมา โดยมากทำเป็นขดหรือบางทีม้วนเป็นม้วนใหญ่ โรงงานทอผ้าต้องนำมาม้วนใหม่ ใช้หลอดเฉพาะงาน เช่น แกนด้ายพุ่งหรือแกนสำหรับสาวด้ายยืน ระหว่างการกรอนี้ต้องหมั่นตรวจดูด้วยว่า เส้นด้ายสม่ำเสมอดี ไม่มีรอยคอดที่จะทำให้ขาดเร็ว ไม่มีปุ่มปมซึ่งจะเป็นอุปสรรคในการทอ ถ้ามีต้องเอาออกและต่อให้เรียบร้อยก่อน

2.1.2.2 การสาวด้ายยืน [5] การจะทอผ้าหน้ากว้างเท่าไร ใช้จำนวนด้ายกี่เส้นต้องคำนวณก่อนแล้วใช้ด้ายยืนที่กรอใส่หลอด ไว้จำนวนเท่ากับเส้นด้ายยืนสาวออกมาพร้อม ๆ กัน พันใส่ม้วนด้ายยืนหรือจะแบ่งสาวออกเป็นส่วน ๆ แล้วเอามารวมกันภายหลัง

2.1.2.3 การลงแป้งด้ายยืน (Sizing) สามารถทำได้โดยการใช้แป้งล้วน ๆ หรือผสมกับสารสังเคราะห์ชนิดอื่น เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ นำมาละลายน้ำแล้วเคลือบเส้นด้ายยืนที่สืบแล้วให้ทั่ว ทำให้เส้นด้ายแข็ง อยู่ตัวและทนต่อการเสียดสีของฟันหวีได้ การเลือกแป้งหรือสารสังเคราะห์ใช้ลงเส้นด้ายนี้ ต้องคำนึงถึงการตกแต่งภายหลังการทอด้วย สำคัญที่สุดคือ ต้องเป็นสารที่ล้างออกได้ง่าย

ในขณะที่เครื่องทอผ้ากำลังทำงานจะสังเกตเห็นได้ว่า เส้นด้ายยืนถูกแรงกระทำจากเครื่องทอผ้าจะทำให้เส้นด้ายขาดในขณะทอผ้า ดังนั้นจุดประสงค์ของการลงแป้งเส้นด้ายยืน (Warp sizing) คือเพื่อลดอัตราการขาดของเส้นด้าย ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของการทอและคุณภาพของผ้าสูงขึ้น

สารที่ใช้ในการลงแป้งด้ายยืนแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

- แป้ง ได้แก่ สารประเภทกาวที่ได้จากแป้งธรรมชาติ เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่งและแป้งสังเคราะห์จากสารเคมี เช่น พีวีเอ หรือพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และอะคริลิก เป็นต้น
- สารช่วยอื่นๆ ได้แก่ สารหล่อลื่นประเภทน้ำมันและไข สารป้องกันไฟฟ้าสถิตย์ สารกำจัดฟองและสารป้องกันเชื้อรา เป็นต้น

- แป้งธรรมชาติ

แป้งธรรมชาติใช้ในการลงแป้งกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาถูกและมีคุณสมบัติการก่อรูปเป็นแผ่นฟิล์ม เคลือบเส้นด้ายกับเส้นด้ายได้ดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งกันโครงสร้างผ้าที่ไม่แน่นมากนัก แต่ถ้าเป็นโครงสร้างที่มีเนื้อแน่น แป้งธรรมชาติจะไม่เหมาะเนื่องจากการผสมน้ำแป้งที่มีความเข้มข้นสูงจะหนืดมากและซึมผ่านเส้นด้ายไม่สะดวก นอกจากนี้ในขั้นตอนการไล่แป้งออกจะต้องใช้เอนไซม์เป็นตัวกำจัดแป้งออกจากเส้นด้าย ในขณะที่แป้งสังเคราะห์จากสารเคมีไม่ต้องใช้

แป้งธรรมชาติโดยทั่วไปประกอบด้วยโครงสร้าง 2 ส่วนคือ อะไมโลส (Amylosez) และอะโมโลเพคทิน (Amylopectin) สัดส่วนประมาณ 20:80 ตามลำดับ อะไมโลเพคทิน ซึ่งอยู่ส่วนรอบนอกมีสมบัติไม่ละลายในน้ำร้อน ความหนืดสูง ส่วนอะไมโลสละลายได้ดีในน้ำร้อนและมีความหนืดต่ำ

ดังนั้นเมื่อเริ่มต้นการผสมควรใช้น้ำอุณหภูมิต่ำ เพื่อให้อะไมโลเพคทินดูดซึมน้ำและค่อยๆ พองตัวด้วยการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นทีละน้อย เมื่ออุณหภูมิประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส อะไมโลสจะเริ่มละลายในน้ำจนกระทั่งถึง 90 องศาเซลเซียส แป้งจะแตกตัวเต็มที่ในช่วงน้ำแป้งที่มีความหนืดสูงและเมื่อต้มต่อไปด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้น ความหนืดจะค่อยๆ ต่ำลงจนถึงจุดคงที่ ดังนั้นก่อนปั๊มน้ำแป้งจากถังต้มส่งไปยังเครื่องลงแป้งจะต้องตรวจสอบความหนืดให้คงที่หรือที่เรียกว่าแป้งสุกเต็มที่ แป้งที่ยังไม่หนืดคงที่จะไปเคลือบเฉพาะผ้ารอบนอกเส้นด้าย ไม่สามารถซึมผ่านไปในเส้นด้ายได้สะดวก

ถ้าต้มแบบฝาเปิดโดยทั่วไปเมื่อน้ำแป้งเดือดหรือมีอุณหภูมิประมาณ 97 องศาเซลเซียส ให้ต้มต่อไปอีก 40-45 นาที ถ้าเป็นถังระบบความดันสูงเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 120 องศาเซลเซียส ให้ต้มต่อไปอีก 20-25 นาที

- แป้งสังเคราะห์จากสารเคมี

แป้งสังเคราะห์จากสารเคมีที่ใช้กันแพร่หลายในการลงแป้งเส้นด้ายยืนมีอยู่ 2 ชนิด คือ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และอะคริลิก (Acrylic)

ก . พอลิไวนิลแอลกอฮอล์

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เป็นแป้งสังเคราะห์ที่ผลิตโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสของสารพอลิไวนิลอะซีเตต ซึ่งหมู่อะซีเตตจะถูกแทนที่ด้วยไฮดรอกซิล พอลิเมอร์ที่ได้จะมีสมบัติการดูดซึมน้ำดีขึ้น

องค์ประกอบสำคัญอีกประการหนึ่งที่กำหนดสมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์คือระดับขั้นการพอลิเมอไรเซชัน (Degree of polymerization หรือ DP) โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงระหว่าง 500-2500

ข้อดีของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีหลายประการเมื่อเทียบกับแป้งธรรมชาติหรือแป้งธรรมชาติดัดแปลงดังนี้

- ความแข็งแรงและการยืดตัวของแผ่นฟิล์มดี ช่วยลดอัตราการขาด
- ความหนืดเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ถึงแม้จะต้มและกวนไว้เป็นเวลานาน
- การไล่แป้งออกทำได้ง่าย ในขั้นตอนการฟอกขาวไม่ต้องใช้เอนไซม์

ข้อเสียของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ มีหลายประการเช่นกัน คือ

- ราคาแพงสูงกว่าแป้งธรรมชาติ 8-10 เท่า
- อาจเกิดฟองอากาศในอ่างลงแป้งและจับตัวเป็นแผ่นที่ผิวน้ำแป้ง
- แผ่นฟิล์มยึดเกาะเส้นใยแข็งแรง ก่อปัญหาการแยกเส้นด้ายภายหลังอบแห้ง
- เมื่อใช้ร่วมกับแป้งธรรมชาติและสารหล่อลื่นประเภทน้ำมัน จะไม่สามารถละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี

ข. อะคริลิก

เส้นด้ายใยสังเคราะห์ เช่น พอลิเอสเตอร์ เมื่อลงแป้งด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะพบว่าเส้นด้ายค่อนข้างกระด้าง สารอาจจะเคลือบอยู่เฉพาะรอบนอก ในขณะทอผ้าจะร่วงหลุดเป็นผงเนื่องจากการยึดติดไม่ดีพอ สารอะคริลิกได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งเส้นด้ายฟิลาเมนท์และสปัน อะคริลิกมีอยู่หลายประเภทและมีสมบัติแตกต่างกันตามชนิดเส้นด้ายที่จะลงแป้งตลอดจนภาวะความชื้นภายในห้องทอ แต่โดยทั่วไปอะคริลิกจะมีข้อดี และข้อเสียที่คล้ายคลึงกันดังนี้คือ

ข้อดี

- อะคริลิกยึดเกาะกับเส้นใยได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารลงแป้งชนิดอื่น
- แผ่นฟิล์มของสารอะคริลิกจะมีความนุ่ม เรียบ โค้งงอตัวดี
- มีการยึดตัวได้ดี
- อะคริลิกซึมผ่านเข้าไปภายในเส้นด้ายได้ง่ายและยึดเกาะเส้นใยระหว่างกันได้ดี
- อะคริลิกละลายน้ำได้ง่าย ใช้ร่วมกับแป้งธรรมชาติได้ดี

ข้อเสีย

- อะคริลิกเป็นสารที่ไวต่อความชื้น
- ความหนืดค่อนข้างสูง
- แผ่นฟิล์มไม่ทนต่อการเสียดสี
- ราคาแพง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- สารหล่อลื่น

ก. น้ำมัน

การใช้แป้งธรรมชาติหรือแป้งสังเคราะห์ เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และอะคริลิกยังไม่เพียงพอสำหรับการลงแป้งเส้นด้าย จำเป็นต้องใช้สารช่วยตัวอื่นๆ เพื่อให้เส้นด้ายที่ผ่านการลงแป้งมีสมบัติเหมาะแก่การทอผ้ายิ่งขึ้น สารตัวช่วยที่ช่วยมีบทบาทสำคัญมากตัวหนึ่ง คือ สารหล่อลื่นจำพวกน้ำมัน (Oiling agent) ผสมลงไปในน้ำแป้งโดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้คือ

- ช่วยให้แผ่นฟิล์มนุ่มและโค้งงอตัวได้ดี
- ช่วยป้องกันขนเส้นด้ายโผล่พ้นลำตัวเส้นด้ายเนื่องจากไฟฟ้าสถิตย์
- ลดการเสียดสีระหว่างเส้นด้ายและส่วนต่างๆ ของเครื่องทอ
- ช่วยให้เส้นด้ายยืดตัวได้ดีขึ้น

ข. ไข

ไขจะใช้เป็นสารเคลือบเส้นด้าย (Waxing agent) ที่ผ่านการลงแป้งและอบแห้งแล้วจึงเรียกการเคลือบไขในขั้นตอนนี้ว่า After waxing จุดประสงค์การคลือบจะคล้ายคลึงการใช้น้ำมันผสมลงในน้ำแป้ง แต่ถ้าผสมมากไปจะมีข้อเสีย คือ ไม่สามารถละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกับแป้งหรือพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ จึงควรใช้ในอัตราส่วนที่น้อย ดังตัวอย่างสูตรแป้งประมาณ 0.2-0.8 กก. ต่อน้ำแป้ง 100 ลิตร ส่วนปริมาณไขเคลือบเส้นด้ายที่เหมาะสมคือ ประมาณร้อยละ 0.2-0.3 ของน้ำหนักเส้นด้าย

การควบคุมปริมาณไขติดไปกับเส้นด้าย ทำได้ดังนี้

- ปรับความเร็วลูกกลิ้งในรางใส่ไข หรือที่เรียกว่า รางเทียน ถ้าลูกกลิ้งหมุนเร็วไขจะติดไปมาก ถ้าหมุนข้าไปไขจะติดน้อย
- อุณหภูมิในรางเทียนที่เหมาะสมคือ 85 $\pm$ 2 องศาเซลซียส เป็นระดับที่ความหนืดไขคงที่ ถ้าอุณหภูมิต่ำความหนืดจะสูง ไขจะติดเส้นด้ายมาก
- มุมเส้นด้ายที่สัมผัสกับลูกกลิ้งในรางเทียน มุมสัมผัสมากไขจะติดไปมาก มุมสัมผัสน้อยไขจะติดไปน้อย
- ระดับไขในราง ถ้าระดับไขสูงจะติดเส้นด้ายไปมาก ระดับไขต่ำจะติดไปน้อย

ไขมีประโยชน์ต่อเส้นด้ายยืนและช่วยให้การทอผ้าดีขึ้น แต่ถ้าปริมาณมากเกินไปจะทำให้ล้างออกไม่หมดในขั้นตอนการไล่แป้งและฟอกขาว เมื่อนำผ้าไปย้อมสีจะเกิดรอยด่างได้

2.1.2.4.**การสอดฟันหวี** ทางภาคตะวันออกเรียกวิธีปฏิบัติขั้นนี้ว่า การสืบด้ายยืน เป็นการเอาด้ายยืนแต่ละเส้นสอดเข้าไปในช่องระหว่างฟันหวีหรือฟืมที่จะใช้ทอ เพื่อบังคับให้ด้ายยืน

อยู่ห่างกันตามระยะที่ต้อง การเลือกขนาดของฟืมก็สำคัญเหมือนกัน ต้องทราบด้วยว่าฟืมขนาดใดจะเหมาะกับด้ายขนาดไหน ทอแล้วจะได้ผ้าเนื้อห่าง-ถี่อย่างไร

2.1.2.5. **การร้อยตะกอ** หรือ การสืบตะกอ คือการนำด้ายยืนร้อยเข้าไปในห่วงของตะกอ แบ่งด้ายยืนออกเป็นหมู่ จะเป็นกี่หมู่ขึ้นอยู่กับลวดลายที่ต้องการทอ

ในขั้นตอนการทอ ควรจะสอดด้ายพุ่งแต่ละเส้นนั้น ต้องปฏิบัติอย่างน้อย 3 ขั้นคือ

ขั้นที่ 1 สับตะกอให้ด้ายยืนแยกออกจากกันเปิดเป็นช่องว่างสำหรับให้ด้ายพุ่งผ่านเข้าไปได้

ขั้นที่ 2 พุ่งกระสวยด้ายพุ่งให้สอดเข้าไปตามหว่างด้ายยืน

ขั้นที่ 3 ปล่อยตะกอให้ด้ายยืนรวมเป็นหมู่เดียวกันตามเดิม กระทบฟันหวีโดยแรง ฟันหวีจะพาด้ายพุ่งให้เข้ามาชิดกันเป็นเส้นตรง

ทั้ง 3 ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ต้องปฏิบัติโดยแท้จริง แต่เพื่อให้ผ้ามีเนื้อผ้าเรียบสม่ำเสมอกันมากขึ้นเวลาทอด้วยมือจะต้องทำอีก 2 ขั้น คือ สับตะกอใหม่อีกครั้งหนึ่งให้ตรงกันข้ามกับขั้นที่ 1 กระทบโดยแรงอีกครั้งหนึ่ง จึงพุ่งด้ายพุ่งเส้นที่ 2 จะทำให้ได้เนื้อแน่นขึ้น

2.2 วิธีการจัดการน้ำเสีย

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอประกอบด้วยสิ่งเจือปนหรือความสกปรกหลายชนิดขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา น้ำเสียจากบ้านเรือนอาจมีเศษวัสดุขนาดใหญ่ กรวดทราย ไขมันตลอดจนสารอินทรีย์ในรูปของ สารแขวนลอยและสารปะปนอยู่ ขณะที่น้ำเสียอุตสาหกรรมจะมีสิ่งปนเปื้อนหลากหลายขึ้นอยู่กับประเภทของโรงงาน วัตถุดิบตลอดจนกระบวนการผลิตที่ใช้ การจัดการน้ำเสียเหล่านี้ส่วนใหญ่จะต้องการกระบวนการบำบัดมากกว่าหนึ่งแบบ เช่น

2.2.1 **กระบวนการบำบัดทางกายภาพ** (Physical Treatment Process) [6]

เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยแรงต่างๆ เพื่อนำไปใช้ในการแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออกจากน้ำเสีย โดยมากจะใช้เป็นขั้นตอนแรกของระบบบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ การดักด้วยตะแกรง (Screening) การตกตะกอน (Sedimentation) การทำให้ลอย (Flotation) การกรอง (Filtration) เป็นต้น และมีการบำบัดโดยวิธีทางกายภาพอีกขั้นตอนหนึ่ง เพื่อทำการแยกตะกอนออกจากน้ำที่ผ่านขั้นตอนการบำบัดทางชีวภาพ อย่างไรก็ตามการบำบัดทางกายภาพเป็นเพียงขั้นเริ่มต้นในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งสามารถลดความเข้มข้นของสารมลพิษได้ในระดับหนึ่ง และน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดนี้จะต้องมีการบำบัดขั้นตอนต่อไปอีกจนกระทั่งได้น้ำทิ้งที่มีสมบัติผ่านมาตรฐาน

2.2.2 กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (Biological Process)[7-9]

มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดสารอินทรีย์เป็นหลัก นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดสารอนินทรีย์บางชนิด เช่น ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสีย โดยอาศัยจุลินทรีย์ซึ่งมีอยู่ในธรรมชาติเปลี่ยนสารอินทรีย์หรือสิ่งสกปรกให้อยู่ในรูปของแก๊สและของแข็ง (เซลล์ใหม่ของจุลินทรีย์) เพื่อง่ายแก่การแยกออกจากน้ำเสียโดยกระบวนการทางกายภาพในขั้นต่อไป ทำให้ปริมาณสารอินทรีย์หรือความสกปรกในน้ำลดลงหรือหมดไป ในกระบวนการบำบัดทางชีวภาพจะเป็นการควบคุมปริมาณน้ำเสียให้สัมพันธ์กับปริมาณจุลินทรีย์และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายให้เหมาะสม การบำบัดน้ำเสียถูกแบ่งตามลักษณะการใช้ออกซิเจนได้เป็น 2 ประเภทหลัก

2.2.2.1 การบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Treatment Process)

เป็นการอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดที่ดำรงชีพโดยไม่ใช้แก๊สออกซิเจน ทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ ให้เปลี่ยนเป็นเซลล์ใหม่และแก๊สบางชนิด ส่วนใหญ่เป็น CO_2 และ CH_4 โดยมี H_2S และอื่นๆ ปะปนมาด้วย โดยมีสารประกอบอินทรีย์บางชนิดเกิดขึ้นมาด้วย เช่น แอมโมเนีย เป็นต้น ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

$$\text{CHONPS} + \text{Anaerobic Bacteria} \longrightarrow \text{Bacteria ใหม่} + CO_2 + CH_4 + \text{พลังงาน} + H_2S + NH_3 + \text{อื่นๆ} \qquad (2.1)$$

2.2.2.2 การบำบัดแบบใช้อากาศ (Aerobic Treatment Process)

เป็นการอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดที่ดำรงชีพโดยใช้แก๊สออกซิเจน โดยจุลชีพจะย่อยสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นเซลล์ใหม่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และสารประกอบบางชนิด เช่น แอมโมเนีย หรือไนเตรต ฟอสเฟต ซัลเฟต เป็นต้น ดังปฏิกิริยา

$$\text{CHONPS} + O_2 \xrightarrow{\textit{Bacteria}} \text{Bacteria ใหม่} + CO_2 + PO_4^{3-} + SO_4^{2-} + H_2O + NO_3^{-} \qquad (2.2)$$

การบำบัดทางชีวภาพจะไม่สามารถลดปริมาณของอนุมูลอิสระของไนโตรเจนได้แก่แอมโมเนียและเกลือแอมโมเนีย และสารอนินทรีย์ต่างๆ เช่น ซัลไฟด์ และโครเมียม ให้ได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง

2.2.3 กระบวนการบำบัดทางเคมี (Chemical Treatment Process) [10, 11]

กระบวนการนี้ต้องพึ่งพาสารเคมีเพื่อให้เกิดผลตามที่ต้องการ โดยจะใช้กระบวนการนี้กำจัดสารเคมีหรือสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่ไม่สามารถใช้กระบวนการอื่นได้หรือได้ผลแต่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูง เช่น โลหะหนัก สารพิษ สภาพความเป็นกรด-เบสสูง ๆ การฆ่าเชื้อโรค เป็นต้น กระบวนการทางเคมีที่นำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้แก่ การสร้างและการรวมตะกอน (Coagulation and Flocculation) การตกผลึก (Precipitation) การออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction) และการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) ซึ่งกระบวนการบำบัดทางเคมีสามารถลดปริมาณของสารมลพิษได้ในระดับหนึ่ง แต่ระบบจะมีหลายขั้นและมีการใช้สารเคมีเป็นจำนวนมาก และต้องอาศัยพื้นที่เป็นบริเวณกว้างซึ่งจะทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น น้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดนี้จะต้องมีการบำบัดขั้นตอนต่อไปอีกหลายระบบ

2.3 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเคมีไฟฟ้า[12]

เคมีไฟฟ้า (Electrochemistry) เป็นวิชาทางเคมี ซึ่งว่าด้วยความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยหลักการของเคมีไฟฟ้าได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ มากมาย เช่น การศึกษากลไกและจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาสังเคราะห์ทางสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า

2.3.1 องค์ประกอบของเซลล์เคมีไฟฟ้า (Electrochemical cell)

เซลล์เคมีไฟฟ้ามีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนคือ

1.ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ขั้วไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และอุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอก ขั้วไฟฟ้าแบ่งเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) หรือขั้วไฟฟ้าชี้บอก (Indicating electrode) ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary electrode) หรือขั้วไฟฟ้าร่วม (Counter electrode) และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) โดยขั้วไฟฟ้าใช้งานจะทำหน้าที่เป็นขั้วทดลองของเซลล์ ขั้วไฟฟ้าช่วยจะทำหน้าที่เป็นตัวช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอนหรือกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งาน ส่วนขั้วไฟฟ้าอ้างอิงทำหน้าที่ช่วยให้ครบวงจรของเซลล์เคมีไฟฟ้า สำหรับวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าใช้งานหรือขั้วไฟฟ้าช่วย และนิยมใช้ในระบบที่มีการวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้าเท่านั้น ลักษณะเฉพาะของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงคือ ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ไม่มีปฏิกิริยาตอบสนองต่อสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ ไม่แปรตามปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร และไม่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ จัดเป็นขั้วไฟฟ้าแบบนอนโพลาไรซ์ในอุดมคติ (Ideal nonpolarization) โดยในการใช้งานทั่วไปจะประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าเพียง 2ชนิดคือ

ขั้วไฟฟ้าใช้งาน และขั้วไฟฟ้าร่วม ขั้วไฟฟ้าใช้งานจะทำหน้าที่เป็นขั้วลบซึ่งเรียกว่าขั้วแคโทด และขั้วไฟฟ้าช่วยจะทำหน้าที่เป็นขั้วบวกซึ่งเรียกว่าขั้วแอโนด

2. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) คือสารละลายที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งผ่านไอออนระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 โดยการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลาย

3. อุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอก คือ อุปกรณ์ใดๆ ที่เชื่อมต่อกับขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 จากภายนอกของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยอุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอกจะแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้า และตัวต้านทาน

2.3.2 **ปฏิกิริยาในเซลล์ไฟฟ้าเคมี** (Reaction in electrochemical cell)

ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะเกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออนภายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะถูกเรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชัน (ปฏิกิริยารีดอกซ์) โดยปฏิกริยานี้จะแบ่งเป็นปฏิกิริยาย่อย คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) และปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) โดยจะเกิดที่ขั้วแอโนด และแคโทด ตามลำดับ ปฏิกิริยาจะเกิดเมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าให้ระบบโดยไอออนหรือโมเลกุลของสารที่มีค่าความสามารถในการรับอิเล็กตรอนสูงจะเข้ามารับอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทดเกิดเป็นปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) ซึ่งไอออนหรือโมเลกุลที่เข้ามารับอิเล็กตอนจะถูกเรียกว่าตัวออกซิไดส์ (Oxidizing agent) ส่วนไอออนหรือโมเลกุลที่มีค่าความสามารถในการรับอิเล็กตรอนต่ำจะเสียอิเล็กตรอนที่ขั้วแอโนดเกิดเป็นปฏิกิริยาปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ซึ่งไอออนหรือโมเลกุลที่เสียอิเล็กตรอนนี้จะถูกเรียกว่าตัวรีดิวซ์ (Reducing agent)

ปฏิกิริยารีดักชัน

$$[Ox]^{n+} + ne^{-} \longrightarrow Re \qquad (2.3)$$

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน

$$[Re] \longrightarrow [Ox]^{n+} + ne^{-} \qquad (2.4)$$

2.3.3 **ชนิดของเซลล์เคมีไฟฟ้า** (Elecrochemical cell)

1.เซลล์อิเล็กโตรไลต์ (Electrolytic cell) เป็นเซลล์ที่ต้องให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่ต้องการในระบบ เช่น การชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า เป็นต้น

2. เซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) เป็นเซลล์ที่ปฏิกิริยาเคมีสามารถเกิดขึ้นได้เองโดยมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนทำเกิดกระแสไฟฟ้า เช่น แบตเตอรี่ เซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น

2.3.4 ลักษณะของเซลล์เคมีไฟฟ้า (Elecrochemical cell)

เซลล์ไฟฟ้าเคมีสามารถแบ่งตามลักษณะได้ 2 แบบคือ

1. เซลล์ที่ไม่แบ่งแยก (Cell without liquid junction) คือ เซลล์เคมีไฟฟ้าที่ขั้วแอโนด และแคโทดอยู่ร่วมกันในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เดียวกัน

2. เซลล์ที่แบ่งแยก (Cell with liquid junction) คือ เซลล์เคมีไฟฟ้าที่แอโนด และแคโทดไม่ได้อยู่ร่วมกันในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เดียวกัน ซึ่งจะต้องมีการเชื่อมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทั้งสองเข้าด้วยกัน โดยอาจจะเชื่อมกันด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane) หรือสะพานไอออน (Salt bride)

2.3.5 ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (E^{o})

ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้าเป็นสมบัติทางกายภาพและเป็นสมบัติเฉพาะตัวของระบบออกซิเดชัน – รีดักชัน ค่า E^{o} ได้จากการวัดค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วของเซลล์ซึ่งเกิดจากครึ่งเซลล์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าดังกล่าวกับครึ่งเซลล์มาตรฐานของไฮโดรเจน และสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีแอกทิวิตี (Activity) เป็นหนึ่ง ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ถือเป็นศักย์ขั้วไฟฟ้า (เพราะศักย์ไฟฟ้าไฮโดรเจนเป็นศูนย์โวลต์) โดยศักย์ขั้วไฟฟ้านี้คือศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้าโดยลักษณะเฉพาะที่สำคัญของค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน มีดังนี้ [13]

- ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน ถือเป็นค่าศักย์มาตรฐานสัมพัทธ์ เพราะเป็นค่าที่ได้เมื่อขั้วไฟฟ้าขั้วหนึ่งของเซลล์ต้องเป็นขั้วไฮโดรเจนเสมอ
- ตามสัญนิยมของเคมีไฟฟ้า ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้าต้องได้จากการเขียนปฏิกิริยาครึ่งเซลล์เป็นแบบรีดักชันเท่านั้น ค่าศักย์ไฟฟ้าจึงอาจถือได้ว่าเป็นค่าศักย์รีดักชันสัมพันธ์ (Relative reduction potentail)
- ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเป็นค่าที่ไม่แปรผันตามจำนวนโมลที่ใช้ในการปรับสมดุลของสมการครึ่งเซลล์
- ค่าศักย์ไฟฟ้าจะผันแปรไปตามอุณหภูมิ ดังนั้นค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานจะเป็นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
- ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ จะเป็นค่าบ่งชี้ถึงความแรงของการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน คือเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานมีค่าสูงกว่า จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ดีกว่า

ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานแสดงถึงแนวโน้มของขั้วไฟฟ้าที่จะรับอิเล็กตรอนว่ามีความสามารถมากน้อยเพียงใด หรือเรียกว่าเป็นการแสดงความสามารถในการเป็นตัวออกซิไดส์หรือตัวรีดิวซ์ เช่น MnO_4 กับ Fe^{2+} ในสารละลายกรดพบว่า ค่า E° ของระบบ Fe^{3+}/Fe^{2+} = +0.77 โวลต์ และค่า E° ของระบบ MnO_4^-/Mn^{2+} = +1.52 โวลต์ จะเห็นว่าระบบของ MnO_4^-/Mn^{2+} มีค่า E° มากกว่าระบบ Fe^{3+}/Fe^{2+} แนวโน้มที่จะรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่า ระบบ Fe^{3+}/Fe^{2+} จึงเป็นตัวออกซิไดส์ที่ดีกว่า

2.3.6 ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (Electrode potential)

ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าหนึ่งๆ เป็นค่าศักย์สัมพัทธ์ซึ่งนำมาหาศักย์ของขั้วไฟฟ้าได้ก็ต่อเมื่อรู้ค่าศักย์ขั้วไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้าทั้งสองของเซลล์ โดยจะสามารถคำนวนค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะมาตรฐานได้จาก

$$E^{\circ}_{cell} = E^{\circ}_{(cathode)} - E^{\circ}_{(anode)}$$

ถ้าค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้ถ้าเป็นบวกแสดงว่าวงจรเซลล์เคมีไฟฟ้าดังกล่าวเป็นการต่อเซลล์แบบกัลวานิก ในทางกลับกันถ้าค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้เป็นลบแสดงว่าเป็นการต่อเซลล์แบบอิเล็กโทรไลติก

2.3.7 หลักการอุณหพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้าที่ไหลระหว่างขั้วไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำ การผลักดันให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในวงจรจะทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าขึ้น งานที่เกิดขึ้นเป็นการลดค่าพลังงานอิสระของกิบบ์ (Gibbs free energy) ที่อยู่ในเซลล์ไฟฟ้า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เป็นแบบผันกลับได้ (Reversible reaction) ดังนั้นจึงมีค่าพลังงานอิสระของกิบบ์คือ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\Delta G = \Delta G^{\circ} + RT \ln \frac{[\mathrm{Re}]^b}{[Ox]^a} \qquad (2.5)$$

เมื่อ ΔG = ค่าพลังงานอิสระกับกิบบ์หน่วย (จูลต่อโมล)

ΔG° = พลังงานอิสระของกิบบ์ของสารที่ภาวะมาตรฐาน (จูลต่อโมล)

T = อุณหภูมิ (องศาเคลวิน)

R = ค่าคงที่ของแก๊สเท่ากับ 8.314 (จูลต่อโมลต่อองศาเคลวิน)

$\frac{[\mathrm{Re}]^{b}}{[Ox]^{a}}$ = อัตราส่วนแอกทิวิตีของสารผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้น

และจากความสัมพันธ์ของค่าพลังงานอิสระของกิบป์กับค่าศักย์ไฟฟ้าซึ่งมีค่าเท่ากับงานที่ได้

$$\Delta G = -\,nF\Delta E \tag{2.6}$$

$$\Delta G^{\circ} = -\,nF\Delta E^{\circ} \tag{2.7}$$

เมื่อ - $nF\Delta E$ คือ งานไฟฟ้าที่เกิดที่เซลล์ไฟฟ้า (จูล)

n = จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ในการปฏิกิริยา (กรัมสมมูลต่อโมล)

F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมบ์ต่อกรัมสมมูล)

ΔE = ค่าศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)

ΔE° = ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (โวลต์)

2.3.8 **สมการเนินสท์** (Nernst equation)

จากสมการปฏิกิริยาของ Van't Hoff ในเทอมของการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ เมื่อปฏิกิริยาอยู่ในภาวะสมดุล เช่น ปฏิกิริยา

$$aA + bB + \ldots + ne^- \longleftrightarrow cC + dD + \ldots \tag{2.8}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานอิสระที่เปลี่ยนแปลง (ΔG) กับแอกทิวิตีเริ่มต้นของสารตั้งต้นและแอกทิวิตีสุดท้ายของผลิตภัณฑ์จะเป็น

$$\Delta G = \Delta G^{\circ} + RT\ln\frac{[C]^{c}[D]^{d}}{[A]^{a}[B]^{b}} \tag{2.9}$$

เมื่อ $[c]^{c}[D]^{d}$ คือแอกทิวิตีของผลิตภัณฑ์

$[A]^{a}[B]^{b}$ คือแอกทิวิตีของสารตั้งต้น

จากค่าสมการ $\Delta G = -\,nF\Delta E$ แทนใน (7) จะได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$- nF\Delta E = - nF\Delta E^{\circ} + RT\ln\frac{[C]^{c}[D]^{d}}{[A]^{a}[B]^{b}} \qquad (2.10)$$

นั้นคือ

$$E = E^{\circ} - \frac{RT}{nF}\ \ln\frac{[C]^{c}[D]^{d}}{[A]^{a}[B]^{b}} \qquad (2.11)$$

สมการเนินสท์สามารถใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น ใช้หาแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์โดยที่ทราบแอกทิวิตีของสารต่าง ๆ ในปฏิกิริยาทราบอุณหภูมิและค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานจะสังเกตเห็นว่าถ้าแอกทิวิตีเป็นหนึ่งค่า E เท่ากับ E° ซึ่งหมายถึงเป็นศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรด

จากสมการ (2.11) ถ้าแทนค่าคงที่ต่าง ๆ และอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส จะได้สมการใหม่เป็น

$$E = E^{\circ} - \frac{0.0592}{n}\log\frac{[C]^{c}[D]^{d}}{[A]^{a}[B]^{b}} \qquad (2.12)$$

หากพิจารณาทั้งเซลล์ไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย 2 ครึ่งเซลล์ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จะมีค่าเป็น

$$E_{cell} = E_1 - E_2 = E_{cathode} - E_{anode} \qquad (2.13)$$

นอกจากนี้แล้วเซลล์เคมีไฟฟ้า ก็เหมือนอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ก็คือ มีความต้านทานอยู่จะต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าจำนวนหนึ่งเพื่อเอาชนะความต้านทานภายใน จึงเกิดการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าซึ่งศักย์ไฟฟ้านี้เราเรียก ศักย์ของโอห์ม (Ohmic Potential, E_R) ดังนั้นหากจะคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ให้ถูกต้องจะต้องรวมค่าศักย์ของโอห์มนี้ไปด้วย จะได้สมการใหม่เป็น

$$E_{cell} = E_1 - E_2 + E_R = E_{cathode} - E_{anode} + E_R \qquad (2.14)$$

2.3.9 **กฎของฟาราเดย์** (Faraday's Law)

ไมเคิล ฟาราเดย์ ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายอิเล็กโตรไลต์กับปริมาณสารที่เปลี่ยนแปลงที่ขั้วไฟฟ้า (เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายอิเล็กโตรไลต์กับระยะเวลาที่ปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านซึ่งกฎของฟาราเดย์มี 2 ข้อ คือ

กฎข้อที่ 1 ปริมาณของสาร (m) ที่เกิดที่อิเล็กโทรดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณประจุของกระแสไฟฟ้า (Q) ที่ผ่านเข้าไปในสารละลาย

กฎข้อที่ 2 ถ้าผ่านปริมาณไฟฟ้าจำนวนเท่าๆ กันลงในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ต่างชนิดกัน ปริมาณของสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักสมมูลของสารเหล่านั้น

จากกฎข้อที่สองของฟาราเดย์สามารถเขียน สมการได้ดังนี้

$$m = \frac{sM_w\, it}{nF} \qquad (2.15)$$

เมื่อ m = มวลของสารนั้น (กรัม)

s = สัมประสิทธิ์มวลสารสัมพันธ์ของชนิดสารเคมี

M_w = น้ำหนักอะตอมหรือน้ำหนักโมเลกุล (กรัมต่อโมล)

i = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

t = เวลาที่ใช้ (วินาที)

n = จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ในการปฏิกิริยา(กรัมสมมูลต่อโมล)

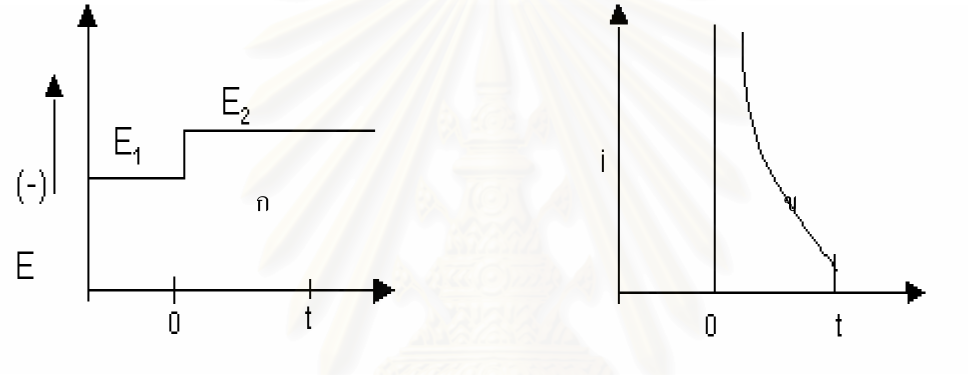
F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมบ์ต่อกรัมสมมูล)

2.3.10 **การควบคุมการทำงานของกระบวนการเคมีไฟฟ้า**

สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled – Potential Method or Potentionstatic Mode) และการทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled – Current Method or Galvanostatic Mode) ซึ่งหลักการทำงานแต่ละแบบเป็นดังนี้

2.3.10.1 **การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่**

พื้นฐานของการทำงานเป็นการควบคุมค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงให้คงที่ ค่ากระแสไฟฟ้าในระบบจะเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา เมื่อปรับค่าความต่างศักย์ให้เพียงพอกับไอออนบวกในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวของขั้วแคโทด ซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นของไอออนที่บริเวณผิวหน้ามีค่าต่ำลง ผลที่เกิดจากการทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่แสดงในรูป 2.1 (ก) ตัวออกซิไดส์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ปริมาณของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ลดลง ส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบลดลงดังแสดงในรูป 2.1 (ข) เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น



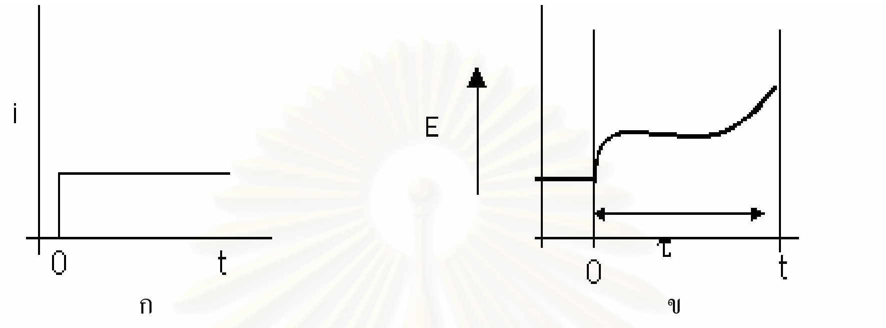
รูปที่ 2.1 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ เมื่อ E_1 คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นก่อนการเกิดปฏิกิริยา และ E_2 คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าเมื่อเกิด Diffusion limited rate หรือเป็น Mass transfer limited.

2.3.10.2 **การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่**

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงในระบบจะเปลี่ยนไปกับเวลา วิธีการนี้เรียกว่า Chronopotentiometry หรือ Chronopotiometric technique เมื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งสองให้คงที่ ทำให้สารออกซิไดส์ (M^{n+}) เกิดปฏิกิริยารีดักชันกลายเป็นสารรีดิวซ์ (M) ด้วยอัตราคงที่

$$M^{n+} + ne^{-} \longrightarrow M \qquad (2.16)$$

ดังนั้นค่าความต่างศักย์จะแปลตามค่าความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลง M^{n+} ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าลดลง ค่าความต่างศักย์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าก็จะลดลงด้วย ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์โดยที่กระแสไฟฟ้าคงที่เรียกว่า Transition time (τ) ซึ่งค่านี้สัมพันธ์กับความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ดังรูปที่ (2.2)



รูปที่ 2.2 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่

2.4 **การประยุกต์ใช้หลักการเคมีไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสีย**

กระบวนการเคมีไฟฟ้าได้รับความสนใจมากในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมี หลักการของกระบวนการเคมีไฟฟ้าคือการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างสารละลายกับผิวของขั้วไฟฟ้าแล้วเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยอาศัยพลังงานจากแหล่งกำเนิด ไฟฟ้าภายนอก

2.4.1 **กระบวนการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า** (Electrodeposition) [12]

กระบวนการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าจะเหมาะสมกับการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักผสมอยู่ การนำโลหะหนักกลับคืนโดยกระบวนการนี้มีความรวดเร็ว แม่นยำเพราะมีค่าในการเลือกเกิดปฏิกิริยาสูง และข้อได้เปรียบในกระบวนการนี้คือไอออนโลหะสามารถนำกลับคืนได้ในรูปของโลหะบริสุทธิ์ หลักการทำงานของกระบวนการมีดังนี้

เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอกสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบด้วยไอออนบวกและไอออนลบ ก่อให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวของขั้วไฟฟ้ามีดังนี้

ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด

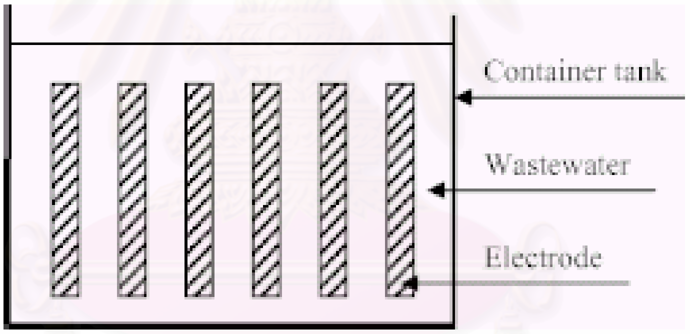
$$M^{n+} + ne^- \longrightarrow M \qquad (2.17)$$

$$2H_2O + 2e^- \longrightarrow H_2(g) + 2OH^- \qquad (2.18)$$

ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด

$$2H_2O \longrightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^- \qquad (2.19)$$

เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าสำหรับการนำโลหะหนักกลับคืนในน้ำเสียมีหลายรูปแบบ แต่ที่นิยมใช้ คือ เครื่องปฏิกรณ์แบบ Tank cell ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เนื่องมีรูปแบบที่ง่ายต่อการขยายหรือลดขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อนำไปใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย



รูปที่ 2.3 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Tank cell [14]

อิเล็กโทรดที่ใช้ ขั้วแอโนดจะใช้วัสดุที่ไม่แตกตัวให้ไอออนของโลหะ (M^+) ทนทานต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับระบบ เรียกขั้วไฟฟ้าชนิดนี้ว่า Insoluble electrode ขั้วไฟฟ้าที่นิยมนำมาใช้จะทำมาจากโลหะออกไซด์เคลือบบนผิวของไทเทเนียม เช่น Ti/RuO_2 ขั้วแคโทด ที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ แกรไฟต์ (Graphite) หรือคาร์บอนที่มีลักษณะเป็นเส้น (Carbon fiber) เนื่องจากมีราคาถูก

2.4.2 **กระบวนการตกตะกอนด้วยเคมีไฟฟ้า** (Electroprecipitation) [15]

กระบวนการตกตะกอนด้วยเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าชนิดมีเยื่อเลือกผ่าน ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือ ขั้วแคโทดและขั้วแอโนดวางคร่อมแผ่นเยื่อเลือกผ่าน โดยเยื่อเลือก

ผ่านใช้ในการบำบัดน้ำเสียมี 2 ชนิด คือ เยื่อเลือกผ่านไอออนลบ (Anion-exchange membrane) และเยื่อเลือกผ่านไอออนบวก (Cation-exchange membrane) แสดงดังรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5 ตามลำดับ

เยื่อเลือกผ่านไอออนลบ จะยอมให้ไอออนลบในสารอิเล็กโทรไลต์เคลื่อนที่ผ่านได้ แต่ไอออนบวกจะผ่านไม่ได้ สำหรับเยื่อเลือกผ่านไอออนบวกจะมีลักษณะตรงกันข้ามคือไอออนบวกในสารอิเล็กโทรไลต์เคลื่อนที่ผ่านได้ แต่ไอออนลบจะผ่านไม่ได้

สำหรับน้ำเสียประกอบด้วยโครเมียมหรือโลหะอื่นๆ โลหะหนักจะถูกกำจัดออกมาในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ ซึ่งปฏิกิริยาแสดงตามสมการที่ (2.20) - (2.26)
โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ฝั่งแคโทด

$$CrO_4^{2-} + 4H_2O + 3e^- \longrightarrow Cr^{3+} + 8OH^- \qquad (2.20)$$

$$2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2 \qquad \text{(ภาวะเป็นกรด)} \qquad (2.21)$$

$$2H_2O + 2e^- \longrightarrow H_2 + 2OH^- \qquad \text{(ภาวะเป็นเบส)} \qquad (2.22)$$

และจะเกิดการตกตะกอนของไฮดรอกไซด์ของโลหะตามมา

$$M^{n+} + nOH^- \longrightarrow M(OH)_n(s) \qquad (2.23)$$

$$Cr^{3+} + 3OH^- \longrightarrow Cr(OH)_3\,(s) \qquad (2.24)$$

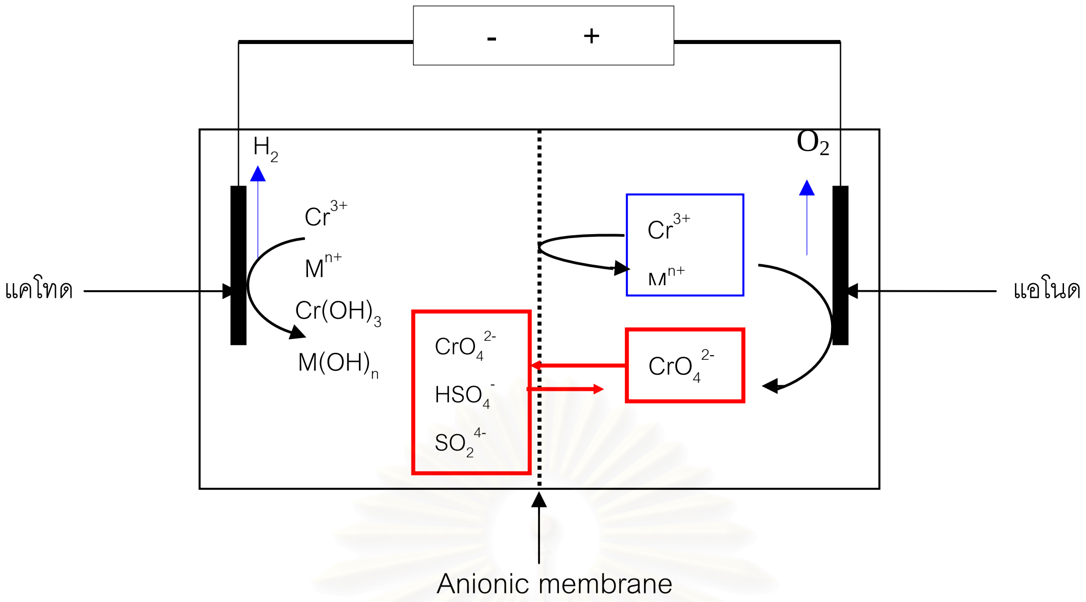
ส่วนที่ฝั่งแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2O

$$2H_2O \longrightarrow 4e^- + O_2 + 4H^+ \qquad \text{(ภาวะเป็นกรด)} \qquad (2.25)$$

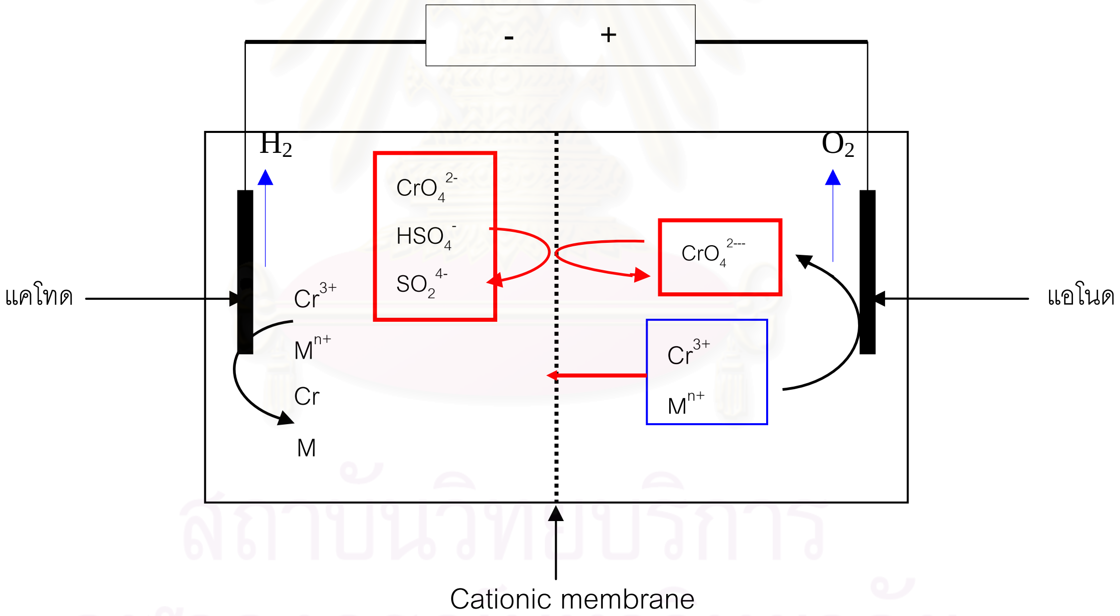
$$4OH^- \longrightarrow O_2 + 4H_2O + 2e^- \qquad \text{(ภาวะเป็นเบส)} \qquad (2.26)$$

จากปฏิกิริยาข้างต้นพบว่าที่ฝั่งแคโทดจะมีความเป็นกรด-เบสเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีไฮดรอกไซด์ (OH^-) ไอออนเกิดขึ้นตลอดเวลาและไฮดรอกไซด์ไอออนก็เกิดปฏิกิริยากับโลหะและตกตะกอนในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของโลหะที่ฝั่งแคโทดลดลง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.4 กระบวนการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าชนิดที่มีเยื่อเลือกผ่านไอออนลบ[15]



รูปที่ 2.5 กระบวนการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าชนิดที่มีเยื่อเลือกผ่านไอออนบวก[15]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4.3 **กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า** (Electro-oxidation: EO) [16]

กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าสามารถลดปริมาณของสารอินทรีย์ และสารมลพิษในน้ำเสียได้ โดยสารอินทรีย์และสารมลพิษจะถูกทำลายด้วยอนุมูลอิสระของ $OH^{\bullet}$

(Hydroxyl radicals) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรง (Strong oxidizing agent) เรียกกระบวนการนี้ว่า Direct anodic process โดยสารอินทรีย์จะถูกออกซิไดส์โดยอนุมูลอิสระของ $OH^{\bullet}$ (Hydroxyl radicals) ทำให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลงจนกระทั่งกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดังปฏิกิริยา (2.27 – 2.28) และศักยภาพของตัวออกซิไดส์

$$H_2O + M[] \longrightarrow M[OH^-] + H^+ + e^- \quad (2.27)$$

$$R + M[OH^-] \longrightarrow M[] + RO + H^+ + e^- \quad (2.28)$$

เมื่อ M[] คือ พื้นที่ผิวของขั้วแอโนดที่เกิดปฏิกิริยา

$M[OH^-]$ คือ $OH^{\bullet}$ ที่ดูดซับบนผิวของขั้วแอโนด

R คือ สารอินทรีย์

RO คือ ผลิตภัณฑ์ของสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดส์

ถ้าในสารละลายมีคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ผสมอยู่ คลอไรด์ไอออนจะทำปฏิกิริยากับโลหะของขั้วไฟฟ้าเกิด $ClOH^{\bullet}$ (Chlorohydroxyl radicals) ซึ่งมีสมบัติเป็น Indirect oxidation ดังปฏิกิริยา (2.29)

$$H_2O + M[] + Cl^- \longrightarrow M[ClOH^-] + H^+ + 2e^- \quad (2.29)$$

เมื่อ $M[ClOH^-]$ คือ $ClOH^{\bullet}$ ที่ดูดซับบนผิวของขั้วแอโนด ซึ่งสามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์ได้ ตามปฏิกิริยา (2.30)

$$R + M[ClOH^-] \longrightarrow M[] + RO + H^+ + Cl^- + e^- \quad (2.30)$$

และ $ClOH^{\bullet}$ สามารถ ทำปฏิกิริยากับ Cl^- เกิดแก๊สคลอรีน (Cl_2) ตามปฏิกิริยา (2.31) ซึ่งจะช่วยลดปริมาณของเชื้อโรคในน้ำเสียได้

$$H_2O + M[ClOH^-] + Cl^- \longrightarrow M[] + Cl_2 + 3H^+ + O_2 + 4e^- \quad (2.31)$$

นอกจากนี้อนุมูลอิสระของ $OH^{\bullet}$ จะสลายตัวเป็นโอโซน (O_3) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์ได้เช่นกัน ตามปฏิกิริยา (2.32) และ (2.33) ประสิทธิภาพในการออกซิไดส์สารอินทรีย์จะขึ้นอยู่กับชนิดของขั้วแอโนดและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

$$O_2 + M[OH^-] \longrightarrow M[]+O_3+ H^+ + e^- \tag{2.32}$$

$$H_2O + M[OH^-] \longrightarrow M[]+H_2O_2 + H^+ + e^- \tag{2.33}$$

2.4.4 **กระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้า** (Electrocoagulation: EC)

กระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าเป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าที่เหมาะกับการบำบัดน้ำเสียที่มีสารมลพิษจำพวก ไขมัน น้ำมัน สีย้อม สารแขวนลอย สารอินทรีย์และโลหะหนัก โดยกระบวนการนี้จะอาศัยสารก่อการจับก้อนซึ่งเกิดจากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีไปทำให้อนุภาคของคอลลอยด์หรือสารมลพิษในน้ำเสียที่มีอนุภาคเล็กๆ มารวมตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่ขึ้นจนหนักพอที่จนตกตะกอนลงมาโดยอาศัยสารสร้างตะกอน ซึ่งสารก่อการจับก้อนนี้เกิดจากขั้วไฟฟ้าชนิดที่กัดกร่อนได้ (Sacrificial electrode) เช่น เหล็กหรืออะลูมิเนียม ในการสร้างสารก่อการจับก้อนโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานภายนอกไปยังขั้วไฟฟ้า โลหะที่เป็นขั้วแอโนดจะมีการสูญเสียอิเลกตรอนกลายเป็นโลหะไอออนละลายอยู่ในน้ำเสียดังปฏิกิริยา (2.34) และ (2.35) โลหะไอออนเหล่านี้จะรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่า Polynuclear metal hydroxyl complexes ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารก่อการจับก้อน

กรณีของอะลูมิเนียมเมื่อใช้เป็นขั้วแอโนดอะลูมิเนียมจะแตกตัวให้ Al^{3+} ไอออนในสารละลาย (2.34) และ Al^{3+} ไอออนรวมตัวกับ OH^- หรือ H_2O ขึ้นอยู่กับความเป็นกรด - เบสของระบบ และตกตะกอนออกมาในรูปของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) ดังปฏิกิริยา (2.35) และ (2.36) [17]

$$Al \longrightarrow Al^{3+} + 3e^- \tag{2.34}$$

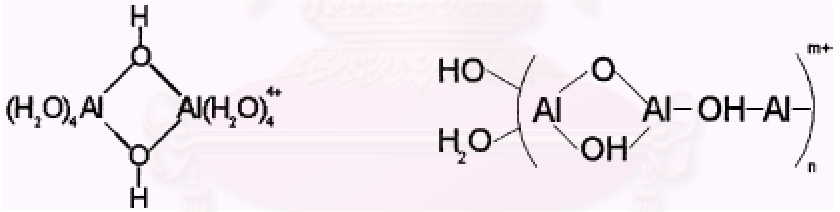
ภาวะสารละลายที่เป็นเบส

$$Al^{3+} + 3OH^- \longrightarrow Al(OH)_3 \quad (2.35)$$

ภาวะสารละลายที่เป็นกรด

$$Al^{3+} + 3H_2O \longrightarrow Al(OH)_3 + 3H^+ \quad (2.36)$$

นอกจากนี้ Al^{3+} ไอออนในสารละลายรวมตัวกับ Polyhydroxides กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่า Poly-nuclear hydroxyl aluminum (III) complexes ซึ่งอาจจะเป็น Monomeric และ Polymeric แต่สุดท้ายสารประกอบเชิงซ้อนของ Al^{3+} ไอออนจะตกตะกอนในรูปของ $Al(OH)_3$ สำหรับตัวอย่างของ Monomeric ได้แก่ $Al(OH)^{2+}$ $Al(OH)_2^{+}$ $Al(OH)_{4-}$ เป็นต้น ส่วนตัวอย่างของ polymeric ได้แก่ $Al_2(OH)_2^{4+}$ $Al_6(OH)_{15}^{3+}$ $Al_7(OH)_{17}^{4+}$ $Al_8(OH)_{20}^{4+}$ และ $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$ ซึ่งโครงสร้างของ Dimeric และ Polymeric aluminum (III) hydroxo complexes แสดงดังรูป 2.6



ก ข

รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของ Poly-nuclear hydroxyl aluminum (III) complexes [18]
(ก) Dimeric Al^{3+} hydroxo complexes
(ข) Polymeric Al^{3+} hydroxo complexes

สำหรับกรณีของเหล็กเมื่อใช้เป็นขั้วแอโนดจะแตกตัวให้ Fe^{2+} ในสารละลาย ดังสมการ (2.37) และตกตะกอนออกมาในรูปของ ($Fe(OH)_n$) เมื่อ n = 2 หรือ 3 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเป็นกรด – เบสของสารละลาย ปฏิกิริยาที่เกิดแสดงสมการที่ (2.38) และ (2.39) [19]

$$Fe \longrightarrow Fe^{2+} + 2e^- \quad (2.37)$$

ภาวะสารละลายที่เป็นเบส

$$Fe^{2+} + 2OH^{-} \longrightarrow Fe(OH)_2 \qquad (2.38)$$

ภาวะสารละลายที่เป็นกรด

$$4Fe^{2+} + 10H_2O + O_2 \longrightarrow 4Fe(OH)_3 + 8H^{+} \qquad (2.39)$$

Fe^{3+} ในสารละลายสามารถรวมตัวกับ Polyhydroxides กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่า Poly-nuclear hydroxyl iron (III) complexes ซึ่งอาจจะเป็น Monomeric และ Ferric hydroxo complexes ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-เบส แต่สุดท้ายสารประกอบเชิงซ้อนของ Fe^{3+} จะตกตะกอนในรูปของ $Fe(OH)_3$ สำหรับตัวอย่างของ Monomeric และ Ferric hydroxo complexes ได้แก่ $Fe(OH)^{2+}$ $Fe(OH)_2^{+}$ $Fe(OH)_{4-}$ $Fe(H_2O)_5OH^{2+}$ $Fe(H_2O)_4(OH)_2^{+}$ เป็นต้น [20]

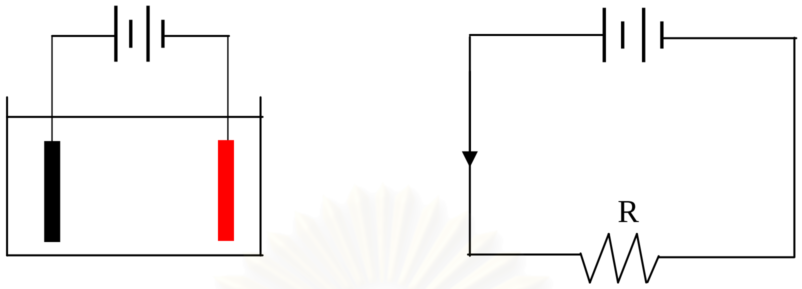
สำหรับการวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์นั้นมี 2 แบบ ขึ้นอยู่กับความต้องการของวิธีที่ใช้ในการบำบัด ถ้าระบบบำบัดต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีทำให้ลอย ควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวตั้ง เพื่อให้ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเป็นตัวพาสารแขวนลอยดังกล่าวขึ้นมาพร้อมกับตะกอนเบาที่เกิดขึ้น แต่ถ้าระบบต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีการตกตะกอนควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวนอนโดยให้ขั้วแอโนดอยู่ด้านล่าง [21]

การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่ง่ายที่สุด คือ มีขั้วไฟฟ้าเพียง 1 คู่โดยขั้วหนึ่งเป็นแอโนดและอีกขั้วเป็นแคโทดดังรูปที่ 7 ซึ่งการวางแบบนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากการนำไปประยุกต์ใช้นั้นต้องการขนาดใหญ่ พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามาก ทำให้ต้องมีการจัดเรียงตัวของแผ่นขั้วไฟฟ้าแบบต่างๆขึ้น ในกรณีที่ต้องใช้ขั้วไฟฟ้ามากกว่า 1 คู่ สามารถเลือกวิธีต่อทางไฟฟ้าได้ 2 แบบ คือ

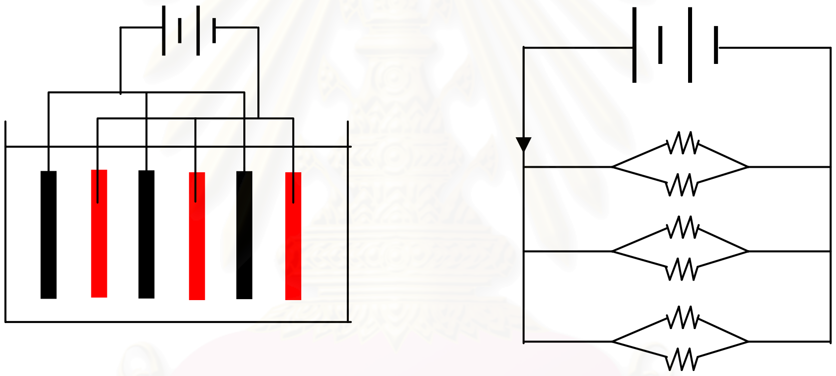
- มอนอโพลาร์ (Monopolar electrode) มีจุดเชื่อมของขั้วไฟฟ้าแต่ละแผ่นทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ซึ่งวางสลับกันขั้วละแผ่นโดยที่ผิวหน้าทั้งของด้านของขั้วไฟฟ้าแผ่นเดียวกันจะมีขั้วเดียวกัน ในทางไฟฟ้านั้นขั้วไฟฟ้าจะมีการจัดเรียงเซลล์ได้ 2 แบบคือ

- แบบขนาน (Parallel connections) กระแสไฟฟ้าจะถูกแบ่งให้แต่ละเซลล์ขึ้นอยู่กับความต้านทานภายในของเซลล์นั้นๆ โดยที่ค่าความต่างศักย์ของระบบจะเท่ากันดังรูปที่ 2.8

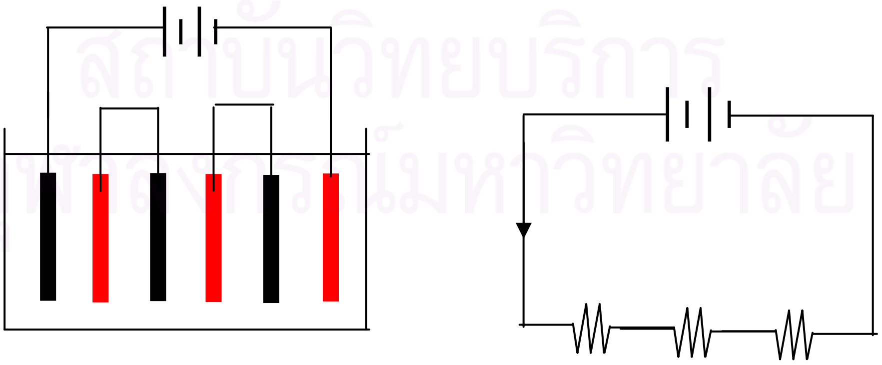
- แบบอนุกรม (Series connections) มีการจัดเรียงของขั้วไฟฟ้าคล้ายเซลล์เดี่ยวหลาย ๆ เซลล์มาต่อกัน โดยมีจุดเชื่อมของขั้วไฟฟ้าดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.7 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบมอนอโพลาร์แบบเซลล์เดี่ยว



รูปที่ 2.8 การจัดเรียงของขั้วไฟฟ้ามอนอโพลาร์แบบขนาน

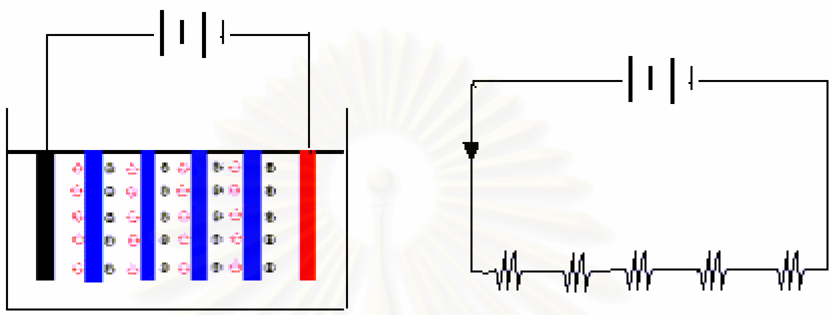


รูปที่ 2.9 การจัดเรียงของขั้วไฟฟ้ามอนอโพลาร์แบบอนุกรม

- ไบโพลาร์ (Bipolar electrodes) มีจุดเชื่อมของขั้วไฟฟ้าเพียง 2 จุดเท่านั้นเฉพาะขั้วไฟฟ้าที่อยู่ปลายนอกสุดดังรูปที่ 2.10 โดยแต่ละแผ่นของขั้วไฟฟ้ามีด้านหนึ่งเป็นขั้วลบซึ่งทำ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้าที่เป็นขั้วแอโนดและอีกด้านหนึ่งเป็นขั้วบวกซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด ในทางไฟฟ้านั้นขั้วไฟฟ้าจะมีการจัดเรียงเซลล์แบบอนุกรม โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูง เนื่องจากความต้านทานที่สูงกว่าของเซลล์ซึ่งต่อแบบอนุกรม แต่จะมีกระแสไฟฟ้าของระบบเท่ากัน นั่นคือจะมีกระแสไฟฟ้าเดียวกันไหลผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่งการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบนี้ทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและบำรุงรักษาในขณะทำการใช้งาน



รูปที่ 2.10 การจัดเรียงของขั้วไฟฟ้าไบโพลาร์

2.4.5 ปฏิกิริยาเฟนตอนและกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอน

ปฏิกิริยาเฟนตอน คือ ปฏิกิริยาระหว่างเฟนตอนรีเอเจนต์ ซึ่งได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอรรัสไอออน ได้เป็น อนุมูลอิสระของ $OH^{\bullet}$ (Hydroxyl radicals) ดังปฏิกิริยาที่ 2.40

$$Fe^{2+} + H_2O_2 \longrightarrow Fe^{3+} + OH^{\bullet} + HO^{-} \qquad (2.40)$$

นอกจากปฏิกิริยาดังกล่าวยังมีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้นอีก แสดงดังปฏิกิริยาข้างล่าง

$$Fe^{3+} + H_2O_2 \longrightarrow Fe^{2+} + H^{+} + HOO^{\bullet} \qquad (2.41)$$

$$Fe^{2+} + OH^{\bullet} \longrightarrow Fe^{3+} + HO^{-} \qquad (2.42)$$

$$OH^{\bullet} + H_2O_2 \longrightarrow HOO^{\bullet} + H_2O \qquad (2.43)$$

$$Fe^{2+} + HO_2^{\bullet} \longrightarrow Fe^{3+} + HOO^{-} \qquad (2.44)$$

$$Fe^{3} + HO_2^{\bullet} \longrightarrow Fe^{2+} + H^{+} + O_2 \qquad (2.45)$$

$$2HO_2^{\bullet} \longrightarrow H_2O_2 + O_2 \qquad (2.46)$$

อนุมูลอิสระของ $OH^{\bullet}$ จะมีสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์สารอินทรีย์ที่รุนแรง โดยในน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ (R) อนุมูลอิสระของ $OH^{\bullet}$ จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับอะตอมของคาร์บอน ในโมเลกุลของสารอินทรีย์ ดังปฏิกิริยาที่ 2.47

$$R + OH^{\bullet} \longrightarrow R^{\bullet} + H_2O \qquad (2.47)$$

อนุมูลอิสระของสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจะเกิดทำปฏิกิริยาแก๊สออกซิเจนอย่างรวดเร็วดังปฏิกิริยา

$$R^{\bullet} + O_2 \longrightarrow R\text{-}OO^{\bullet} \qquad (2.48)$$

$$2R^{\bullet} + O_2 \longrightarrow 2R\text{-}O^{\bullet} \qquad (2.49)$$

$R\text{-}OO^{\bullet}$ และ $R\text{-}O^{\bullet}$ ไม่เสถียรจึงเกิดปฏิกิริยากับไอออนของเหล็กและโปรตอนดังปฏิกิริยา

$$R\text{-}OO^{\bullet} + Fe^{2+} \longrightarrow ROO\text{-}Fe \qquad (2.50)$$

$$ROO\text{-}Fe + H^{+} \longrightarrow R\text{-}OOH + Fe^{3+} \qquad (2.51)$$

$$ROO\text{-}Fe + 3H^{+} \longrightarrow R\text{-}OH + H_2O + Fe^{3+} \qquad (2.52)$$

$$R\text{-}O^{\bullet} + Fe^{2+} \longrightarrow RO\text{-}Fe \qquad (2.53)$$

$$RO\text{-}Fe + H^{+} \longrightarrow R\text{-}OH + Fe^{3+} \qquad (2.54)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ซึ่ง R-OH และ R-OOH จะทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของ $OH^\bullet$ ต่อไปจนได้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในที่สุด

กระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนเป็นกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าและกระบวนการเฟนตอน

กระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนแบ่งตามลักษณะของการเติมเฟนตอนรีเอเจนต์ได้ดังนี้

- การเติมเฟอรัสไอออนจากภายนอก และผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่ขั้วแคโทด โดยใช้อิเล็กโทรดที่ไม่ละลาย เช่น แสตนเลส แกรไฟต์ เป็นต้น
- การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากภายนอก และผลิตเฟอรรัสไอออนจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่ขั้วแอโนด โดยใช้อิเล็กโทรดละลายได้ เช่น เหล็ก เป็นต้น
- การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากภายนอก และผลิตเฟอรรัสไอออนจากปฏิกิริยารีดักชันของเฟอริกไอออน หรือตะกอนของเฟอริกไฮดรอกไซด์
- การผลิตเฟอรรัสไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากปฏิกิริยาเคมี

2.5 หลักการในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้า

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเคมีไฟฟ้ามีหลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่จะประยุกต์ใช้ โดยมีหลักการสำคัญในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเคมีไฟฟ้า คือ

1. เครื่องปฏิกรณ์ควรเป็นแบบที่ง่ายที่สุด และค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด ถ้าเป็นไปได้ควรหลีกเลี่ยงการออกแบบระบบที่มีการกวนผสม
2. เครื่องปฏิกรณ์ต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีอย่างสมบูรณ์ก่อนจะผ่านสู่ขั้นตอนอื่น ในกรณีที่มีกระบวนการอื่นนอกจากกระบวนการเคมีไฟฟ้ามาเกี่ยวข้อง ควรจะแยกออกจากกระบวนการเคมีไฟฟ้า
3. เมื่อจำเป็นต้องมีการกวนผสมหรือการไหลของสารละลายต้องพิจารณาการถ่ายเทมวลสารเป็นอันดับแรก เช่น การกวนผสมอาจจะต้องใช้แผ่นกั้น หรือใบพัด
4. ควรออกแบบให้มีการกระจายความต่างศักย์ไฟฟ้าให้สม่ำเสมอทั่วพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า
5. ควรออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าน้อยเพราะระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ายิ่งมากจะต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้น
6. การเลือกวัสดุที่ใช้ทำเครื่องปฏิกรณ์นั้นต้องคำนึงถึงสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่จะผ่านกระบวนเคมีไฟฟ้า และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเคมีไฟฟ้า โดยสามารถคงทน ไม่สึกกร่อนภายใต้สภาพการใช้งาน

7. การเลือกวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้านั้นต้องคำนึงถึงปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นให้สอดคล้องกับความต้องการของระบบบำบัด และปฏิกิริยาข้างเคียงที่อาจขึ้นได้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศังกรม์ คงเจาะ (2005)[22] ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้ขั้วเหล็กเป็นอิเล็กโทรด พบว่าค่าความต่างศักย์ของการจัดวางขั้วไฟฟ้าด้วยมอนอโพลาร์แบบขนานมีค่าต่ำกว่าการจัดวางขั้วไฟฟ้ามอนอร์โพลาร์แบบอนุกรมและไบโพลาร์แบบขนานตามลำดับ เนื่องจากการจัดวางขั้วไฟฟ้ามอนอร์โพลาร์แบบอนุกรมและไบโพลาร์แบบขนานทำให้ขั้วไฟฟ้าเรียงตัวเป็นแบบอนุกรมจึงส่งผลให้ความต้านทานของระบบมีค่าสูงกว่าระบบที่ต่อแบบขนาน ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านต้องใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าการจัดวางขั้วมอโนโพลาร์แบบขนานจะให้ค่าร้อยละการกำจัดค่าบีโอดีและซีโอดีสูงกว่าการจัดวางขั้วไฟฟ้ามอนอร์โพลาร์แบบอนุกรม และการจัดวางขั้วไฟฟ้าไบโพลาร์แบบขนานตามลำดับ โดยร้อยล่ะของการกำจัดของค่าบีโอดีและค่าซีโอดีสูงสุดในช่วงเวลา 15-20 นาที เนื่องจากการจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบดังกล่าว มีระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดน้อยกว่าจึงทำให้การถ่ายเทมวลสารของสารเฟอรัส (Fe^{2+})ไอออนและไฮดรอกไซดีไอออนในระบบเกิดการรวมตัวเป็นสารสร้างตะกอนได้เร็วกว่า

Inan และคณะ (2004) [23] ศึกษาการลดค่าซีโอดี สี และของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียจากโรงโม่แป้งซึ่งมีปริมาณน้ำมันมะกอกอยู่มาก บำบัดโดยวิธีการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า พบว่าที่ภาวะความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าอยู่ระหว่าง 10-40 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 6 7และ 9 เป็นเวลาน้อยกว่า 30 นาที เมื่อใช้ขั้วอะลูมิเนียมสามารถลดค่าซีโอดีได้ 52 เปอร์เซ็นต์และเมื่อใช้ขั้วเหล็กสามารถลดค่าซีโอดีได้ 42 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี่ยังทำการทดลองที่ภาวะ ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 6.2 ± 0.2 เป็นเวลา 10 นาที พบว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระไฟฟ้า ค่าซีโอดีก็จะลดลงมากขึ้นเช่นกันนอกจากจะสามารถลดค่าซีโอดีได้แล้วยังสามารถลดสีและของแข็งแขวนลอยได้ปริมาณมากอีกด้วย

Xu และ Zhu (2004) [24] ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงอาหารโดยวิธีการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า พบว่าค่าการนำไฟฟ้ามีผลต่อการลดลงของมลพิษในน้ำน้อยมาก แต่มีผลต่อการประหยัดพลังงานที่ใช้ ที่ภาวะความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าระหว่าง 10-14 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ความเป็นกรด-เบสระหว่าง 3-10 และระยะห่างระหว่างขั้ว 10 mm เวลาที่ใช้บำบัด 30 นาที สามารถลดน้ำมันได้ 95 เปอร์เซ็นต์ และลดค่าซีโอดี 75 เปอร์เซ็นต์

Murugananthan และคณะ (2004) [25] ศึกษาการลดสารมลพิษในน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกหนังโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า โดยใช้ขั้วแอโนดคือเหล็กและอะลูมิเนียม พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการลดสารแขวนลอยและน้ำมันได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์

Jiantuan และคณะ (2004) [26] ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากการซักผ้าด้วยกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าควบคู่กับกระบวนการลอยตัวด้วยกระแสไฟฟ้า (Electroflotation) พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียคือความเป็นกรด-เบสประมาณ 5-9 ในเวลา 5-10 นาที โดยสามารถลดความขุ่น ค่าซีโอดี สารฟอสเฟสและสารลดแรงตึงผิวมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์

Zhang และคณะ (2005) [27]ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากกองขยะด้วยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนโดยใช้ Ti/RuO_2-IrO_2 เป็นขั้วไฟฟ้า พบว่าที่ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า 2.1 เซนติเมตร อัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.34 โมลต่อลิตรต่อเฟอรัสไอออน 0.038 โมลต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 33.61 แอมแปร์ต่อตารางเมตร สามารถลดค่าซีโอดีได้มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 รูปแบบการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอน

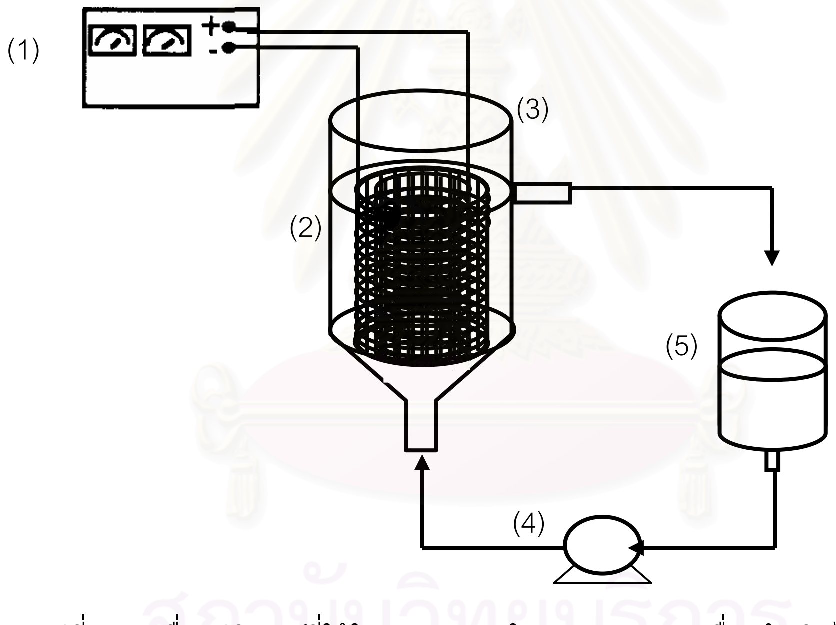
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส ยี่ห้อ Horiba รุ่น F-22
2. ขั้วไฟฟ้า ได้แก่ เหล็ก เหล็กกล้าไร้สนิม
3. เครื่องกวนแม่เหล็ก
4. เครื่องชั่งละเอียด
5. ตู้อบ (Oven)
6. นาฬิกาจับเวลา
7. กระดาษกรองเบอร์ 1
8. กระดาษกรอง GF/C
9. เครื่องดูดสุญญากาศพร้อมขวดดูดสุญญากาศ
10. หลอดย่อย (Digestion Vessels) เป็นหลอดแก้วบอโรซิลิเคท (Borosilicate) ขนาด 20x 150 หรือ 25x150 มิลลิเมตร มีฝาสลักเกลียวซึ่งทำด้วยทีเอฟอี (Tetrafluoroethylene, TFE)
11. ตู้ควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 150 ± 2 องศาเซลเซียส
12. ขวดบีโอดี (BOD Bottle) ขนาด 250 - 300 มิลลิลิตร พร้อมจุกปิด
13. ตู้ควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 20 ± 1 องศาเซลเซียส
14. เครื่องอังไอน้ำ
15. เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.1. เครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าและกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนในระบบกะ แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วย

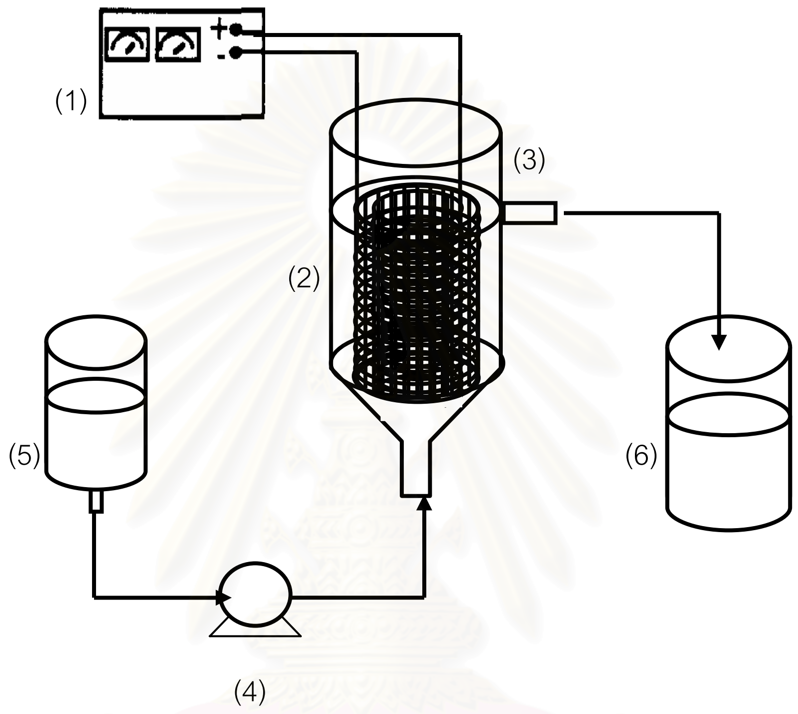
1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง รุ่น ZS 3205-2X
2. ขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด ทำจากเหล็กมีลักษณะเป็นตะแกรง
   - ขั้วแคโทดมีพื้นที่ผิว 1073.5 ตารางเซนติเมตร
   - ขั้วแอโนดมีพื้นที่ผิว 968.7 ตารางเซนติเมตร
3. เครื่องปฏิกรณ์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 เมตร สูง 0.4 เมตร
4. ปั๊ม 1 ตัว รุ่น NH-5PX บริษัท Pan World Co., Ltd.
5. ถังพักมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.17 เมตร สูง 0.3 เมตร มีปริมาตรประมาณ 2 ลิตร



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในระบบกะ (1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (2) ขั้วไฟฟ้า (3) เครื่องปฏิกรณ์ (4) ปั๊ม (5) ถังพัก

3.2.2. เครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าในระบบต่อเนื่อง

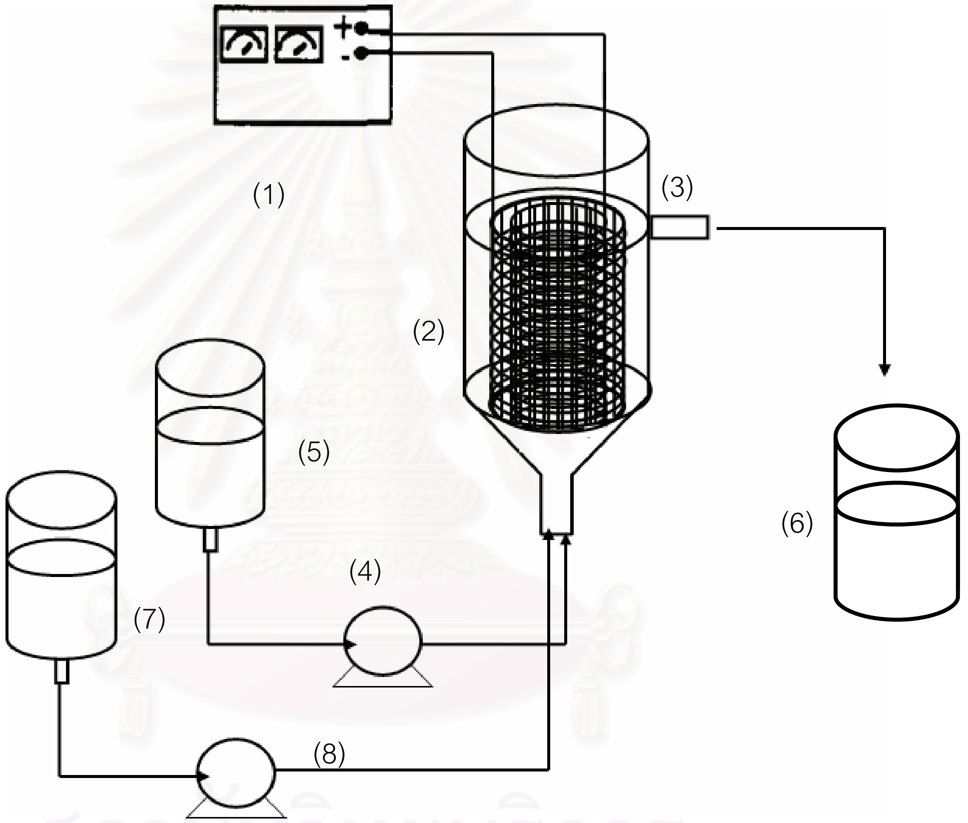
เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองจะคล้ายกับที่ใช้ในระบบกะแต่มีส่วนที่ต่างคือ ถังพักน้ำเสียก่อนบำบัดปริมาตร 40 ลิตร และถังพักน้ำเสียหลังบำบัดปริมาตร 40 ลิตรดังแสดงในหมายเลข 5 และ 6 ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าในระบบต่อเนื่อง
(1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (2) ขั้วไฟฟ้า (3) เครื่องปฏิกรณ์ (4) ปั๊ม
(5) ถังพักน้ำเสียก่อนบำบัด (6) ถังพักน้ำเสียหลังบำบัด

3.2.3. เครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนในระบบต่อเนื่อง

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองจะคล้ายกับที่ใช้ในกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าในระบบต่อเนื่องแต่มีส่วนที่ต่างคือ ถังเก็บสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ขนาด 1 ลิตร และปั้มที่ใช้ในการปั้มสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าสู่ระบบ ดังแสดงในหมายเลข 7 และ 8 ตามลำดับ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.3 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองด้วยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนในระบบต่อเนื่อง

(1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (2) ขั้วไฟฟ้า (3) เครื่องปฏิกรณ์ (4) ปั๊ม

(5) ถังพักน้ำเสียก่อนบำบัด (6) ถังพักน้ำเสียหลังบำบัด

(7) ถังเก็บสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (8) ปั้ม

3.3 สารเคมี

1. โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$)	(Merck, AR grade)
2. กรดซัลฟิวริก (cone.H_2SO_4)	(Fisher, 98%)
3. ซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4)	(POCh. S.A., AR grade)
4. ไอร์ออน (II) แอมโมเนียซัลเฟต ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \bullet 6H_2O$)	(Unilab, AR grade)
5. สารละลายเฟอโรอีนอินดิเคเตอร์ (Ferroin Indicator)	(Labchem, AR grade)
6. โปตัสเซียมไฮโดรเจนพะทาเลต (KHP)	(Merck, AR grade)
7. โปแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4)	(Univer, AR grade)
8. ไดโปแตสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4)	(Univer, AR grade)
9. ไดโซเดียมฟอสเฟตเฮปตะไฮเดรต ($Na_2PO_4 \bullet 7H_2O$)	(Univer, AR grade)
10. แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl)	(Univer, AR grade)
11. แมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($MgSO_4 \bullet 7H_2O$)	(Univer, AR grade)
12. แคลเซียมคลอไรด์ปราศจากน้ำ (Anhydrous $CaCl_2$)	(Univer, AR grade)
13. เฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($FeCl_3 \bullet 6H_2O$)	(Univer, AR grade)
14. แมงกานีสซัลเฟตโมโนไฮเดรต ($MnSO_4 \bullet H_2O$)	(Univer, AR grade)
15. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	(Univer, AR grade)
16. โซเดียมไอโอไดด์ (NaI)	(Labchem, AR grade)
17. โซเดียมเอไซด์ (NaN_3)	(Labchem, AR grade)
18. โซเดียมไธโอซัลเฟตเพนตะไฮเดรต ($Na_2S_2O_3 \bullet 5H_2O$)	(Univer, AR grade)
19. เฮกเซน (n-Hexane)	(Unilab, AR grade)
20. โซเดียมซัลเฟต ปราศจากน้ำ (Anhydrous Na_2SO_4)	(Labchem, AR grade)
21. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogenperoxide)	(Univer, AR grade)

3.4 น้ำตัวอย่าง

น้ำตัวอย่างที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ได้รับอนุเคราะห์จากบริษัทเอเชียไฟเบอร์ จำกัด (มหาชน) จ.สมุทรปราการ โดยน้ำเสียที่ใช้ในการวิจัยเป็นน้ำเสียก่อนทำการบำบัด ซึ่งมีลักษณะเป็นสีขาวขุ่นซึ่งเกิดจากมีน้ำมันและไขมันปนอยู่ในปริมาณมาก มีค่าความเป็นกรด - เบส ในช่วง 7 - 8

3.5 ขั้นตอนการวิจัย

3.5.1 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ ที่ใช้ในงานวิจัย คือ

- ค่าความเป็นกรด - เบส
- อุณหภูมิ
- ค่าการนำไฟฟ้า
- ของแข็งแขวนลอยในน้ำ
- ของแข็งละลายน้ำ
- น้ำมันและไขมัน
- ค่าบีโอดี
- ค่าซีโอดี

3.5.2 ศึกษาการกำจัดปริมาณสารมลพิษจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการรวมอิเล็กโตรเฟนตอน โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน

3.5.2.1 ศึกษาการกำจัดปริมาณสารมลพิษจากน้ำเสียโดยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

1. ใช้น้ำตัวอย่างจากอุตสาหกรรมทอผ้าปริมาตร 6 ลิตร และทำการปรับปริมาณน้ำมันและไขมันเริ่มต้นให้อยู่ที่ 150 300 450 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. ชั่งน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าที่ใช้เป็นขั้วแอโนดและแคโทดก่อนการทดลอง
3. ผ่านกระแสไฟฟ้า 2.12 แอมแปร์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ที่อัตราการไหลของน้ำเสีย 6 ลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที
4. เก็บตัวอย่างปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทุกๆ 15 นาที เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที
5. ชั่งน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าที่ใช้เป็นขั้วแอโนดและแคโทดหลังการทดลอง
6. วิเคราะห์หาปริมาณสารมลพิษที่ผ่านการบำบัดในรูปของปริมาณน้ำมันและไขมัน ค่าซีโอดี และบีโอดี ตามวิธีมาตรฐาน (กรองแก้ว, 2541 และ Clescerl, 1998)

7. ทำการทดลองซ้ำโดยใช้ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมัน 450 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ทำที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 14-24 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
8. ทำการทดลองซ้ำโดยใช้ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมัน 450 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดจากข้อ (7) แต่ปรับค่าอัตราการไหลวน 1.5 – 6 ลิตรต่อนาที
9. ทำการทดลองซ้ำโดยใช้ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมัน 450 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดจากข้อ (7) อัตราการไหลวนที่เหมาะสมจากข้อ (8) แต่ทำการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงในน้ำเสียก่อนทำการทดลองโดยให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อยู่ในช่วงความเข้มข้น 0-0.6 โมลต่อลิตร

3.5.2.2 ศึกษาการกำจัดสารมลพิษจากน้ำเสียโดยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยจะใช้ภาวะที่เหมาะสมของการทดลองในหัวข้อ 3.5.2.1 ในการทดลองตอนนี้จะศึกษาอัตราการไหลของน้ำเสียและอัตราการไหลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ก. ศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำเสียในระบบต่อเนื่อง

1. ทำการปรับความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมันให้อยู่ 450 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. ชั่งน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าที่ใช้เป็นขั้วแอโนดและแคโทดก่อนการทดลอง
3. ผ่านกระแสไฟฟ้า 2.12 แอมแปร์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ที่อัตราการไหลของน้ำเสีย 0.1 0.2 และ 0.3 ลิตรต่อนาที
4. เก็บตัวอย่างปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทุกๆ 15 นาที ในช่วงระยะเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นเก็บตัวอย่าง 100 มิลลิลิตร ทุกๆ 1 ชั่วโมงจนครบ 10 ชั่วโมง
5. ชั่งน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าที่ใช้เป็นขั้วแอโนดและแคโทดหลังการทดลอง
6. วิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ผ่านการบำบัดด้วยโดยวิธีการ ตกตะกอนด้วยไฟฟ้าตามวิธีมาตรฐาน ในรูปของปริมาณน้ำมันและไขมัน ค่าซีโอดี และบีโอดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข. ศึกษาผลของอัตราการไหลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในระบบต่อเนื่อง

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ ก. โดยทำการทดลองที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมัน 450 มิลลิกรัมต่อลิตร ผ่านกระแสไฟฟ้า 2.12 แอมแปร์ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) และอัตราการไหลของน้ำตัวอย่าง 0.1 ลิตรต่อนาที ทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 0 1 และ 2 ลิตรต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผลการทดลอง

การลดปริมาณสารมลพิษในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ กระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนในระบบกะและกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนในระบบต่อเนื่อง

กระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอน ซึ่งเป็นกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าและกระบวนการเฟนตอนซึ่งเป็นกระบวนการในการสร้างอนุมูลอิสระของ $OH^{\bullet}$ (Hydroxyl radicals) มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรงซึ่งจะไปออกซิไดส์สารอินทรีย์ในน้ำเสีย ทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์มีขนาดเล็กลงจนกระทั่งกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอมีสีขาวขุ่น มีเศษกาวลอยอยู่บริเวณผิวน้ำ มีกลิ่นเหม็นเล็กน้อย ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติทางกายภาพของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอเทียบกับมาตรฐานน้ำทิ้ง พบว่าค่าความเป็นกรด – เบส อุณหภูมิ ปริมาณของแข็งแขวนลอย และปริมาณของแข็งละลายน้ำมีค่าผ่านมาตรฐาน ส่วนค่าน้ำมันและไขมัน ค่าบีโอดี และค่าซีโอดีมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน โดยค่าน้ำมันและไขมันสูงกว่ามาตรฐานประมาณ 30 - 90 เท่า ค่าบีโอดีสูงกว่ามาตรฐานประมาณ 5 เท่า และค่าซีโอดีสูงกว่ามาตรฐานประมาณ 4.5 เท่า ดังนั้นน้ำเสียจากอุตสาหกรรมดังกล่าวจึงต้องผ่านกระบวนการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม

4.2 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอน

การลดปริมาณสารมลพิษในน้ำเสียของอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าจะทำในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 เมตร สูง 0.4 เมตร ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่ทำจากเหล็ก พื้นที่ผิวขั้วแอโนด 968.7 ตารางเซนติเมตร และขั้วแคโทด 1073.5 ตารางเซนติเมตร ที่ปลายขั้วไฟฟ้าจะต่อกับเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรง และมีปั๊มเพื่อทำให้เกิดการไหลเวียนของน้ำตัวอย่าง การทดลองแต่ละครั้งใช้น้ำตัวอย่างประมาณ 6 ลิตร ค่าความเป็นกรด - เบสประมาณ 7 - 9 การทดลองทำในระบบกระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic mode) และวิเคราะห์หาปริมาณของสารมลพิษที่เหลืออยู่ในน้ำเสีย

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำทิ้ง

รายการ	ปริมาณ	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง*
ค่าความเป็นกรด – เบส	7.0 - 9.0	5.5-9
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	27 – 29	$\leq$ 40
ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	23 - 25	-
ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	60 – 75	$\leq$ 150
ของแข็งละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1,600 - 1,750	$\leq$ 3,000
ไขมันและน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	150 – 450	$\leq$ 5
ค่าบีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	290 – 300	< 60
ค่าซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1,700 – 1,800	$\leq$ 400

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

4.2.1 **การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนในระบบกะ**

การศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนในระบบกะ ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมัน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า อัตราการไหลวนของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์-ออกไซด์ ซึ่งในการศึกษาตัวแปร 3 ตัวแรกได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมัน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และอัตราการไหลวนของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ กลไกการลดสารมลพิษจะเกิดเพียงกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้า ส่วนในการศึกษาผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเกิดกระบวนการเฟนตอนร่วมด้วย

4.2.1.1 ผลของปริมาณน้ำมันและไขมันเริ่มต้น

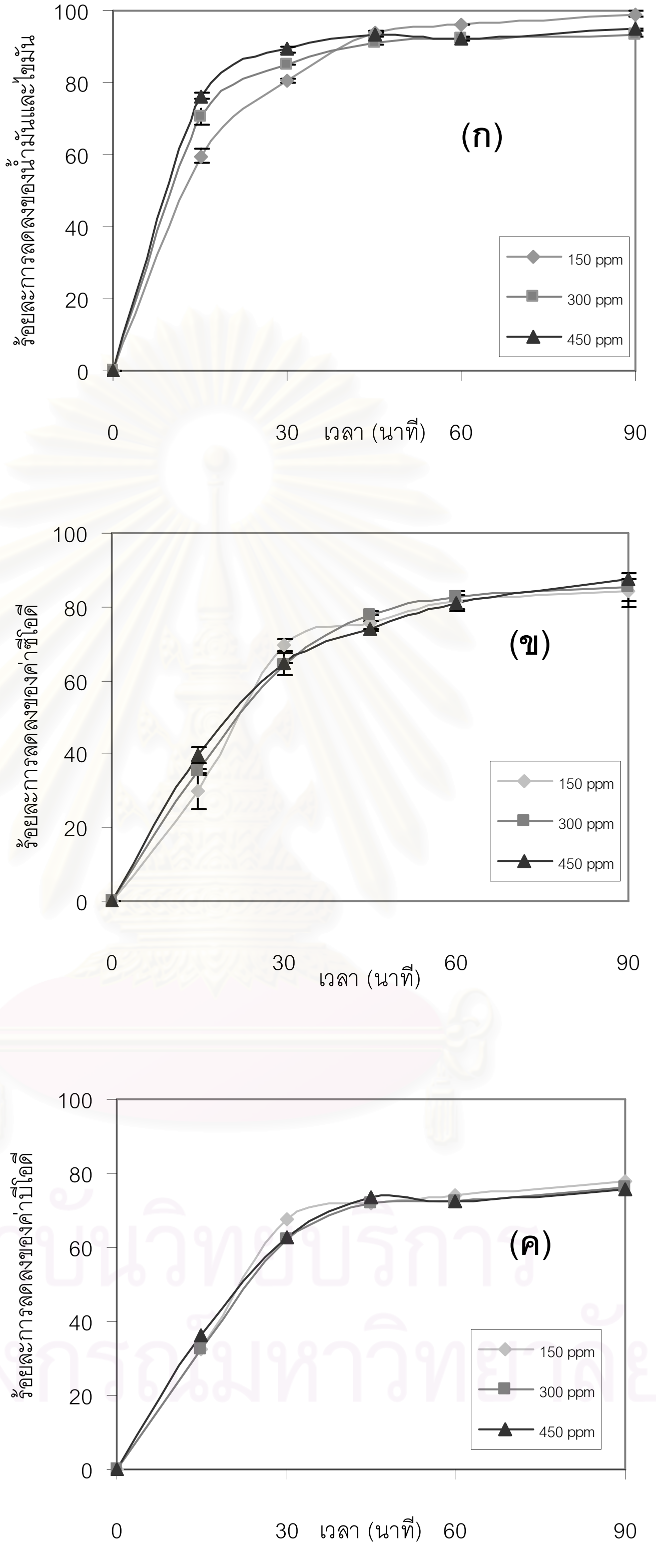
เนื่องจากน้ำเสียจากเครื่องทอผ้าแบบใช้น้ำในอุตสาหกรรมสิ่งทอมีการปนเปื้อนของปริมาณน้ำมันและไขมันในปริมาณไม่คงที่ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ในหัวข้อนี้จึงทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณน้ำมันและไขมันเริ่มต้นต่อการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน ซีโอดี บีโอดี โดยการทดลองนี้จะทำที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลวน 6 ลิตรต่อนาที และค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 8 ที่ปริมาณน้ำมันและไขมันเริ่มต้นที่ 150, 300 และ 450 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยมีค่าบีโอดีและค่าซีโอดีอยู่ระหว่าง 270-285 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1372 -1724 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

รูปที่ 4.1 (ก) - (ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสารมลพิษกับเวลา พบว่าในช่วงความเข้มข้นปริมาณน้ำมันและไขมันเริ่มต้นระหว่าง 150-450 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่มีผลต่อร้อยละการลดลงของสารมลพิษ กล่าวคือที่เวลา 45 นาที ร้อยละลดลงของน้ำมันและไขมันของค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 150, 300 และ 450 มิลลิกรัมต่อลิตรมีค่าร้อยละ 94.0, 91.4 และ 93.3 ตามลำดับ ซึ่งร้อยละการลดลงของค่าบีโอดีและค่าซีโอดีก็เป็นไปในทำนองเดียวกันเนื่องจากที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร กระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าสามารถสร้างสารก่อการจับตัวเพียงพอต่อค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมันในช่วง 150-450 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นในทดลองต่อไปจะศึกษาที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมันที่ 450 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากเป็นค่าความเข้มข้นสูงสุดของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ

4.2.1.2 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อค่าการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน ซีโอดี และบีโอดี ในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 14-24 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลวน 6 ลิตรต่อนาที ค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 8 และปริมาณน้ำมันและไขมันเริ่มต้นที่ 450 มิลลิกรัมต่อลิตร

รูปที่ 4.2 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมันกับเวลา พบว่าเมื่อค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอัตราการลดลงของน้ำมันและไขมันจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจะทำให้ปริมาณของเหล็กละลายออกมาในสารละลายมากขึ้นซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ ทำให้เกิดสารก่อการจับตัวมากขึ้น รูปที่ 4.2 (ข) และ(ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของค่าซีโอดีและบีโอดีกับเวลา พบว่าเมื่อค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอัตราการลดลงของซีโอดีและบีโอดีจะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับน้ำมันและไขมัน เนื่องจากเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจะทำให้ปริมาณของเหล็กที่ใช้เป็นอิเล็กโทรดละลายออกมามากขึ้นในสารละลาย ทำให้เกิดปริมาณสารก่อการจับตัวมากขึ้น



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมัน (ก) ซีโอดี (ข) บีโอดี (ค) กับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมันค่าต่าง ๆ

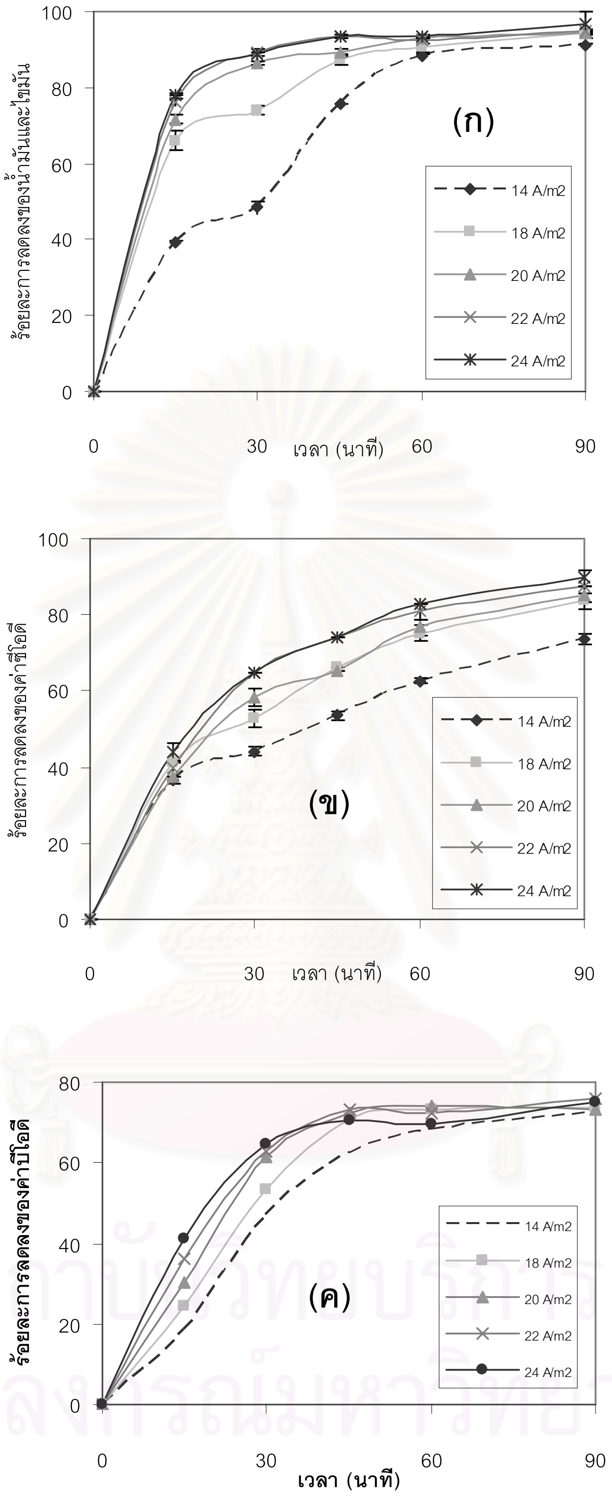
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมจะพิจารณาจากประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าโดยคำนวณจากการลดลงของค่าซีโอดี แสดงดังสมการที่ (4.1) พบว่าในช่วงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 14-24 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้ามีค่าไม่แตกต่างกันมากนักดังแสดงในรูปที่ 4.3 และเมื่อพิจารณาจากร้อยละการลดลงของค่าน้ำมันและไขมันที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตรซึ่งมีค่าร้อยละ 93.3 พบว่าร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมันมีค่าใกล้เคียงกับที่ 24 แอมแปร์ต่อตารางเมตรซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 93.5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากกว่า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมันจะไม่เพิ่มขึ้น จึงกล่าวได้ว่าที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อในการลดปริมาณน้ำมันและไขมัน โดยที่เวลา 45 นาที สามารถลดปริมาณน้ำมันและไขมัน ค่าซีโอดี และบีโอดีได้ร้อยละ 93.5, 74.1 และ 73.3 ตามลำดับ

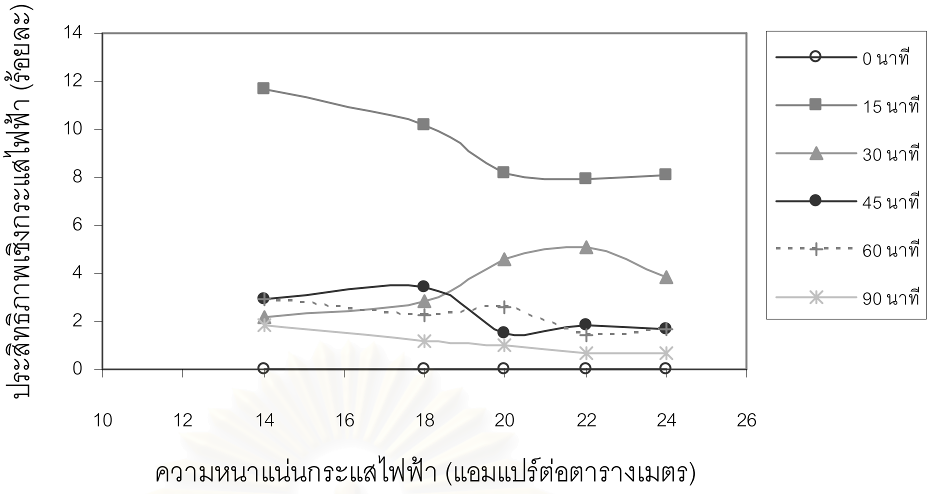
$$CE(\%) = \frac{(COD)_t - (COD)_{t+\Delta t}}{8I\Delta t} FL100 \qquad (4.1)$$

CE(%)	=	ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า (เปอร์เซ็นต์)
$(COD)_t$	=	ค่าซีโอดีที่เวลา t (มิลลิกรัมต่อลิตร)
$(COD)_{t+\Delta t}$	=	ค่าซีโอดีที่เวลา t + Δt (มิลลิกรัมต่อลิตร)
I	=	ค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
F	=	ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (26.8 แอมแปร์•ชั่วโมง)
L	=	ปริมาณสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (ลิตร)
Δt	=	ผลต่างของเวลา (ชั่วโมง)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมัน (ก) ซีโอดี (ข) บีโอดี (ค) กับเวลา ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าของการกำจัดซีโอดีกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ

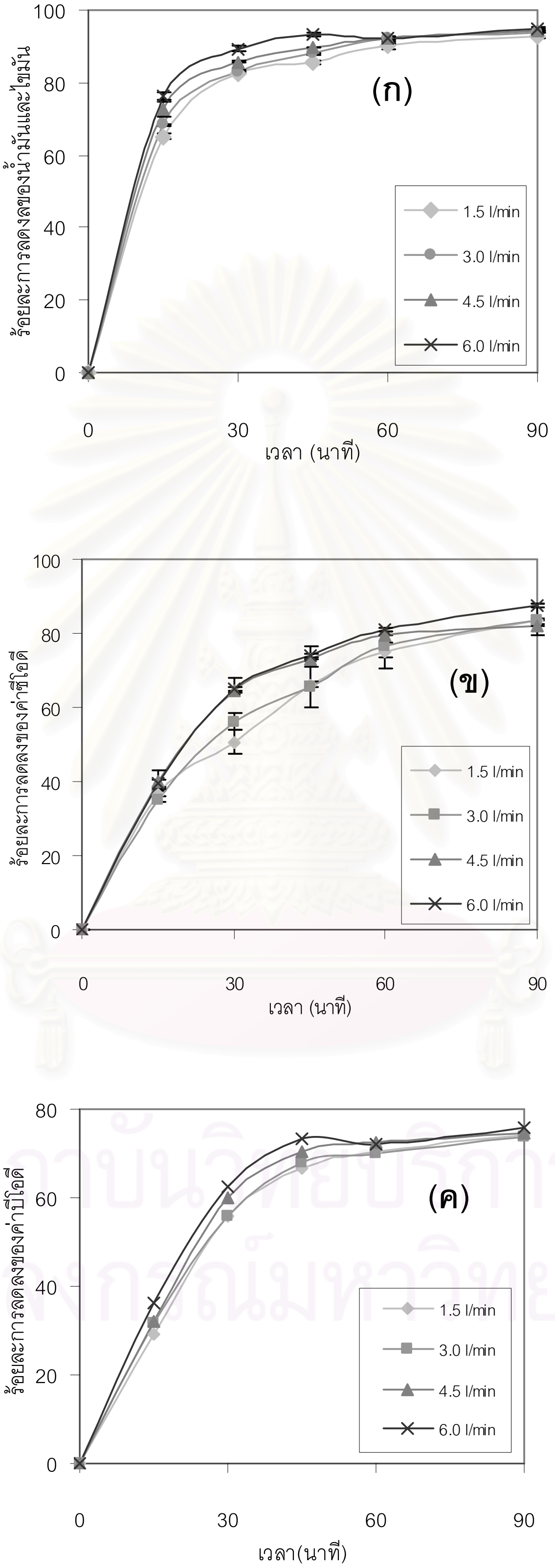
4.2.1.3 **ผลของอัตราการไหลวนของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์**

ผลกระทบของอัตราการไหลวนต่อค่าการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน ซีโอดี และบีโอดี จะศึกษาที่อัตราการไหลวนระหว่าง 1.5-6 ลิตรต่อนาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 8 และปริมาณน้ำมันและไขมันเริ่มต้นที่ 450 มิลลิกรัมต่อลิตร

รูปที่ 4.4 (ก) – (ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสารมลพิษกับเวลา พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลวนของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ จะทำให้ค่าร้อยละการลดลงของสารมลพิษเพิ่มขึ้น โดยพิจารณาจากค่า Reynold number ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (4.2) ในช่วงอัตราการไหล 1.5– 6 ลิตรต่อนาที จะมีค่า Reynold number อยู่ระหว่าง 212.12 - 848.48 ซึ่งเป็นช่วงการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) พบว่าที่อัตราการไหล 6 ลิตรต่อนาทีจะให้อัตราการลดลงของสารมลพิษสูงกว่าที่อัตราการไหลอื่น เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลเป็นการเพิ่มโอกาสในการชนกันของสารมลพิษกับสารก่อการจับตัวทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น ทำให้สามารถลดสารมลพิษได้มากขึ้น

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho D V}{\mu} \qquad (4.2)$$

Re	=	Reynolds number
ρ	=	ความหนาแน่นของของเหลว (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ (เมตร)
V	=	ความเร็วของของเหลว (เมตรต่อวินาที)
μ	=	ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)



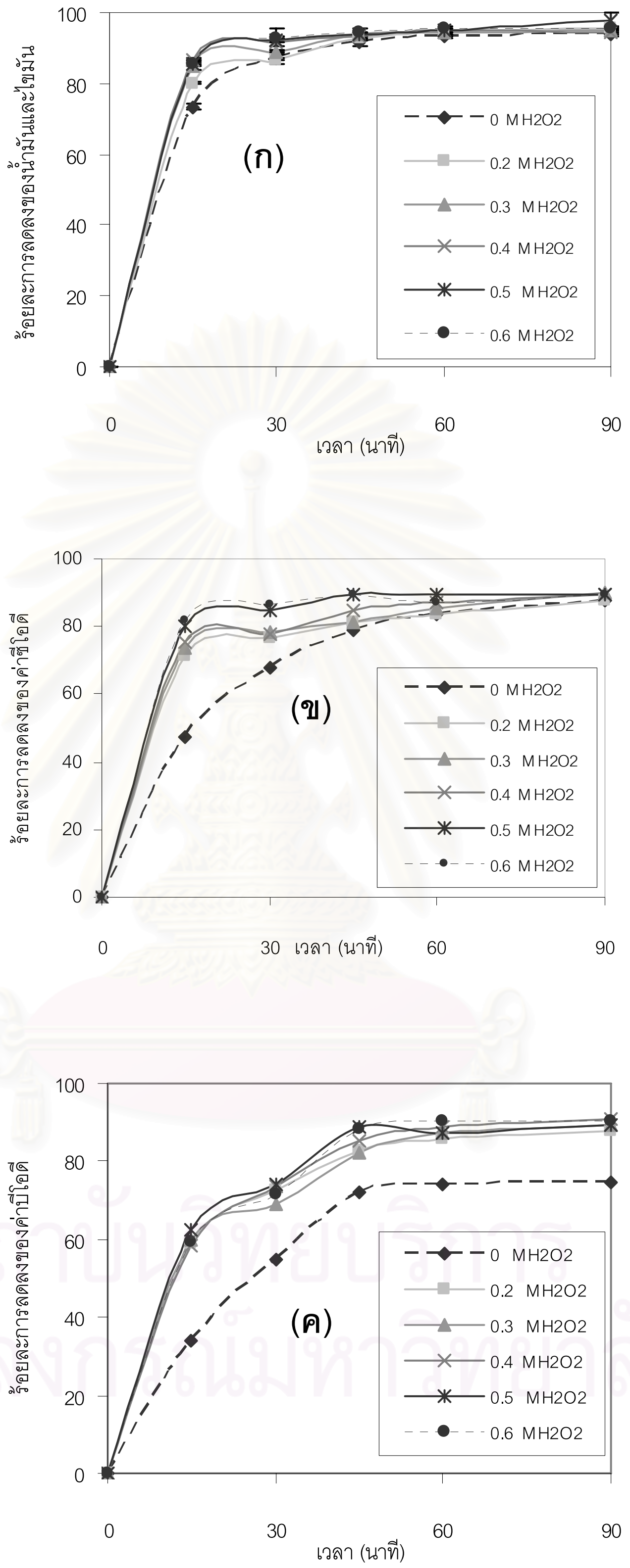
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน (ก) ซีโอดี (ข) บีโอดี (ค) กับเวลา ที่ค่าอัตราการไหลวนต่าง ๆ

4.2.1.4 ผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ผลกระทบของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน ซีโอดี และบีโอดี จะศึกษาที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วง 0-0.6 โมลต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ปริมาณน้ำมันและไขมันเริ่มต้นที่ 450 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 8 และอัตราการไหลวน 6 ลิตร

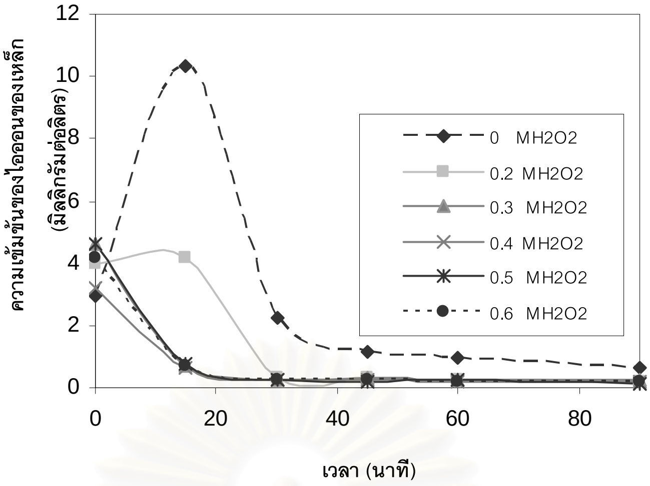
รูปที่ 4.5 (ก) – (ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสารมลพิษกับเวลา พบว่าเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น ร้อยละการลดลงของสารมลพิษจะเพิ่มขึ้น กล่าวคือเมื่อมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในระบบที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ที่เวลา 30 นาที สามารถลดน้ำมันและไขมัน ซีโอดี และบีโอดี ได้มากกว่าการไม่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 5.39, 16.84 และ 19.22 ตามลำดับ เนื่องจากการมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้การลดลงของสารมลพิษเกิดทั้งจากกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าควบคู่กับกระบวนการเฟนตอน ซึ่งเรียกรวมว่ากระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอน แต่อย่างไรก็ดีเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะคงที่เนื่องจากถูกจำกัดด้วยปริมาณของ Fe^{2+} ไอออนในระบบ ซึ่งจากรูปที่ 4.5 (ก) – (ค) ที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตรเป็นภาวะที่เหมาะสมเนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 0.6 โมลต่อลิตร อัตราการลดลงของสารมลพิษไม่เพิ่มขึ้น โดยสามารถลดปริมาณน้ำมันและไขมัน ค่าซีโอดีและบีโอดี ร้อยละ 93.9, 84.89 และ 88.9 ที่เวลา 45 นาที

รูปที่ 4.6 แสดงความเข้มข้นของไอออนของเหล็กในสารละลายกับเวลา จากกราฟเมื่อไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในระบบจะเห็นว่าในช่วงแรกปริมาณเหล็กในสารละลายจะสูงมากเมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับระบบเนื่องจากการหลุดของเหล็กที่ใช้เป็นอิเล็กโทรด แต่เมื่อเวลาผ่านไปไอออนของเหล็กจะเกิดเป็นสารก่อการจับก้อนปริมาณของไอออนของเหล็กจึงลดลงซึ่งกลไกแสดงดังปฏิกิริยาที่ 2.38-2.39 แต่เมื่อมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในระบบ พบว่าปริมาณของไอออนของเหล็กจะลดลงตั้งแต่แรกเนื่องจากถูกนำไปใช้ในกระบวนการเฟนตอนจึงเป็นการยืนยันปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบว่าเป็นปฏิกิริยาอิเล็กโตรเฟนตอนจริง นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นอีกว่าเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นปริมาณของไอออนของเหล็กจะลดลงเร็วขึ้น



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมัน (ก) ซีโอดี (ข) บีโอดี (ค) กับเวลา ที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 ค่าความเข้มข้นของไอออนของเหล็กในสารละลายกับเวลา

รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะของน้ำเสียโดยรูป ก. แสดงน้ำเสียก่อนผ่านกระบวนการบำบัดจะเห็นว่ามีสีขาวขุ่นซึ่งเกิดจากมีน้ำมันปนเปื้อนในปริมาณที่มาก รูป ข. แสดงน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะเห็นว่ามีสีใสคือมีปริมาณน้ำมันและไขมันปนเปื้อนอยู่เพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณของสารมลพิษของน้ำก่อนบำบัด และหลังบำบัดที่ด้วยกระบวนการรวมอิเล็กโตรเฟนตอนเปรียบเทียบกับมาตรฐาน พบว่าน้ำก่อนบำบัดมีค่าของแข็ง-แขวนลอย และของแข็งละลายน้ำมีค่าผ่านมาตรฐานอยู่แล้ว แต่ค่าปริมาณน้ำมันและไขมัน ค่าบีโอดี และซีโอดี ไม่ผ่านมาตรฐานจึงจำเป็นต้องทำการบำบัด เมื่อบำบัดแล้วพบว่าที่ภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการทดลองคือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลวน 6 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตร ที่เวลา 45 นาที สามารถบำบัดค่าซีโอดีและบีโอดีได้ผ่านมาตรฐาน แต่ยังทำการบำบัดปริมาณน้ำมันและไขมันไม่ผ่านมาตรฐานคือ ปริมาณน้ำมันและไขมันสูงกว่ามาตรฐาน 5 เท่า แต่อย่างไรก็ดีน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดก็มีสีใสและสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ในกระบวนการผลิตได้

รูปที่ 4.7 ลักษณะของน้ำเสีย (ก) ก่อนบำบัด (ข) หลังบำบัด

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอก่อนและหลังการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอน

รายการ	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง	น้ำก่อนบำบัด	น้ำหลังการบำบัด (45 นาที)					
			ก	ข	ค	ง	จ	ฉ
ไขมันและน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	≤ 5	437	33	32	28	32	25	23
ค่าซีโอดี ((มิลลิกรัมต่อลิตร)	≤ 400	1746	392	353	353	274	196	196
ค่าบีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	≤ 60	287	85	55	55	45	35	33
ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	≤ 150	71	15	10	10	10	7	7
ของแข็งที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	≤ 3,000	1685	1386	1333	1343	1337	1333	1343

ก: j = 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, อัตราการไหลวน 6 ลิตรต่อนาที

ข: j = 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, อัตราการไหลวน 6 ลิตรต่อนาที,H_2O_2 0.2โมลต่อลิตร

ค: j =22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, อัตราการไหลวน 6 ลิตรต่อนาที, H_2O_2 0. 3โมลต่อลิตร

ง: j = 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, อัตราการไหลวน 6 ลิตรต่อนาที, H_2O_2 0.4โมลต่อลิตร

จ: j = 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, อัตราการไหลวน 6 ลิตรต่อนาที, H_2O_2 0. 5โมลต่อลิตร

ฉ: j = 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, อัตราการไหลวน 6 ลิตรต่อนาที, H_2O_2 0.6โมลต่อลิตร

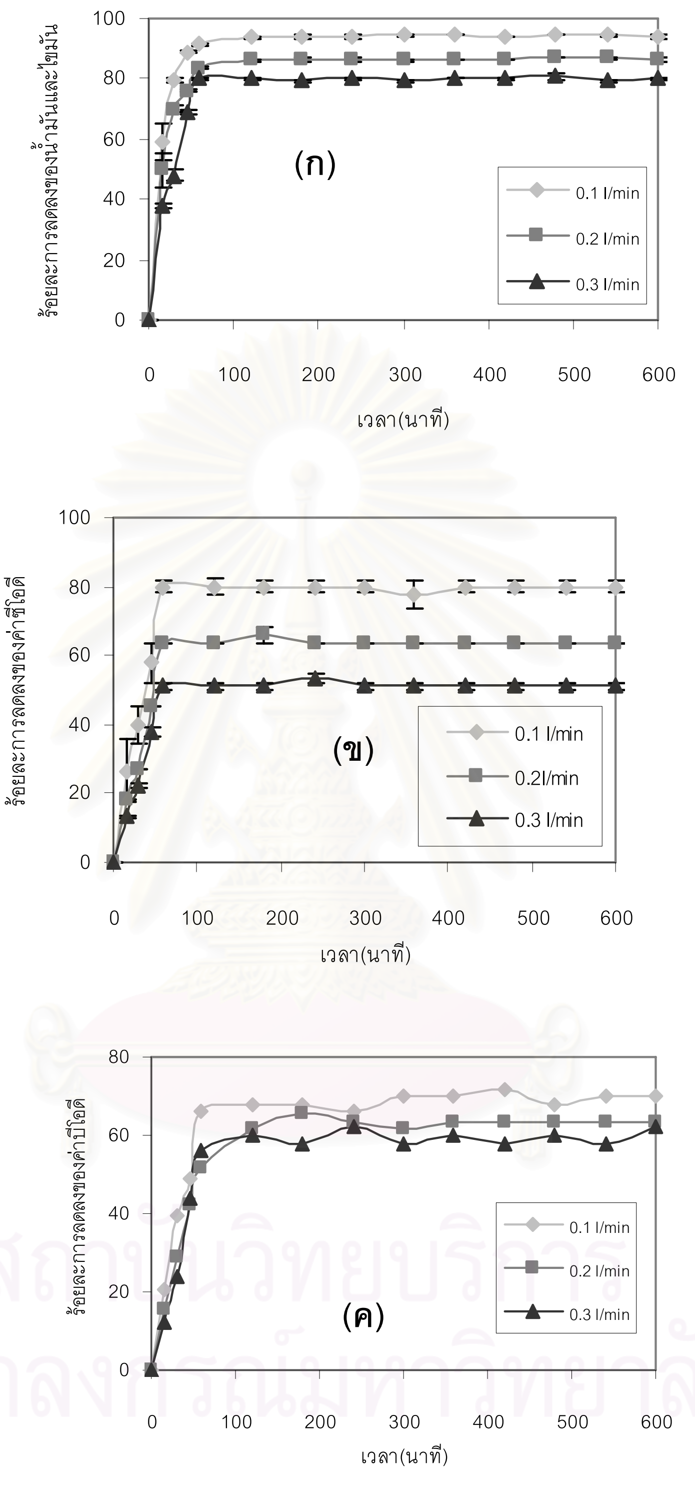
4.2.2 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนในระบบต่อเนื่อง

การศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนในระบบต่อเนื่องโดยมีตัวแปรที่ศึกษาคือ อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์ และลักษณะการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และอัตราการไหลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อค่าการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน ซีโอดี และบีโอดี โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองในระบบกะในกรณีที่ไม่ได้เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มาใช้ คือค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และปริมาณน้ำมันและไขมันเริ่มต้นที่ 450 มิลลิกรัมต่อลิตร และจากข้อมูลเวลาที่ใช้ในการทดลอง 45 นาที และเครื่องปฏิกรณ์มีขนาด 6 ลิตร จะได้อัตราการไหลในระบบต่อเนื่องคือ 1.33 ลิตรต่อนาที การทดลองนี้จึงทำที่อัตราการไหลในช่วง 0.1 – 0.3 ลิตรต่อนาที

4.2.2.1 ผลของอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์

หัวข้อนี้จะศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลต่อค่าการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน ซีโอดี และบีโอดี โดยใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และปริมาณน้ำมันและไขมันเริ่มต้นที่ 450 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-เบสประมาณ 8 และอัตราการไหลของน้ำเสียในช่วง 0.1 – 0.3 ลิตรต่อนาที ในช่วงเริ่มต้นจะรอให้น้ำเสียไหลเข้าสู่ระบบจนเต็มเครื่องปฏิกรณ์แล้วทำการทดลองทันที โดยจะปล่อยน้ำเสียออกจากเครื่องปฏิกรณ์ตลอดเวลา

พบว่าเมื่ออัตราการไหลมากขึ้นร้อยละการลดลงของสารมลพิษจะลดขึ้นเนื่องจาก เมื่อเพิ่มค่าอัตราการไหลจะไปลดเวลาที่น้ำเสียอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ทำให้โอกาสการเจอกันของสารมลพิษและสารก่อการจับตัวลดลงดังรูปที่ 4.8 โดยที่อัตราการไหล 0.1 ลิตรต่อนาทีระบบจะเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลา 60 นาที โดยจะสามารถลดปริมาณน้ำมันและไขมัน ค่าซีโอดี บีโอดี ได้ร้อยละ 91.3, 80 และ 66 ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมัน (ก) ซีโอดี (ข) บีโอดี (ค) กับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ ในระบบต่อเนื่อง

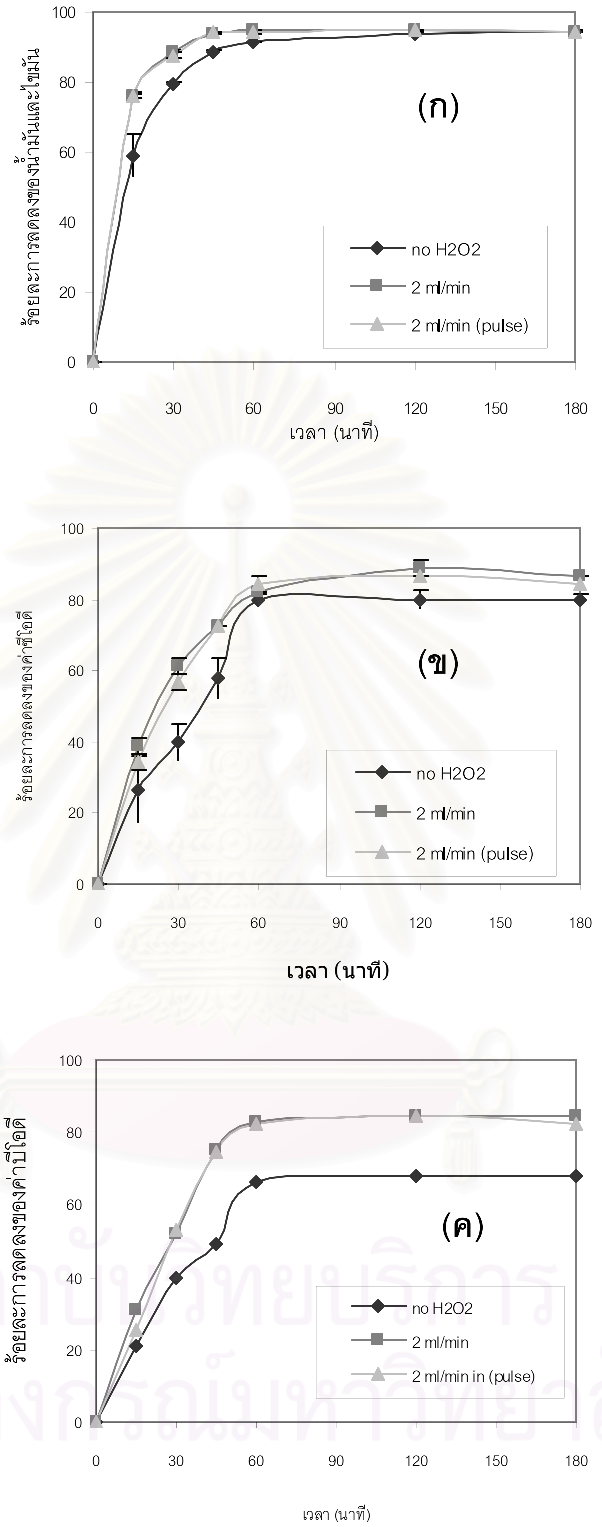
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.2.2 ผลของลักษณะการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ผลของลักษณะการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน ซีโอดี และบีโอดี จะศึกษาที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 9.71 โมลต่อลิตร ซึ่งเป็นความเข้มข้น ด้วยอัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที โดยจะป้อนเป็นสองลักษณะคือป้อนแบบต่อเนื่องและป้อนแบบเป็นจังหวะ (Pulse) คือป้อนสิบนาทีหยุดป้อนสิบนาที ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมัน 450 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ความเป็นกรด-เบสประมาณ 8 และอัตราการไหลของ น้ำเสีย 0.1 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.9 (ก) – (ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสารมลพิษกับเวลา พบว่าเมื่อมีการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2 มิลลิลิตรต่อนาที ร้อยละการลดลงของสารมลพิษจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในระบบจะทำให้กลไกการลดลงของมลพิษเป็นแบบอิเล็กโตรเฟนตอนคือ เกิดปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอรัสไอออนจากการสลายตัวของอิเล็กโทรด แสดงดังปฏิกิริยา (2.41) ซึ่งที่เวลา 60 นาที สามารถลดปริมาณสารมลพิษได้สูงกว่าในระบบที่ไม่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คือสามารถลดปริมาณน้ำมันและไขมัน ค่าซีโอดี ค่าบีโอดี ได้ร้อยละ 94.6, 81.82 และ 82.7 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แบบเป็นจังหวะจะให้ร้อยละการลดลงของสารมลพิษใกล้เคียงกับการป้อนแบบต่อเนื่อง คือลดปริมาณน้ำมันและไขมัน ค่าซีโอดี ค่าบีโอดี ได้ร้อยละ 94.3, 84.1 และ 82.4 ที่เวลา 60 นาที และสิ้นเปลืองปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์น้อยกว่าในระบบต่อเนื่อง ดังนั้นในการทดลองตอนต่อไปจึงใช้การไหลแบบเป็นจังหวะ

เมื่อเปรียบกับงานวิจัยของ Zhang และคณะ(2005)[26] พบว่าผลการทดลองจะไม่สอดคล้องกันคืองานวิจัยดังกล่าวจะกล่าวว่าการป้อนไฮโดรเจนแบบต่อเนื่องให้ผลการทดลองที่ดีกว่า เนื่องจากการทดลองดังกล่าวทำโดยการเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทีเดียวในแต่ละเวลาที่กำหนด แต่ในการทดลองนี้จะป้อนแบบต่อเนื่องเป็นช่วงเวลาทุก 10 นาที เว้น 10 นาที ทำให้ได้ผลไม่เหมือนกันคือ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากว่าการทดลองนี้จะมีสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงพอในการทดลองในแต่ละช่วงเวลา แต่การทดลองของ Zhang อาจจะมีสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่เพียงพอในการทำปฏิกิริยา



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน (ก) ซีโอดี (ข) บีโอดี (ค) กับเวลาที่ลักษณะการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

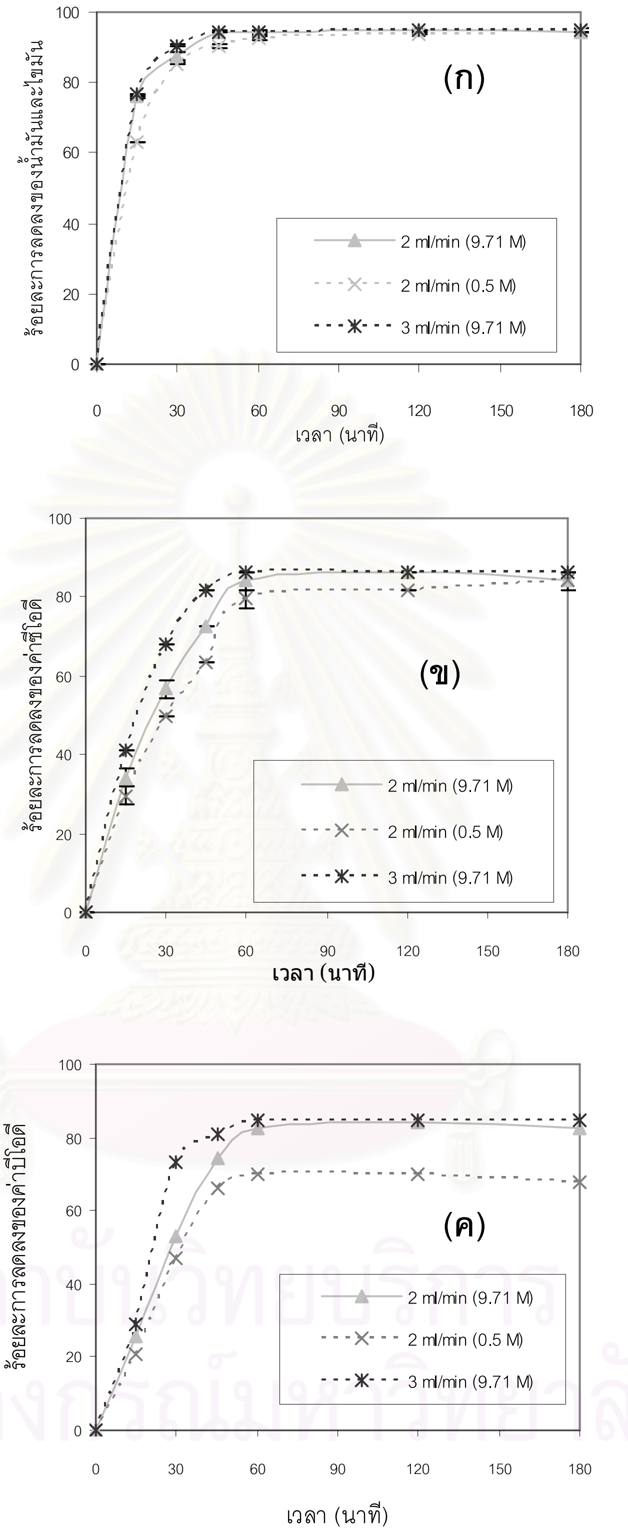
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.2.3 ผลกระทบของอัตราการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลกระทบของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน ซีโอดี และบีโอดี โดยการทดลองนี้จะใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 9.71 โมลต่อลิตรและ 0.5 โมลต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมในระบบกะ ด้วยอัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 9.71โมลต่อลิตร ด้วยอัตราการไหล 3 มิลลิลิตรต่อนาที โดยจะป้อนแบบเป็นจังหวะคือป้อน 10 นาทีหยุด 10 นาที และทำที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมัน 450 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ความเป็นกรด-เบสประมาณ 8 และอัตราการไหลของน้ำเสีย 0.1 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.10 (ก) – (ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสารมลพิษกับเวลา พบว่าที่อัตราการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้น 9.71 โมลต่อลิตร ให้ค่าร้อยละการลดลงของสารมลพิษสูงกว่าภาวะอื่นเล็กน้อย และถ้าพิจารณาจากต้นทุนในการบำบัดพบว่าที่การป้อนสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ด้วยอัตราการ-ไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที มีต้นทุนต่ำกว่าการป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3 มิลลิลิตรต่อนาทีด้วยที่ความเข้มข้น 9.71 โมลต่อลิตรประมาณ 29 เท่า ดังนั้นอัตราการการป้อนสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ด้วยอัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที จึงเป็นภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยสามารถลดน้ำมันและไขมัน ซีโอดี และบีโอดีได้ร้อยละ 92.5, 79.6 และ 69.8 ในเวลา 60 นาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



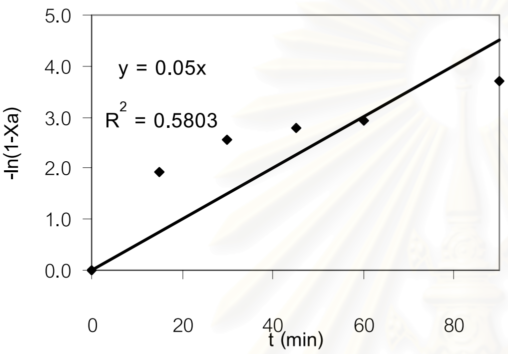
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน (ก) ซีโอดี (ข) บีโอดี (ค) กับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

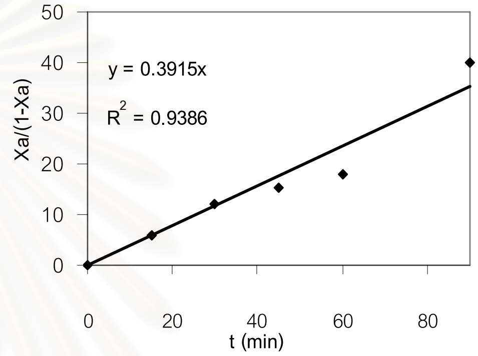
4.3) **สมการจลนพลศาสตร์** (Kinetics equation)[28]

1) อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate constant หรือ ค่า k)

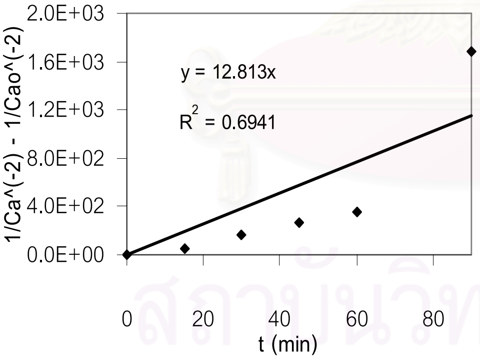
ในหัวข้อนี้จะศึกษาอัตราการการเกิดปฏิกิริยาของน้ำมันและไขมัน โดยภาวะที่ศึกษาคือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลวน 6 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตร ที่เวลา 45 นาที



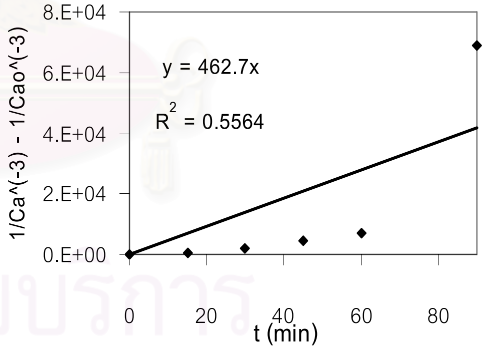
(ก) ปฏิกิริยาอันดับที่ 1



(ข) ปฏิกิริยาอันดับที่ 2



(ค) ปฏิกิริยาอันดับที่ 3

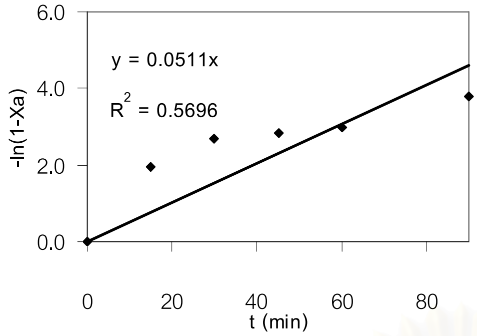


(ง) ปฏิกิริยาอันดับที่ 4

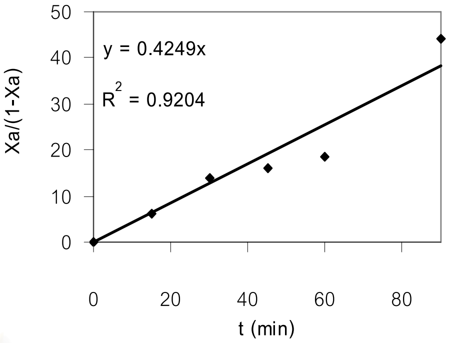
รูปที่ 4.11 ปฏิกิริยาอันดับต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

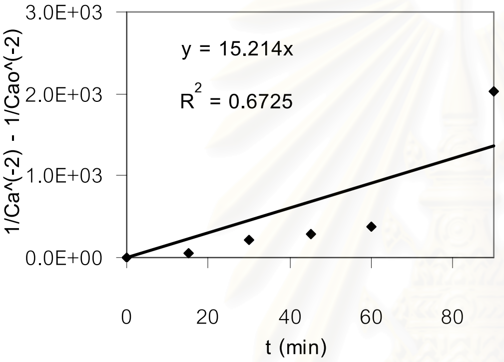
รูปที่ 4.11 แสดงปฏิกิริยาอันดับต่างๆ ของความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมันกับเวลาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่าความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ให้ความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุด เพราะให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.9386 ซึ่งมีค่ามากที่สุดและใกล้เคียง 1 ดังนั้นปฏิกิริยาการกำจัดน้ำมันและไขมันเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ให้ค่า k เท่ากับ 0.3915 $L \cdot mol^{-1}s^{-1}$



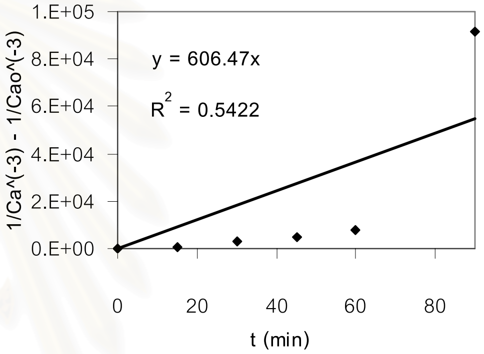
(ก) ปฏิกิริยาอันดับที่ 1



(ข) ปฏิกิริยาอันดับที่ 2



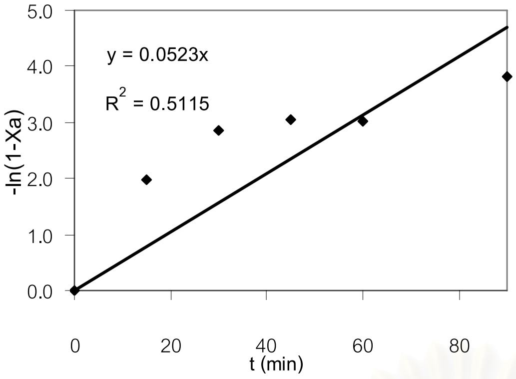
(ค) ปฏิกิริยาอันดับที่ 3



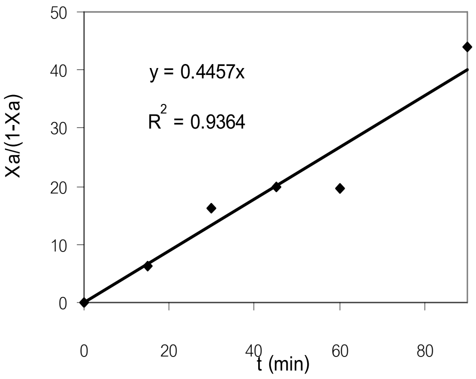
(ง) ปฏิกิริยาอันดับที่ 4

รูปที่ 4.12 ปฏิกิริยาอันดับต่างๆ ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส

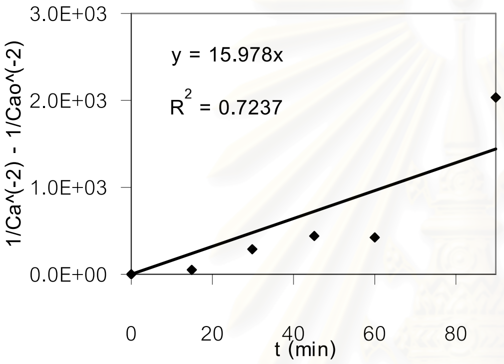
รูปที่ 4.12 แสดงปฏิกิริยาอันดับต่างๆ ของความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมันกับเวลาที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส พบว่าความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ให้ความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุด เพราะให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.9204 ซึ่งมีค่ามากที่สุดและใกล้เคียง 1 ดังนั้นปฏิกิริยาการกำจัดน้ำมันและไขมันเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ให้ค่า k เท่ากับ 0.4249 $L \cdot mol^{-1} s^{-1}$



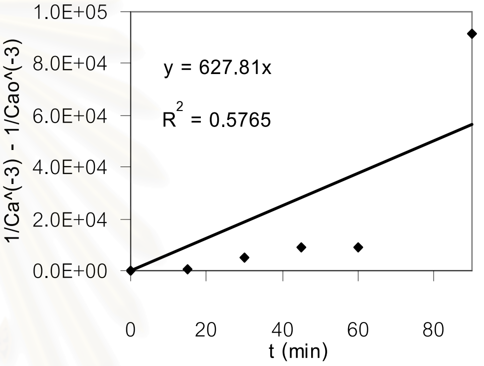
(ก) ปฏิกิริยาอันดับที่ 1



(ข) ปฏิกิริยาอันดับที่ 2



(ค) ปฏิกิริยาอันดับที่ 3



(ง) ปฏิกิริยาอันดับที่ 4

รูปที่ 4.13 ปฏิกิริยาอันดับต่างๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.13 แสดงปฏิกิริยาอันดับต่างๆ ของความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมันกับเวลาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ให้ความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุด เพราะให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.9364 ซึ่งมีค่ามากที่สุดและใกล้เคียง 1 ดังนั้นปฏิกิริยาการกำจัดน้ำมันและไขมันเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ให้ค่า k เท่ากับ 0.4457 $L \cdot mol^{-1} s^{-1}$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) ค่าความถี่หรือปัจจัยพรีเอ็กโปเนนเชียล (Frequency or pre-exponential factor ; K_o) กับพลังงานกระตุ้น (Activation energy ; E_a)

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยากับอุณหภูมิ

T (°C)	T (K)	$\frac{1}{T}$ (K^{-1})	K ($L \bullet mol^{-1}s^{-1}$)	$\ln(K)$
25	303	0.00336	0.3915	-0.9777
28	306	0.00332	0.4249	-0.8559
30	308	0.00330	0.4457	-0.8081

จากกฎของอาร์เรเนียส (Arrhenius' law)

$$k = k_o e^{\frac{-E_a}{RT}} \tag{4.9}$$

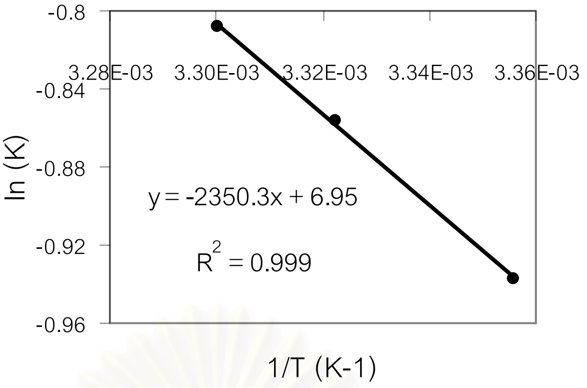
$$\ln k = \frac{-E_a}{RT} + \ln(k_o) \tag{4.10}$$

รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างล็อกกาลิทึมฐานอีของค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (ln k) กับส่วนกลับของอุณหภูมิ (1/T) พบว่ากราฟตัดแกน Y ที่ 6.95 ดังนั้นจะได้ค่า k_o เท่ากับ 1043.15 $L \bullet mol^{-1}s^{-1}$ ส่วนความชันของกราฟ ซึ่งหมายถึง $-E_a/R$ มีค่าเท่ากับ –2350.3 ดังนั้น E_a มีค่าเท่ากับ 19,540 จูลต่อโมล หรือประมาณ 19.54 กิโลจูลต่อโมล ดังนั้นสมการจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาของการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน คือ

$$-r = kC \tag{4.3}$$

$$-r = k_o e^{\frac{-Ea}{RT}} (C) \tag{4.4}$$

$$-r = 1043.15 e^{\frac{-19540}{T}} (C) \tag{4.5}$$



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างล็อกกาลิทึมฐานอีของค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา(ln k) กับส่วนกลับของอุณหภูมิ (1/T)

4.4 ต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ

จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอในระบบต่อเนื่องพบว่าช่วงเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียในระบบต่อเนื่องของทั้งกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าและกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอน พบว่าระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที จากการคำนวณต้นทุนการบำบัดดังแสดงไว้ในภาคผนวก ง. พบว่าค่าใช้จ่ายในการบำบัดของกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าและกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนเท่ากับ 18.69 และ 203.12 บาทต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าใช้จ่ายในการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนมีค่าสูงมากเนื่องจากสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้มีราคาสูงทำให้กระบวนการนี้ยังไม่เหมาะที่จะนำมาใช้จริง

4.5 เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ ในการบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณน้ำมันและไขมันเจือปน พบว่าของกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงกว่าและสามารถลดสารมลพิษในน้ำเสียได้หลายค่า และสามารถลดปริมาณน้ำมันและไขมันได้มากกว่าร้อยละ 90 เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ (ตารางที่ 4.7)เช่น การใช้แบคทีเรียในการช่วยย่อยหรือกระบวนการใช้เอนไซม์ช่วยในการย่อยจะต้องใช้เวลาในการทดลองนานมากซึ่งไม่เหมาะที่จะนำมาใช้อุตสาหกรรม แต่หากเทียบกันเองระหว่างกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าและกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนพบว่า กระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่เหมาะที่จะนำมาใช้จริงมากกว่ากระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนเนื่องจากกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้ามีต้นทุนในการบำบัดต่ำกว่ากระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอน

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบผลของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ ในการบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันและไขมันปนอยู่

ผู้วิจัย (ปี)	กระบวนการบำบัด	น้ำมันและไขมัน ก	น้ำมันและไขมัน ข	ซีโอดี ก	ซีโอดี ข	บีโอดี ก	บีโอดี ข
Faisal[29] (2000)	Anaerobic Baffled Reactor	410	91.3	16000	95.3	-	-
Marcia C.M.R. Leal[30] (2006)	Enzymatic hydrolysis	600 -1000	82-88	-	-	-	-
งานวิจัยนี้ (2007)	Electrocoagulation (ในระบบต่อเนื่อง)	463	92.5	1725	79.6	265	69.8
	Electro-Fenton (ในระบบต่อเนื่อง)	463	91.3	1725	80.0	265	66

หมายเหตุ ก คือ ความเข้มข้นของสารมลพิษในน้ำเสียก่อนการบำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ข คือ ร้อยละการลดของสารมลพิษหลังการบำบัด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอน จากการวิเคราะห์หาค่าสมบัติทางน้ำของน้ำเสียที่ได้รับจากโรงงานทอผ้า พบว่าสารมลพิษที่ไม่ผ่านมามาตรฐานได้แก่ น้ำมันและไขมัน ซีโอดี และบีโอดี

เมื่อทำการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนในระบบกะ พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันและไขมันในช่วง 150-450 มิลลิกรัมต่อลิตรใกล้เคียงกันโดยภาวะที่เหมาะสมในระบบกะคือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 22 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลวน 6 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตร โดยที่ภาวะดังกล่าวสามารถลดปริมาณน้ำมันและไขมัน ซีโอดี และบีโอดี ที่เวลา 45 นาที ได้ร้อยละ 93.9, 84.89 และ 88.9 ตามลำดับ

เมื่อทำการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนในระบบต่อเนื่องพบว่าภาวะที่เหมาะสมในระบบต่อเนื่องคือ อัตราการไหลของน้ำเสีย 0.1 ลิตรต่อนาที การป้อนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แบบเป็นจังหวะ โดยใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรที่อัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที โดยที่ภาวะดังกล่าวสามารถลดปริมาณน้ำมันและไขมัน ซีโอดี และบีโอดี ที่เวลา 60 นาที ได้ร้อยละ 92.5, 79.6 และ 69.8

ข้อเสนอแนะ

ในการทดลองนี้มีข้อเสียคือ ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ตะกอน และเก็บน้ำตัวอย่างในปริมาณที่มากเกินไป ดังนั้นหากมีการทำซ้ำจึงควรทำการวิเคราะห์ตะกอนและเก็บตัวอย่างให้น้อยลงหรือทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใหญ่ขึ้นเพื่อปริมาณตัวอย่างที่เก็บมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2544. อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.oie.go.th/industrystatus1/r_JulSep44/JulSep44_72.doc.
2. North Carolina Division of Pollution Prevention and Environmental Assistance. 1996. Water efficiency industry specific process[Online]. Available from: http://www.p2pays.org/ref/04/03105.pdf .
3. Techni Waterjet Co. Ltd. 2004. Water jet loom machine[Online]. Available from: http://www.techjet.com.au/how.html.
4. อัจฉราพร ไศละสูต. ความรู้เรื่องผ้า. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2526.
5. มณฑา จันทร์เกตุเลี้ยด. วิทยาศาสตร์สิ่งทอเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร : สมาคมคหเศรษฐศาสตร์ประเทศไทย, 2541.
6. Song Z., Williams C.J. and Edyvean R.G.J. Sedimentation of tannery wastewater. Water Research 34 (7 2000):2171 – 2176.
7. Ahn D.H., Chung Y.C., Yoo Y.J., Pak D.W. and Chang W.S. Improvedtreatment of tannery wastewater using Zoogloea ramigera and its extracellular polymer in an activated sludge process. Biotechnology Letters 18 (8 1996):917 – 922.
8. Vijayaraghvan, K. and Murthy, D.V.S., Effect of toxic substances in anaerobic treatment of tannery wastewater. Bioprocess Engineering 16 (3 1997):151 - 155.
9. Wiemann M., Schenk, H. and Hegemann W. Anaerobic treatment of tannery wastewater with simultaneous sulphide elimination. Water Research 32 (1998):774-780.
10. Panswad T., Chavalparit O., Chandung C. and Anotai J. Economic considerations of chromium recovery form tanning wastewater. Waste Management & Research 19 (2001):450 - 455.
11. Song Z., Williams C.J. and Edyvean R.G.J. Treatment of tannery wastewater by chemical coagulation. Desalination 164 (3 2004):249 - 259.
12. เก็จวลี พฤกษาทร. เอกสารประกอบการสอนวิชาเคมีไฟฟ้าประยุกต์. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

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

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

15. Hunsom M., Pruksathorn K., Damronglerd S., Vergnes H. and Duverneuil P. Electrochemical treatment of heavy metals (Cu^{2+}, Cr^{6+}, Ni^{2+}) from industrial effluent and modeling of copper reduction. Water Research 39 (2005):610 – 616.

16. Israilides C.J., Vlyssides A.G., Mourafeti V.N. and Karvouni G. Olive oil wastewater treatment with the use of an electrolysis system. Bioresource Technology 61 (1997):163 - 170.

17. Kobya M., Can O.T. and Bayramoglu M. Treatment of textile wastewater by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. Journal of Hazardous Materials 100 (2003): 189 - 199.

18. Mollah M.Y.A., Schennach R., Parga J. R. and Cocke D. L. Electrocoagulation (EC) - science and applications. Journal of Hazardous Materials 84 (2001):29 – 41

19. G Laure O., Vorobiev E., Vu C. and Durand B. Electrocoagulation and coagulation by iron of latex particles in aqueous suspensions. Separation and Purification Technology 31 (2003):177 - 192.

20. Murugananthan M., Bhaskar R.G. and Prabhakar S. Removal of sulfide, sulfate and sulfite ions by electro coagulation. Journal of Hazardous Materials 109 (2004):34 - 44.

21. Mollah M.Y.A., Morkovsky P., Gomes J.A.G., Kesmez M., Parga J. and Cocke D.L. Fundamentals, present and future perspective of electrocoagulation. Journal of Hazardous Materials 114 (3 2004):189 - 199.

22. ศังกรม์ คงเจาะ. การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนังในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2548.

23. Inan H., Dimoglo A., Simsek H. and Karpuzcu M. Olive oil mill wastewater treatment by means of electro-coagulation . Separation and Purification Technology 36 (1 2004): 23-31.

24. Xu X. and Zhu X. 2004. Treatment of refractory oily wastewater by electro - coagulation process. Chemosphere 56, 10:889 – 894.

25. Murugananthan M., Bhaskar R.G. and Prabhakar S. Separation of pollutants from tannery effluents by electro flotation. Separation and Purification Technology 40 (1 2004):69 - 75.

26. Jiantuan G., Jiuhui Q., Pengju L. and Huijuan L. New bipolar electrocoagulation –electroflotation process for the treatment of laundry wastewater. Separation and Purification Technology 36 (1 2004):33-39.

27. Zhang H., Zhang D. and Zhou J. Removal of COD from landfill leachate by electro-Fenton method. Journal of Hazardous Materials 135 (2005):106-111.

28. Levenspiel O., 1999. Chemical reaction engineering. 3rd edition : John Wiley & Sons, 13-47.

29. Faisal M., Unno H., Kinetic analysis of palm oil mill wastewater treatment by a modified anaerobic baffled reactor. Biochemical Engineering Jounal 9 (2001):25-31.

30. Leal M.C.M.R., Freire D.M.G., Cammarota M.C., Sant' Anna Jr. G.L.,2006. Effect of enzymatic hydrolysis on anaerobic treatment of dairy wastewater. Process Biochemistry 41: 1173-1178.

31. กรองแก้ว ทิพยศักดิ์ และ พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย. ปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อม 1 กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2541.

32. สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. 2543. อัตราค่าไฟฟ้าการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.eppo.go.th/power/pw-Rate-PEA.html.

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ความหมายของค่าพารามิเตอร์ในน้ำ[31]

1. **ค่าพารามิเตอร์** (Parameter)

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าสิ่งเจือปนในน้ำเสียมีหลายชนิด ดังนั้นเพื่อความเหมาะสมและสะดวกในการวิเคราะห์สิ่งเจือปนดังกล่าว จึงได้มีการกำหนดใช้ค่าพารามิเตอร์ค่าที่สำคัญและมักจะกำหนดในมาตรฐานน้ำทิ้งที่ควรทราบ

1.1 **ค่าพีเอช** (pH) หรือ (Positive potential of the hydrogen ions) เป็นค่าที่แสดงถึงภาวะความเป็นกรดและเบส ซึ่งสิ่งที่ชี้บอกความเป็นกรดคือ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน $[H^+]$ และ สิ่งที่ชี้บอกความเป็นเบสคือ ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน $[OH^-]$ เนื่องจากพีเอชสเกลอยู่ในช่วง 0 ถึง 14 โดยสามารถแบ่งภาวะความเป็นกรด เบส และกลางได้ดังนี้ กล่าวคือ เมื่อพีเอชมีค่าเท่ากับ 7 แสดงว่าสารละลายมีสภาพเป็นกลาง ถ้าค่าพีเอชมีค่าน้อยกว่า 7 แสดงว่าสารละลายเป็นกรด หรือค่าพีเอชมีค่ามากกว่า 7 แสดงว่าสารละลายเป็นเบส โดยทั่วไปค่า pH ของสารละลายในสภาพปกติจะมีค่าในช่วง 6-8 ซึ่งจะไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งชีวิต ค่าพีเอชมีสมการดังนี้

$$pH = -\log[H+] \quad \text{หรือ} \quad pH = \log \frac{1}{[H+]}$$

1.2 **ค่าการนำไฟฟ้า** (Conductivity) เป็นการวัดความสามารถของน้ำที่จะให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน คุณสมบัติข้อนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้น ชนิดของไอออนในน้ำและอุณหภูมิ ค่าการนำไฟฟ้านั้นไม่ได้เป็นค่าเฉพาะไอออนตัวใดตัวหนึ่ง แต่เป็นค่ารวมของไอออนทั้งหมดในน้ำ ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นก็แสดงว่ามีสารที่แตกตัวได้ในน้ำเพิ่มขึ้น และค่าการนำไฟฟ้าลดลงแสดงว่ามีสารที่แตกตัวได้ในน้ำลดลง

1.3 **สี** (Color) สีของน้ำตามธรรมชาติ เป็นผลจากการที่น้ำไหลผ่านสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น ใบไม้ ใบหญ้า ซากสัตว์ เป็นต้น ซึ่งมีลิกนินเป็นองค์ประกอบ เมื่อสลายตัวจะให้สารจำพวกแทนนิน กรดฮิวมิค และฮิวเมตซึ่งเป็นสารมีสี นอกจากนี้สีของน้ำอาจเกิดมาจากไอออนของโลหะจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เหล็ก แมงกานีส เป็นต้น เนื่องจากสีในน้ำมักเป็นพวกคอลลอยด์ มีประจุโดยรวมเป็นลบ สีสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1.3.1 สีจริง (true color) ซึ่งเป็นสีของน้ำที่ได้ทำการกำจัดความขุ่นออกไปแล้วโดยการเซนตริฟิวจ์ (centrifuge)

1.3.2 สีปรากฏ (apparent color) เป็นสีที่เกิดขึ้นจากสารที่ละลายในน้ำรวมทั้งจากสารแขวนลอยในน้ำด้วย การหาสีปรากฏหาได้โดยตรงไม่ต้องผ่านการเซนตริฟิวจ์หรือการกรองก่อน

1.4 บีโอดี (BOD) หรือ (Biochemical Oxygen Demand) หมายถึง ปริมาณออกซิเจนที่แบคทีเรียใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดที่ย่อยสลายได้ (decomposable) ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน ผลพลอยได้จากการออกซิเดชันนี้ทำให้แบคทีเรียได้รับพลังงานไปใช้ในการเจริญเติบโต เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ หรือแอมโมเนีย ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหาร ค่าบีโอดีหาได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยการวัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO: Dissolved Oxygen) ที่ถูกใช้ไปโดยจุลชีพ ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ณ ปัจจุบัน เรียกว่า DO_0 และในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในเวลา 5 วัน ภายใต้อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เรียกว่า DO_5

1.5 ซีโอดี (COD) หรือ (Chemical Oxygen Demand) หมายถึง ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการเพื่อใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำทางเคมีให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยอาศัยหลักที่ว่าสารอินทรีย์เกือบทั้งหมด (มียกเว้นบางตัวเป็นส่วนน้อย) สามารถที่จะถูกออกซิไดซ์โดยตัวเติมออกซิเจนอย่างแรงภายใต้สภาวะที่เป็นกรด ดังสมการ

$$\text{Organic C} + \text{Oxidant} \xrightarrow[H^+]{\Delta} CO_2 + H_2O + \text{Reduced Oxidant}$$

จัดเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงให้ทราบว่าน้ำนั้นมีความสกปรกที่เกิดจากสารอินทรีย์ อยู่ในระดับมากน้อยเพียงใด

1.6 ของแข็งทั้งหมด (Total solid: TS) ของแข็ง หมายถึงสารหรือสิ่งเจือปนที่เหลืออยู่ภายหลังจากผ่านการนำน้ำออกแล้ว ไม่รวมถึงสารที่ระเหยไปกับน้ำ สิ่งที่เหลืออยู่หรือตะกอนมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งอาจจะละลายน้ำหรือไม่ละลายก็ได้ สามารถแบ่งของแข็งออกเป็นชนิดต่าง ๆ

1.6.1 ของแข็งละลายน้ำ (Total Dissolved Solids, TDS) คือของแข็งส่วนที่ละลายในน้ำได้ ได้แก่ เกลืออนินทรีย์ต่างๆ หรืออินทรีย์สาร

1.6.2 ของแข็งที่ไม่ละลายน้ำหรือของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Undissolved Solids หรือ Total Suspended Solids, TSS) แบ่งเป็น

1.6.2.1 Suspended Solids คือของแข็งที่ไม่ละลายน้ำและสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ ตะกอนมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา

1.6.2.2 Stable Solids คือของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ ตะกอนมีขนาดใหญ่และมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำ เมื่อตั้งทิ้งไว้สามารถจะตกลงมานอนที่ก้นภาชนะได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.6.3 ของแข็งระเหย (Volatile Solids) คือของแข็งที่ระเหยได้เมื่อนำไปเผาในอากาศที่อุณหภูมิสูง 550 – 600 องศาเซลเซียส

1.6.4 ของแข็งคงตัว (Fixed Solids) คือของแข็งหรือขี้เถ้าที่เหลือจากการเผาของแข็งที่อุณหภูมิสูง 550 – 600 องศาเซลเซียส

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข
มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพของน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรด-เบส (pH value)	5.5 – 9.0	pH Meter
2. ค่า TDS (Total Dissolved Solid)	- ไม่เกิน 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตรหรืออาจแตกต่างแล้วแต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร - น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือลงสู่ทะเล ค่า TDS ในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่า TDS ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่งโมง
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างแล้วแต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มิลลิกรัมต่อลิตร	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc)
4. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส	เครื่องวัดอุณหภูมิวัดขณะทำการเก็บตัวอย่าง
5. ซัลไฟด์ (Sulfide as H_2S)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	ไทเทรต
6. ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร	กลั่นและตามด้วยวิธี Pyridine Barbituric Acid

ดัชนีคุณภาพของน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
7. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างแล้ว แต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 15 มิลลิกรัมต่อลิตร	สกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน
8. สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่ได้กำหนด
9. ฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	Spectrophotometry
10. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	กลั่นและตามด้วยวิธี 4-Aminoantipyrine
11. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	Iodometric Method
12. ค่าบีโอดี 5 วันที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (Biochemical Oxygen Demand: BOD)	ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตรหรือแตกต่างแล้วแต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	Azide Modification ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 วัน
13. ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl)	ไม่เกิน 100 มิลลิกรัมต่อลิตรหรือแตกต่างแล้วแต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร	Kjeldahl
14. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD)	ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตรแล้วแต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อลิตร	Potassium Dichromate Digestion

ดัชนีคุณภาพของน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
15. โลหะหนัก (Heavy Metal) 1. สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Direct Aspiration หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma: ICP
2.โครเมียมชนิดเฮ็ก-ซะวาเล้นท์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร	
3.โครเมียมชนิดไตรวาเล้นท์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร	
4. ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	
5. แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร	
6. แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	
7. ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร	
8. นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	
9. แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	
10. อาร์เซนิก (As)	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร	Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Hydride Generation หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma: ICP
11. ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร	Atomic absorption Cold Vapor Technique

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดัชนีคุณภาพของน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
12. เซเลเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร	Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Hydride Generation หรือ วิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma: ICP

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสีย

1. pH

วิธีวิเคราะห์: วิเคราะห์โดยตรงด้วยเครื่อง pH meter 7020 Electronic Instrument Limited

หมายเหตุ: รายละเอียดการใช้เครื่อง pH meter ศึกษาได้จากคู่มือเฉพาะเครื่องนั้นๆ

2. **ค่าการนำไฟฟ้า** (Conductivity)

วิธีวิเคราะห์: วิเคราะห์โดยตรงด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า

หมายเหตุ: รายละเอียดการใช้เครื่องค่าการนำไฟฟ้าศึกษาได้จากคู่มือเฉพาะเครื่องนั้นๆ

3. **การวิเคราะห์หาของแข็งทั้งหมด** (TS)

ตัวอย่างน้ำที่ผสมเข้ากันอย่างดีในถ้วยระเหยซึ่งทราบน้ำหนักจะถูกนำไประเหยด้วยไอน้ำจนแห้งแล้วนำไปอบที่ 103 – 105 $^{\circ}$C ทำให้เย็นและชั่งน้ำหนัก น้ำหนักส่วนที่เพิ่มคือน้ำหนักของของแข็งทั้งหมดในน้ำ

<u>เครื่องมือและอุปกรณ์:</u>

1. ถ้วยระเหย
2. เครื่องอังน้ำ
3. โถทำแห้ง
4. ตู้อบ
5. ตาชั่งละเอียด

<u>วิธีวิเคราะห์:</u>

1. นำถ้วยระเหยไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 – 105 $^{\circ}$C เป็นเวลา 1 ชม. ปล่อยทิ้งให้เย็นในโถทำแห้ง
2. นำถ้วยระเหยมาชั่งน้ำหนัก สมมุติมีน้ำหนัก A กรัม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. เขย่าตัวอย่างน้ำให้เข้ากันอย่างดี เทตัวอย่างน้ำที่ทราบปริมาตรแน่นอนลงในถ้วยระเหย ด้วยปริมาตรตัวอย่างน้ำที่ใช้นั้น จะต้องทำให้เหลือกากแห้งภายหลังการอบอยู่ในช่วง 10 – 200 มก.
4. นำถ้วยระเหยที่ใส่ตัวอย่างน้ำมาระเหยในเครื่องอังไอน้ำจนแห้ง และนำเข้าตู้อบที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 103 – 105 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชม.
5. นำออกจากตู้อบ ปล่อยทิ้งให้เย็นในโถทำแห้ง ชั่งน้ำหนัก สมมุติมีน้ำหนัก B กรัม
6. ทำการอบซ้ำ จนได้น้ำหนักคงที่ หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักน้อยกว่า 4% ของน้ำหนักหนก่อน

การคำนวณ:

$$\text{ของแข็งทั้งหมด (มก./ล)} = \frac{(B - A)}{C} \times 10^{6}$$

A	=	น้ำหนักถ้วยระเหยอย่างเดียว, กรัม
B	=	น้ำหนักถ้วยระเหยและของแข็ง, กรัม
C	=	ปริมาตรตัวอย่างน้ำ, มล.

4. การวิเคราะห์หาของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)

ของแข็งที่แขวนลอยทั้งหมดหมายถึงส่วนของของแข็งที่เหลือค้างอยู่บนกระดาษกรองใยแก้วหลังจากการกรองน้ำตัวอย่างที่ทราบปริมาตรแน่นอน แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียสและทำให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นคือน้ำหนักของของแข็งแขวนลอยทั้งหมดต่อปริมาตรตัวอย่างน้ำที่ใช้

<u>เครื่องมือและอุปกรณ์</u>:

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)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>วิธีวิเคราะห์</u>:

1. นำกระดาษกรอง GF/C ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 - 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่งโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น
2. ชั่งน้ำหนักกระดาษกรอง GF/C สมมุติมีน้ำหนัก A กรัม
3. ต่อชุดเครื่องมือสำหรับกรอง ใช้ปากคีบกระดาษกรอง GF/C วางบนกรวยบุคเนอร์ เปิดเครื่องดูดสุญญากาศ ล้างกระดาษกรองด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง โดยใช้ครั้งละ 20 มิลลิลิตร เปิดเครื่องดูดสุญญากาศต่อให้ดูดน้ำออกจนแห้ง ทิ้งน้ำล้างไป
4. เลือกปริมาตรตัวอย่างน้ำที่จะใช้ ซึ่งควรเลือกให้มีค่าของแข็งแขวนลอยที่ติดบนกระดาษกรองไม่เกิน 200 มิลลิกรัม และไม่ควรต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมเมื่อเลือกปริมาตรแล้ว ทำการเขย่าตัวอย่างน้ำให้เข้ากันอย่างดี เทตัวอย่างน้ำที่ทราบปริมาตรลงกรองโดยค่อย ๆ เททีละน้อยอย่างต่อเนื่องจนหมด ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างภาชนะที่ใช้ตวงตัวอย่าง และฉีดน้ำกลั่นที่ด้านข้างของกรวยบุคเนอร์รวมทั้งบนกระดาษกรอง GF/C ปล่อยให้เครื่องดูดสุญญากาศดูดน้ำออกจนแห้ง ปิดเครื่อง
5. นำกระดาษกรองใยแก้วไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 - 105 องศาเซลเซียส อย่างน้อยเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักกระดาษกรอง สมมุติมีน้ำหนัก B กรัม
6. ทำข้อ 5 ซ้ำ จนได้น้ำหนักคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักน้อยกว่า 4% ของน้ำหนักครั้งก่อน

<u>การคำนวณ:</u>

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

A = น้ำหนักกระดาษกรองอย่างเดียว (กรัม)

B = น้ำหนักกระดาษกรองและของแข็ง (กรัม)

C = ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)

5. **การวิเคราะห์หาของแข็งละลายน้ำ** (TDS)

หมายถึง ส่วนของน้ำตัวอย่างที่กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้วแล้วนำไปใส่ถ้วยระเหยที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน และนำไประเหยด้วยไอน้ำจนแห้งแล้วจึงนำไปอบแห้งที่ 103 -105 องศาเซลเซียส น้ำหนักส่วนที่เพิ่มคือน้ำหนักของของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด

<u>เครื่องมือและอุปกรณ์</u>:

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)

<u>วิธีวิเคราะห์</u>:

1. นำน้ำตัวอย่างมากรองเอาสารแขวนลอยออกทั้งหมดก่อนโดยกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้วและเครื่องกรองสุญญากาศ
2. นำน้ำตัวอย่างที่ได้จากการกรองใส่ถ้วยระเหยนำไปอบแห้งที่ 103 – 105 องศาเซลเซียส ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้นชั่งหาน้ำหนัก

<u>การคำนวณ</u>:

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

A = น้ำหนักถ้วยระเหยอย่างเดียว (กรัม)

B = น้ำหนักถ้วยระเหยและของแข็ง (กรัม)

C = ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)

6. **การวิเคราะห์หาซีโอดีด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด** (Closed Reflux, Titrimetric method)

สำหรับการวิเคราะห์ COD มี 2 แบบ คือวิธีรีฟลักซ์แบบปิดและวิธีรีฟลักซ์แบบเปิด แต่ในการทดลองจะใช้วิธีรีฟลักซ์แบบปิด โดยมีหลักการดังนี้

ภายใต้สภาวะการรีฟลักซ์ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่มีอุณภูมิสูง สารอินทรีย์ในน้ำจะถูกออกซิไดส์โดยสารละลายโปตัสเซียมไดโครเมตที่ทราบความเข้มข้นและมีปริมาณเกินพอที่ทราบจำนวน หลังจากรีฟลักซ์แล้ว ทำการวัดปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตที่เหลือ โดยนำไปไทเทรตกับเฟรัสแอมโมเนียซัลเฟต (Ferrous Ammonium Sulfate, FAS) และใช้เฟอโรอิน

(Ferroin) เป็นอินดิเคเตอร์ ทำให้ทราบปริมาณของโปตัสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ได้ปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

เมื่อรีฟลักซ์ด้วย $K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4$

$$CHO + Cr_2O_7^{2-} + H^+ \longrightarrow CO_2 + H_2O + Cr^{3+} + Cr_2O_7^{2-} \quad (ค1)$$

(เกินพอ) (เหลือ)

หาปริมาณ $Cr_2O_7^{2-}$ ที่เหลือโดยการไทเทรตด้วย FAS ที่มีเฟอโรอีนเป็นอินดิเคเตอร์

$$6Fe^{2+} + Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ \longrightarrow 6Fe^{3+} + 2Cr^{3+} + 7H_2O \quad (ค2)$$

สีเหลือง สีน้ำตาลแดง

$Cr_2O_7^{2-}$ ที่เหลือจะทำปฏิกิริยากับ Fe^{2+} (FAS) ได้โครมิก (Cr^{3+}) จนหมด แล้ว Fe^{2+} จึงทำปฏิกิริยากับเฟอโรอีนได้สารประกอบสีน้ำตาลแดงซึ่งแสดงจุดยุติของการไทเทรต

<u>เครื่องมือและอุปกรณ์</u>

1. หลอดย่อย (Digestion Vessels) เป็นหลอดแก้วบอโรซิลิเคท (Borosilicate) ขนาด 20 x150 หรือ 25 x150 มิลลิเมตร มีฝาสลักเกลียวซึ่งทำด้วยมีทีเอฟอี
2. บล็อก (Block) หรือที่ใส่หลอดแก้วแบบตัน ทำด้วยอลูมิเนียม ความลึกของช่องใส่หลอดประมาณ 45 - 50 มิลลิเมตร การให้ความร้อนเพื่อต้มย่อยสลายกระทำโดยวางบล็อกบนเตาแผ่น
3. ตู้อบ (Oven) สามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ประมาณ 150 $\pm$ 2 องศาเซลเซียส
4. บิวเรต
5. ขวดรูปกรวยขนาด 125 มิลลิลิตร

<u>สารเคมี</u>

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตสำหรับย่อยสลาย (Standard potassium digestion solution) 0.1 นอร์มัล
   - นำ $K_2Cr_2O_7$ อบที่ 103 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่งโมง แล้งชั่งน้ำหนัก $K_2Cr_2O_7$ มา 4.913 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น

167 มิลลิลิตร และเติมปรอทซัลเฟต 33.3 กรัม ทิ้งให้ละลายและปล่อยให้เย็นจึงเจือจางด้วยน้ำกลั่นเป็น 1,000 มิลลิลิตร

2. กรดซัลฟิวริกที่เติมซิลเวอร์ซัลเฟต (Concn.sulfuric acid with silver sulfate)
   - ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) 22 กรัม เติมลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นซึ่งมีน้ำหนัก 4.1 กิโลกรัม (2.5ลิตร) ทิ้งไว้ 1 - 2 วัน ซิลเวอร์ซัลเฟตจึงละลาย
3. สารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) แอมโมเนียซัลเฟตไทแทรนต์ (Ferrous ammonium sulfate titrant) เข้มข้นโดยประมาณ 0.05 นอร์มัล
   - ละลายไอร์ออน (II) แอมโมเนียซัลเฟต ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \bullet 6H_2O$) ชนิด AR. Grade ประมาณ 19.6 กรัมในน้ำกลั่น เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร ทำให้เย็นแล้วเจือจาง 1000 มิลลิลิตร
   - สารละลายนี้ต้องนำมาหาความเข้มข้นที่แน่นอน (Standardize) ก่อนใช้ทุกครั้งด้วยสารละลายมาตรโพแทสเซียมไดโครเมต ทำได้ดังนี้คือนำ $K_2Cr_2O_7$ 5 มิลลิลิตร มาเติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตรแล้วเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 15 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำมาไทเทรตกับสารละลายเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟตโดยใช้เฟอโรอิน (Ferroin) จำนวน 2 - 3 หยดเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลแดง
4. สารละลายเฟอโรอีนอินดิเคเตอร์ (Ferroin Indicator)
5. สารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไฮโดรเจนฟธาเนต (Potassium Hydrogen Phthalate หรือ KHP)
   - ชั่ง KHP จำนวน 425 มิลลิกรัมที่บดแห้งและอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส ละลายด้วยในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตรสารละลายนี้จะมีค่าซีโอดี 500 มิลลิกรัมต่อลิตร (ปกติเก็บไว้ในตู้เย็นได้นาน 3 เดือน)

<u>วิธีวิเคราะห์</u>

1. ต้องล้างหลอดแก้วและฝาปิดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 20% เสมอทุกครั้งก่อนใช้งาน
2. เลือกขนาดของหลอดแก้วสำหรับต้มซีโอดีให้เหมาะสม
3. ถ้าตัวอย่างน้ำมีซีโอดีต่ำให้เลือกใช้หลอดแก้วขนาด 25 x 150 มิลลิเมตร (ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 5 มิลลิลิตร) และถ้าซีโอดีสูงสามารถใช้หลอดแก้วขนาด 16 x 100 มิลลิเมตร (ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 2.5 มิลลิลิตร)

4. การเลือกปริมาตรตัวอย่างน้ำ ถ้าเป็นน้ำสะอาด น้ำธรรมชาติหรือน้ำที่มีค่าซีโอดีต่ำๆ (<40 มิลลิกรัมต่อลิตร) ควรใช้ตัวอย่างน้ำ 10 มิลลิลิตร โดยใช้หลอดแก้วขนาด 25 x 150 มิลลิเมตร แต่ถ้าซีโอดีสูงกว่านั้นให้ใช้หลอดแก้วขนาด 20 x 150 โดยเลือกใช้ปริมาณตัวอย่างน้ำมากที่สุด 5 มิลลิลิตร หรือใช้น้อยกว่า แล้วเติมน้ำกลั่นให้เป็น 5 มิลลิลิตร และถ้าตัวอย่างน้ำมีค่าซีโอดีสูงมากต้องเจือจางต้องเจือจางตัวอย่างน้ำก่อนนำมาใช้ การเลือกขนาดตัวอย่างน้ำที่จะใช้วิเคราะห์ให้เหมาะสมอาจดูได้จาก ตารางที่ ค1
5. ใส่น้ำตัวอย่างลงในหลอดแก้วขนาดเหมาะสม เติมน้ำยาย่อยสลายหรือโปตัสเซียมไดโครเมต ตามด้วยกรดกำมะถันอย่างช้าๆในปริมาณที่แสดงอยู่ในตารางที่ ค2 ปิดฝาให้แน่นและเขย่าผสมกันให้ดี สำหรับแบลงค์ใช้น้ำกลั่นแล้วทำเหมือนตัวอย่างทุกอย่าง
6. วางหลอดแก้วในบล็อคแล้วใส่ตู้อบ ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 150 $\pm$ 2 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
7. เมื่อครบ 2 ชั่งโมงแล้ว นำออกจากตู้อบปล่อยทิ้งให้เย็น
8. เทสารละลายออกจากหลอดแก้วลงในขวดรูปกรวย ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างสารละลาย
9. ในหลอดแก้วให้หมดแล้วเทรวมลงในขวดรูปกรวย เติมเฟอโรอีนอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด แล้วไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน FAS สีของสารละลายจะค่อยๆ เปลี่ยนจาก สีเหลือง $\longrightarrow$ เขียวอมเหลือง $\longrightarrow$ ฟ้า $\longrightarrow$ น้ำตาลแดง ซึ่งแสดงว่าถึงจุดยุติ จดปริมาณ FAS ที่ใช้ไทเทรต

<u>ข้อเสนอแนะ</u>

1. น้ำตัวอย่างที่นำมาวัดหาค่า COD ควรผ่านการเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาทีเป็นเวลานาน 10 นาที
2. นำน้ำตัวอย่างที่ผ่านการเหวี่ยงแล้ว มาใช้ในการทดลองถ้าน้ำตัวอย่างมีความสกปรกสูงหรือมีความเข้มข้นสูงต้องทำการเจือจางตามสัดส่วนของตาราง ค (1) แล้วจึงนำมาใช้ในการทดลองลำดับต่อไปได้

ตารางที่ ค (1) ปริมาณน้ำตัวอย่างและอัตราเจือจางที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์หาซีโอดี*

ช่วงซีโอดี	ขนาดตัวอย่าง(มิลลิลิตร)	อัตราเจือจาง
<200	5	1 : 1
200 - 400	4	1 : 1
400 - 800	2	1 : 1
800 - 1600	1	1 : 1
1600 - 3200	5	1 : 10
2700 - 5300	3	1 : 10
4000 - 8000	4	1 : 20
8000 - 16000	2	1 : 20
13000 - 26500	3	1 : 50
20000 - 40000	2	1 : 50
40000 - 80000	2	1 : 100
80000 - 160000	1	1: 100

* เมื่อใช้ FAS ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล และ $K_2Cr_2O_7$ ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล

ตารางที่ ค (2) ขนาดของหลอดแก้ว ปริมาณตัวอย่างน้ำและสารเคมีที่เหมาะสม

ขนาดหลอดแก้ว (มิลลิลิตร)	ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)	สารละลายไดโครเมต (มิลลิลิตร)	สารละลายกรดซัลฟิวริก (มิลลิลิตร)	ปริมาตรทั้งหมด (มิลลิลิตร)
16 x 100	2.5	1.5	3.5	7.5
20 x 150	5.0	3.0	7.0	15.0
25 x 150	10.0	6.0	14.0	30.0

<u>การคำนวณ</u>

$$\text{ค่าซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(A - B) \times N \times 8{,}000}{\text{ปริมาตรน้ำเสียตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}} \times 10^{6}$$

เมื่อ A = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตกับ Blank (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตกับน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

N = ความเข้มข้นของ FAS (นอร์มัล)

V = ปริมาตรน้ำเสียตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

7. การวิเคราะห์หาบีโอดี

การวิเคราะห์ BOD วิธีการวิเคราะห์มี 2 วิธี คือ วิธีแบบโดยตรงและวิธีแบบโดยเจือจาง แต่ในการทดลองจะใช้วิธีแบบโดยเจือจาง ซึ่งวิธีแบบโดยเจือจางแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

วิธีแบบเจือจางใช้สำหรับตัวอย่างที่มีความสกปรก เช่น มีค่าบีโอดีเกิน 7 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากปริมาณของออกซิเจนที่ใช้ไปในการย่อยสลายสารอินทรีย์จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับจำนวนสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำนั้น เมื่อตัวอย่างน้ำมีสารอินทรีย์จำนวนมาก จึงต้องเจือจางตัวอย่างเพื่อให้มีออกซิเจนเพียงพอที่แบคทีเรียจะใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์นั้น ซึ่งวิธีแบบเจือจางจะแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือไม่ต้องเติมหัวเชื้อและต้องเติมหัวเชื้อ ในการทดลองเลือกแบบไม่ต้องเติมหัวเชื้อ

<u>เครื่องมือและอุปกรณ์</u>

1. ขวดบีโอดี (BOD Bottle) ขนาด 250 – 300 มิลลิลิตรพร้อมจุกปิดสนิท
2. ตู้ควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 20 $\pm$ 1 องศาเซลเซียสและต้องมืด
3. อุปกรณ์และเครื่องแก้วต่างๆ เช่น กระบอกตวง บิวเรต ขวดรูปชมพู่ เป็นต้น
4. เครื่องจ่ายลม แบบเดียวกันกับที่ใช้กับตู้เลี้ยงปลาสวยงามและหัวลูกฟู่ (หัวจ่ายลม)

<u>สารเคมี</u>

1. น้ำกลั่น

   - ต้องมีคุณภาพสูง ควรมีทองแดงน้อยกว่า 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร ปราศจากการคลอรีน คลอรามีน สารอินทรีย์ กรด – เบส ต้องเป็นกลาง

2. สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH7.2

   - ละลายโปแตสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) 8.5 กรัม ไดโปแตสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4) 21.75 กรัม แอมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) 17.2 กรัม และไดโซเดียมไฮไดรเจนฟอสเฟตเฮปตะไฮเดรต ($Na_2PO_4 \bullet 7H_2O$) 33.4 กรัมและในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร แล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร

3. สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

   - ละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($MgSO_4 \bullet 7H_2O$) จำนวน 22.5 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร

4. สารละลายแคลเซียมคลอไรด์

   - ละลายแคลเซียมคลอไรด์ปราศจากน้ำ (Anhydrous $CaCl_2$) จำนวน 27.5 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร

5. สารละลายเฟอร์ริคคลอไรด์

   - ละลายเฟอร์ริคคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($FeCl_3 \bullet 6H_2O$) จำนวน 0.25 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร

6. สารละลายแมงกานีสซัลเฟต

   - ละลายแมงกานีสซัลเฟตโมโนไฮเดรต ($MnSO_4 \bullet H_2O$) 364 กรัม หรือแมงกานีสซัลเฟตเตตระไฮเดรต ($MnSO_4 \bullet 4H_2O$) 480 กรัมหรือแมงกานีสซัลเฟตไดไฮเดรต ($MnSO_4 \bullet 2H_2O$) 400 กรัมในน้ำกลั่น กรองแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร

7. สารละลายอัลคาไล-ไอโอไดด์-เอไซด์

   - ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 500 กรัมและโซเดียมไอโดไดด์ (NaI) 135 กรัม ในน้ำกลั่นเจือจางให้ได้ 950 มิลลิลิตรและทำให้เย็น จากนั้นค่อย ๆ เติมสารละลายโซเดียมเอไซด์ (NaN_3) ที่ละลายในน้ำ 40 มิลลิลิตร อย่างช้าๆ ทำให้มีฤทธิ์เป็นกรด และเจือจางจนได้ปริมาตร 1 ลิตร

8. สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 นอร์มัล

   - ละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตเพนตะไฮเดรต ($Na_2S_2O_3 \bullet 5H_2O$) จำนวน 24.82 กรัมในน้ำต้มที่เย็นแล้ว เติมคลอโรฟอร์ม 5 มิลลิลิตรหรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 กรัม เพื่อเก็บไว้ใช้นาน ๆ ปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร เมื่อใช้งานให้เจือจางเป็น 0.025 นอร์มัล

9. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น

10. น้ำแป้ง

<u>วิธีวิเคราะห์แบบเจือจางที่ไม่ต้องเติมหัวเชื้อ Seed</u>

1. การเตรียมน้ำเจือจาง โดยน้ำกลั่นมาแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส และพ่นอากาศก่อนทำการเจือจางอย่างน้อย 1 ชั่วโมง แล้วเติมสารเคมีข้อ 2 - 5 อย่างละ 1 มิลลิลิตรต่อน้ำ 1 ลิตร
2. การเลือกปริมาณตัวอย่างที่จะใช้ ถ้าไม่ทราบค่าบีโอดีโดยประมาณของตัวอย่างน้ำต้องหาซีโอดีก่อนหรืออาจจะดูจากค่า Rapid COD (ซีโอดีอย่างง่าย) พร้อมกับพิจารณาลักษณะของตัวอย่างน้ำ แหล่งเก็บตัวอย่างน้ำร่วมด้วย เพื่อกะประมาณค่าซีโอดี เช่น น้ำตัวอย่างที่มีค่าของแข็งละลายมาก ควรจะมีค่าบีโอดี ระหว่าง 100 -300 มิลลิกรัมต่อลิตร การเลือกปริมาณตัวอย่างนิยมเลือกให้มีปริมาณออกซิเจนเหลืออยู่อย่างน้อย 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และควรจะมีการใช้ออกซิเจนอย่างน้อย 2 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อทราบค่าบีโอดีโดยประมาณ ควรเลือกปริมาณตัวอย่างที่คาดว่าจะให้ค่าบีโอดีอยู่ในช่วงที่กำหนดแล้วจึงเลือกปริมาณตัวอย่างที่ใช้ให้สูงและต่ำกว่าที่อยู่ติดกันตามตารางที่ ค (3) เช่น ปริมาณค่าบีโอดีไว้ประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเลือกใช้ปริมาณตัวอย่าง 10 มิลลิกรัม เลือกสูงขึ้นเป็น 5 มิลลิลิตรและต่ำลงเป็น 20 มิลลิลิตร

ตารางที่ ค (3) การเลือกปริมาณน้ำตัวอย่างและอัตราเจือจางสำหรับช่วงบีโอดี

ปริมาณตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	ช่วงบีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อัตราเจือจาง
0.02	30,000 - 105,000	15,000
0.05	12,000 – 42,000	6,000
0.10	6,000 – 21,000	3,000
0.20	3,000 - 10,500	1,500
0.50	1,200 – 4,200	600
1.0	600 - 2,100	300
2.0	300 - 1,050	150
5.0	120 - 420	60
10.0	60 - 210	30
20.0	30 - 105	15
50.0	12 - 42	6
100	6 - 21	3
300	0 - 7	1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หมายเหตุ ถ้าปริมาณตัวอย่างที่ใช้น้อยกว่า 1.0 มิลลิลิตร ควรเจือจางตัวอย่างก่อนปิเปตใส่ขวดบีโอดี

3. ปิเปตตัวอย่างตามจำนวนที่เลือกไว้ลงในขวดบีโอดี ขนาด 300 มิลลิลิตร อย่างละ 2 ขวด
4. เติมน้ำสำหรับใช้เจือจางจนเต็มขวดบีโอดี ต้องระมัดระวังพยายามอย่าให้เกิดฟองอากาศ ปิดฝาให้แน่น
5. นำขวดบีโอดีขวดหนึ่งของแต่ละปริมาณที่เลือกมาหาค่าออกซิเจนละลายที่มีเริ่มต้นสมมุติเป็น DO_0 ส่วนอีกขวดนำไปบ่มที่ตู้ควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน
6. เมื่อครบ 5 วัน นำขวดบีโอดีที่บ่มไว้มาหาค่าออกซิเจนละลายที่เหลืออยู่ เรียกว่า DO_5

<u>การวิเคราะห์ค่า DO</u>

1. เก็บน้ำตัววิธีการเก็บน้ำตัวอย่าง ลงในขวดบีโอดี ให้เต็มขวดพร้อมปิดจุก
2. เติมสารละลาย $MnSO_4$ 1.0 มิลลิลิตร และสารละลายอัลคาไล – ไอโอไดด์ - เอไซด์ 1.0 มิลลิลิตร โดยใช้ปิเปตวัดปริมาตรและจุ่มลงใต้ผิวน้ำตัวอย่าง ปิดจุกอย่างระมัดระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศ เขย่าโดยคว่ำขึ้น - ลง แรง ๆ หลาย ๆ ครั้ง ให้ผสมเข้ากันปล่อยให้เกิดการตกตะกอนและเขย่าใหม่ซ้ำอีกครั้ง
3. เมื่อตกตะกอนได้ส่วนใสมากกว่า 100 มิลลิลิตร เปิดจุกและค่อย ๆ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2.0 มิลลิลิตร ให้ไหลรินตามตอขวดบีโอดี
4. ปิดจุกและทำการเขย่าคว่ำ ขึ้น - ลง จนเห็นไอโอดีนกระจายทั่ว (I_2 มีสีเหลืองแกมน้ำตาล) และตะกอนละลายหมด
5. ปิเปตใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร จำนวน 203 มิลลิลิตร* นำไปไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.025 นอร์มัล เมื่อสารละลายได้สีเหลืองฟางให้เติมน้ำแป้งเป็นอินดิเคเตอร์ 1 - 2 มิลลิลิตรและไทเทรตต่อจนสีน้ำเงินจางหายไป

การคำนวณ $DO_{(ppm)}$ = (ปริมาตรของ 0.025 นอร์มัลของโซเดียมไธโอซัลเฟต x 0.2 /200) x1000

*** ข้อสังเกต** - การนำสารละลายจากข้อที่ 4 มาไทเทรตจำนวน 203 มิลลิลิตร แต่ในการคำนวณคิดปริมาณเพียง 200 เนื่องมาจากเทียบจากเมื่อใช้น้ำ 300 มิลลิลิตร เติมสารเคมีจากข้อ 1 ลงไป 4 มิลลิลิตร น้ำตัวอย่างเหลือในขวดเพียง 296 มิลลิลิตร

- น้ำตัวอย่าง 296 มิลลิลิตรเมื่อเทียบกับสารละลาย 300 มิลลิลิตร ดังนั้น ต้องการสารละลาย 200 มิลลิลิตร จะต้องใช้สารละลายในขวด =(300 x200) / 296 = 203 มิลลิลิตร

<u>การคำนวณค่าบีโอดี</u>

BOD (มิลลิลิตรออกซิเจนต่อลิตร) = (DO_0 - DO_5) x อัตราส่วนเจือจาง

เมื่อ DO_0 = ค่าออกซิเจนละลายที่ไทเทรตได้ในวันแรก

DO_5 = ค่าออกซิเจนละลายที่ไทเทรตได้ในวันที่ 5

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณ

ง. การคำนวณต้นทุนในการดำเนินงาน

ง.1 กระบวนการรวมตัวของตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าในระบบต่อเนื่อง

ให้ ค่ากระแสไฟฟ้า(Electricity cost) = 3.28 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง[32]

ค่าฝังกลบตะกอน (Land fill cost) = 2000 บาทต่อตัน[22]

ค่าขั้วไฟฟ้า (Cost of electrode) = 0.9 บาทต่อกรัม

ปริมาณน้ำตัวอย่าง = 6.0 ลิตร

<u>พิจารณาที่</u>

กระแสไฟฟ้า (*i*) = 2.12 แอมแปร์

ปริมาณน้ำตัวอย่าง (*L*) = 6.0 ลิตร

ศักย์ไฟฟ้า (*V*) = 2.30 โวลต์

เวลา (*t*) = 60 นาที

ตะกอนที่เกิดขึ้น* (*Ws*) = 2.20 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

น้ำหนักของขั้วไฟฟ้าที่กัดกร่อน **(*Wre*) = 0.87 กรัมต่อปริมาณน้ำตัวอย่าง 6 ลิตร

- กำลังไฟฟ้า = (i x V x t)

= [(2.12 x 2.30 x 60)/(60 x 1000)] กิโลวัตต์-ชั่วโมง

= 0.0048 กิโลวัตต์ -ชั่วโมง

= (0.0048x 1000) / 6 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร

= 0.80 กิโลวัตต์ - ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร

- ค่ากระแสไฟฟ้ารวม = กำลังไฟฟ้า x ค่ากระแสไฟฟ้า

= 0.80 x 3.28 = 2.62 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

- ค่าฝังกลบตะกอนรวม = ตะกอนที่เกิดขึ้น x ค่าฝังกลบตะกอน

= (2.20 /1000) x 2000 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

= 4.4 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

- ค่าขั้วไฟฟ้า (Cost of electrode) = น้ำหนักของขั้วไฟฟ้าที่กัดกร่อน x ค่าขั้วไฟฟ้า

= (0.87 *x* 0.90) บาทต่อปริมาณน้ำตัวอย่าง 6 ลิตร

= (0.07x 1000)/6 = 11.67 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

ต้นทุนในการดำเนินงาน = ค่ากระแสไฟฟ้า + ค่าฝังกลบตะกอน +ค่าขั้วไฟฟ้า

= 2.62 + 4.4 + 11.67 = 18.69 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

= 0.49 เหรียญสหรัฐต่อลูกบาศก์เมตรของสารตัวอย่าง

* เกิดจากการเก็บน้ำตัวอย่างที่เวลา 60 นาทีปริมาณ 1 ลิตรนำมาระเหยน้ำออกแล้วคำนวณเปรียบเป็น 1 ลูกบาศก์เมตร

** เกิดจากการชั่งน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าก่อนทำการทดลองแล้วหักออกด้วยน้ำหนักของขั้วหลังทำการทดลอง

ง.2 กระบวนการอิเล็กโตรเฟนตอนในระบบต่อเนื่อง

ให้ ค่ากระแสไฟฟ้า(Electricity cost) = 3.28 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง[32]

ค่าฝังกลบตะกอน (Land fill cost) = 2000 บาทต่อตัน[22]

ค่าขั้วไฟฟ้า (Cost of electrode) = 0.9 บาทต่อกรัม

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ = 720 บาทต่อลิตร

ปริมาณน้ำตัวอย่าง = 6.0 ลิตร

<u>พิจารณาที่</u>

กระแสไฟฟ้า (i) = 2.12 แอมแปร์

ปริมาณน้ำตัวอย่าง (L) = 6.0 ลิตร

ศักย์ไฟฟ้า (V) = 1.8 โวลต์

เวลา (t) = 60 นาที

ตะกอนที่เกิดขึ้น (Ws) = 1.75 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

น้ำหนักของขั้วไฟฟ้าที่กัดกร่อน (Wre) = 1.17 กรัมต่อปริมาณน้ำตัวอย่าง 6 ลิตร

ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ = 1.5 มิลลิลิตรต่อปริมาณน้ำตัวอย่าง 6 ลิตร

- กำลังไฟฟ้า = ($i \times V \times t$)

= [(2.12 x 1.80 x 60)/(60 x 1000)] กิโลวัตต์-ชั่วโมง

= 0.0038 กิโลวัตต์ -ชั่วโมง

= (0.0038x 1000) / 6 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร

= 0.63 กิโลวัตต์ - ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร

- ค่ากระแสไฟฟ้ารวม = กำลังไฟฟ้า x ค่ากระแสไฟฟ้า

= 0.63 x 3.28 = 2.07บาทต่อลูกบาศก์เมตร

- ค่าฝังกลบตะกอนรวม = ตะกอนที่เกิดขึ้น x ค่าฝังกลบตะกอน

= (1.75 /1000) x 2000 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

= 3.50 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

- ค่าขั้วไฟฟ้า (Cost of electrode) = น้ำหนักของขั้วไฟฟ้าที่กัดกร่อน x ค่าขั้วไฟฟ้า

= (1.17 *x* 0.90)p บาทต่อปริมาณน้ำตัวอย่าง 6 ลิตร

= (0.105x 1000)/6 = 17.55 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

-ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ = ปริมาณที่ใช้ x ค่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

= (1.5x720/1000) บาทต่อปริมาณน้ำตัวอย่าง 6 ลิตร

= (1.08x1000)/6 = 180 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

ต้นทุนในการดำเนินงาน = ค่ากระแสไฟฟ้า + ค่าฝังกลบตะกอน +ค่าขั้วไฟฟ้า + ค่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

= 2.07 + 3.50 + 17.55 + 180

= 203.12 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

= 5.35 เหรียญสหรัฐต่อลูกบาศก์เมตรของสารตัวอย่าง

ง.3 ค่า Reynolds number

$$Re = \frac{\rho DV}{\mu}$$

Re = Reynolds number

ρ = ความหนาแน่นของของเหลว (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ (เมตร)

V = ความเร็วของของเหลว (เมตรต่อวินาที)

μ = ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)

<u>พิจารณาที่</u>

อัตราการไหล = 1.5 ลิตรต่อนาที

ρ = 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

D = 0.15 เมตร

μ = 0.001 กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที

ความเร็วของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ = อัตราการไหล/พื้นที่หน้าตัดของเครื่องปฏิกรณ์

พื้นที่หน้าตัดของเครื่องปฏิกรณ์ = ¶ x$(D/2)^2$

= ¶ x$(0.15/2)^2$

= 0.018 ตารางเมตร

อัตราการไหล = 1.5 ลิตรต่อนาทีx(1x10^{-3} ลูกบาศก์เมตร/ 1 ลิตร) /(60 วินาที/ 1 นาที)

= 2.5X10^{-5} ลูกบาศก์เมตร/วินาที

ความเร็วของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ = (2.5X10^{-5} ลูกบาศก์เมตร/วินาที)/0.018 ตารางเมตร

= 1.41x10^{-3} เมตร/วินาที

Re = 1000x0.15X1.41x10^{-3}/0.001

Re = 212.12

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายมารุต โปราณานนท์ เกิดวันที่ 23 กันยายน 2524 ที่จังหวัด นครปฐม สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2547

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย