

การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์ด้วยเหล็กนาโนและเหล็กนาโนดัดแปร



นางสาวภัสกรกน หอมหวล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TREATMENT OF WASTEWATER FROM ALCOHOL INDUSTRY USING NANO-Fe AND
MODIFIED NANO-Fe



Miss Phatkanok Homhoul

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

Department of Science

Faculty of Chemical Technology

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์ด้วย
เหล็กนาโนและเหล็กนาโนดัดแปร

โดย

นางสาวภัศกนก หอมหวล

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

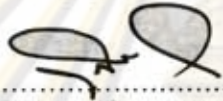
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. มะลิ นุ่นสม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

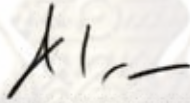
ดร. สิทธิพงษ์ เพ็งพานิช

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

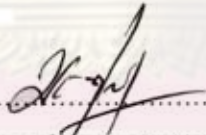


..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ นารหนองบัว)

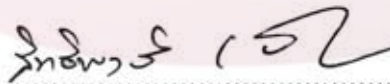
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



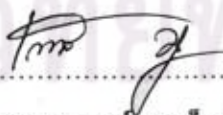
..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธารพงษ์ วิทิตสานต์)



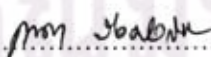
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. มะลิ นุ่นสม)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร. สิทธิพงษ์ เพ็งพานิช)



..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกจวลี พุกษาทร)




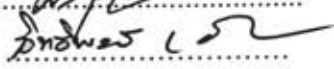
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กานดา ว่องไวลิขิต)

ภัศกนก หอมหวล : การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์ด้วยเหล็กนาโนและเหล็กนาโนดัดแปร. (TREATMENT OF WASTEWATER FROM ALCOHOL INDUSTRY USING NANO-Fe AND MODIFIED NANO-Fe) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร. มะลิ หุ่นสม, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.สิทธิพงษ์ เพ็งพานิช, 96 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์ด้วยเหล็กนาโนและเหล็กนาโนดัดแปร โดยตัวแปรที่ศึกษาสำหรับเหล็กนาโนได้แก่ การเจือจาง ความเป็นกรด-เบส ความเร็วรอบในการเขย่า อัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนและปริมาณน้ำเสีย ต่อร้อยละการลดลงของสี ซีไอดี และบีไอดี ส่วนตัวแปรที่ศึกษาสำหรับเหล็กนาโนดัดแปรคือชนิดและปริมาณของตัวรองรับ และปริมาณโลหะตัวที่สอง (แพลเลเดียม) พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเจือจางน้ำเสียมากขึ้น ค่าความเป็นกรด-เบสลดลง และอัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนและปริมาณน้ำเสียเพิ่มขึ้น ส่วนความเร็วรอบในการเขย่ามีผลเล็กน้อยต่อร้อยละการลดลงของสี ซีไอดี และบีไอดี การใช้โคโคซานเป็นตัวรองรับจะให้ผลในการบำบัดน้ำเสียดีกว่าซิลิกา และการเติมแพลเลเดียมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยเหล็กนาโนและเหล็กนาโนดัดแปร พบว่าเหล็กนาโนดัดแปรจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าเหล็กนาโน โดยเหล็กนาโนดัดแปรที่เหมาะสมในการนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์คือเหล็กนาโนบนโคโคซาน ซึ่งมีปริมาณโคโคซาน 0.1 กรัมต่อกรัมเหล็ก โดยภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดคือ การเจือจาง 50 เท่า ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 ความเร็วรอบในการเขย่า 170 รอบ ต่อเวลาที่อัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนและปริมาณน้ำเสีย 12.5 กรัมต่อลิตร ซึ่งที่ภาวะดังกล่าวสามารถลดสี ซีไอดี และบีไอดี ได้ร้อยละ 93.9 90.5 และ 60.8 ตามลำดับ เมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง โดยอัตราการลดลงของสี ซีไอดี และบีไอดี จะเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ซึ่งมีค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.85 0.76 และ 0.57 ชั่วโมง⁻¹ ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา	เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อนิสิต	ภัศกนก หอมหวล
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....	
ปีการศึกษา	2552	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	

4872614023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : WASTEWATER INDUSTRY / NANO-Fe MODIFIED / NANO-Fe

PHATKANOK HOMHOUL : TREATMENT OF WASTEWATER FROM

ALCOHOLINDUSTRY USING NANO-Fe AND MODIFIED NANO-Fe. THESIS

ADVISOR:ASSOC.PROF MALI HUNSOM, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR

SITTHIPHONG PENGPNICH, Ph.D., 96 pp.

This work was carried out to treat wastewater from alcohol plant by nano-Fe⁰ and modified nano-Fe⁰. The investigated parameters for the system treated by the nano-Fe⁰ were number of dilution, initial pH of wastewater, shaking rate, ratio of nano-Fe⁰ to volume of wastewater whereas the explored parameters for the system treated by the modified nano-Fe⁰ were type and quantity of supporter and quantity of the secondary metal (Pd). The preliminary results indicated that the treatment efficiency increased with the increase of dilution time and ratio of nano-Fe⁰ to volume of wastewater and the decrease of initial pH of wastewater while the shaking speed had slightly effect on the removal efficiency of color, COD and BOD. The utilization of chitosan as a supporter provided the better performance than that of silica and the addition of Pd slightly promoted the treatment efficiency. Comparison between the treatment efficiency of nano-Fe⁰ and modified nano-Fe⁰, the modified nano-Fe⁰, nano-Fe⁰ on 0.1 g chitosan, was suitable for treating wastewater from alcohol plant. At optimum condition, dilution 50 times, initial pH 3, shaking rate 170 rpm, ratio of nano-Fe⁰ to volume of wastewater 12.5 g/l, approximately 93.9 90.5 and 60.8 of color, COD and BOD was decreased within 6 hr reaction time. The reduction rate of color, COD and COD followed the first order reaction with the rate constant of 0.85 0.76 and 0.57 hr⁻¹, respectively

Department : Chemical Technology.....

Field of Study : Chemical Technology.....

Academic Year : 2009.....

Student's Signature *PHATKANOK HOMHOUL*

Advisor's Signature *Mali Hunsom*

Co-Advisor's Signature *S. Pengpanich*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หนูนสม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.สิทธิพงษ์ เพ็งพานิช อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งท่านทั้งสองได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ด้วยดีตลอดมารวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พฤษาทร และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานดา ว่องไวลิขิต ที่กรุณารับเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง และ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้าง ซ่อมแซมเครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นกำลังใจอย่างดีและให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ชาวเคมีเทคนิคทุกคนที่ให้กำลังใจ ช่วยเหลือและให้คำแนะนำด้วยดีเสมอมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	1
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 แอลกอฮอล์.....	3
2.2 กระบวนการผลิต.....	4
2.3 การหมักกากน้ำตาล.....	6
2.4 ลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานสุรา.....	9
2.5 ลักษณะของน้ำกากส่าและสารเมลานอยดิน.....	10
2.6 วิธีการจัดการน้ำเสีย.....	11
2.6.1 กระบวนการทางกายภาพ.....	12
2.6.2 กระบวนการทางชีววิทยา.....	12
2.6.3 กระบวนการทางเคมี.....	12
2.6.3.1 การทำให้เกิดตะกอน.....	13
2.6.3.2 การสะเทิน.....	13
2.6.3.3 การรวมตัวและการตกตะกอน.....	13
2.6.3.4 การเกิดออกซิเดชันทางเคมี.....	13

2.6.3.5 การเกิดรีดักชันทางเคมี	13
2.7 หลักการของตัวดูดซับ	14
2.7.1 ไคโตซาน.....	14
2.7.2 ซิลิกา.....	19
2.8 หลักการพื้นฐานของนาโนเทคโนโลยี	20
2.8.1 เทคโนโลยีแบบหยาบ.....	21
2.8.2 เทคโนโลยีระดับโมเลกุล.....	22
2.9 นาโนเทคโนโลยี.....	22
2.9.1 องค์ประกอบของนาโนเทคโนโลยี.....	23
2.9.2 สมบัติพิเศษที่เกิดจากความเล็กระดับนาโน.....	23
2.10 การประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยี.....	23
2.10.1 เทคโนโลยีแบบบนลงล่าง.....	23
2.10.2 เทคโนโลยีแบบล่างขึ้นบน.....	26
2.11 การประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีกับการบำบัดน้ำเสีย	29
2.11.1 ถ่านกัมมันต์กับการบำบัดน้ำเสีย.....	29
2.11.2 อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์.....	30
2.11.3 ซิลเวอร์นาโน.....	30
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	34
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	34
3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี.....	35
3.2.1 การวิเคราะห์สี.....	35
3.2.2 การวิเคราะห์ซีไอดี.....	35
3.2.3 การวิเคราะห์บีไอดี.....	35
3.2.4 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมเหล็กนาโนและเหล็กนาโนดัดแปร.....	36
3.3 น้ำตัวอย่าง.....	36
3.4 ขั้นตอนการเตรียมเหล็กและเหล็กนาโนดัดแปร.....	37
3.4.1 การเตรียมเหล็กนาโน.....	37
3.4.2 การเตรียมเหล็กนาโนบนตัวรองรับไคโตซาน.....	38

3.4.3 การเตรียมเหล็กนาโนบนตัวรองรับซิลิกา.....	38
3.4.4 การเตรียมเหล็กนาโน-แพลเลเดียม.....	38
3.4.5 การเตรียมเหล็กนาโน-แพลเลเดียมบนตัวรองรับไคโตซาน.....	38
3.5 การบำบัดน้ำเสีย.....	39
3.5.1 การหาภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียด้วยเหล็กนาโน.....	39
3.5.1.1 อัตราการเจือจางน้ำเสีย.....	39
3.5.1.2 ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำเสีย.....	39
3.5.1.3 อัตราความเร็วของการเขย่า.....	39
3.5.1.4 อัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนต่อน้ำเสีย.....	39
3.5.2 การหาภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียด้วยเหล็กนาโนดัดแปร.....	40
3.5.2.1 เหล็กนาโนบนตัวรองรับไคโตซาน.....	40
3.5.2.2 เหล็กนาโนบนตัวรองรับซิลิกา.....	40
3.5.2.3 เหล็กนาโน-แพลเลเดียม.....	40
3.5.2.4 เหล็กนาโน-แพลเลเดียมบนตัวรองรับไคโตซาน.....	41
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	42
4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์..	42
4.2 การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์ด้วยเหล็กนาโนและเหล็กนาโนดัดแปร.....	43
4.2.1 สมบัติทางสัณฐานวิทยาของเหล็กนาโนและเหล็กไมโคร.....	43
4.2.2 ภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียด้วยเหล็กนาโน.....	46
4.2.2.1 ผลของความเป็นกรด-เบส.....	46
4.2.2.2 ผลของการเจือจางน้ำเสีย.....	47
4.2.2.3 ผลของความเร็วของการเขย่า.....	49
4.2.2.4 ผลของอัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนต่อน้ำเสีย.....	49
4.2.3 ภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียด้วยเหล็กนาโนดัดแปร.....	52
4.2.3.1 ผลของตัวรองรับ.....	52
4.2.3.2 ผลของโลหะตัวที่สอง.....	59
4.2.3.3 ผลของโลหะผสมบนตัวรองรับ.....	62

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	68
รายการอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก.....	73
ภาคผนวก ก ความหมายของค่าพารามิเตอร์ในน้ำเสีย.....	74
ภาคผนวก ข มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคม อุตสาหกรรม.....	76
ภาคผนวก ค การหาสมบัติของน้ำเสีย.....	79
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	96



ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	อันดับการบริโภคเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ของประเทศไทยในช่วงปี ค.ศ.1998-2000.....	4
2.2	ส่วนประกอบของกากน้ำตาล	9
2.3	สมบัติและปริมาณน้ำเสียจากโรงงานสุรา	10
2.4	ลักษณะโดยเฉลี่ยของน้ำกากส่าจากโรงงานผลิตสุราในประเทศไทย	11
4.1	สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์...	42
4.2	การเปรียบเทียบค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา.....	66
4.3	การเปรียบเทียบปริมาณสารมลพิษและร้อยละการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตแอลกอฮอล์เมื่อบำบัดด้วยกระบวนการต่างๆ.....	68
ข1	มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม.....	76
ค1	ปริมาณน้ำตัวอย่างและอัตราเจือจางที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์ไอดี.....	85
ค2	ขนาดของหลอดแก้ว ปริมาณตัวอย่างตัวอย่างน้ำและสารเคมีที่เหมาะสม.....	86
ค3	การเลือกปริมาณน้ำตัวอย่างและอัตราเจือจางสำหรับช่วงปีไอดี.....	89
ค4	การเลือกปริมาณน้ำตัวอย่าง.....	92



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	กรรมวิธีการผลิตสุราและจุดปล่อยน้ำทิ้งของโรงงานสุรา.....	5
2.2	การใช้แสงเลเซอร์เขียนรูปแบบวงจรมือสำหรับไมโครชิป	23
2.3	การผลิตวงจรมือไมโครชิบบนแผ่นซิลิกอน	24
2.4	ท่อนาโน.....	25
2.5	แผนภาพวงจรการทำงานของ AFM	26
2.6	วงจรการทำงานของ STM	27
2.7	หุ่นยนต์นาโนและ DNA.....	28
2.8	ควอนตัมดอท.....	29
3.1	ลักษณะของน้ำเสีย.....	36
3.2	ลักษณะของเหล็กนาโนก่อนรอง.....	37
3.3	ลักษณะของเหล็กนาโนหลังรอง.....	37
4.1	พื้นฐานวิทยาของ (ก) เหล็กไมโครที่มีในทางการค้า และ (ข) เหล็กนาโนที่เตรียมในห้องปฏิบัติการเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD.....	43
4.2	พื้นฐานวิทยาและการแจกตัวของขนาดอนุภาคของ (ก) เหล็กไมโครที่มีในทางการค้า และ (ข) เหล็กนาโนที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ที่กำลังขยาย 200,000 เท่า.....	44
4.3	ร้อยละการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียกับเวลาเมื่อผ่านการบำบัดด้วยเหล็กนาโนและเหล็กไมโคร.....	45
4.4	ผลของค่าความเป็นกรด-เบส ต่อร้อยละการลดลงของสารมลพิษ ที่อัตราการเจือจาง 50 เท่า อัตราการเขย่า 170 รอบต่อนาที ในเวลา 24 ชั่วโมงและอัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนต่อน้ำเสียเท่ากับ 10 กรัมต่อตร.....	47
4.5	ผลของการเจือจางต่อร้อยละการลดลงของสารมลพิษที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 อัตราการเขย่าที่ 170 รอบต่อนาที ในเวลา 24 ชั่วโมงและอัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนต่อน้ำเสียเท่ากับ 10 กรัมต่อลิตร.....	48

ภาพที่	หน้า	
4.6	ผลของการเขย่าต่อร้อยละการลดลงของสารมลพิษ โดยใช้อัตราการเจือจางน้ำเสีย 50 เท่า ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 และอัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนต่อน้ำเสียเท่ากับ 10 กรัมต่อลิตร.....	50
4.7	ผลของอัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนและน้ำเสียต่อร้อยละการลดลงของสารมลพิษ โดยใช้อัตราการเจือจางน้ำเสีย 50 เท่า ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 และเขย่าที่ความเร็ว 170 รอบต่อนาที.....	51
4.8	ฐานฐานวิทยาของเหล็กนาโนบนตัวรองรับโคโตซานที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่กำลังขยาย 200,000 เท่า.....	54
4.9	ผลของตัวรองรับโคโตซานต่อร้อยละการลดของสารมลพิษ โดยใช้อัตราการเจือจางน้ำเสีย 50 เท่า ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 อัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนบนโคโตซานต่อน้ำเสียเท่ากับ 12.5 กรัมต่อลิตร และเขย่าที่ความเร็ว 170 รอบต่อนาที.....	55
4.10	ลักษณะของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยเหล็กนาโนบนตัวรองรับโคโตซานที่มีปริมาณโคโตซาน (ก) น้ำเสียเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองเมื่อผ่านการเจือจาง 50 เท่า (ข) 2.0 กรัมต่อกรัมเหล็ก (ค) 1.0 กรัมต่อกรัมเหล็ก (ง) 0.5 กรัมต่อกรัมเหล็ก และ (จ) 0.1 กรัมต่อกรัมเหล็ก.....	56
4.11	ผลของตัวรองรับซิลิกาต่อร้อยละการลดของสารมลพิษ โดยใช้อัตราการเจือจางน้ำเสีย 50 เท่า ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 อัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนบนโคโตซานต่อน้ำเสียเท่ากับ 12.5 กรัมต่อลิตร และเขย่าที่ความเร็ว 170 รอบต่ออาที่.....	57
4.12	ฐานฐานวิทยาของเหล็กนาโนบนตัวรองรับซิลิกาที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่กำลังขยาย 200,000 ((ก) (ข) และ (ค-1)) และกำลังขยาย 300,000 เท่า ((ค-2) และ (ง)).....	57
4.13	ลักษณะของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยเหล็กนาโนบนตัวรองรับซิลิกาที่มีปริมาณซิลิกา (ก) 2 กรัม (ข) 1 กรัม (ค) 0.5 กรัม และ (ง) 0.1 กรัม.....	59

ภาพที่		หน้า
4.14	กลไกการเกิดปฏิกิริยาของโลหะคู่ผสม.....	60
4.15	ผลของปริมาณแพลเลเดียมในโลหะคู่ผสมเหล็กนาโน-แพลเลเดียมต่อร้อยละการลดลงของสารมลพิษโดยใช้อัตราการเจือจางน้ำเสีย 50 เท่า ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 อัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนบนโคโคซานต่อน้ำเสียเท่ากับ 12.5 กรัมต่อลิตร และเขย่าที่ความเร็ว 170 รอบต่อนาที.....	61
4.16	ผลของปริมาณโคโคซานในเหล็กนาโน-แพลเลเดียมต่อร้อยละการลดลงของสารมลพิษโดยใช้อัตราการเจือจางน้ำเสีย 50 เท่า ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 อัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนบนโคโคซานต่อน้ำเสียเท่ากับ 12.5 กรัมต่อลิตร และเขย่าที่ความเร็ว 170 รอบต่อนาที.....	63
4.17	ผลของความเข้มข้นของปริมาณเหล็กปนเปื้อนหลังการบำบัดที่ภาวะเหมาะสม.....	64
4.18	กราฟแสดงค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาของเหล็กนาโน (ก) เหล็กนาโนบนโคโคซาน (ข) เหล็กนาโน-แพลเลเดียม (ค) และเหล็กนาโน-แพลเลเดียมบนโคโคซาน (ง).....	65
ค1	Calibration Curve ของการวัดสีด้วยเครื่อง UV- Spectrophotometer.....	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์เป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อประเทศไทยอย่างมาก เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการบริโภคแอลกอฮอล์ประเภทสุรามากเป็นอันดับที่ 5 ของโลก และมีโรงงานผลิตสุราชั้นนำตั้งอยู่ในประเทศหลายแห่งด้วยกัน ซึ่งทำรายได้ให้กับประเทศเป็นอย่างมากในแต่ละปี อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมดังกล่าวก็ทำให้เกิดน้ำเสียในปริมาณมากเช่นกัน โดยแต่ละปีอุตสาหกรรมดังกล่าวจะปล่อยน้ำเสียมากถึง 330,000 ลูกบาศก์เมตร และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในทุกปีเนื่องจากการผลิตที่สูงขึ้น

น้ำกากส่าเป็นน้ำเสียที่มาจากกระบวนการผลิตแอลกอฮอล์และมีสีน้ำตาลเข้ม ซึ่งเกิดจากสีของการเคี้ยวน้ำตาล ส่วนใหญ่เป็นสารเมลานอยดิน (Melanoidin) ซึ่งย่อยสลายได้ยาก น้ำกากส่านี้ประกอบด้วยกรดอินทรีย์ต่างๆ เช่น กรดทาร์ทาริก กรดซักซินิก กรดมาลิก กรดแอสซิดิก นอกจากนี้น้ำเสียดังกล่าวยังมีความเป็นพิษค่อนข้างมาก กล่าวคือ มีค่าความเป็นกรด-เบสต่ำคือ อยู่ในช่วง 4.5-4.8 มีค่าบีโอดีและค่าซีโอดีสูง ทำให้ต้องมีการบำบัดน้ำเสียชนิดนี้ก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ การย่อยสลายด้วยวิธีทางชีวภาพ และกระบวนการเคมีไฟฟ้า ฯลฯ แต่วิธีการดังกล่าวก็ยังมีข้อจำกัดทั้งในแง่ของค่าใช้จ่ายและประสิทธิภาพในการบำบัด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาการเตรียมเหล็กนาโนและเหล็กนาโนดัดแปร

1.2.2 ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์ด้วยเหล็กนาโนและเหล็กนาโนดัดแปรที่เตรียมได้

1.2.3 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการบำบัดน้ำเสียโดยใช้เหล็กนาโนและเหล็กนาโนดัดแปร

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาวิธีการเตรียมเหล็กนาโนโดยวิธีแบบดั้งเดิม โดยใช้โซเดียมบอโรไฮไดรด์และเพอริกคลอไรด์

1.3.2 ศึกษาเหล็กนาโนดัดแปร เช่น การเติมโลหะตัวที่สองหรือการใช้ตัวรองรับ

1.3.3 ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์โดยใช้เหล็กนาโนและเหล็กนาโนดัดแปร

1.3.4 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการบำบัดน้ำเสียโดยใช้เหล็กนาโนและเหล็กนาโนดัดแปร

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาค้นหาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในประเทศและต่างประเทศ

1.4.2 เตรียมเหล็กนาโนตามวิธีดั้งเดิมและทดสอบบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์ โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ การเจือจาง ความเป็นกรด-เบส ความเร็วรอบในการเขย่า อัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนและปริมาตรน้ำเสีย ต่อร้อยละการลดลงของสี ซีไอดี และบีไอดี ในน้ำเสีย

1.4.3 เตรียมเหล็กนาโนดัดแปรและทดสอบการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์ โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ ชนิดและปริมาณของตัวรองรับ และปริมาณโลหะตัวที่สอง ต่อการลดลงของสี ซีไอดี และบีไอดี ในน้ำเสีย

1.4.4 ทดสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยาของเหล็กนาโนและเหล็กนาโนดัดแปร

1.4.5 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการบำบัดน้ำเสียด้วยเหล็กนาโนและเหล็กนาโนดัดแปร

1.4.5 วิเคราะห์ สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้เหล็กนาโนที่มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์

1.5.2 ได้ความรู้พื้นฐานในการประยุกต์ใช้เหล็กนาโนในการบำบัดน้ำเสียสำหรับอุตสาหกรรมประเภทอื่น

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แอลกอฮอล์

แอลกอฮอล์ได้จากการหมักวัสดุประเภทแป้งและน้ำตาล วิธีการหมักทำได้โดยการเตรียมวัตถุดิบมาถ่ายลงถังหมัก ซึ่งวัตถุดิบอาจผ่านหรือไม่ผ่านขั้นตอนการฆ่าเชื้อขึ้นอยู่กับชนิดของการหมักและวัตถุดิบที่ใช้ เช่น กากน้ำตาลสามารถนำไปหมักเป็นแอลกอฮอล์โดยไม่ต้องทำการฆ่าเชื้อก่อน สำหรับขั้นตอนการหมักเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีที่เกิดจากการทำงานของเชื้อยีสต์ในการเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคส ภายใต้อุณหภูมิที่ไร้อากาศหรือมีอากาศเพียงเล็กน้อยให้เป็นแอลกอฮอล์ โดยทั่วไปการหมักจะใช้เวลาประมาณ 2-3 วัน จะได้แอลกอฮอล์ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 95.6 โดยปริมาตร

2.1.1 การจัดอันดับโลกในการบริโภคเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ของประเทศไทย

จากการที่หน่วยงาน/องค์กรต่างๆได้มีการอ้างอิงบ่อยครั้งว่า ปัจจุบันประเทศไทยมีการบริโภคเครื่องดื่มแอลกอฮอล์มากเป็นอันดับ 5 ของโลก โดยใช้ฐานข้อมูลจาก World Health Organization (WHO) นั้น ทางศูนย์วิจัยปัญหาสุรา (ศวส.) ก็เป็นหน่วยงานหนึ่งที่สนใจแนวโน้มการบริโภคเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ของประเทศไทยเช่นกัน ดังนั้นจึงได้ดำเนินการเรียบเรียงข้อมูลการจัดอันดับของประเทศต่างๆ ในด้านการบริโภคเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ในช่วงปี ค.ศ.1998-2000 โดยเรียงอันดับของปริมาณการดื่มตามแต่ละประเภทของเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ อันได้แก่ เบียร์ (Beer) ไวน์ (Wine) และเหล้า (Spirits) เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการอ้างอิงให้ถูกต้อง

2.1.2 ปริมาณการบริโภคเครื่องดื่มประเภทแอลกอฮอล์

ในปี ค.ศ.2000 ประเทศไทยมีการบริโภคเครื่องดื่มแอลกอฮอล์รวมทุกประเภทอยู่ในอันดับ 5 ของโลก โดยมีปริมาณการบริโภคเครื่องดื่มแอลกอฮอล์จำนวน 13.59 ลิตรต่อคนต่อปี แต่ถ้าพิจารณาแยกประเภทจะพบว่าคนไทยบริโภคเบียร์ (Beer) เป็นอันดับที่ 58 ของโลก โดยมีปริมาณการบริโภคเท่ากับ 1.12 ลิตรต่อคนต่อปี คนไทยบริโภคไวน์ (Wine) เป็นอันดับที่ 111 ของโลก โดยมีปริมาณการบริโภคเท่ากับ 0.01 ลิตรต่อคนต่อปี และคนไทยบริโภคเหล้า (Spirits) เป็นอันดับที่ 3 ของโลก โดยมีปริมาณการบริโภคเท่ากับ 12.45 ลิตรต่อคนต่อปี เพื่อให้สามารถมองเห็นแนวโน้มของอันดับการบริโภคแอลกอฮอล์ของประเทศไทยเปรียบเทียบกับช่วงเวลาปี ค.ศ.1998-2000 แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 อันดับการบริโภคเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ของประเทศไทยในช่วงปี ค.ศ.1998-2000
(มาลี, 2530)

ปี	อันดับโลก			
	รวมทุกประเภท	เบียร์	ไวน์	เหล้า
1998	30	96	141	5
1999	8	93	127	3
2000	5	58	111	3

หมายเหตุ : อันดับน้อย หมายถึง ปริมาณการบริโภคเครื่องดื่มแอลกอฮอล์จำนวนมาก

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า คนไทยมีการบริโภคเหล้าสูงมาก โดยปริมาณการบริโภคอยู่ในช่วง 5 อันดับแรกของโลกตลอดทั้ง 3 ปี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการที่ประเทศไทยมีการบริโภคเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ที่ติดอันดับโลกนั้นมาจากรฐานการบริโภคเหล้าที่มีอยู่สูงมาก และหากพิจารณาให้ดีจะพบว่าการที่อันดับการบริโภคเครื่องดื่มแอลกอฮอล์โดยรวมทุกประเภทของประเทศไทยมีการปรับสู่อันดับที่สูงมากขึ้นจากเดิมอันดับที่ 30 ของโลกในปี ค.ศ.1998 มาเป็นอันดับที่ 5 ของโลกในปี ค.ศ.2000 เป็นเพราะว่ามีการเปลี่ยนแปลงอันดับการบริโภคเบียร์และไวน์ของคนไทย โดยในปี ค.ศ.1999 คนไทยบริโภคเบียร์เป็นอันดับที่ 93 ของโลก แต่พอมาปี ค.ศ.2000 มีการเปลี่ยนแปลงมาสู่อันดับที่ 58 ของโลก

2.2 กระบวนการผลิต

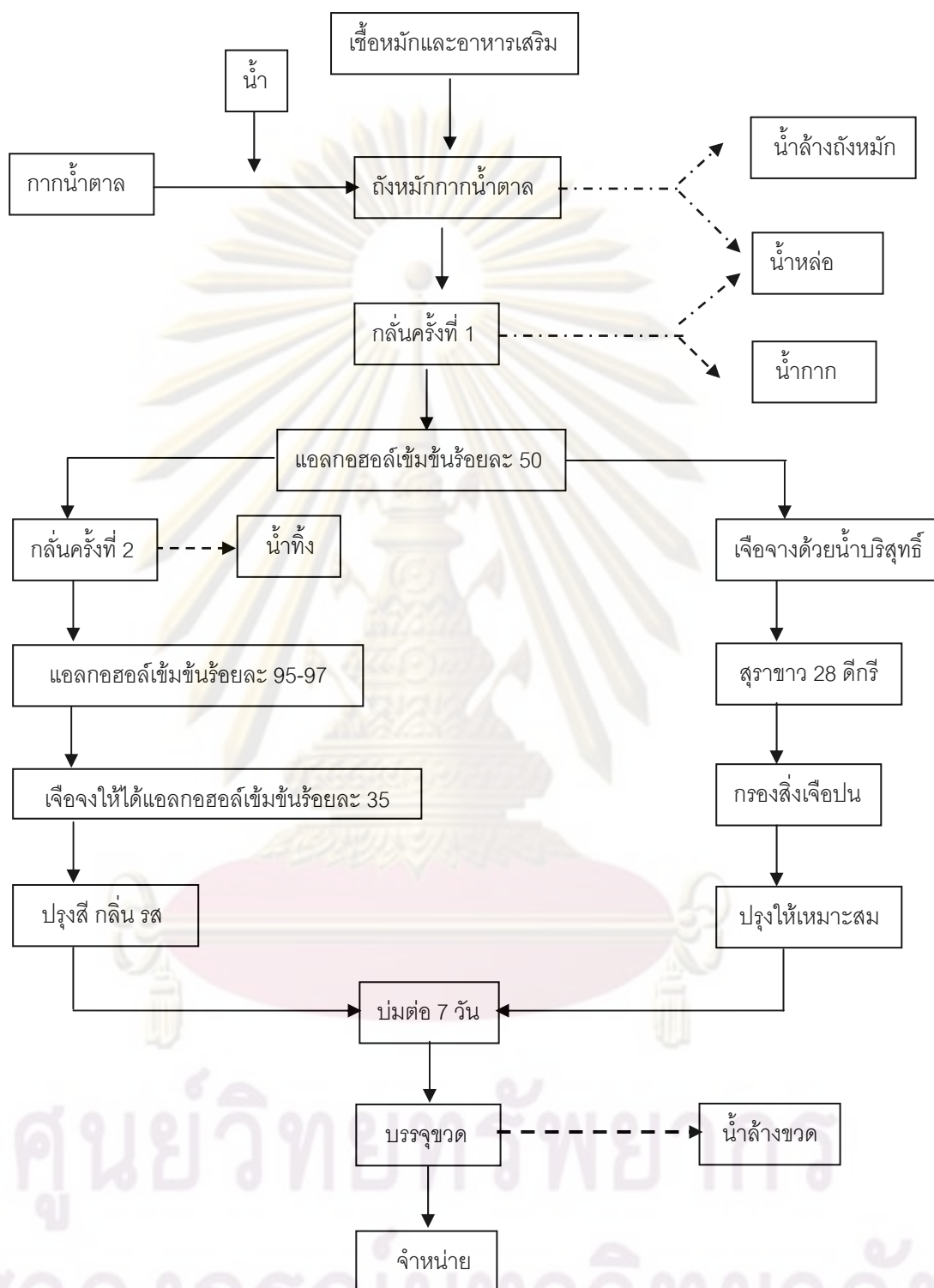
สุราเป็นเครื่องดื่มที่ได้จากการผสมแอลกอฮอล์ น้ำ และส่วนผสมอื่นๆ เพื่อให้มีรสชาติและสีแตกต่างกันไป สุราแบ่งตามประเภทของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตได้ 3 ประเภท คือ

2.2.1 สุราที่ผลิตจากเมล็ดธัญพืช (Grain distilleries) เช่น ข้าวเหนียว ข้าวเจ้า ข้าวบาเลย์ เป็นต้น ได้แก่ สุราประเภทสก๊อตวิสกี (Scotch whiskey)

2.2.2 สุราที่ผลิตจากผลไม้ (Fruit distilleries) เช่น สับปะรด องุ่น เป็นต้น ได้แก่ สุราประเภทไวน์ บรั่นดี และแชมเปญ

2.2.3 สุราที่ผลิตจากกากน้ำตาล (Molasses distilleries) เช่น สุราขาว สุราผสม รัม เป็นต้น

ซึ่งกระบวนการผลิตสุรจากากน้ำตาลแบ่งได้ 4 ขั้นตอนใหญ่ๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 กรรมวิธีการผลิตสุราและจุดปล่อยน้ำทิ้งของโรงงานสุรา (มาลี, 2530)

ผลผลิตที่ได้จากการหมักสามารถนำไปผลิตเป็นแอลกอฮอล์ความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้

1. การกลั่นแอลกอฮอล์

เมื่อน้ำสาถูกส่งมายังหอกลั่นแรกเพื่อกลั่นแยกแอลกอฮอล์ออกมาจะได้แอลกอฮอล์เข้มข้นประมาณร้อยละ 50 ส่วนหนึ่งของที่กลั่นได้นี้ถูกนำไปผลิตสุราขาว และอีกส่วนหนึ่งจะถูกส่งไปกลั่นในขั้นต่อไป เพื่อให้ได้แอลกอฮอล์บริสุทธิ์ร้อยละ 95 – 97 โดยปริมาตร

2. การผลิตสุราขาว (Raw alcohol production)

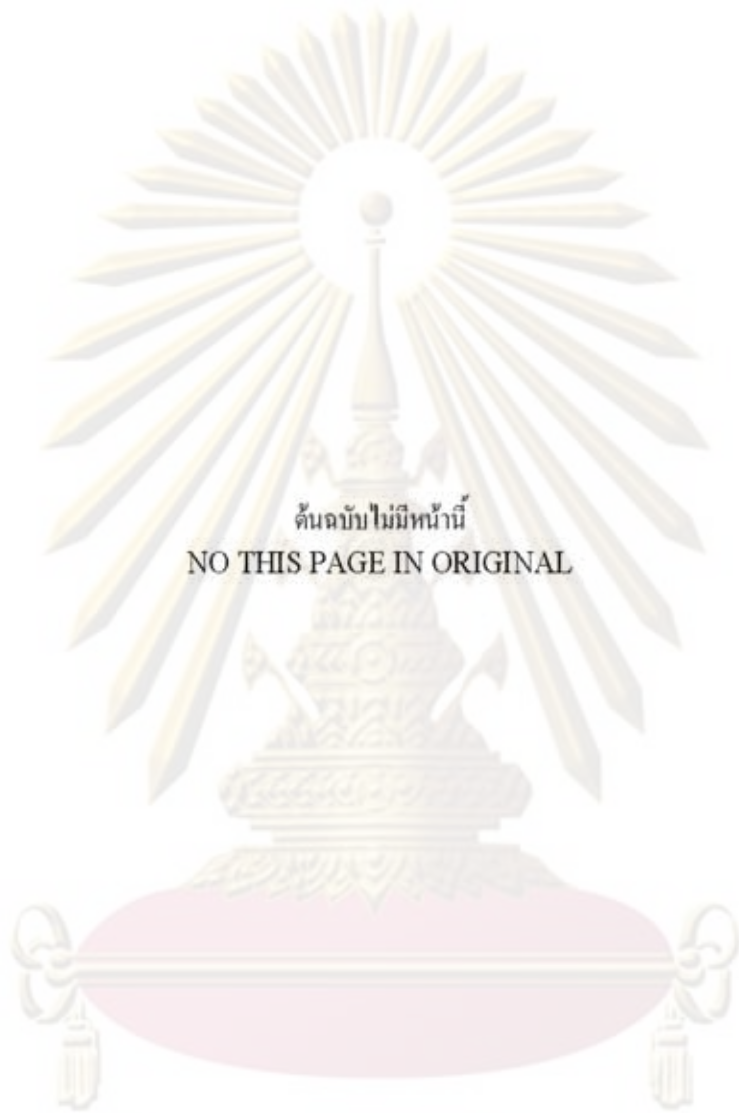
ส่วนหนึ่งของแอลกอฮอล์เข้มข้นร้อยละ 50 โดยปริมาตรที่ได้จากการกลั่นครั้งแรก จะถูกนำมาเจือจางด้วยน้ำบริสุทธิ์เพื่อให้มีความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ร้อยละ 28 โดยปริมาตร หรือ 28 ดีกรี เรียกว่า สุราขาว จากนั้นกรองเศษผงและสิ่งเจือปนออก บรรจุให้เหมาะสมและนำมาบ่มต่อประมาณ 7 วัน แล้วนำไปบรรจุขวดเพื่อจำหน่ายต่อไป

3. การผลิตสุราผสม (Blended liquor production)

นำแอลกอฮอล์บริสุทธิ์เข้มข้นร้อยละ 95 – 97 โดยปริมาตรที่ได้จากการกลั่นครั้งที่สองมาเจือจางด้วยน้ำให้มีความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ร้อยละ 35 โดยปริมาตร หรือ 35 ดีกรี แล้วเติมสี ยาสมุนไพร และส่วนประกอบอื่นๆ เพื่อให้ได้กลิ่นหอมและรสชาติตามความต้องการ จากนั้นนำมากรองและบ่มต่อประมาณ 7 วัน ก่อนบรรจุลงขวดเพื่อจำหน่ายต่อไป

2.3 การหมักกากน้ำตาล

กากน้ำตาล (Molasses) เป็นผลผลิตที่เหลือจากการผลิตของโรงงานน้ำตาล ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่สามารถตกผลึกได้ต่อไปอีก มีสีดำหรือน้ำตาลเข้ม ประกอบด้วยแร่ธาตุต่างๆ มากมาย เช่น เหล็ก วิตามินบี แคลเซียมและโบแทสเซียม เป็นต้น มีปริมาณน้ำตาลอยู่ประมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก อัตราความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหมาะสมในการหมักประมาณร้อยละ 16 โดยน้ำหนัก ดังนั้นการหมักจึงต้องเจือจางกากน้ำตาลด้วยน้ำ 3 เท่า แล้วจึงใส่เชื้อหมัก คือ ยีสต์และอาหารเสริม การหมักใช้เวลาประมาณ 48 ชั่วโมง จะได้แอลกอฮอล์ร้อยละ 8 – 10 โดยปริมาตร ส่วนผสมของแอลกอฮอล์ภายหลังการหมักเรียกว่า เบียร์ หรือ แมช (Mash) หรือน้ำสา ซึ่งจะถูกส่งต่อไปยังหอกลั่น



ต้นฉบับไม่มีหน้านี้

NO THIS PAGE IN ORIGINAL

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในกระบวนการผลิตเริ่มตั้งแต่การคัดเลือกวัตถุดิบ เช่น อ้อยหรือหัวบีท โดยแยกส่วนที่ไม่ต้องการออกและทำความสะอาดเท่าที่จำเป็น จากนั้นทำการสกัดเอาน้ำหวาน (Raw juice) ออกโดยใช้เครื่องรีดน้ำหรือลูกหีบ ผ่านกระบวนการทำให้น้ำหวานที่ได้สะอาดขึ้น โดยการกรองแยกเอาเศษกากหรือเปลือกที่กระเด็นตกลงไป แล้วนำมาต้มหรือเคี่ยวเพื่อระเหยเอาน้ำออก (Evaporation) ทำให้น้ำหวานมีความเข้มข้นมากขึ้นแล้วตกลึก หลังจากนั้นรวมผลึกที่ได้โดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงจะได้น้ำตาลดิบ (Raw sugar) ซึ่งจะต้องนำมาผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ได้แก่ การล้าง การฟอกสี การระเหยเอาน้ำออก และตกลึกจนได้น้ำตาลทรายที่บริสุทธิ์ (Refined sugar) หลังจากนั้นทำการตกลึกซ้ำหลายๆ ครั้ง จนกระทั่งมีความบริสุทธิ์น้อยกว่าร้อยละ 32 (กากน้ำตาล) ก็จะไม่นำกลับมาใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาลอีก แต่จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการหมัก เพราะเป็นแหล่งคาร์บอนที่ราคาถูก ประโยชน์ที่ได้จากกากน้ำตาลมีมากมาย เช่น ทำปุ๋ย เลี้ยงสัตว์ ผลิตแอลกอฮอล์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตยีสต์ ทำผงชูรส ทำกรดน้ำส้ม ผลิตไลซีน เป็นต้น แม้ว่าจะใช้ประโยชน์ได้กว้างขวาง แต่กากน้ำตาลส่วนใหญ่จะนำไปใช้ประโยชน์หลักๆ อยู่ 2 ประการ (โครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, 2004) คือ

1. ใช้เป็นอาหารสัตว์ กากน้ำตาลมีสมบัติเหมาะสมที่จะใช้เป็นอาหารสัตว์สำหรับสัตว์เคี้ยวเอื้อง (Ruminant) เช่น โค กระบือ แพะ ฯลฯ ทั้งนี้เพราะว่ากากน้ำตาลนอกจากจะช่วยเพิ่มรสชาติแก่อาหารแล้ว ยังช่วยกระตุ้นการทำงานของแบคทีเรียในกระเพาะ ซึ่งจะช่วยย่อยอาหารหยาบ เช่น ยอดอ้อย ฟางข้าว และแม้กระทั่งชานอ้อย ทำให้สัตว์พวกนี้ใช้ประโยชน์จากอาหารดังกล่าวได้มากขึ้น

2. ใช้ผลิตแอลกอฮอล์ การผลิตแอลกอฮอล์จากกากน้ำตาลกระทำได้โดยนำเอากาก น้ำตาลมาทำให้เจือจางด้วยน้ำแล้วหมักโดยอาศัยเชื้อยีสต์ในตระกูลแซคคาโรไมซีตาซีอี (Saccharomycetaceae) เปลี่ยนน้ำตาลไปเป็นแอลกอฮอล์ จากนั้นนำมากลั่นแยกแอลกอฮอล์ซึ่งจะได้แอลกอฮอล์ที่มีความบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 95 ปริมาณแอลกอฮอล์ที่ได้แตกต่างกันไปตามคุณภาพของกากน้ำตาล ตลอดจนกรรมวิธีการผลิตแอลกอฮอล์ของโรงงานนั้นๆ กากน้ำตาลมีอยู่หลายชนิด เช่น Fancy Molasses, Liter Molasses, Cooking Molasses และ Blackstrap Molasses แต่ที่นิยมใช้กันมาก คือ Blackstrap molasses ซึ่งหมายถึง กากน้ำตาลสุดท้ายที่ได้จากการผลิตน้ำตาลทรายขาว (White sugar) จะมีความเข้มข้นน้ำตาลทั้งหมดอยู่ประมาณร้อยละ 50 – 60 แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบของกากน้ำตาล (มาลี, 2530)

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละน้ำหนักต่อน้ำหนัก)	ค่าเฉลี่ย (ร้อยละน้ำหนักต่อน้ำหนัก)
น้ำ	17 – 25	20
ซูโครส	30 – 40	35
กลูโคส	4 – 9	7
ฟรุคโตส	5 – 12	9
น้ำตาลรีดิวซ์อื่นๆ	1 – 5	3
คาร์โบไฮเดรตอื่น	2 – 5	4
เถ้า	7 – 15	12
สารประกอบไนโตรเจน	2 – 6	4.5
กรดที่ไม่มีไนโตรเจน	2 – 8	5
อื่นๆ	0.1 – 1	0.5

2.4 ลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานสุรา

น้ำเสียจากโรงงานสุรา แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.4.1 น้ำเสียประเภทเข้มข้น มีค่าบีโอดีสูงประมาณ 2,500 – 35,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้แก่ น้ำล้างถังหมัก และน้ำกากส่า ปริมาณน้ำเสียขึ้นอยู่กับอัตราการผลิตของแต่ละโรงงาน

2.4.2 น้ำเสียประเภทเจือจาง มีค่าบีโอดีต่ำ ประมาณ 10 - 450 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมสรรพสามิต, 2544) ได้แก่ น้ำล้างขวด น้ำหล่อเย็น และน้ำใช้จากอาคารบ้านเรือน เป็นต้น น้ำเสียประเภทนี้จะไม่นำมาบำบัดรวมกับน้ำกากส่า เนื่องจากมีค่าบีโอดีแตกต่างกันมากและมีปริมาณสูง การแยกบำบัดจะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายมากกว่า

น้ำทิ้งของโรงงานสุราส่วนใหญ่มาจากกระบวนการผลิตสุราในแต่ละขั้นตอนซึ่ง แสดงในภาพที่ 2.1 สำหรับลักษณะของน้ำทิ้งประเภทต่างๆ จากโรงงานสุรา มีลักษณะแตกต่างกันแสดงในตารางที่ 2.3 โดยทั่วไปน้ำทิ้งของโรงงานผลิตสุราหรือเรียกว่าน้ำกากส่าจะมีสีน้ำตาลเข้มซึ่งเกิดจากสองสาเหตุด้วยกัน คือ เกิดจากสีของคาราเมลจากน้ำตาลชนิดต่างๆ ที่มีเหลือในกากน้ำตาลที่ยีสต์ไม่ใช้ในการหมักแอลกอฮอล์ เป็นสารที่ไม่มีธาตุไนโตรเจน และเกิดจากสารเมลานอยดินซึ่งเป็นสารที่มีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เกิดจากการรวมตัวระหว่างน้ำตาลชนิดต่างๆ กับกรดอะมิโนชนิดต่างๆ ภายใต้อุณหภูมิสูง โดยผ่านกระบวนการปฏิกิริยาบราวน์นิ่ง (Browning reaction) ซึ่งมีสีเหลืองถึงน้ำตาลเข้ม และมีผลทำให้กากน้ำตาลและน้ำกากส่ามีสีน้ำตาลเข้มด้วย สารนี้เป็นสารที่ถูกละลายได้ง่าย จึงเป็นปัญหาในการกำจัดก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

ตารางที่ 2.3 สมบัติและปริมาณน้ำเสียจากโรงงานสุรา (บัณฑิต, 2549)

ประเภทน้ำเสีย	สมบัติโดยเฉลี่ย		ปริมาณน้ำเสียต่อวัน คิดเป็นเท่าของน้ำกาก สำ
	บีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
1. น้ำกากสำ	27,500	118,000	1
2. น้ำหล่อคอนเดนเซอร์	27	53	18
3. น้ำหล่อถังหมัก	160	223	8
4. น้ำแช่ข้าวเหนียว	1,344	2,246	น้อยมาก
5. น้ำล้างขวด	100	220	0.5
6. น้ำดักเถ้าในหม้อไอน้ำ	-	24	น้อยมาก

2.5 ลักษณะของน้ำกากสำและสารเมลานอยดิน

น้ำกากสำ (Slop) เป็นน้ำทิ้งที่ออกจากหอกลั่นประเภท Mash column แบ่งได้ 2 ชนิด คือ กากสำขาว ได้จากการใช้ข้าวเหนียวเป็นวัตถุดิบในการผลิตและกากสำแดง ซึ่งได้จากระบวนการผลิตที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ น้ำกากสำจากโรงงานสุราเกือบทุกแห่งในประเทศไทยเป็นชนิดกากสำแดง มีสีน้ำตาลเข้มหรือดำซึ่งเกิดจากสารคาราเมลมีฤทธิ์เป็นกรด และมีความเข้มข้นของปริมาณสารอินทรีย์สูง โดยปกติที่อัตราการผลิต 4,500 เทต่อวัน (1 เท = 20 ลิตร) จะมีปริมาณน้ำกากสำประมาณ 300 ลูกบาศก์เมตรต่อวันหรือมีปริมาณน้ำกากสำประมาณ 3.5 เท่าของอัตราการผลิต (มาลี, 2530)

คาราเมลเป็นสารประกอบที่ไม่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เกิดจากน้ำตาลได้รับความร้อนมากเกินไป ในระหว่างการผลิตน้ำตาลทราย คาราเมลมีสีดำสนิท ส่วนมากใช้ประโยชน์ในการทำเป็นส่วนผสมที่ทำให้เกิดสีในอาหาร เช่น ซีอิ๊ว ซีอิ๊วปรุงรส สุรา และเครื่องดื่มประเภทน้ำอัดลมต่างๆ เป็นต้น สารคาราเมลนี้เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ในกระบวนการผลิตน้ำตาล ดังนั้นสารคาราเมลนี้จึงมีน้ำหนักโมเลกุลสูง แต่ไม่ทราบโครงสร้างที่แน่นอนโดยทั่วไป เรียกสารประกอบพวกนี้ว่า Brown melanoidin

เมลานอยดิน (Melanoidin) เป็นสารประกอบที่มีองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ได้แก่ คาร์บอนไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 5000 ถึง 40000 (บัณฑิต, 2549) และเกิดจากปฏิกิริยาของการเกิดสีน้ำตาล (Browning or mallard reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาควบแน่นของน้ำตาลชนิดต่างๆ กับสารประกอบไนโตรเจน เช่น กรด

อินทรีย์ ได้แก่ กรดอะมิโน (Amino acid) โดยไม่ใช่เอนไซม์ (Enzyme) เข้าร่วม ซึ่งสารเมลานอยดินมีประจุลบ โดยประจุลบมาจากการแยกของกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) และกลุ่มสารฟีนอลิก (Phenolic) และเป็นคอลลอยด์อยู่ในน้ำกากส่าที่มีภาวะของความเป็นกรดแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ลักษณะโดยเฉลี่ยของน้ำกากส่าจากโรงงานผลิตสุราในประเทศไทย (บัณฑิต, 2549)

พารามิเตอร์	ปริมาณ
ค่าความเป็นกรด-เบส	4.54-4.84
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	53-100
ค่าการนำไฟฟ้า(ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร)	16.04-23.4
ของแข็งละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	80,550-110,367
ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	2,475-6,080
ของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	83,900-115,267
ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	65,600-143,462
ค่าบีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	15,750-88,500
สี(หน่วยของแพลทินัม-โคบอลต์)	103,270-115,100

2.6 วิธีการจัดการน้ำเสีย

ปัญหาน้ำเสียในปัจจุบันเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่หลายหน่วยงานกำลังให้ความสำคัญอย่างมากเนื่องมาจากมีการพัฒนาชุมชนตลอดจนพัฒนาอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้มีปริมาณน้ำเสียเพิ่มมากขึ้นโดยแหล่งที่มาของน้ำเสียได้แก่ น้ำเสียจากชุมชน (Domestic wastewater) น้ำเสียจากอุตสาหกรรม (Industrial wastewater) น้ำเสียจากเกษตรกรรม (Agricultural wastewater) และน้ำเสียที่ไม่ทราบแหล่งกำเนิด (Non point source wastewater) เมื่อปริมาณน้ำเสียเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งที่ทำให้การทำความสะอาดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติไม่ได้ผลก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ทำให้จำเป็นต้องมีการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการต่างๆ ในการบำบัดน้ำเสียถูกแบ่งเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ กระบวนการทางกายภาพ กระบวนการทางชีวภาพ และกระบวนการทางเคมี ซึ่งในการเลือกกระบวนการบำบัดควรที่จะเลือกให้เหมาะสมกับปัจจัยต่างๆ

2.6.1 กระบวนการทางกายภาพ

การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางกายภาพเป็นการบำบัดน้ำเสียอย่างง่ายซึ่งจะแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออก วิธีนี้จะแยกตะกอนได้ประมาณร้อยละ 50-65 และสามารถแยกความสกปรกของสารอินทรีย์ในรูปของบีโอดีประมาณร้อยละ 20-30 เท่านั้น โดยอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วยตะแกรงหยาบ (Coarse screen) ตะแกรงละเอียด (Fine screen) ถังตกกรวดทราย (Grit chamber) ถังตกตะกอนเบื้องต้น (Primary sedimentation tank) เครื่องกำจัดไขมัน (Skimming devices) การตัดย่อย (Combination) การกวาด (Skimming) การทำให้ลอย (Floating) การตกตะกอน (Sedimentation) และการกรอง (Filtration) ซึ่งเป็นการกำจัดสารที่ไม่ต้องการโดยวิธีการทางกายภาพ อันได้แก่ สารแขวนลอยที่ตกตะกอนได้ยาก เป็นต้น

2.6.2 กระบวนการทางชีววิทยา

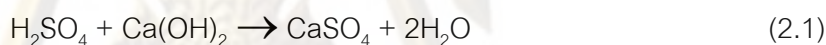
การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีววิทยามักใช้บำบัดน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการทางกายภาพมาแล้วโดยกระบวนการดังกล่าวเป็นการใช้จุลินทรีย์ต่าง ๆ มาทำการย่อยสลายเปลี่ยนอินทรีย์สารไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนีย ซึ่งเป็นการบำบัดน้ำเสียที่ดีที่สุดในแง่ของการลดปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำภายใต้ภาวะที่สามารถควบคุมได้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกินสารอินทรีย์ได้รวดเร็วกว่าที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ และแยกตะกอนจุลินทรีย์ออกจากน้ำทิ้งโดยใช้ถังตกตะกอน (Secondary sedimentation tank) ทำให้น้ำทิ้งมีคุณภาพดีขึ้น จากนั้นจึงผ่านเข้าระบบฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคปนเปื้อน ก่อนจะระบายน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ หรือนำกลับไปใช้ประโยชน์ (Reuse) แบบที่เรียกที่เลือกใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์แยกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ แบคทีเรียที่ต้องใช้ออกซิเจน (Aerobic bacteria) ส่วนกลุ่มที่ 2 เป็นพวกไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic bacteria) การบำบัดน้ำเสียในขั้นนี้สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยและสารอินทรีย์ซึ่งวัดในรูปของบีโอดีได้มากกว่าร้อยละ 80

2.6.3 กระบวนการทางเคมี

การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีเป็นการบำบัดน้ำเสียโดยการแยกสารต่างๆ หรือสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่บำบัด เช่น โลหะหนัก สารพิษ ค่าความเป็นกรด-เบสที่ปนเปื้อนอยู่ด้วยการเติมสารเคมีต่าง ๆ ลงไปเพื่อให้เข้าไปทำปฏิกิริยาซึ่งจะมีประโยชน์ในการแยกสาร แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ เมื่อเติมสารเคมีลงในน้ำเสียแล้วทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและวิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีค่อนข้างสูง ดังนั้นกระบวนการทางเคมีจะเลือกใช้ก็ต่อเมื่อน้ำเสียไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางกายภาพหรือทางชีวภาพได้

2.6.3.1 การทำให้เกิดตะกอน (Precipitation) อาศัยหลักการเติมสารเคมีลงไปทำปฏิกิริยาทำให้เกิดกลุ่มตะกอนตกลงมา โดยทั่วไปสารแขวนลอยจะมีประจุลบ ดังนั้นสารเคมีที่เติมลงไปจึงต้องมีประจুবวกเพื่อทำให้เป็นกลาง การแยกด้วยวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูงแต่ก็มีประสิทธิภาพสูงเช่นกัน ดังนั้นวิธีนี้จะเลือกใช้ต่อเมื่อไม่สามารถแยกได้โดยกระบวนการทางชีวภาพหรือกายภาพ โดยส่วนมากสารเคมีที่ทำให้เกิดตะกอนจะละลายน้ำ เช่น เกลือของสารประกอบต่างๆ เช่น เกลืออะลูมิเนียมซัลเฟต หรือสารส้ม ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) เกลือเหล็ก (FeCl_3 , FeSO_4) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ส่วนเกลือที่นำมาช่วยในการเกิดตะกอนได้ดียิ่งขึ้นนี้เป็นสารประกอบของ กลุ่มซิลิกา และพอลิอิเล็กโทรไลต์ โดยต้องผ่านกระบวนการทางเคมีอีกหลายขั้นตอน

2.6.3.2 การสะเทิน (Neutralization) เป็นการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-เบส ของน้ำเสียให้มีฤทธิ์เป็นกลาง ถ้าต้องการปรับค่าน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นกรดในน้ำเสียให้สูงขึ้นต้องเติมสารที่มีฤทธิ์เป็นเบส เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนกรณีถ้าต้องการปรับน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นเบสให้มีค่ากรด-เบส ต่ำลงจะต้องเติมกรด เช่น กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก กรดเกลือ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น แสดงดังสมการที่ (2.1)



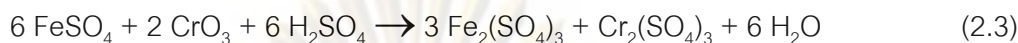
2.6.3.3 การรวมตัวและการตกตะกอน (Coagulation and flocculation) เป็นกรรมวิธีที่ใช้สารเคมีบางชนิดใส่ลงไปลงในน้ำเสียแล้วเกิดสารที่มีลักษณะเหนียว หยุ่น เรียกว่า ฟล็อก (Floc) ฟล็อกนี้มีคุณสมบัติพิเศษคือ เมื่อถูกพัดพาไปสัมผัสกับตะกอนแขวนลอยทั้งหลาย จะดูดตะกอนเหล่านั้นติดผิวไว้ เมื่อตะกอนเข้ามารวมตัวกับฟล็อกมากๆ ก็จะมีน้ำหนักมากขึ้น สามารถแยกตัวออกจากน้ำจมนลงสู่ก้นถังแยกตะกอนได้

2.6.3.4 การเกิดออกซิเดชันทางเคมี (Chemical oxidation) อาศัยหลักการเสียอิเล็กตรอนของตัวรีดิวซ์ (Reducer) ให้แก่สารเคมีที่เติมลงไปลงในน้ำเสียโดยสารเคมีนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidizer) ส่วนมากวิธีนี้จะนิยมใช้เปลี่ยนโมเลกุลของโลหะที่เป็นพิษ เช่น การเปลี่ยน Fe^{2+} ซึ่งมีพิษมากไปเป็นสาร Fe^{3+} ซึ่งมีพิษน้อย ด้วยคลอรีน แสดงดังสมการที่ (2.2)



2.6.3.5 การเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction) เป็นปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน วิธีการนี้เป็นการเปลี่ยนสภาพของสารพิษไปเป็นสารที่มีอันตรายน้อยลง อะตอมหรือ อิออนของสารพิษจะรับอิเล็กตรอนจากสารเคมีที่เติมลงไปซึ่งมีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ (Reducing

agent) เช่น การเปลี่ยน Cr^{6+} ซึ่งมีพิษมากไปเป็น Cr^{3+} ด้วยเฟอรัสซัลเฟต (FeSO_4) ในสภาพที่เป็นกรด แสดงดังสมการที่ (2.3)



การบำบัดน้ำเสียสามารถนำกระบวนการต่างๆ มาใช้ร่วมกันได้ เช่น กระบวนการทางกายภาพร่วมกับกระบวนการทางเคมี ได้แก่ การดูดซับด้วยถ่าน (Carbon adsorption) โดยใช้ผงถ่านหรือคาร์บอนเป็นตัวดูดซับสารเจือปนที่ละลายอยู่ในน้ำทิ้ง หรือ การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) วิธีการนี้อาศัยหลักการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างสารปนเปื้อนในน้ำเสียกับตัวกลางที่บรรจุซึ่งมีทั้งประจุบวกและประจุลบ โดยจะมีการลำเลียงน้ำภายในและกระบวนการทางชีวภาพร่วมกับกระบวนการทางเคมี ได้แก่ การกำจัดไนโตรเจน โดยวิธีการทางชีวภาพนั้นจะมี 2 ขั้นตอนร่วมกับการใช้สารเคมี คือ ขั้นตอนการเปลี่ยนแอมโมเนียไนโตรเจนให้เป็นไนเตรตที่เกิดขึ้นในภาวะแบบใช้ออกซิเจน หรือที่เรียกว่า กระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และขั้นตอนการเปลี่ยนไนเตรตให้เป็นแก๊สไนโตรเจน ซึ่งเกิดขึ้นในภาวะไร้ออกซิเจนหรือที่เรียกว่า กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) หรือ การกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนร่วมกันโดยกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งเป็นการใช้ทั้งกระบวนการแบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศในการกำจัดไนโตรเจนโดยกระบวนการไนตริฟิเคชันและกระบวนการดีไนตริฟิเคชันร่วมกับกระบวนการจับใช้ฟอสฟอรัสอย่างฟุ่มเฟือย (Phosphorus luxury uptake) ซึ่งต้องมีการใช้กระบวนการแบบไม่ใช้อากาศต่อด้วยกระบวนการใช้อากาศ เป็นต้น

2.7 หลักการของตัวดูดซับ (กมลศิริ, 2545)

2.7.1 ไคโตซาน (Chitosan)

ไคโตซาน เป็นวัสดุชีวภาพเกิดในธรรมชาติ จัดอยู่ในกลุ่มคาร์โบไฮเดรตผสมที่ประกอบด้วยอนุพันธ์ของน้ำตาลกลูโคสที่มีธาตุไนโตรเจนติดอยู่ด้วยทำให้มีคุณสมบัติที่โดดเด่นและหลากหลายมีประสิทธิภาพสูงในกิจกรรมชีวภาพและยังย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ดังนั้นจึงเป็นสารที่มีความปลอดภัยในการใช้กับมนุษย์ สัตว์ และสิ่งแวดล้อม ไคโตซานนี้มีลักษณะพิเศษในการนำมาใช้ดูดซับและจับตะกอนต่างๆในสารละลายแล้วนำสารกลับมาใช้ใหม่ได้ซึ่งเป็นการหมุนเวียนตามระบบธรรมชาติ โครงสร้างทางเคมีของสารไคตินคล้ายคลึงกับเซลลูโลส คือ เป็นเส้นใยที่ยาวไคตินที่เกิดในธรรมชาติมีโครงสร้างของผลึกที่แข็งแรงมีการจัดตัวของรูปแบบของผลึกเป็น 3 ลักษณะได้แก่ แอลฟาไคติน บีต้าไคติน และแกมมาไคติน ไคตินที่เกิดในเปลือกกุ้งและปู ส่วนใหญ่อยู่ในรูปแอลฟาไคติน ส่วนไคตินที่อยู่ในปลาหมึกพบว่าส่วนใหญ่เป็น

ปีต้าโคตินในการจัดเรียงตัวของโครงสร้างตามธรรมชาติ พบว่าแอลฟาโคตินมีคุณลักษณะของเสถียรภาพทางเคมีสูงกว่าปีต้าโคติน ดังนั้นจึงมีโอกาในปีต้าโคตินสามารถจะเปลี่ยนแปลงรูปแบบไปเป็นแอลฟาโคตินได้ในสารละลายของกรดแก่ เช่น กรดเกลือ เป็นต้น ส่วนแกมมาโคตินเป็นโครงสร้างผสมระหว่างแอลฟาและปีต้าโคติน

โคตินเป็นพอลิเมอร์ที่มีสายยาวมีองค์ประกอบของหน่วยย่อยเป็นอนุพันธ์ของน้ำตาลกลูโคสมีชื่อว่า N-acetyl glucosamine โคตินเป็นสารที่ละลายยากหรือไม่ค่อยละลาย ส่วนโคโตซานเป็นพอลิเมอร์ของหน่วยย่อยที่ชื่อว่า Glucosamine มากกว่าร้อยละ 60 ขึ้นไป (นั่นคือมีปริมาณ N-acetylglucosamine) นั่นเอง ในธรรมชาติย่อมมีโคตินและโคโตซาน ประกอบอยู่ในพอลิเมอร์ที่เป็นสายยาวในสัดส่วนต่าง ๆ กัน ถ้ามีปริมาณของ Glucosamine น้อยกว่าร้อยละ 40 ลงมา พอลิเมอร์นั้นจะละลายได้ในกรดอินทรีย์ต่าง ๆ นั้นหมายถึงมีปริมาณโคโตซานมากกว่าร้อยละ 60 นั่นเอง ฉะนั้นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีทำให้โคตินเปลี่ยนไปเป็นโคโตซาน คือการลดลงของหมู่อะซีทิลหรือเรียกว่า Deacetylation ขณะที่มีการลดลงของหน่วยย่อย N-acetyl glucosamine ย่อมเป็นการเพิ่มขึ้นของ glucosamine ในปริมาณที่เท่ากัน ซึ่งคือการเปลี่ยนแปลงโคตินให้เป็นโคโตซานนั่นเอง การจัดระดับของการ Deacetylation มีค่าร้อยละหรือเรียกว่า Percent Deacetylation (% DD) กล่าวคือเมื่อในพอลิเมอร์มีค่าเกิน % DD เกินกว่าร้อยละ 60 ขึ้นไป ของการกระจายโคโตซานในกรดอินทรีย์มากจะเพิ่มขึ้นของหมู่อะมิโนของ glucosamine ทำให้มีความสามารถในการรับโปรตอนจากสารละลายได้เพิ่มขึ้นซึ่งช่วยในการละลายดีขึ้นเพราะมีสมบัติของประจุบวกเพิ่มขึ้น ฉะนั้นโคโตซานจึงสามารถละลายได้ดีขึ้นในกรดต่าง ๆ เช่น กรดน้ำส้ม กรดแลคติก และกรดอินทรีย์อื่นๆ

ซึ่งโดยธรรมชาติแล้วโคโตซานจะไม่ละลายน้ำเช่นเดียวกับเปลือกกุ้ง กระจดองปู หรือเปลือกไม้ทั่วไปแต่โคโตซานจะละลายได้ดีเมื่อใช้กรดอินทรีย์เป็นตัวทำละลาย สารละลายของโคโตซานจะมีความข้นเหนียวแต่ใสคล้ายวุ้น หรือพลาสติกใส ยืดหยุ่นได้เล็กน้อยจึงมีคุณสมบัติที่พร้อมจะทำให้เป็นรูปแบบต่างๆได้ง่าย โดยเฉพาะถ้าต้องการทำเป็นแผ่นหรือเยื่อบางๆเป็นเจลหรือรูปร่างเป็นเม็ด เกล็ด เส้นใย สารเคลือบและคอลลอยด์ เป็นต้น นอกจากนี้โคโตซานยังย่อยสลายตามธรรมชาติ จึงไม่เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต เมื่อกินเข้าไปและไม่มีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อบริโภคเข้าไปในน้ำหรือในดินเพื่อการเกษตรโคโตซานที่ผลิตขึ้นมาใช้ในปัจจุบันนี้ มีหลายรูปแบบ และส่วนใหญ่จะผลิตมาจากบริษัทต่างประเทศ จึงมีราคาค่อนข้างสูง

2.7.1.1 รูปแบบของโคโตซาน

1. โคโตซานที่เป็นเกล็ดหรือแผ่นบางเล็กๆ (Flake)
2. โคโตซานที่เป็นผงละเอียดคล้ายแป้ง (Micromilled powder)
3. โคโตซานในรูปแบบสารละลายเป็นของเหลวหนืด
4. โคโตซานที่อยู่ในรูปเม็ดจิ๋วขนาดประมาณ 300-500 ไมโครเมตร

ผลิตภัณฑ์โคโตซานที่อยู่ในรูปแผ่นบางเล็กๆ ผงละเอียดคล้ายแป้ง และเม็ดเล็กๆนั้นหากเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงจะต้องมีความชื้นต่ำมากคือไม่เกินร้อยละ 5-10 หากความชื้นสูงกว่านี้ก็อาจทำให้เกิดเชื้อราหรือมีสิ่งปนเปื้อนอื่นๆเข้าไปปะปนอยู่ทำให้คุณภาพด้อยลงหรืออาจเกิดความเป็นพิษเนื่องจากเชื้อรา เชื้อแบคทีเรียหรือสิ่งปนเปื้อนนั้นๆผลิตภัณฑ์สารพิษออกมา ความเป็นไปได้ที่จะเกิดการปนเปื้อนของสิ่งไม่พึงประสงค์ในโคโตซานนั้น เนื่องจากวัตถุดิบที่นำมาสกัดนั่นเอง

2.7.1.2 หลักการสำคัญในการผลิตสารโคตินและโคโตซานจากเปลือกกุ้ง

1. กระบวนการกำจัดโปรตีน (Deproteination) โดยการทำให้ปฏิกิริยากับด่าง ซึ่งส่วนใหญ่ใช้โซดาไฟ (NaOH) ในกระบวนการนี้โปรตีนส่วนใหญ่จะถูกกำจัดออกไปจากวัตถุดิบพร้อมกันนี้บางส่วนของไขมันและรงควัตถุบางชนิดมีโอกาสถูกกำจัดออกไปด้วย การพิจารณาใช้กระบวนการนี้จะขึ้นอยู่กับประเภทของวัตถุดิบที่จะนำมาใช้

2. กระบวนการกำจัดเกลือแร่ (Deminerlization) โดยการนำวัตถุดิบที่ผ่านกระบวนการกำจัดโปรตีนมาแล้ว มาทำปฏิกิริยากับกรดซึ่งส่วนมากใช้กรดเกลือ (HCl) ทำให้เกลือแร่ส่วนใหญ่ ได้แก่ หินปูน (Calcium carbonate, CaCO_3) ซึ่งจะถูกกำจัดออกไปโดยเปลี่ยนไปเป็นแก๊ส

3. กระบวนการกำจัดหรือลดหมู่อะซีติล (Deacetylation) เป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ใช้ในการกำจัดหรือลดหมู่อะซีติล (CH_3CO) ที่มีอยู่บนโมเลกุลของโคติน เพื่อให้เกิดเป็นโคโตซานซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นของหมู่อะมิโน ($-\text{NH}_2$) บนโมเลกุลของโคตินและหมู่อะมิโนนี้มีความสามารถในการรับโปรตอนจากสารละลายซึ่งช่วยให้การละลายดีขึ้น เพราะมีสมบัติเป็นประจุบวก (Cation) ส่วนใหญ่เมื่อปริมาณของหมู่อะซีติล ถูกกำจัดไปมากกว่าร้อยละ 60 ขึ้นไป สารโคโตซานที่ได้สามารถละลายได้ในกรดอินทรีย์หลายชนิด การลดหมู่อะซีติลกระทำโดยใช้ต่างที่เข้มข้นสูงตั้งแต่ร้อยละ 40 ขึ้นไป ดังนั้นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการพิจารณาสารโคโตซานก็คือค่าระดับการกำจัดหมู่อะซีติล

ไคโตซานได้จากปฏิกิริยาการกำจัดหมู่อะซีทิลของไคตินซึ่งก็คือ พอลิเมอร์ของ (1,4)-2-amino-2deoxy-b-D-glucan หรือเรียกง่าย ๆ ว่าพอลิเมอร์ของ Glucosamine การเกิดไคโตซานนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดหมู่อะซีทิลซึ่งวัดจากค่าระดับการกำจัดหมู่อะซีทิลการทำปฏิกิริยาการกำจัดหมู่อะซีทิล คิดเป็นหน่วยร้อยละกล่าวคือถ้า %DD เกินกว่าร้อยละ 50 ขึ้นไปแล้วสามารถใช้พอลิเมอร์นั้นทำให้เกิดอนุพันธ์ที่ละลายในกรดอินทรีย์ได้ หรืออาจกล่าวได้ว่าการลดลงของหมู่อะซีทิลในไคติน (Chitin regenerated) ผลที่ได้คือ การเพิ่มหมู่อะมิโน ซึ่งเป็นการเพิ่มสมบัติการเป็นสารที่มีประจุเป็นบวก (Polycationic activity) บนพอลิเมอร์ทำให้เกิดสภาพของการเป็นไคโตซานเพิ่มขึ้น (Chitosan generation) เพราะฉะนั้นโครงสร้างของไคโตซานต่างจากไคตินตรงหน่วยที่เป็น Glucosamine ในสายพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้นเกินกว่าร้อยละ 50 ขึ้นไปนั่นเองในอุตสาหกรรมปัจจุบันการผลิตสารไคตินและไคโตซานจากเปลือกกุ้งโดยการใส่เคมีสารได้แก่ กรดและเบส

2.7.1.3 การใช้ประโยชน์จากไคโตซาน

ไคติน-ไคโตซานจะทำงานเป็นตัวสร้างตะกอนและตัวตกตะกอน ตัวสร้างตะกอนจะกระตุ้นให้เศษของเสียที่แขวนลอยๆ ในน้ำเกิดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อน ใหญ่ขึ้นๆ และพอใหญ่มากเกินก็ตกเป็นตะกอนลงมา ส่วนตัวตกตะกอน ก็ทำงานคล้ายๆ กันคือจะไปจับกับสารแขวนลอยในน้ำแล้วตกตะกอนลงมา โดย-ไคโตซานจะทำหน้าที่ทั้งสองแบบ ซึ่งทำได้ดีเนื่องจากมีหมู่อะมิโนที่สามารถแตกตัวให้ประจุบวกมาก จึงทำให้พวกประจุลบอย่างโปรตีน สีย้อม กรดไขมัน อีเธอร์ คอลเลสเทอรอล (ในร่างกาย) ต้องเข้ามาเกาะกับประจุบวกของไคโตซาน ส่วนโลหะหนักซึ่งเป็นประจุบวกอยู่แล้ว จะจับกับอิเล็กตรอนจากไนโตรเจนในหมู่อะมิโนของไคโตซานทำให้เกิดพันธะเคมีที่เรียกว่า พันธะเชิงซ้อนขึ้นมา และจากการทดลองพบว่าหมู่อะมิโนในไคโตซานจะสามารถจับกับโลหะหนักในน้ำ ได้ดีกว่าหมู่อะซีทิลของไคติน

1. การใช้กับพืชผักผลไม้ ในด้านการเกษตรกรรมนั้นมีการนำไคโตซานมาใช้เป็นอาหารเสริมให้แก่พืชเพื่อช่วยควบคุมการทำงานของพืชผลไม้และต้นไม้ให้ทำงานได้ดีขึ้นคล้ายๆ กับการเพิ่มปุ๋ยพิเศษให้แก่พืชผักผลไม้ นอกจากนี้ยังนำไปใช้ในการป้องกันโรคที่เกิดจากจุลินทรีย์และเชื้อราบางชนิดอีกด้วย

2. การใช้ไคโตซานในวงการประมง ในวงการประมงนั้นขณะนี้ได้มีการนำไคโตซานมาใช้ประโยชน์ในด้านการยืดอายุการรักษา และเก็บถนอมอาหารที่เป็นผลิตภัณฑ์จากสัตว์น้ำ และในขั้นต้นนี้ได้สกัดโปรตีนจากหัวกุ้งด้วยกระบวนการย่อยด้วยแบคทีเรีย กรดแล็กติก (Lactic

acid bacteria) เพื่อนำโปรตีนนั้นมาใช้ในแง่เป็นสารเสริมคุณค่าอาหารและของว่างที่ทำจากสัตว์น้ำ การปรุงแต่งรส และกลิ่นในอาหารขบเคี้ยวที่เป็นผลิตภัณฑ์จากสัตว์น้ำ เป็นต้น

นอกจากนี้ฝ่ายเอกชนหลายแห่งได้นำโคโคซานมาใช้ประโยชน์ในด้านการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพาะเลี้ยงกุ้งกุลาดำ วิธีการนั้นมีหลายรูปแบบ ได้แก่ การคลุกกับอาหารเม็ดในอัตราส่วนต่างๆกันเพื่อให้กุ้งกินโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการไปกระตุ้นภูมิคุ้มกันโรคในตัวกุ้ง และเพื่อเป็นส่วนไปกระตุ้นการย่อยอาหารและการเจริญเติบโต ประโยชน์อีกด้านหนึ่งที่ผู้ขายโฆษณาไว้ก็คือการช่วยให้เม็ดอาหารคงรูปอยู่ในน้ำได้นานกว่าโดยการเคลือบสารโคโคซานบนอาหารที่จะหว่านให้กุ้งกิน บางรายก็แนะนำให้เติมลงไปลงในน้ำเพื่อช่วยปรับสภาพแวดล้อมให้ดีขึ้น

3. การใช้โคโคซานในวงการแพทย์ โคโคซานที่ใช้ในการแพทย์และมีผลที่เชื่อถือได้ ได้ดำเนินการมาหลายปีแล้ว เช่น การใช้ประโยชน์โดยนำมาประกอบเป็นอาหารเพื่อลดน้ำหนัก ทำผลิตภัณฑ์เสริมความงาม เช่น ครีมทาผิว ทำเป็นแผ่นโคโคซานเพื่อปิดปากแผลที่เกิดจากการผ่าตัดเฉพาะที่ซึ่งพบว่าแผ่นโคโคซานจะช่วยให้คนป่วยเกิดการเจ็บปวดแผลน้อยกว่าการใช้ผ้าก๊อชชุบน้ำมันวาสลินมาปิดแผลเหมือนที่เคยปฏิบัติมาในสมัยก่อน นอกจากนี้เวลาที่แผลปิดดีแล้วและมีการลอกแผ่นโคโคซานออก ยังสะดวกและง่ายกว่าการลอกแถบผ้าก๊อชเพราะจะไม่มีอาการสูญเสียเลือดที่เกิดจากการลอกแผ่นปิดแผลออกทำให้ผู้ป่วยไม่เจ็บปวดเท่ากับการใช้แถบผ้าก๊อชปิดแผล นอกจากนี้ยังใช้โคโคซานไปเป็นส่วนผสมของยาหลายประเภท เช่น ยาที่ใช้พ่นทางจมูกเพื่อบรรเทาอาการโรคทางเดินหายใจ

4. การบำบัดน้ำเสีย จากสมบัติที่โดดเด่นของโคโคซานเช่น ไม่มีความเป็นพิษ สามารถเข้ากันได้ทางชีวภาพ และย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ จากคุณสมบัติที่กล่าวสามารถนำมาบำบัดน้ำเสียได้โดย น้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร มีสารแขวนลอยสูง โคโคซานมีประจุบวกสามารถจับกับโปรตีนและไขมันได้ดี ซึ่งโปรตีนที่ได้สามารถแยกนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ต่อไป นอกจากนี้ โคโคซานยังสามารถดูดซับไอออนของโลหะหนัก และจับสี (บุญศรี, 2545) น้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโรงงานฟอกย้อมมีองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการผลิตคือ วัสดุ (เส้นใย เส้นด้าย ผ้า) ตัวกลาง (น้ำ) สี และสารเคมี (ได้แก่โซเดียมซัลเฟต กรดอะซิติก โซเดียมไฮดรอกไซด์ สารช่วยชนิดต่างๆ) ซึ่งในแต่ละขั้นตอนของการผลิตจะมีการใช้น้ำเป็นจำนวนมาก ทั้งนี้ น้ำเสียจากกระบวนการผลิตจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและกระบวนการที่ใช้น้ำเสียส่วนใหญ่ในโรงงานฟอกย้อมจะมีสภาพเป็นเบส เนื่องจากเกือบทุกกระบวนการของการฟอกย้อมจะมีการใช้ด่างและมีค่าบีโอดีในปริมาณที่สูง การศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสี

ในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้ไคโตซานร่วมด้วย ซึ่งผลการศึกษาพบว่าไคโตซาน และไคโตซาน-พอลิอะคริลาไมด์ สามารถกำจัดสีในน้ำทิ้งที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการได้ โดยสีที่ถูกกำจัดได้ดีที่สุดคือ สีไดเร็กซ์ ส่วนสีที่กำจัดได้น้อยคือ สีดีสเพอร์ส สีแอสซิด และสีรีแอคทีฟ การใช้ไคโตซานร่วมกับสารส้มจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสี โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมในการกำจัดสีของสารส้มต่อปูนขาวต่อเกลือไฮโดรโบรไมด์ของไคโตซานคือ 1:2:0:2 ส่วนอัตราส่วนที่เหมาะสมในการกำจัดสีของสารส้มต่อปูนขาวต่อไคโตซาน-พอลิอะคริลาไมด์ คือ 1:2:2 และการใช้สารส้มร่วมกับเกลือไฮโดรโบรไมด์ของไคโตซานจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการดีกว่าการใช้สารส้มร่วมกับไคโตซาน-พอลิอะคริลาไมด์ ส่วนการกำจัดสีรีแอคทีฟพบว่า เกลือไฮโดรโบรไมด์ของไคโตซานจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีดีกว่าการใช้สารละลายไคโตซานในกรดอะซิติก และไคโตซานในรูปแบบผง อย่างไรก็ตาม ค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมในการกำจัดสีในน้ำทิ้งที่สู่มตัวอย่างจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้สารตกตะกอนทางการค้าคือค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 6 โดยปริมาตรที่เหมาะสมที่สุดของสารตกตะกอนทางการค้าในการกำจัดสี คือ ปริมาณสารตกตะกอนทางการค้า 1.5 มิลลิลิตรต่อน้ำเสีย 25 มิลลิลิตร และการใช้สารตกตะกอนประเภทต่าง ๆ คือ สารตกตะกอนทางการค้า สารตกตะกอนร่วมของสารส้ม ปูนขาวและไคโตซาน มีผลต่อการกำจัดสีในน้ำทิ้งที่สู่มตัวอย่างจากโรงงานเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการตกตะกอนของสารชนิดต่าง ๆ เพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพการกำจัดสีขึ้นอยู่กับลักษณะน้ำทิ้งที่ปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรม การใช้ไคโตซานร่วมกับสารส้มและปูนขาวในการบำบัดน้ำเสีย จะมีราคาต้นทุนในการบำบัดค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับการใช้สารส้มร่วมกับปูนขาวและการบำบัดโดยใช้สารตกตะกอนทางการค้า แต่การใช้ไคโตซานจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอคทีฟได้ดี ซึ่งจะกำจัดได้ยากเมื่อใช้สารส้มร่วมกับปูนขาว สรุปได้ว่า ไคโตซานจะกำจัดสีรีแอคทีฟได้ดี ดังนั้น อาจมีการใช้ไคโตซานร่วมในการกำจัด ถ้าในน้ำทิ้งมีการปล่อยสีรีแอคทีฟออกมาเป็นจำนวนมาก ส่วนสีดีสเพอร์ส สีไดเร็กซ์ และสีแอสซิดจะสามารถกำจัดได้โดยใช้สารส้มร่วมกับปูนขาว

2.7.2 ซิลิกา (กมลศิริ, 2545)

ซิลิกา (silica) เป็นสารประกอบชนิดหนึ่งมีสูตรเคมีคือ SiO_2 จุดหลอมเหลว 1,700 องศาเซลเซียส จุดเดือด 2,230 องศาเซลเซียส เป็นของแข็งไม่มีสีมีโครงสร้างผลึก 5 รูปแบบในธรรมชาติ อยู่ในรูปของทราย คลอธซ์ และหินบางชนิดใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตแก้ว ผงขัด วัสดุทนไฟ และผลิตภัณฑ์เซรามิก เป็นต้น

ซิลิกาเจล (Silica gel) เป็นสารสังเคราะห์ในรูปของซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide, SiO_2) ที่มีพื้นที่ผิวมาก ประมาณ 800 ตารางเมตร ต่อ 1 กรัม การดูดความชื้นของซิลิกาเจลเป็นลักษณะทางกายภาพ โดยกักเก็บความชื้นไว้ที่โพรงโครงสร้างด้านในซิลิกาเจล ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะในบรรจุภัณฑ์ยาและอาหาร โดยปกติซิลิกาเจลสามารถดูดความชื้นได้ระหว่างร้อยละ 24-40 ของน้ำหนักตัวเองและมีประสิทธิภาพสูงสุดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียส หากอุณหภูมิสูงกว่านี้ประสิทธิภาพในการดูดความชื้นจะลดลงไปเรื่อยๆ และมีโอกาสที่จะคายความชื้น (Desorption) ออกจากตัวเองเช่นกัน โดยเหตุนี้การใช้ซิลิกาเจลกับประเทศร้อนขึ้นดังเช่นประเทศไทย จึงต้องระมัดระวังเป็นอย่างยิ่งต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิรอบข้างของบรรจุภัณฑ์สินค้า นอกจากนี้การใช้ซิลิกาเจลในระหว่างการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศที่มีความผันผวนหรือความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของประเทศไทยและประเทศปลายทางย่อมมีโอกาสเสี่ยงต่อการดูดและคายความชื้นของซิลิกาเจลเป็นอย่างยิ่ง

ซิลิกาเจลที่ใช้งานอยู่ทั่วไปมี 2 ชนิด คือ เม็ดสีใสขนาด 2-5 มิลลิเมตรและเม็ดสีน้ำเงินขนาดเท่าๆ กัน คุณสมบัติของซิลิกาเจล ทั้ง 2 ชนิดนี้ แตกต่างกันตรงที่มีการเติมโคบอลต์คลอไรด์ลงไปทำให้มีสีน้ำเงินบนเม็ดซิลิกาเจลสีน้ำเงินนี้จะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสีชมพูเมื่อความชื้นสัมพัทธ์รอบข้างสูงขึ้นมากกว่าร้อยละ 40 ซิลิกาเจลชนิดนี้มีประโยชน์ในการสังเกตได้โดยง่ายว่าสินค้ามีโอกาสเสี่ยงต่อความชื้นมากน้อยเพียงไรหากซิลิกาเจลที่ใช้ยังคงมีสีน้ำเงินหรือไม่เปลี่ยนสีมากนักแสดงว่าความชื้นรอบข้างถูกซิลิกาเจลดูดไว้และมีระดับความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำ ในทางตรงกันข้ามหากสีของซิลิกาเจลเปลี่ยนเป็นสีชมพูแสดงว่าความชื้นรอบข้างนั้น มีปริมาณที่สูงเกินกว่าที่ซิลิกาเจลจะดูดและควบคุมให้อยู่ในระดับที่ต่ำได้

2.8 หลักการพื้นฐานของนาโนเทคโนโลยี (สมนึก, 2545)

นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) หรือเทคโนโลยีระดับโมเลกุล (Molecular technology) เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่สามารถจัดการกับอะตอมหรือโมเลกุลแต่ละตัวได้อย่างเที่ยงตรง เป็นเทคโนโลยีที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า การจัดการกับสิ่งต่าง ๆ หรือผลิตสิ่งต่าง ๆ สามารถทำได้โดยการนำอะตอมหรือโมเลกุล มาวางในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ สิ่งที่เกิดขึ้นมาจะมีขนาดเล็กหรือใหญ่ก็ได้ นาโนเทคโนโลยีมีรากฐานอยู่บนการผลิตในระดับโมเลกุลที่ต้องการ นาโนเทคโนโลยีเป็นการรวมเอาหลักการทางเคมีและทางกลศาสตร์มาประยุกต์ใช้งานที่แปลกใหม่ ในทางเคมีโดยทั่วไปโมเลกุลเคลื่อนที่โดยการแพร่ และชนกันของโมเลกุลในทุกตำแหน่งและในทุกทิศทางที่เป็นไปได้ ผลของปฏิกิริยาเคมีเป็นสิ่งที่ยากจะควบคุม

ในทางตรงกันข้ามการสร้างโมเลกุลสามารถใช้ประโยชน์ของการสังเคราะห์ทางกลคือ ใช้อุปกรณ์ทางกลเพื่อนำการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่ทำปฏิกิริยาโดยประยุกต์ใช้หลักการทางกลศาสตร์ของการยืดและ กำหนดตำแหน่งเข้ากับการทำปฏิกิริยาเคมี การสังเคราะห์ทางกลสามารถสร้างความพิเศษที่ทำให้โมเลกุลเปลี่ยนแปลงไปเกิดในตำแหน่งที่เที่ยงตรง และในลำดับที่เที่ยงตรง ตำแหน่งที่เชื่อถือได้เป็นสิ่งที่ต้องการสำหรับการสังเคราะห์ทางกล เพื่อสร้างวัตถุด้วยการจัดเรียงอะตอมจำนวนล้านถึงพันล้านอะตอมอย่างเที่ยงตรง

ในปีค.ศ. 1959 ริชาร์ด ฟายน์แมน นักฟิสิกส์ได้กล่าวปาฐกถาเรื่อง “There’s Plenty of Room at the Bottom” ซึ่งเกี่ยวกับปัญหาการจัดการและควบคุมสิ่งที่มีขนาดเล็ก เขาไม่ได้พูดเกี่ยวกับการจัดการแต่ได้อธิบายถึงรายละเอียดที่อาจจะทำได้ สิ่งแรกที่ฟายน์แมนแนะนำคือ เราอาจจัดการกับอะตอมเพื่อสร้างวงจรเล็ก ๆ ที่สมบูรณ์โดยใช้อะตอม 7 ตัว หรือเพื่อสำเนาตัวเอง (Replicate) คำพูดของฟายน์แมนเป็นการเริ่มต้นจุดประกายความคิดในการสร้างอุปกรณ์ในระดับโมเลกุลที่สามารถ คำนวณ สำเนาตัวเอง และประดิษฐ์ได้จากการศึกษาที่ผ่านมาเราทราบว่าสารทั้งหลายต่างก็ประกอบขึ้นจากอะตอมของธาตุต่าง ๆ ด้วยการจัดเรียงตัวของอะตอมในรูปแบบที่ต่างกัน ทำให้สามารถแยกแยะสิ่งต่าง ๆ ออกจากกันได้ การจัดเรียงอะตอมแบบหนึ่งอาจได้น้ำ อากาศ หรือดิน ขณะที่การจัดเรียงอะตอมอีกแบบหนึ่งอาจได้กล้วย ข้าวหรือ มะละกอ การจัดเรียงตัวแบบหนึ่งอาจทำให้เป็นต้นไม้ และ อากาศที่สดชื่น ในขณะที่การจัดเรียงตัวอีกแบบหนึ่งจะทำให้เกิดไข้ได้ และเขม่าควัน ความสามารถในการจัดเรียงอะตอมของมนุษย์เราเป็นสิ่งที่วางรากฐานของเทคโนโลยี จากอารยธรรมของมนุษย์พบว่าเทคโนโลยีที่มนุษย์ได้พัฒนามาอาจแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ

2.8.1 เทคโนโลยีแบบหยาบ

เทคโนโลยีแบบหยาบ (Bulk technology) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้กันมาตั้งแต่สมัยโบราณ เป็นการจัดการกับอะตอมและโมเลกุลในลักษณะที่เป็นก้อนด้วยวิธีทางกล เช่น การตัดกลึง ดัด ตีขึ้นรูป และอื่น ๆ ตัวอย่างเช่นการทำมีดมักขึ้นรูปด้วยการเผาเหล็กให้ร้อนแล้วตีขึ้นรูปจากนั้นนำไปเจียรไนหรือลับให้คม ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาการจัดการอะตอมและโมเลกุลในระดับขนาดเล็กลง เช่น การอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็ก แต่อุปกรณ์เหล่านี้ยังคงประกอบด้วยอะตอมเป็นล้าน ๆ ตัว และยังคงมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ถึงแม้ว่าอุปกรณ์เหล่านี้จะทำให้คอมพิวเตอร์มีขนาดเล็กลงและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น แต่การใช้เทคโนโลยีแบบหยาบมาสร้างสิ่งที่มีขนาดเล็กย่อมขาดความเที่ยงตรง และมีความบกพร่องสูง

2.8.2 เทคโนโลยีระดับโมเลกุล

เทคโนโลยีระดับโมเลกุล (Molecular technology) เป็นการจัดการกับสิ่งต่างๆ หรือผลิตสิ่งต่างๆ โดยการนำอะตอมหรือโมเลกุลมาจัดเรียง ณ ตำแหน่งที่ต้องการอย่างแม่นยำ สิ่งที่เกิดขึ้นมาอาจเป็นสิ่งเล็กๆ หรือ เป็นสิ่งใหญ่ โดยการนำเอาเทคโนโลยีระดับโมเลกุลไปสร้างสิ่งที่ใหญ่ขึ้นมา เช่น พืชสร้างผนังเซลล์จากการนำเอาโมเลกุลน้ำตาลมาต่อกัน นี้ว่าการใช้เทคโนโลยีแบบล่างขึ้นบน (Bottom-up technology) เทคโนโลยีระดับโมเลกุลนี้เองที่เป็นนาโนเทคโนโลยี

2.9 นาโนเทคโนโลยี

คำว่า นาโน (Nano) มาจากภาษากรีก Nanos แปลว่า แคระ (Dwarf) เป็นการเรียกชื่อย่อจากคำเต็มว่า นาโนเมตร หมายถึงเศษหนึ่งส่วนหนึ่งพันล้าน $1/1,000,000,000 = 10^{-9}$ นาโนเมตร ซึ่งหมายถึงหน่วยการวัดความยาวซึ่งเท่ากับ $1/1,000,000,000$ เมตร หรือ 10^{-9} เมตรโดยถ้านำอะตอม 10 อะตอมนำมาเรียงติดกันเป็นแถวเดียวในแนวตรงจะมีความยาวเท่ากับ 1 นาโนเมตร มีผู้ให้นิยามของนาโนเทคโนโลยีมากมายแตกต่างกันไป เช่น

- นาโนเทคโนโลยีหมายถึงการจัดการกับอะตอมหรือโมเลกุลแต่ละตัว
- นาโนเทคโนโลยีหมายถึงการศึกษาวัสดุวิศวกรรม อุปกรณ์และระบบในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 200 นาโนเมตร ซึ่งเป็นขีดจำกัดของกล้องจุลทรรศน์ทางแสง)
- นาโนเทคโนโลยีหมายถึงการออกแบบระบบขนาดต่างๆ ด้วยส่วนประกอบระดับนาโนเมตร
- นาโนเทคโนโลยีหมายถึงการใช้และกำรพัฒน์วัสดุชนิดใหม่บนพื้นฐานของผลลัพท์ด้านคุณภาพ จากโครงสร้างอะตอมโดยธรรมชาติ

นาโนเทคโนโลยีเป็นวิชาที่รวมเอาสาขาวิชาทางด้านวิทยาศาสตร์ และวิทยาศาสตร์ประยุกต์เข้าไว้ด้วยกัน ถ้ากล่าวโดยกว้าง ๆ นาโนเทคโนโลยีคือ หลักของการจัดการวัสดุในระดับอะตอมหรือโมเลกุล เพื่อสร้างอุปกรณ์ในระดับที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เช่น อนุพันธ์คอมพิวเตอร์ขนาดจิ๋ว นาโนเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีของการสร้างสิ่งของโดยการนำอะตอมมาวางต่อกันทีละตัวเพื่อให้สิ่งที่สร้างขึ้นมามีลักษณะพิเศษจากวัสดุธรรมดาทั่วไปเช่น นางพยาบาลนาโนต้นแบบ อนุพันธ์ขนาดจิ๋ว คอมพิวเตอร์ขนาดจิ๋ว ชีวะนาโนชิป

2.9.1 องค์ประกอบของนาโนเทคโนโลยี

1. ขนาดเล็กในระดับ 1 - 100 นาโนเมตร
2. มีหน้าที่ใหม่ๆ เกิดขึ้นหรือมีสมบัติที่พิเศษขึ้น
3. ถูกต้อง แม่นยำ และควบคุมได้

2.9.2 สมบัติพิเศษที่เกิดจากความเล็กระดับนาโน

1. ผลจากปรากฏการณ์ทางควอนตัม (Quantum effects)
2. ผลจากพื้นที่ผิวหน้า (Surface effects)
3. ผลจากผิวสัมผัส (Interface effects)
4. ผลจากกฎการเปลี่ยนขนาด (Scaling laws)

2.10 การประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยี

ในการผลิตหรือสร้างวัตถุที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรมีวิธีการพื้นฐานอยู่ 2 วิธีคือ

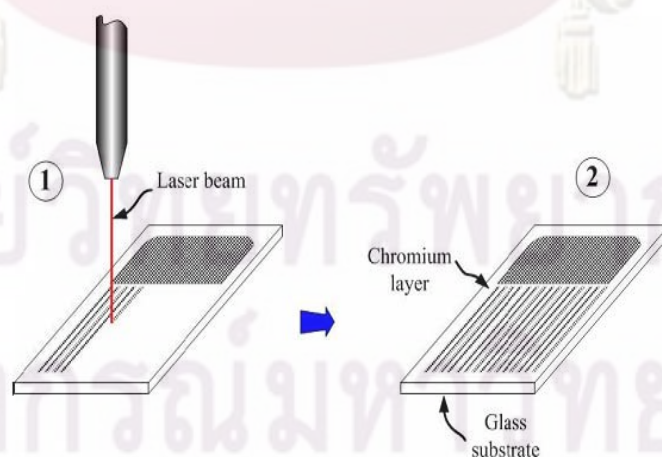
1. เทคโนโลยีแบบบนลงล่าง (Top down technology)
2. เทคโนโลยีแบบล่างขึ้นบน (Bottom up technology)

2.10.1 เทคโนโลยีแบบบนลงล่าง หมายถึงการทำโครงสร้างขนาดนาโนเมตรโดยใช้

เทคโนโลยีแบบหยาบ ตัวอย่างของเทคโนโลยีแบบบนลงล่างเช่น

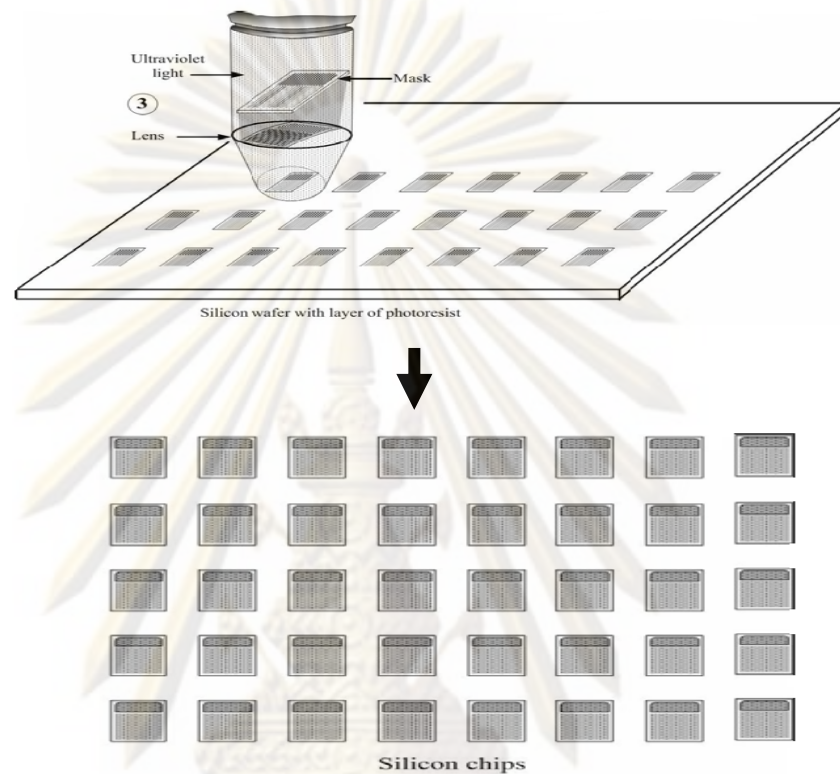
- **โฟโตลิโทกราฟี (Photo lithography)** เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ผลิตชิปคอมพิวเตอร์และระบบไมโครอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ สามารถทำโครงสร้างที่มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร แต่ทำได้ยากมาก ราคาแพงและไม่สะดวกโฟโตลิโทกราฟีเป็นเทคโนโลยีที่มีพื้นฐานมาจากการถ่ายรูป ขั้นตอนของโฟโตลิโทกราฟีมี 2 ขั้นตอน คือ

1. สร้างรูปแบบของส่วนของวงจรมิโครชิปบนแก้วที่เคลือบด้วยชั้นของโครเมียมโดยใช้แสงเลเซอร์ ซึ่งมีลักษณะเหมือนฟิล์มเนกะตีฟเรียกว่ามาสก์ (Mask)



ภาพที่ 2.2 การใช้แสงเลเซอร์เขียนรูปแบบวงจรมิโครชิป (สมนึก,2545)

2. ใช้รูปแบบส่วนของวงจรมicrochipที่สร้างในขั้นตอนที่ 1 ผลิตรูปแบบวงจบบนแผ่นซิลิกอนโดยใช้แสงอุลตราไวโอเล็ต

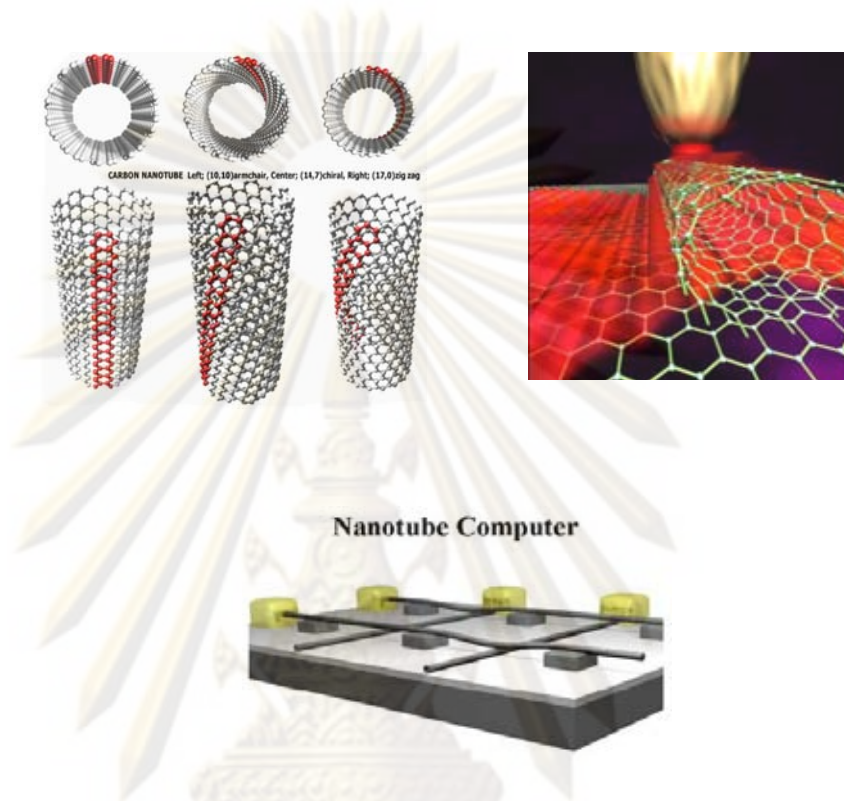


ภาพที่ 2.3 การผลิตวงจรมicrochipบนแผ่นซิลิกอน (สมนึก, 2545)

เทคโนโลยีโฟโตลิโทกราฟียังมีข้อจำกัดอันเนื่องมาจากแสงอุลตราไวโอเล็ต การปรับปรุงเทคโนโลยีโฟโตลิโทกราฟียังคงมีการทำวิจัยอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สามารถสร้างโครงสร้างที่มีขนาดเล็กลง ทำงานได้เร็วขึ้น และราคาถูกลง การนำลำอิเล็กตรอน และรังสีเอกซ์มาใช้ในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีก็เป็นอีกหนทางเลือกหนึ่งที่กำลังศึกษาและวิจัยกันอยู่

- **ท่อนาโนคาร์บอน** (Carbon nanotube) ท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุที่สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้เหมือนกับเป็นแท่งโลหะ หรือสามารถทำหน้าที่เป็นสารกึ่งตัวนำ หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทไดโอด ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอน ท่อนาโนคาร์บอนสามารถทำได้จากการให้ความร้อนกับคาร์บอนบริสุทธิ์จนกระทั่งระเหยเป็นไอ แล้วปล่อยให้ควบแน่นในสุญญากาศหรือแก๊สเฉื่อย จะได้แผ่นคาร์บอนบริสุทธิ์ที่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนเพียงชั้นเดียว จากแผ่นคาร์บอนบริสุทธิ์เมื่อนำมาม้วนเป็นท่อที่มีขนาดเล็กกว่าเส้นผมของมนุษย์ 50,000 เท่า จะได้ท่อนาโนคาร์บอน

เมื่อสามารถสร้างท่อนาโนคาร์บอนได้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ก็สามารถสร้างได้จากท่อนาโนคาร์บอน รวมถึงคอมพิวเตอร์ท่อนาโน

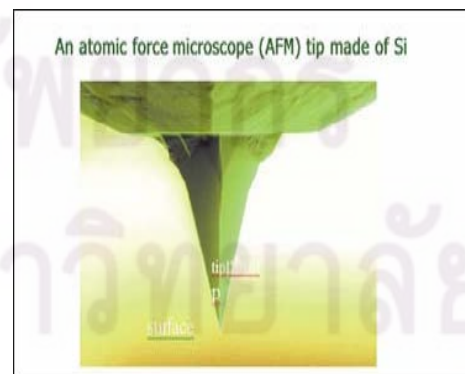
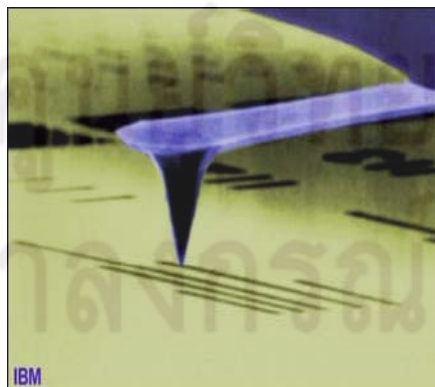
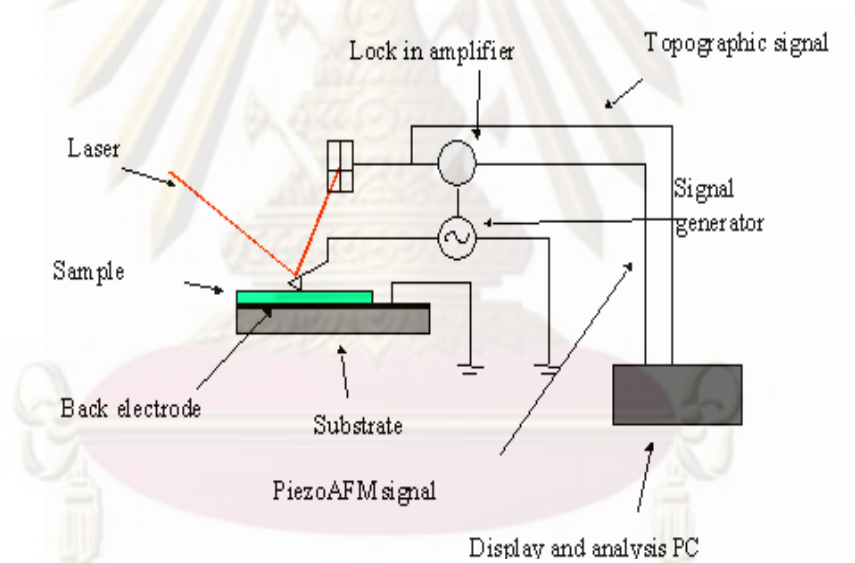


ภาพที่ 2.4 ท่อนาโน (สมนึก, 2545)

- **วัสดุนาโน** (Nano material) วัสดุนาโนเป็นคำทั่วๆ ไปหมายถึงวัสดุที่ประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดโดยเฉลี่ยน้อยกว่า 100 นาโนเมตร และมีขนาดเล็กกว่าขนาดของอนุภาคทั่วไป 10,000 เท่า สมบัติของวัสดุนาโนขึ้นอยู่กับการกระทำระหว่างกันของอะตอมที่ต่อกันบนผิวของอนุภาคหรือขอบของอนุภาคที่รวมกันเป็นวัสดุนาโน ซึ่งทำให้วัสดุนาโนแสดงสมบัติทางกลเคมีไฟฟ้า แสง และแม่เหล็ก ผิดปกติไปจากเดิมวัสดุนาโนมีศักยภาพในการนำไปทำเป็นชิ้นส่วนที่มีความแข็งแรง มีอายุการใช้งานที่นานกว่า เช่น ชิ้นส่วนเครื่องบิน รถยนต์ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานประเภทเม็ดตัด ดอกสว่าน วัสดุเชื่อมต่อเซรามิก ตลับลูกปืน สมรรถนะสูง วงจรรวม แม่เหล็กอำนาจสูงสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์

2.10.2 เทคโนโลยีแบบล่างชั้นบน หมายถึงการทำโครงสร้างหรือผลิตสิ่งของโดยการนำอะตอม/โมเลกุล มาจัดเรียงหรือประกอบกันทีละอะตอม/โมเลกุล เทคโนโลยีแบบล่างชั้นบนก็คือเทคโนโลยีระดับโมเลกุลหรือนาโนเทคโนโลยีนั่นเอง ตัวอย่างของเทคโนโลยีแบบล่างชั้นบน

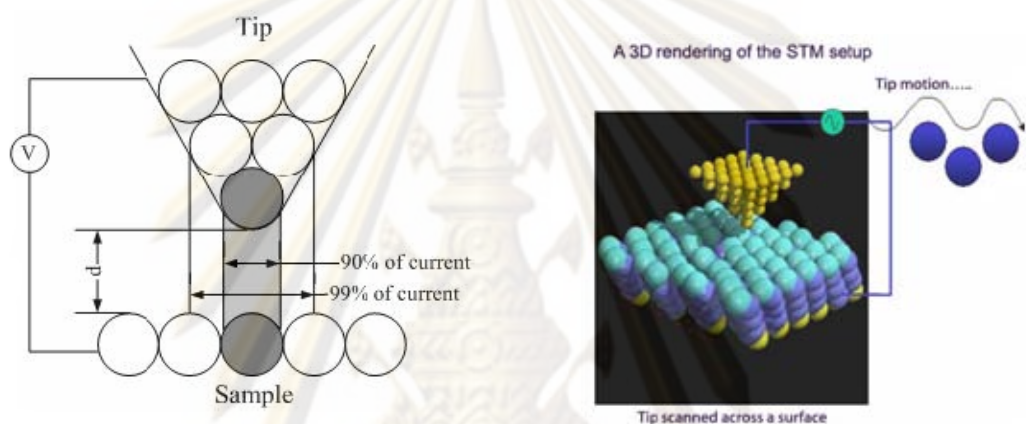
- **เครื่องมือระดับนาโน (Nano tools)** เป็นเครื่องมือที่ใช้ได้ในระดับนาโนเมตร เครื่องมือนี้คือ AFM (Atomic Force Microscopy) และ STM (Scanning Tunneling Microscopy) AFM เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สังเกตและจัดการเคลื่อนย้ายวัสดุขนาดนาโนเมตรได้ ทั้งวัสดุที่เป็นตัวนำและฉนวน สามารถใช้งานได้ทั้งในสิ่งแวดล้อมที่เป็นสุญญากาศ อากาศ แก๊สและของเหลว ส่วนประกอบที่สำคัญของ AFM คือคานยื่นที่ทำจากวัสดุที่สามารถเปลี่ยนแปลงประจุได้เมื่อถูกแรงกระทำ ที่ปลายคานจะมีเข็มที่ประกอบด้วยอะตอม 1 ตัว เมื่อเลื่อนคานให้ปลายเข็มอยู่ห่างจากผิววัสดุระหว่าง 0 - 100 นาโนเมตร แรงกระทำระหว่างอะตอมจะดึงคานและสามารถวัดระยะหรือใช้เคลื่อนย้ายอะตอมทีละตัวแผนภาพวงจรการทำงานของ AFM



ภาพที่ 2.5 แผนภาพวงจรการทำงานของ AFM (สมนึก, 2545)

การเบี่ยงเบนของปลายคานทำให้แสงเลเซอร์ที่สะท้อนไปยังตัวรับแสงมีการเบี่ยงเบน จึงสามารถวัดขนาดหรือระยะได้

STM มีส่วนประกอบคล้ายกับ AFM เข็มของ STM เป็นตัวนำไฟฟ้า มีการป้อนแรงดันระหว่างปลายเข็มและวัสดุตัวอย่าง ที่ปลายเข็มมีประจุเพียงเล็กน้อย เมื่อเลื่อนปลายเข็มเข้าหาผิวของวัสดุตัวอย่างในระยะประมาณ 1 นาโนเมตร อิเล็กตรอนจะกระโดดข้ามช่องว่างระหว่างปลายเข็มกับวัสดุตัวอย่างทำให้สามารถวัดกระแสและสร้างภาพของพื้นผิวได้ STM ใช้ได้กับวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้า



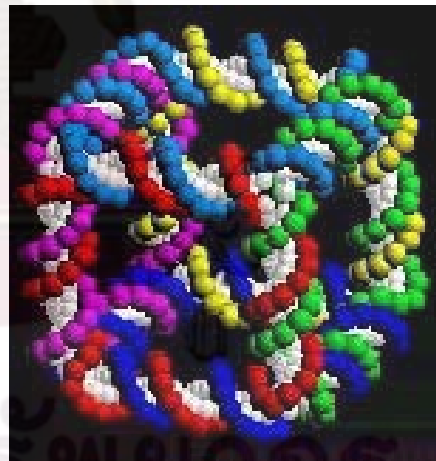
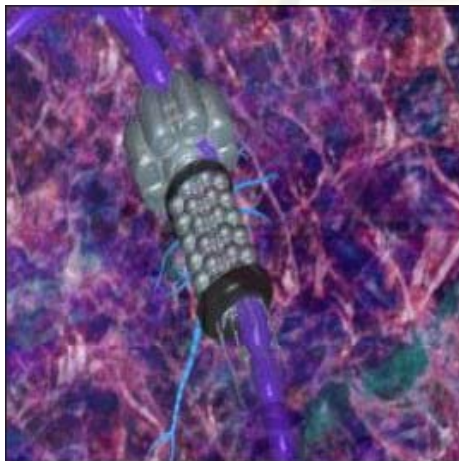
ภาพที่ 2.6 วงจรการทำงานของ STM (สมนึก, 2545)

-หุ่นยนต์นาโน (Nano robot) คือหุ่นยนต์หรือเครื่องจักรกลในระดับนาโนเมตร ซึ่งอาจสามารถจัดการกับอะตอมหรือโมเลกุลแต่ละตัว รวมข้อมูล และทำวัสดุใหม่หรือสำเนาตัวเองโปรตีนเป็นเครื่องจักรกลนาโนหรือหุ่นยนต์นาโนที่นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรนาโนได้ให้ความสนใจเป็นพิเศษ เพราะโปรตีนเป็นโมเลกุลที่มีชีวิตอยู่ในสิ่งมีชีวิตทุกชนิด ตั้งแต่ช่วยกันสังเคราะห์โปรตีนด้วยตัวเอง ควบคุมปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น เช่น การเผาผลาญอาหาร การกำจัดสิ่งแปลกปลอม เป็นต้น ความน่าสนใจอีกอย่างหนึ่งของโปรตีนคือความสามารถในการประกอบตัวเองได้ (Self assembly) ได้มีผู้ทดลองแยกไรโบโซม (ribosome) ซึ่งเป็นอวัยวะหนึ่งในเซลล์ทำหน้าที่ผลิตโปรตีนออกเป็นโมเลกุลย่อย ๆ ซึ่งประกอบด้วยโปรตีนถึง 50 ชนิด แล้วนำมาผสมรวมกันใหม่ในหลอดทดลอง ผลที่ได้คือ โมเลกุลย่อย ๆ เหล่านี้รวมกันเองจนกลายเป็นไรโบโซมเหมือนเดิม ความสามารถในการประกอบตัวเองนี้เป็นสิ่งสำคัญที่นาโนเทคโนโลยีที่สร้างโดยมนุษย์จะต้องมี เพราะเป็นพื้นฐานสำคัญที่ทำให้หุ่นยนต์/เครื่องจักรกลนาโนมีราคาถูกลงในการผลิต

นอกจากความสามารถในการประกอบตัวเองได้แล้ว ความสามารถในการสำเนาตัวเอง (Self replication) หรือขยายพันธุ์เป็นสิ่งทีหุ่นยนต์นาโนสามารถทำได้ ได้มีผู้ทดลองแยก RNA ออก

จากเซลล์ในหลอดทดลอง แล้วใส่วัตถุดิบที่จำเป็นต่อการสร้าง RNA ลงไป จากนั้นนำเอนไซม์ที่ช่วยในการสร้าง RNA ลงไปด้วย ผลก็คือ RNA ที่จับคู่กันอยู่เริ่มแยกออกจากกันและเอนไซม์ที่ใส่ลงไปจะค่อย ๆ นำเอาวัตถุดิบมาสร้างคู่ของ RNA ที่อยู่โดดเดี่ยวขึ้นมาใหม่เมื่อได้ RNA ที่เป็นคู่กันแล้วมันจะแยกออกจากกันอีก แล้วเอนไซม์ก็จะนำวัตถุดิบมาสร้างคู่ของมันอีก ทำซ้ำอยู่อย่างนี้จนกระทั่งวัตถุดิบที่ใช้ในการสร้าง RNA หมดจะเห็นว่าการสำเนาตัวเองหรือการขยายพันธุ์สามารถเกิดขึ้นได้นอกเซลล์ของสิ่งมีชีวิต และเป็นกลไกที่มนุษย์สามารถออกแบบให้เกิดขึ้นกับนาโนเทคโนโลยีได้

ในแง่ของนาโนเทคโนโลยี โปรตีนเป็นหุ่นยนต์นาโนที่ได้รับคำสั่งให้ทำงานตามที่มาบหมายโดยมีระบบพันธุกรรม หรือ DNA เป็นตัวควบคุมการทำงาน นักนาโนเทคโนโลยีจึงมีความสนใจที่จะสร้างระบบควบคุมที่คล้าย ๆ กับ DNA เพื่อควบคุมหุ่นยนต์นาโนที่มนุษย์สร้างขึ้น ซึ่งรู้จักกันในนาม นาโนคอมพิวเตอร์ (Nano computer) โดยนาโนคอมพิวเตอร์จะเป็นส่วนสมองของหุ่นยนต์นาโนที่มนุษย์สร้างขึ้น ควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์นาโน



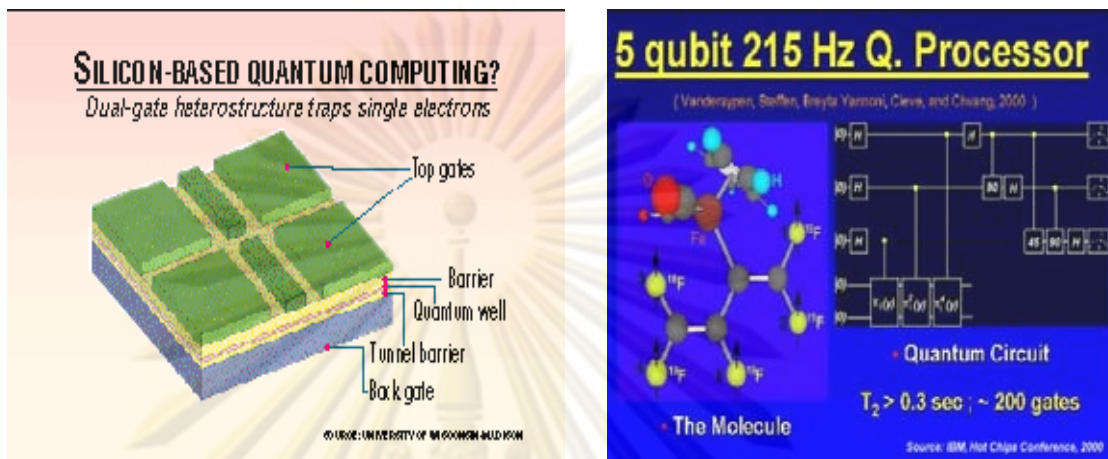
หุ่นยนต์นาโนกำลังซ่อมแซมปลายประสาท

DNA ทำหน้าที่เป็น Software ของสิ่งมีชีวิต

ภาพที่ 2.7 หุ่นยนต์นาโนและ DNA (สมนึก, 2545)

- **ควอนตัมคอมพิวเตอร์** (Quantum Computer) เป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ปฏิกิริยาทางกลศาสตร์ควอนตัมในการเข้าประมวลรหัสข้อมูลในอะตอม ถึงแม้ในปัจจุบันนี้จะยังไม่มีควอนตัมคอมพิวเตอร์ แต่แบบจำลองของควอนตัมคอมพิวเตอร์ที่เสนอไว้สามารถประมวลผล

ข้อมูลเร็วกว่าซูเปอร์คอมพิวเตอร์ที่มีอยู่ในปัจจุบันเป็นพันล้านเท่า



ภาพที่ 2.8 ควอนตัมคอมพิวเตอร์ (สมนึก, 2545)

2.11 การประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีกับการบำบัดน้ำเสีย (เวพรูรีย์, 2549)

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนาโนเพื่อสิ่งแวดล้อมมุ่งเน้นไปที่การเตรียมอนุภาคที่มีขนาดเล็กในระดับนาโน (Nanoparticles) ซึ่งอนุภาคนาโนดังกล่าวจะมีข้อดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบดั้งเดิมคือ มีขนาดเล็กทำให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามาก นอกจากนี้อนุภาคนาโนยังมีสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพที่เปลี่ยนไปจากตัวเร่งปฏิกิริยาทั่วไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของขนาดและโครงสร้าง รวมถึงมีความสามารถในการเปลี่ยนความไวต่อความยาวคลื่น (Tunable wavelength sensing ability) และมีความแข็งแรงเชิงกลสูง (Mechanical strength) ซึ่งจากคุณสมบัติเหล่านี้ช่วยให้อนุภาคนาโนมีประสิทธิภาพในการยับยั้งและกำจัดสารมลพิษโดยตรงช่วยลดเครื่องมือในกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยสามารถนำไปบำบัด ณ จุดกำเนิดได้เลย และที่สำคัญเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ต้นทุนต่ำในเชิงพาณิชย์ ในการประยุกต์ใช้ขึ้นกับรูปร่างขนาดของอนุภาคนาโนในการเกิดปฏิกิริยา เช่นเป็นตัวดูดซับ ตัวเร่งปฏิกิริยา และเป็นเยื่อเลือกผ่าน (Nanofiltration membranes)

2.11.1 ถ่านกัมมันต์กับการบำบัดน้ำเสีย

ถ่านกัมมันต์มีลักษณะเด่นของโครงสร้างที่เป็นรูพรุนมีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตรมีคุณสมบัติพิเศษในการคัดเลือกและมีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับสารบางชนิดได้ รูพรุนระดับนาโนเมตรจึงได้รับความสนใจอย่างยิ่งในการนำมาใช้เพื่อการบำบัดน้ำเสียซึ่งมีสารพิษที่กำจัดได้ยาก

ปนเปื้อนอยู่เป็นจำนวนมาก ปัจจุบันนำมาใช้กับอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมทอผ้า อุตสาหกรรมสิ่งพิมพ์ เป็นต้น ซึ่งน้ำเสียที่มาจากอุตสาหกรรมประกอบด้วยสารพิษที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เช่น โลหะหนัก สีหมึกพิมพ์ น้ำมัน สารเคมี และตัวทำละลาย อนุพันธ์ที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียนั้นทำการบำบัดได้ยากเนื่องจากมีสมบัติในการละลายน้ำได้ดีเมื่อผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแล้วยังคงเหลือตกค้างอยู่วิธีที่เหมาะสมในการกำจัดคือการใช้วัสดุดูดซับ เช่น ถ่านกัมมันต์ (Active carbon) หรือแอคติเวตเต็ดคาร์บอน (Activated carbon) แต่ถ่านกัมมันต์ยังคงเป็นวัสดุที่มีราคาแพง และถ่านกัมมันต์ที่ผลิตทางการค้า ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์มีหลายชนิด และมักเป็นพวกอินทรีย์สารที่ประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ ส่วนใหญ่มักเป็นพวกเซลลูโลสที่มาจากพืชและต้นไม้ เช่น ยางพารา ไม้ไผ่ เศษไม้เหลือทิ้ง และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรบางอย่าง แกลบ กะลามะพร้าว ชี้เลื่อย โดยทำการเผาด้วยความร้อนสูงในสภาวะที่ไม่มีอากาศ

2.11.2 อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂)

บำบัดน้ำเสียโดยเลือกใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ มาเป็นเป็นเส้นใยแทนที่จะใช้แบบผงเหมือนปัจจุบัน (พิชญ์, 2549) โครงสร้างของไททาเนียมไดออกไซด์ สามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงได้คือ เมื่อโดนแสงกระตุ้นจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และเมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นเส้นใย โครงสร้างที่ได้มานั้นจะมีลักษณะเหมือนแผ่นกรอง ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกำจัดสารเคมีอินทรีย์ตกค้าง เช่นยาฆ่าแมลง และยาฆ่าวัชพืช เป็นต้น "เส้นใยไททาเนียมไดออกไซด์" ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150-270 นาโนเมตร สามารถเปลี่ยนโครงสร้างของสารเมทิลีนบลู ผงนาโนไททาเนียมมาตรฐานใช้ในอุตสาหกรรมจริง พบว่าสามารถย่อยสลายสารเมทิลีนบลูได้เร็วกว่า และปริมาณมากกว่า นอกจากนี้การที่เส้นใยมีขนาดเล็กมาก ทำให้มีพื้นที่ผิวสูงสามารถทำปฏิกิริยาได้มากกว่า สำหรับเส้นใยนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ หรือ เส้นใยนาโนไทเทเนียม มีข้อดีอยู่ตรงที่สามารถจัดเก็บได้ง่ายเมื่อนำไปใช้ในบ่อบำบัด และพื้นที่เกษตรที่ใส่ยาฆ่าแมลงเยอะ โดยหลังจากนำเส้นใยไปวางในบ่อแล้ว เมื่อโดนแสงอาทิตย์ก็จะเปลี่ยนโครงสร้างของยาฆ่าแมลงได้

2.11.3 ซิลเวอร์นาโน (Nano silver)

ซิลเวอร์ นาโน หรืออนุภาคเงินนาโน ซึ่งมีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียโดยอนุภาคนาโนมีความสามารถในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียนั้นต้องมีขนาดอยู่ในช่วง 20 นาโนเมตรแต่ถ้าหากอนุภาคเงินนาโนมีขนาดเล็กลงจนถึงขนาด 10 นาโนเมตร จะสามารถกำจัดเชื้อไวรัสได้โดยกลไกของการกำจัดแบคทีเรียของนาโนซิลเวอร์คือการทำลายผนังเซลล์แบคทีเรีย ส่งผลให้แบคทีเรียตาย

และไม่สามารถเพิ่มจำนวนได้ นาโนซิลเวอร์จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับสิ่งทอต่างๆ เพื่อให้สิ่งทอมีคุณสมบัติในการกำจัดแบคทีเรียโดยการเคลือบหรือผสมลงในเส้นใยสังเคราะห์

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Shih และคณะ (2009) ได้ศึกษาการกำจัดสารประกอบคลอรีนพวกเฮกซะเบนซีน โดยใช้เหล็กนาโนและ โลหะคู่ผสมคือแพลเลเดียม-เหล็ก พบว่าจากการสังเคราะห์เหล็ก และแพลเลเดียม-เหล็กได้ขนาดของเหล็กนาโนและแพลเลเดียม-เหล็กประมาณ 90 นาโนเมตร และเหล็กทั้งสองแบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดได้ร้อยละ 60 และร้อยละ 70 ตามลำดับ ซึ่งแพลเลเดียม-เหล็ก สามารถกำจัดสารมลพิษได้เร็วกว่าเหล็กนาโนในอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นอันดับหนึ่ง 0.14 และ 0.23 ต่อชั่วโมง ตามลำดับ

He และ Zhao (2008) ศึกษาการกำจัดสารพวกสารพอลิคลอรีเนตไบฟีนีลส์ในดิน โดยใช้โลหะคู่ผสมแพลเลเดียม-เหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่าเมื่อเติมแพลเลเดียมร้อยละ 0.05 และแพลเลเดียม-เหล็ก 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของดิน ทำให้พื้นที่ผิวของแพลเลเดียม-เหล็กเท่ากับ 0.92 ตารางเมตรต่อกกรัม และพื้นที่ของเหล็กเท่ากับ 0.67 ตารางเมตรต่อกกรัม มีค่ากรด-เบสเท่ากับ 5.5 สามารถกำจัดสารพวกสารพอลิคลอรีเนตไบฟีนีลส์ในดินร้อยละ 73.8

Wang และคณะ (2008) ศึกษาการกำจัดสารคลอรีนจำพวกมีเทน โดยใช้โลหะคู่ผสมคือแพลเลเดียมและเหล็ก โดยการเตรียมเหล็กนาโนจากไฮโดรโบไฮไดด์ KBH_4 และ $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และหลังจากได้เหล็กนาโนที่ผ่านการเตรียมโดยกระบวนการออกซิเดชัน และได้เตรียมแพลเลเดียมและเหล็กจากการผสมกันของสารละลายแพลเลเดียมในอะซิโตนและเหล็กนาโน ทำให้แพลเลเดียมไปเกาะบนผิวของเหล็กนาโนโดยเติมแพลเลเดียมร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักรวม ปริมาณแพลเลเดียมเหล็กนาโนที่ 10 กรัมต่อลิตร และที่ค่ากรด-เบสเท่ากับ 7 จากผลการทดลองพบว่า แพลเลเดียมที่เกาะอยู่บนผิวของเหล็กนาโนมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 51.4 ตารางเมตรต่อกกรัม และเหล็กนาโนมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 31.4–36.4 ตารางเมตรต่อกกรัม มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารคลอรีนจำพวกมีเทนได้ถึงร้อยละ 80 โดยมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนเตตระคลอไรด์ จะถูกกำจัดได้มากที่สุด ตามด้วยคลอโรฟอร์มและไดคลอโรมีเทน

Xu และ Zhao (2007) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Hexavalent chromium) เป็นองค์ประกอบ โดยการใช้เหล็กนาโนในการรีดิวซ์เฮกซะวาเลนต์โครเมียมไปเป็นไตรวาเลนต์โครเมียม (Trivalent chromium) ที่มีความเป็นพิษน้อยกว่าในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

โดยภาวะในการทดลองคืออัตราการเกิด 0.08 ต่อชั่วโมง ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 5.6 พบว่าเหล็กนาโนสามารถรีดิวซ์เฮกซาวาเลนต์โครเมียมได้ถึงร้อยละ 90

Lien และ Zhang (2001) ศึกษาประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนแบบโลหะคูปรัม คือ แพลเลเดียมบนตัวรองรับเหล็ก เพื่อบำบัดสารประกอบจำพวกคลอรีน พบว่าประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถบำบัดสารประกอบประเภทคลอรีนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีขนาดพื้นที่ผิวที่ในการเกิดปฏิกิริยาสูง และใช้เวลาในการบำบัดสารประกอบจำพวกคลอรีนเพียง 90 นาที

Sun และคณะ (2006) ศึกษาการกำจัดสารหนูที่มีอยู่ในน้ำใต้ดินโดยได้ใช้ผงเหล็กนาโนทำการทดลองในปฏิกรณ์แบบกะและแบบเป็นคอลัมน์ จากการทดลองในปฏิกรณ์แบบกะในภาวะไร้ออกซิเจนสามารถกำจัดสารหนูได้มากกว่าร้อยละ 80 ในเวลา 4 ชั่วโมง และในแบบมีออกซิเจนสามารถกำจัดสารหนูได้มากกว่าร้อยละ 95 ที่ค่าความเป็นกรด-เบสต่ำๆ ในเวลา 2 ชั่วโมงตามลำดับ และในการทดลองแบบคอลัมน์สามารถกำจัดสารหนูได้มากกว่าร้อยละ 98

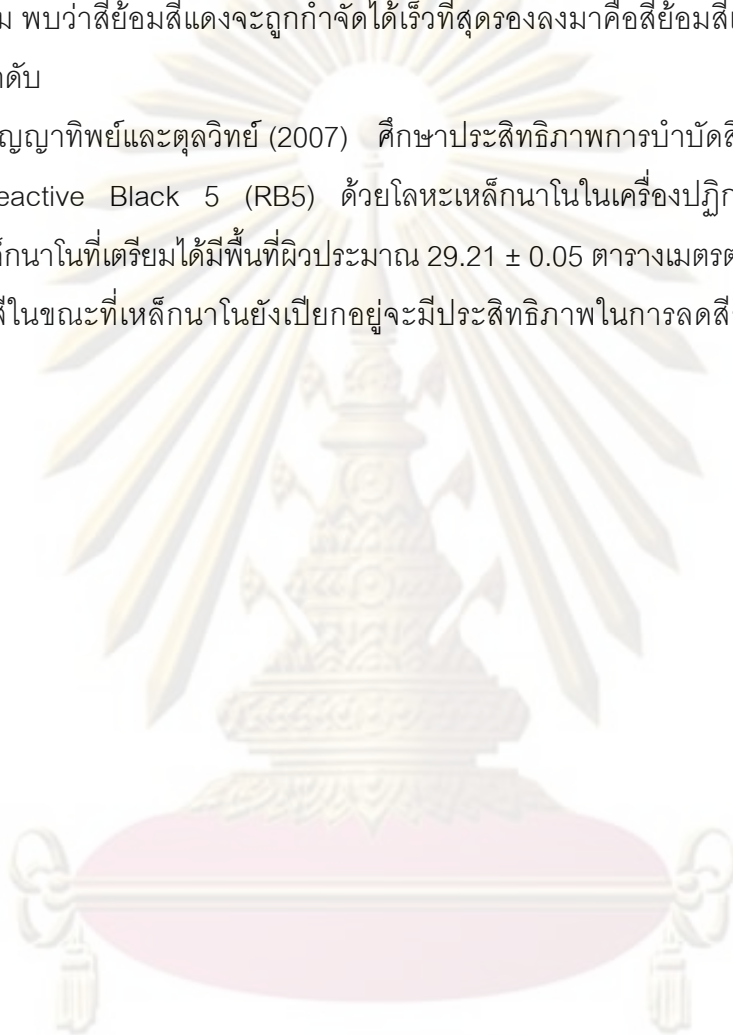
Tee และคณะ (2005) ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่มีไตรคลอโรเอทิลีนเป็นองค์ประกอบ โดยเตรียมอนุภาคนาโนแบบโลหะคูปรัม คือ นิกเกิลบนตัวรองรับเหล็กด้วยปฏิกิริยารีดักชัน พบว่าเหล็กนาโนสามารถเปลี่ยนไตรคลอโรเอทิลีนเป็นอีเทนได้ร้อยละ 97.3

Bao และคณะ (2006) ศึกษาการลดสารประกอบคลอรีนพวก 1,2,4-ไตรคลอโรเบนซีนที่ปะปนอยู่ในน้ำด้วยอนุภาคแพลเลเดียม-เหล็กนาโน และได้มีการเติมตัวรองรับโคโคซานและซิลิกาช่วยในการกำจัดสารดังกล่าว พบว่าการเติมตัวรองรับโคโคซานให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารประกอบพวกไตรคลอโรเบนซีนได้ดีกว่าตัวรองรับซิลิกาภายในเวลาเพียง 60 นาที ซึ่งซิลิกาใช้เวลาในการบำบัดถึง 100 นาที ปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาของแพลเลเดียม-เหล็กต่อโคโคซานคือ 0.0749 นาที^{-1} และค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาของแพลเลเดียม-เหล็กต่อซิลิกาคือ 0.0188 นาที^{-1}

Zhang (2003) ศึกษาการลดสารประกอบพวกคลอรีนและสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ปะปนอยู่ในน้ำและดินด้วยอนุภาคเหล็กนาโน โดยขนาดของเหล็กนาโนที่ศึกษาอยู่ในช่วง 10-100 นาโนเมตร เหล็กนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นเองด้วยการผสมกันของไซเดียมโบโรไฮไดรด์และเหล็กคลอไรด์ในห้องปฏิบัติการ พบว่าเหล็กนาโนมีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดสารประกอบคลอรีน โดยสามารถลดคลอรีนได้ถึงร้อยละ 99

ทัตชลิตและยุทธนา (2006) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการกำจัดฟีนอลและสีย้อมโดยใช้เหล็กนาโน พบว่าปริมาณเหล็กต่อความเข้มข้นของฟีนอลที่สามารถกำจัดฟีนอลได้ดีที่สุดมีค่าตั้งแต่ 0.0005 กรัมต่อพีพีเอ็มของฟีนอล การลดลงของฟีนอลเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง สำหรับการกำจัดสีย้อม พบว่าสีย้อมสีแดงจะถูกกำจัดได้เร็วที่สุดรองลงมาคือสีย้อมสีเหลืองและสีย้อมสีน้ำเงิน ตามลำดับ

เบญญาทิพย์และตุลวิทย์ (2007) ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมกลุ่ม Azo dye ประเภท Reactive Black 5 (RB5) ด้วยโลหะเหล็กนาโนในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ พบว่าอนุภาคเหล็กนาโนที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิวประมาณ 29.21 ± 0.05 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งเมื่อนำไปใช้ในการลดสีในขณะที่ยังเปียกอยู่จะมีประสิทธิภาพในการลดสีร้อยละ 95 ในเวลา 1 ชั่วโมง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์ด้วยเหล็กนาโนและเหล็กนาโนดัดแปร โดยสามารถนำผลการทดลองที่ได้ไปใช้เป็นข้อมูลในระดับขยายส่วนหรือใช้ประโยชน์ในการศึกษาต่อไป

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยสำหรับเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย

- เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ
- ช้อนตักสาร (Spatula)
- แท่งแก้ว (Stick glass)
- ไมโครปิเปต (Micro pipette)
- เครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic steer)
- นาฬิกาจับเวลา
- กระจกทรงเบอร์ 1
- กระจกทรงเบอร์ 42
- กระจกทรง GF/C
- ขวดบีโอดี (BOD Bottle) ขนาด 250-300 มิลลิลิตร พร้อมจุกปิด
- หลอดย่อย (Digestion Vessels) เป็นหลอดแก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate) ขนาด 20x150 หรือ 25x150 มิลลิเมตร มีฝาพลาสติกเกลียวซึ่งทำด้วยทีเอฟอี (Tetrafluoroethylene, TFE)
- ตู้ควบคุมอุณหภูมิซึ่งควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 20 ± 1 องศาเซลเซียส
- เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath)
- เครื่องชั่งละเอียด
- เครื่องวัดซีโอดี รุ่น ECO16 Themoreactor
- เครื่องเขย่า (Shaker) รุ่น SK 30-po
- เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส (pH meter) ยี่ห้อ Horiba รุ่น F-22

- เครื่องวัด UV Spectrophotometer ยี่ห้อ Jasco รุ่น V-530
- เครื่อง AAS (Atomic Absorption Spectrophotometer) รุ่น GBC Avanta Σ
- เครื่อง TEM (Transmission electron microscopy) รุ่น JEOL-1230
- เครื่อง XRD (X-ray Diffraction) รุ่น D8 Advance

3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

3.2.1 การวิเคราะห์สี

- โคบอลต์คลอไรด์ ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (Merck, 98%)
- โพแทสเซียมคลอโรแพลททิน (K_2PtCl_6) (Carlo, AR grade)

3.2.2 การวิเคราะห์ซีโอดี

- โพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) (Merck, AR grade)
- กรดซัลฟิวริก (conc. H_2SO_4) (Fisher, 98%)
- ซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) (POCh.S.A., AR grade)
- ไอร์รอน (II) แอมโมเนียมซัลเฟต ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (Unilab, AR grade)
- สารละลายเฟอร์โรซีนอินดิเคเตอร์ (Labchem, AR grade)
- โปตัสเซียมไฮโดรเจนแพทาเลต (KHP) (Merck, AR grade)

3.2.3 การวิเคราะห์บีโอดี

- โปแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) (Univer, AR grade)
- ไดโปแตสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4) (Univer, AR grade)
- ไดโซเดียมฟอสเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{PO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) (Univer, AR grade)
- แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) (Univer, AR grade)
- แคลเซียมคลอไรด์ปราศจากน้ำ (Anhydrous CaCl_2) (Univer, AR grade)
- เฟอริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (Univer, AR grade)
- แมงกานีสซัลเฟตโมโนไฮเดรต ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) (Univer, AR grade)
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (Univer, AR grade)
- โซเดียมไอโอดด์ (NaI) (Labchem, AR grade)
- โซเดียมเอไซด์ (NaN_3) (Labchem, AR grade)
- โซเดียมไทโอซัลเฟตเพนตะไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) (Univer, AR grade)

- แมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) (Univer, AR grade)

3.2.4 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมเหล็กนาโนและเหล็กนาโนดัดแปร

- โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (NaBH_4) (Labchem, AR grade)
- เหล็กคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (Univer, AR grade)
- กรดไฮโดรคลอริก (HCl) (Fisher, 98%)
- กรดแอสซิติคเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร
- เฟอริกซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) (Univer, AR grade)
- แอสซิติค ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) (Fisher, 98%)
- เอทิลแอลกอฮอล์ ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) (Labchem, AR grade)
- ไคโตซาน (ELAD Cooperation)
- ซิลิกาฟุ่ม
- แพลเลเดียมคลอไรด์ (PdCl_2) (Univer, AR grade)

3.3 น้ำตัวอย่าง

น้ำตัวอย่างที่นำมาวิจัยนี้ได้รับอนุเคราะห์จากบริษัทแสงโสม จำกัด ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์ตั้งอยู่ที่จังหวัดนครปฐม โดยน้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยเป็นน้ำเสียก่อนเข้าบำบัด ซึ่งมีลักษณะน้ำตาลเข้ม มีกลิ่นเหม็น มีค่าความเป็นกรด-เบสในช่วง 5-6 มีตะกอนของเศษวัสดุดิบ

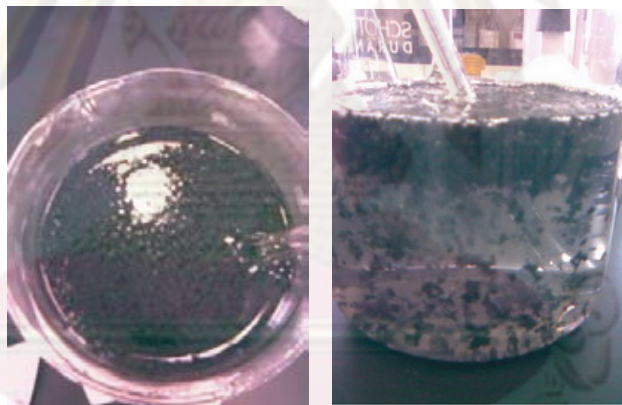
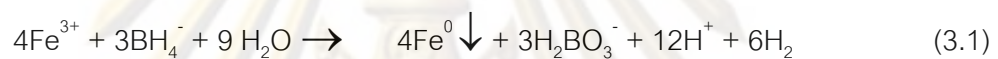


ภาพที่ 3.1 ลักษณะของน้ำเสีย

3.4 ขั้นตอนการเตรียมเหล็กและเหล็กนาโนดัดแปร

3.4.1 การเตรียมเหล็กนาโน

ละลายเหล็กคลอไรด์ $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 1 กรัม ในน้ำปราศจากไอออน (DI water) 400 มิลลิลิตร และละลาย NaBH_4 7.5 กรัม ในน้ำ 800 มิลลิลิตร นำสารละลาย $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ผสมกับสารละลาย NaBH_4 ในอัตราส่วน 1:2 จะเกิดปฏิกิริยาของ NaBH_4 กับ Fe_3Cl ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ (3.1) (Wang และ Zhang 1997) กวนด้วยเครื่องกวนเป็นเวลา 15 นาที แล้วนำสารละลายไปเขย่าด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็น 15 นาที เสร็จแล้วนำไปกรองด้วยระบบสุญญากาศแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นและเอซีโตนจะได้อนุภาคของเหล็กนาโน ดังแสดงในภาพที่ 3.2 และ 3.3



ภาพที่ 3.2 ลักษณะของเหล็กนาโนก่อนกรอง



ภาพที่ 3.3 ลักษณะของเหล็กนาโนหลังกรอง

3.4.2 การเตรียมเหล็กนาโนบนตัวรองรับไคโตซาน

ซึ่งไคโตซาน 0.1 กรัม ละลายในกรดแอสซิติคเข้มข้นร้อยละ 5 ปริมาตร 30 มิลลิลิตร และละลาย $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ปริมาณ 5 กรัม ในน้ำปราศจากไอออน 40 มิลลิลิตร นำไปกวนด้วยเครื่องกวนเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้ได้ค่าที่ 6.8 ด้วย NaOH เข้มข้น 3.8 โมลต่อลิตร ค่อยๆ หยด NaBH_4 เข้มข้น 2.3 โมลต่อลิตร ในสารละลายที่ได้ จนกระทั่งเหล็กถูกรีดิวส์อย่างสมบูรณ์ เสร็จแล้วนำไปกรองด้วยระบบสุญญากาศแล้วล้างด้วยน้ำกลั่น และแอสซิโตนจะได้เหล็กนาโนบนตัวรองรับไคโตซาน

3.4.3 การเตรียมเหล็กนาโนบนตัวรองรับซิลิกา

ละลายซิลิกา 0.1 กรัม และ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ปริมาณ 5 กรัม ในน้ำปราศจากไอออน 70 มิลลิลิตร กวนด้วยเครื่องกวนเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้ได้ค่าที่ 6.8 ด้วย NaOH เข้มข้น 3.8 โมลต่อลิตร ค่อยๆ หยด NaBH_4 เข้มข้น 2.3 โมลต่อลิตร ลงในสารละลายที่ได้จนกระทั่งเหล็กถูกรีดิวส์อย่างสมบูรณ์ เสร็จแล้วนำไปกรองด้วยระบบสุญญากาศแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นและแอสซิติคจะได้เหล็กนาโนบนตัวรองรับซิลิกา

3.4.4 การเตรียมเหล็กนาโน-แพลเลเดียม

ซึ่ง Cl_2Pd 0.0833 กรัม ละลายในแอสซิติคเข้มข้นปริมาตร 126.5 มิลลิลิตร จะได้สารละลายแพลเลเดียมแอสซิเตตเข้มข้นร้อยละ 0.05 จากนั้นใส่เหล็ก 2 กรัม (เตรียมดังหัวข้อ 3.4.1) ลงไปในสารละลายแพลเลเดียมแอสซิเตต กวนประมาณ 30 นาที จะได้เหล็กนาโน-แพลเลเดียม

3.4.5 การเตรียมเหล็กนาโน-แพลเลเดียมบนตัวรองรับไคโตซาน

ซึ่งไคโตซาน 0.05 กรัม ละลายในกรดแอสซิติคเข้มข้นร้อยละ 5 ปริมาตร 30 มิลลิลิตร และซึ่ง $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ จำนวน 5 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน 40 มิลลิลิตร นำไปกวนด้วยเครื่องกวนเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้ได้ 6.8 ด้วย NaOH เข้มข้น 3.8 โมลต่อลิตร จากนั้นค่อยๆ หยด NaBH_4 เข้มข้น 2.3 โมลต่อลิตร จนกระทั่งเหล็กถูกรีดิวส์อย่างสมบูรณ์ เสร็จแล้วนำสารละลายไปกรองด้วยระบบสุญญากาศแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นและแอสซิโตน จะได้เหล็กนาโน-แพลเลเดียมบนตัวรองรับไคโตซาน

3.5 การบำบัดน้ำเสีย

3.5.1 การหาภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียด้วยเหล็กนาโน

3.5.1.1 อัตราการเจือจางน้ำเสีย

นำน้ำเสียที่ไม่ได้ทำการเจือจางปริมาตร 200 มิลลิลิตร บรรจุลงในขวดรูปชมพู่ ปรับค่าความเป็นกรด-เบส ให้เท่ากับ 3 ด้วยกรดซัลฟิวริก ใส่เหล็กนาโนที่เตรียมตามหัวข้อ 3.4.1 ในอัตราส่วน 10 กรัมต่อลิตร เขย่าด้วยความเร็วที่ 170 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่างๆ ครั้งละ 5 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กรองด้วยกระดาษกรองและทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ซีไอดี และบีไอดี ทำการทดลองซ้ำโดยใช้น้ำเสียที่เจือจาง 10 25 50 75 และ 100 เท่า ตามลำดับ

3.5.1.2 ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำเสีย

นำน้ำเสียที่ทำการเจือจาง 50 เท่า บรรจุลงในขวดรูปชมพู่ ปรับค่าความเป็นกรด-เบส ให้เท่ากับ 1 ด้วยกรดซัลฟิวริก ใส่เหล็กนาโนที่เตรียมตามหัวข้อ 3.4.1 ในอัตราส่วน 10 กรัมต่อลิตร เขย่าด้วยความเร็วที่ 170 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่างๆ ครั้งละ 5 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กรองด้วยกระดาษกรองและทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ซีไอดี และบีไอดี ทำการทดลองซ้ำโดยปรับค่าความเป็นกรด-เบส ของน้ำเสียให้มีค่าเท่ากับ 3 5 และ 7 ตามลำดับ

3.5.1.3 ความเร็วรอบของการเขย่า

นำน้ำเสียที่ทำการเจือจาง 50 เท่า บรรจุลงในขวดรูปชมพู่ ปรับค่าความเป็นกรด-เบส ให้เท่ากับ 3 ด้วยกรดซัลฟิวริก ใส่เหล็กนาโนที่เตรียมตามหัวข้อ 3.4.1 ในอัตราส่วน 10 กรัมต่อลิตร เขย่าด้วยความเร็วที่ 120 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่างๆ ครั้งละ 5 มิลลิลิตร เป็นเวลา 10 ชั่วโมง กรองด้วยกระดาษกรองและทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ซีไอดี และบีไอดี ทำการทดลองซ้ำโดยเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 250 300 และ 350 รอบต่อนาที ตามลำดับ

3.5.1.4 อัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนต่อน้ำเสีย

นำน้ำเสียที่ทำการเจือจาง 50 เท่า บรรจุลงในขวดรูปชมพู่ ปรับค่าความเป็นกรด-เบส ให้เท่ากับ 3 ด้วยกรดซัลฟิวริก ใส่เหล็กนาโนที่เตรียมตามหัวข้อ 3.4.1 ในอัตราส่วน 2.5 กรัมต่อลิตร เขย่าด้วยความเร็วที่ 170 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่เวลา

ต่างๆ ครั้งละ 5 มิลลิลิตร เป็นเวลา 10 ชั่วโมง กรองด้วยกระดาษกรองและทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ สี ซีไอดี และบีไอดี ทำการทดลองซ้ำโดยใช้เหล็กนาโนที่อัตราส่วน 5 7.5 10 12.5 และ 15 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

3.5.2 การหาภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียด้วยเหล็กนาโนดัดแปร

3.5.2.1 เหล็กนาโนบนตัวรองรับไคโตซาน

นำน้ำเสียที่ทำการเจือจาง 50 เท่า ปริมาตร 200 มิลลิลิตร บรรจุลงในขวดรูปชมพู่ ปรับค่าความเป็นกรด-เบส ให้เท่ากับ 3 ด้วยกรดซัลฟิวริก ใส่เหล็กนาโนบนตัวรองรับไคโตซานที่เตรียมตามหัวข้อ 3.4.2 ในอัตราส่วน 0.1 กรัมไคโตซานต่อกรัมเหล็ก ลงในน้ำเสียในอัตราส่วน 12.5 กรัมต่อลิตรน้ำเสีย เขย่าด้วยความเร็วที่ 170 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่างๆ ครั้งละ 5 มิลลิลิตรเป็นเวลา 10 ชั่วโมง กรองด้วยกระดาษกรองและทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ สี ซีไอดี และบีไอดี ทำการทดลองซ้ำโดยใช้เหล็กนาโนบนตัวรองรับไคโตซานที่อัตราส่วนต่างๆ คือ 0.1 0.5 1 และ 2 กรัมไคโตซานต่อกรัมเหล็ก

3.5.2.2 เหล็กนาโนบนตัวรองรับซิลิกา

นำน้ำเสียที่ทำการเจือจาง 50 เท่า ปริมาตร 200 มิลลิลิตร บรรจุลงในขวดรูปชมพู่ ปรับค่าความเป็นกรด-เบส ให้เท่ากับ 3 ด้วยกรดซัลฟิวริก ใส่เหล็กนาโนบนตัวรองรับซิลิกาที่เตรียมตามหัวข้อ 3.4.3 ในอัตราส่วน 0.1 กรัมซิลิกาต่อกรัมเหล็ก ลงในน้ำเสียในอัตราส่วน 12.5 กรัมต่อลิตร เขย่าด้วยความเร็วที่ 170 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่างๆ ครั้งละ 5 มิลลิลิตรเป็นเวลา 10 ชั่วโมง กรองด้วยกระดาษกรองและทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ สี ซีไอดี และบีไอดี ทำการทดลองซ้ำโดยใช้เหล็กนาโนบนตัวรองรับไคโตซานที่อัตราส่วนต่างๆ คือ 0.1 0.5 1 และ 2 กรัมซิลิกาต่อกรัมเหล็ก

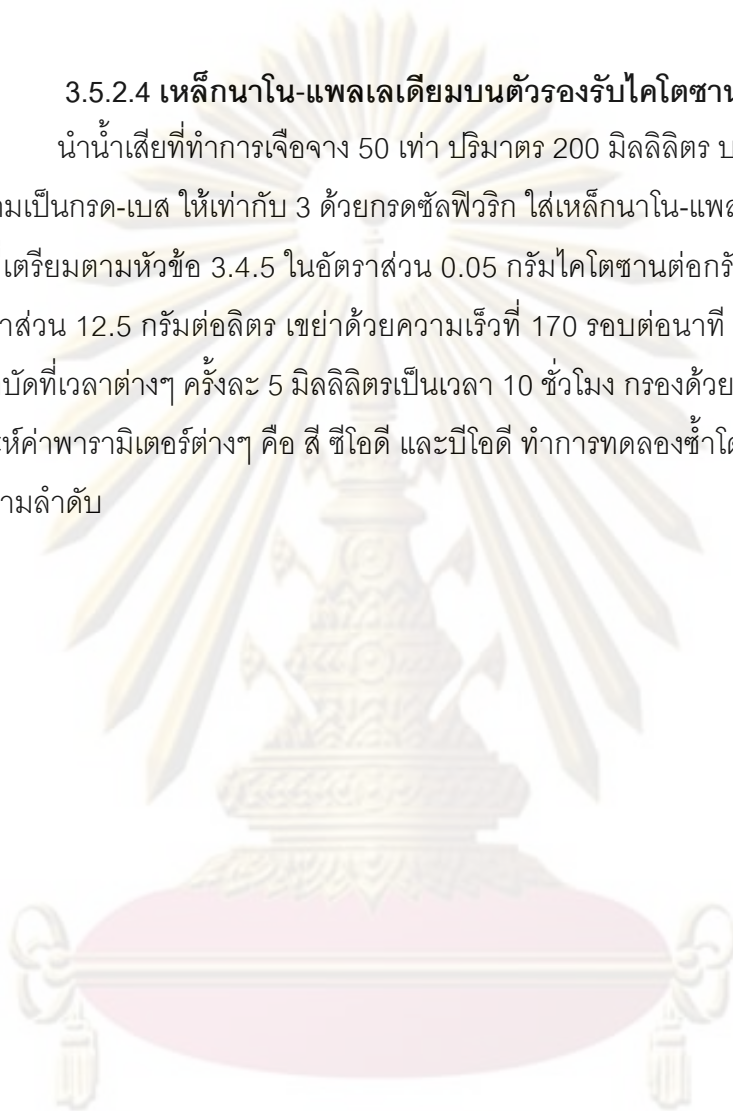
3.5.2.3 เหล็กนาโน-แพลเลเดียม

นำน้ำเสียที่ทำการเจือจาง 50 เท่า ปริมาตร 200 มิลลิลิตร บรรจุลงในขวดรูปชมพู่ ปรับค่าความเป็นกรด-เบส ให้เท่ากับ 3 ด้วยกรดซัลฟิวริก ใส่โลหะคู่ผสมแพลเลเดียม-เหล็กที่เตรียมตามหัวข้อ 3.4.4 ในอัตราส่วน 0.01 กรัมแพลเลเดียมต่อกรัมเหล็ก ลงในน้ำเสียในอัตราส่วน 12.5 กรัมต่อลิตร เขย่าด้วยความเร็วที่ 170 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่างๆ ครั้งละ 5 มิลลิลิตรเป็นเวลา 10 ชั่วโมง กรองด้วยกระดาษกรองและทำการวิเคราะห์

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ สี ซีไอดี และบีไอดี ทำการทดลองซ้ำเหล็กนาโน-แพลเลเดียมที่เตรียม อัตราส่วนต่างๆ คือ 0.02 0.03 0.04 และ 0.05 ตามลำดับ

3.5.2.4 เหล็กนาโน-แพลเลเดียมบนตัวรองรับโคโตซาน

นำน้ำเสียที่ทำการเจือจาง 50 เท่า ปริมาตร 200 มิลลิลิตร บรรจุลงในขวดรูปชมพู่ ปรับค่าความเป็นกรด-เบส ให้เท่ากับ 3 ด้วยกรดซัลฟิวริก ใส่เหล็กนาโน-แพลเลเดียมบนตัวรองรับโคโตซานที่เตรียมตามหัวข้อ 3.4.5 ในอัตราส่วน 0.05 กรัมโคโตซานต่อกรัมโลหะผสม ลงในน้ำเสียในอัตราส่วน 12.5 กรัมต่อลิตร เขย่าด้วยความเร็วที่ 170 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่างๆ ครั้งละ 5 มิลลิลิตรเป็นเวลา 10 ชั่วโมง กรองด้วยกระดาษกรองและทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ สี ซีไอดี และบีไอดี ทำการทดลองซ้ำโดยใส่โคโตซาน 0.075 0.1 0.15 ตามลำดับ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์ซึ่งรับความอนุเคราะห์มาจากบริษัทแสงโสม จำกัด จังหวัดนครปฐม มีสีน้ำตาลเข้ม มีตะกอน และมีกลิ่นเหม็น สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียดังกล่าวเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำทิ้งจากกรมโรงงานอุตสาหกรรมแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าสมบัติของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์จะมีค่าความเป็นกรด-เบส อยู่ในช่วงของค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง แต่จะมีปริมาณสารแขวนลอยสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งประมาณ 16-40 เท่า ค่าซีไอดีสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งประมาณ 150-400 เท่า และค่าบีไอดีที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งประมาณ 250-1500 เท่า ซึ่งจะเห็นว่าน้ำเสียดังกล่าวมีสมบัติไม่ผ่านมาตรฐาน ดังนั้นจึงต้องมีการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์

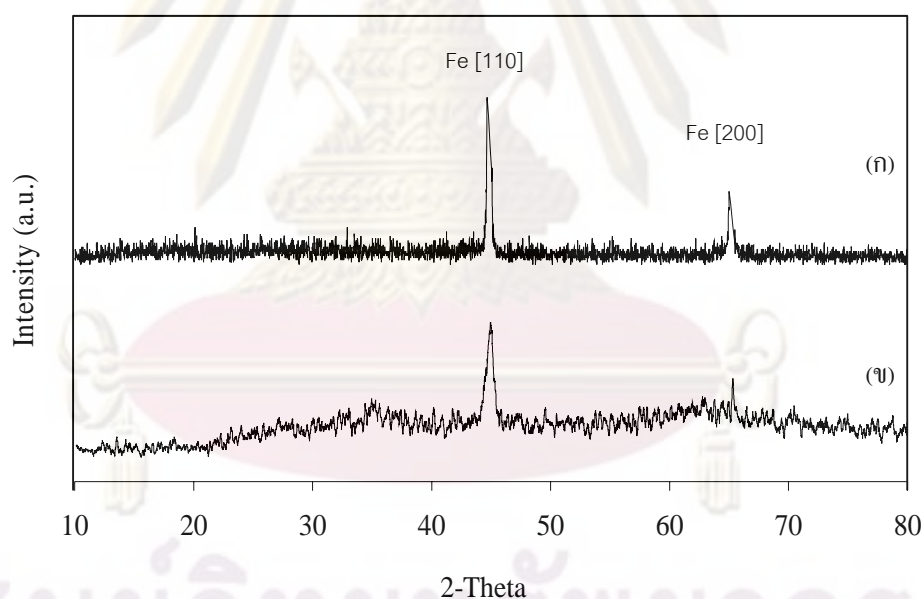
พารามิเตอร์	ปริมาณ	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง*
ค่าความเป็นกรด-เบส	5 - 6	5.5 – 9
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	53-100	≤ 40
ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	16.04-23.4	ไม่ได้กำหนด
ของแข็งละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	80,550-110,367	≤ 3,000
ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	2,475-6,080	≤ 150
ของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	83,900-115,267	-
ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	65,600-143,462	≤ 400
ค่าบีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	15,750-88,500	< 60
สี (หน่วยสีของหน่วยสี)	103,270-115,100	ไม่พึงรังเกียจ
เหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	-	ไม่ได้กำหนด

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

4.2 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์ด้วยเหล็กนาโนและเหล็กนาโนดัดแปร

4.2.1 สมบัติทางสัณฐานวิทยาของเหล็กนาโนและเหล็กไมโคร

ในงานวิจัยนี้จะเตรียมเหล็กนาโนตามวิธีที่ระบุในงานวิจัยของ Wang และ Zhang (1997) ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมโบโรไฮไดรด์กับเฟอร์ริกคลอไรด์ ดังแสดงโดยปฏิกิริยา (3.1) ภาพที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเหล็กนาโนที่เตรียมได้และเหล็กไมโครที่มีในทางการค้าด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) จากผลการวิเคราะห์เหล็กทั้งสองชนิด พบว่าจะปรากฏพีก [110] ที่ตำแหน่ง 44.6° และ พีก [200] ที่ตำแหน่ง 65.16° ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างของเหล็กเป็นแบบ Face-centered cubic (FCC) โดยจะไม่พบพีกที่ตำแหน่ง 35.45° ของแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) และที่ตำแหน่ง 35.74° ของเฮมาไทต์ (Fe_2O_3) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อเหล็กถูกออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจนในอากาศ (Üzüm และคณะ 2008) แสดงว่าเหล็กที่เตรียมได้มีสมบัติไม่เปลี่ยนแปลงและไม่เสื่อมคุณภาพระหว่างการเก็บรักษาเพื่อรอการใช้งาน

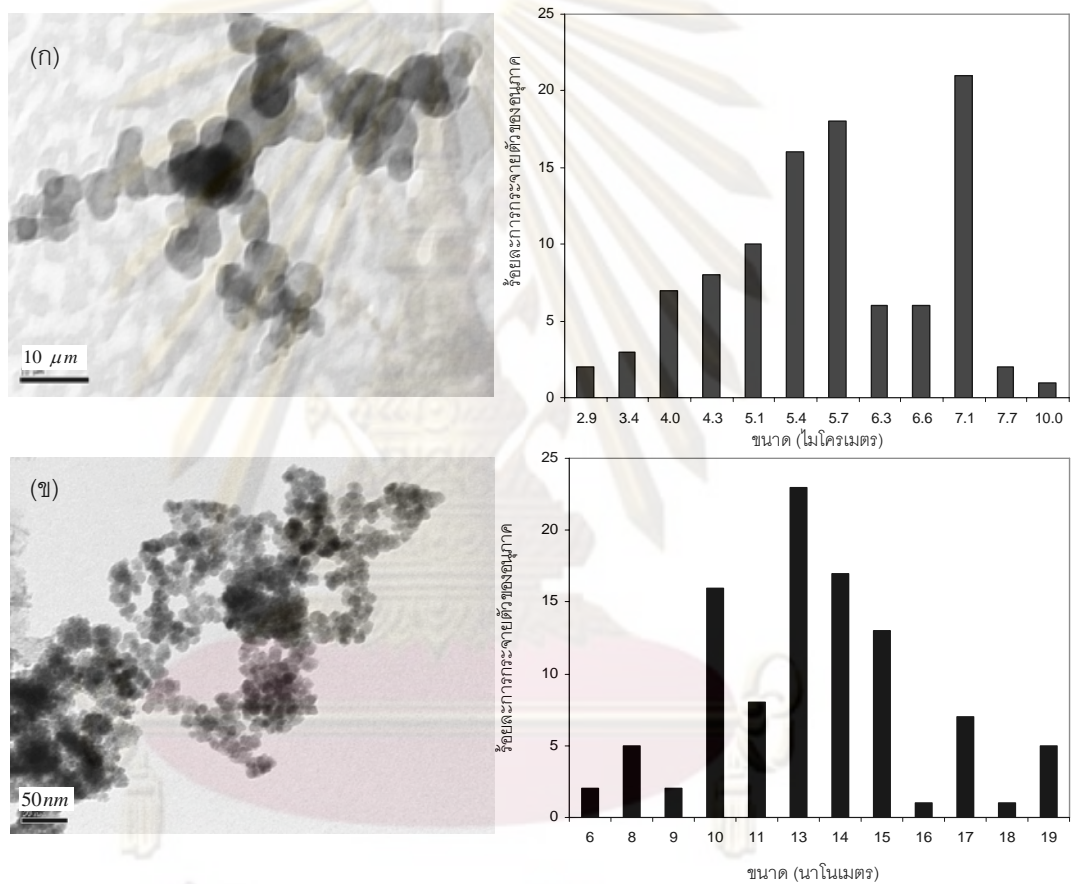


ภาพที่ 4.1 สัณฐานวิทยาของ (ก) เหล็กไมโครที่มีในทางการค้า และ (ข) เหล็กนาโนที่เตรียมในห้องปฏิบัติการเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

สำหรับขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเหล็กสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการของ Scherrer (สมการ (4.1)) พบว่าขนาดอนุภาคของเหล็กนาโนและเหล็กไมโคร มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 11.96 นาโนเมตร และ 5.38 ไมโครเมตร ตามลำดับ

$$L_{110} = \frac{0.9\lambda_{k\alpha 1}}{B_{2\theta} \cos \theta_{\max}} \quad (4.1)$$

โดยที่ L_{110} คือขนาดอนุภาคของเหล็กที่มีระนาบผลึกเป็น [110] (นาโนเมตร); $\lambda_{k\alpha 1}$ คือความยาวคลื่นของ X-rays; $B_{2\theta}$ คือความกว้างที่ความเข้มครึ่งหนึ่งของพีก [110] (เรเดียน) และ θ_{\max} คือมุม Bragg ของการสะท้อนของรังสี (เรเดียน)

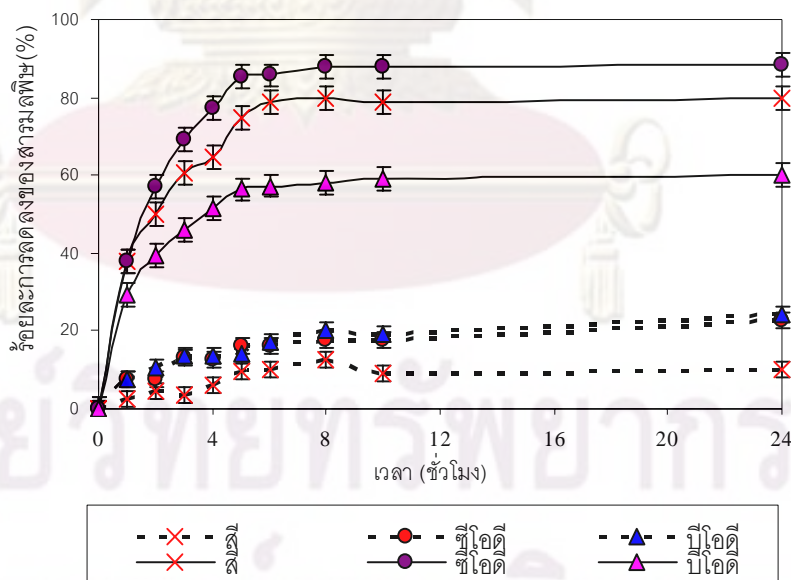


ภาพที่ 4.2 สัณฐานวิทยาและการแจกตัวของขนาดอนุภาคของ (ก) เหล็กไมโครที่มีในทางการค้า และ (ข) เหล็กนาโนที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ที่กำลังขยาย 200,000 เท่า

ภาพที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายสัณฐานวิทยาของเหล็กนาโนและเหล็กไมโครด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ที่กำลังขยาย 200,000 พบว่าอนุภาคของเหล็กนาโนและเหล็กไมโครจะมีลักษณะที่คล้ายกันคือมีลักษณะเป็นทรงกลมวางซ้อนทับกันอย่างไม่เป็นระเบียบ โดยที่เหล็กนาโนมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 6-19 นาโนเมตร หรือมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย

เท่ากับ 12.82 ± 2.59 นาโนเมตร ส่วนอนุภาคของเหล็กไมโครมีขนาดอนุภาคในช่วง 2-10 ไมโครเมตร ค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคเท่ากับ 5.71 ± 2.32 ไมโครเมตร ซึ่งขนาดอนุภาคที่วัดได้จากภาพถ่าย TEM ของเหล็กทั้งสองชนิดจะมีค่าใกล้เคียงกับขนาดอนุภาคที่คำนวณได้จากสมการของ Scherrer ที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น

ภาพที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสี ซีโอดี และบีโอดี ในน้ำเสีย เมื่อผ่านการบำบัดด้วยเหล็กนาโนที่เตรียมได้ในห้องปฏิบัติการและเหล็กไมโครที่มีในทางการค้า ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 อัตราการเขย่าที่ 170 รอบต่อนาที การเจือจางน้ำเสีย 50 เท่า (ความเข้มข้นของสี 9600 หน่วยสี และซีโอดี 5400 บีโอดี 3700 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ) และอัตราส่วนระหว่างเหล็กต่อน้ำเสียเท่ากับ 7.5 กรัมต่อลิตร จากภาพพบว่าร้อยละการลดของสี ซีโอดี และบีโอดี จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อผ่านการบำบัดด้วยเหล็กนาโน กล่าวคือ สี ซีโอดี และบีโอดี จะลดถึงร้อยละ 81.3 87.4 และ 62.4 ตามลำดับ ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ในขณะที่การลดค่าสี ซีโอดี และบีโอดี ในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยเหล็กไมโครจะเกิดขึ้นประมาณร้อยละ 20-30 ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากเหล็กนาโนมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าจึงมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่า ดังนั้นในงานวิจัยที่จะศึกษาต่อไปจึงเป็นการบำบัดน้ำเสียด้วยเหล็กนาโนที่เตรียมได้เองในห้องปฏิบัติการ



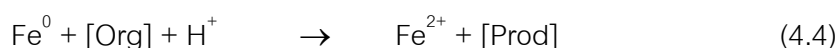
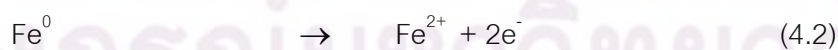
ภาพที่ 4.3 ร้อยละการลดของสารมลพิษในน้ำเสียบนเวลาเมื่อผ่านการบำบัดด้วยเหล็กนาโน (—) และเหล็กไมโคร(- - -)

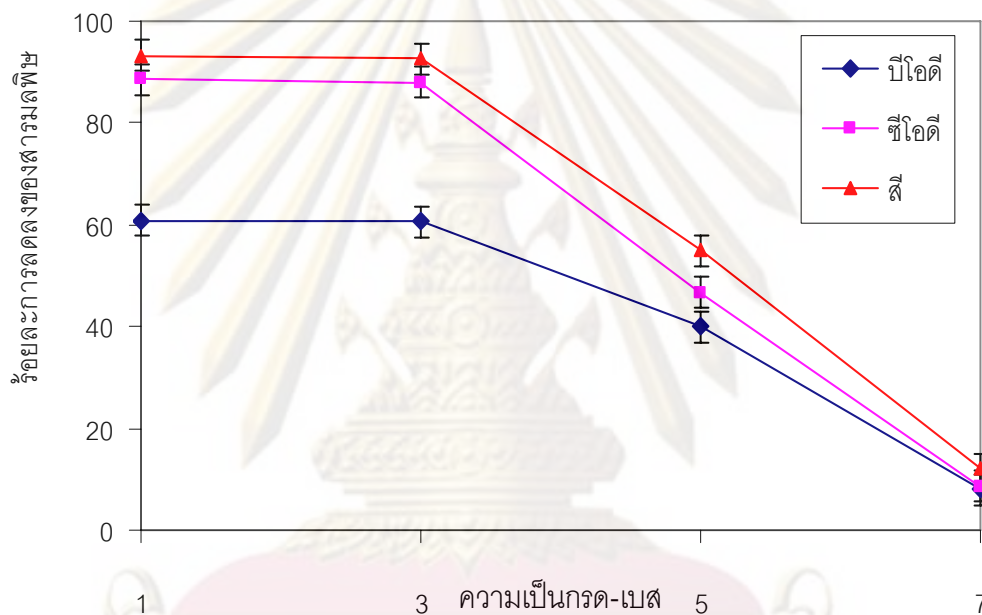
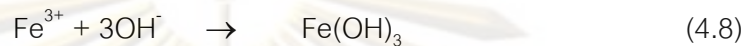
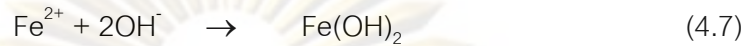
4.2.2 ภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียด้วยเหล็กนาโน

การศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยเหล็กนาโนจะศึกษาในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้อง โดยตัวแปรที่จะศึกษาได้แก่ ผลของค่าความเป็นกรด-เบส การเจือจางน้ำตัวอย่าง อัตราการเขย่า และอัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนและน้ำเสีย

4.2.2.1 ผลของความเป็นกรด-เบส

การศึกษาผลของความเป็นกรด-เบสในการบำบัดน้ำเสียด้วยเหล็กนาโนจะศึกษาในช่วง 1 – 7 โดยใช้ น้ำเสียเจือจาง 50 เท่า (ความเข้มข้นของสี 8700 หน่วยสี และซีไอดี 5500 บีไอดี 3900 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ) เขย่าด้วยความเร็ว 170 รอบต่อนาที และอัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนต่อน้ำเสีย 10 กรัมต่อลิตร จากรูปที่ 4.4 พบว่าร้อยละในการกำจัดสารมลพิษ มีแนวโน้มลดตามค่าความเป็นกรด-เบสที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 1 และ 3 จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียใกล้เคียงกัน กล่าวคือ ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 1 และ 3 จะสามารถลดค่าสีได้ร้อยละ 93.2 และ 92.6 ลดค่าของซีไอดีได้ร้อยละ 88.6 และ 85.9 และลดค่าบีไอดีได้ร้อยละ 60.87 และ 60.56 ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรด-เบสต่ำเหล็กสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีเนื่องจากเหล็กมีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เท่ากับ -0.44 โวลต์. เมื่อเหล็กเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเหล็กจะเสียอิเล็กตรอน (e^-) เป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ดังแสดงในสมการที่ (4.2) และอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่จากพื้นที่ผิวของเหล็กนาโนเข้าไปทำลายพันธะของสารมลพิษให้แตกตัวเป็นไอออน $[X^-]$ ดังแสดงในสมการที่ (4.3)-(4.4) ซึ่งพบว่าการแตกตัวของสารมลพิษจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในภาวะที่เป็นกรด (แก้วตา, 2542) นอกจากนี้พบว่าในระบบยังมีการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำได้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ซึ่งจะจับตัวกับ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา (4.4) และ (4.5) ได้เป็น $Fe(OH)_2$ และ $Fe(OH)_3$ ดังแสดงในสมการ (4.7) และ (4.8) ตามลำดับ ซึ่งสารดังกล่าวจะมีสมบัติเป็นสารก่อกองจับก้อน (Coagulant) ซึ่งจะเป็นส่วนที่ช่วยให้เกิดการลดของสารมลพิษเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นในงานที่จะศึกษาต่อไปจะศึกษาที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3



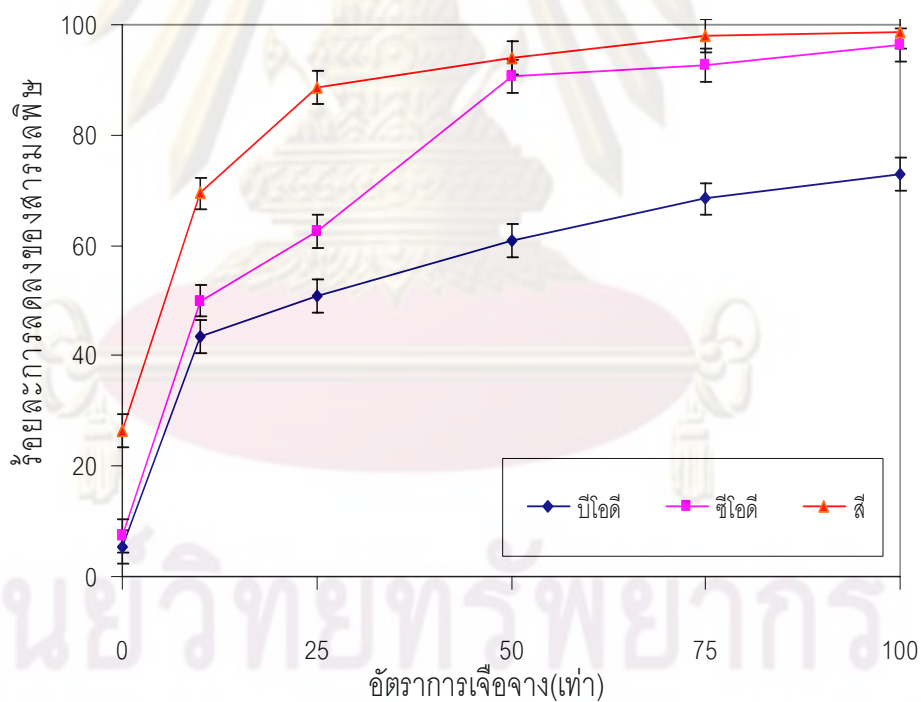


ภาพที่ 4.4 ผลของค่าความเป็นกรด-เบส ต่อร้อยละการลดของสารมลพิษ ที่อัตราการเจือจาง 50 เท่า อัตราการเขย่า 170 รอบต่อนาที ในเวลา 24 ชั่วโมง และอัตราส่วนระหว่างเหล็กกับไดออกไซด์เท่ากับ 10 กรัมต่อลิตร

4.2.2.2 ผลของการเจือจางน้ำเสีย

ภาพที่ 4.5 แสดงผลของอัตราการเจือจางน้ำเสียต่อร้อยละการลดของสารมลพิษ โดยจะทำการศึกษาผลของการเจือจางทั้งหมด 6 ค่า คือ 0 10 25 50 75 และ 100 เท่า ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิห้องโดยใช้น้ำตัวอย่างปริมาตร 200 มิลลิลิตร อัตราส่วนระหว่างเหล็กกับไดออกไซด์เท่ากับ 10 กรัมต่อลิตร เขย่าด้วยความเร็วที่ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพในการลดซีโอดี และบีโอดี มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นที่ปริมาณการเจือจางมากขึ้น โดยที่น้ำเสียที่ไม่มีการเจือจางและน้ำเสียที่เจือจางที่ 10 เท่า และ 25 เท่า จะให้ประสิทธิภาพของ

การลดค่าสีได้ร้อยละ 26.5 69.4 และ 88.7 ตามลำดับ ลดค่าซีไอดีได้ร้อยละ 7.3 50.0 และ 62.6 ตามลำดับ และลดค่าบีไอดีได้ร้อยละ 5.2 43.6 และ 50.7 ทั้งนี้เนื่องจากการที่ค่าการเจือจางต่ำน้ำเสียจะมีปริมาณสารมลพิษมาก ปริมาณของเหล็กนาโนที่เติมลงไปอาจไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยา แต่เมื่อทำการเจือจางน้ำเสียมากขึ้นปริมาณสารมลพิษในระบบจะมีความเข้มข้นลดลง ปริมาณเหล็กนาโนที่เติมลงไปจึงเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้น แต่เมื่อทำการเจือจางน้ำเสีย 75 เท่า และ 100 เท่า พบว่าร้อยละการลดลงของสารมลพิษจะมีแนวโน้มคงที่ เพราะในน้ำเสียมีปริมาณสารมลพิษน้อยระบบจึงถูกควบคุมด้วยการถ่ายโอนมวลของสารมลพิษมาที่พื้นที่ผิวของเหล็กนาโน อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการลดของบีไอดีมีแนวโน้มที่ต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กนาโนยังมีประสิทธิภาพต่ำในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ต้องการออกซิไดซ์ด้วยจุลินทรีย์ได้ ซึ่งโดยทั่วไปการกำจัดสารอินทรีย์จะใช้ระบบชีวโมเลกุลในการบำบัด



รูปที่ 4.5 ผลของการเจือจางต่อร้อยละการลดของสารมลพิษที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 อัตราการเขย่าที่ 170 รอบต่อนาที ในเวลา 24 ชั่วโมง และอัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนต่อน้ำเสียเท่ากับ 10 กรัมต่อลิตร

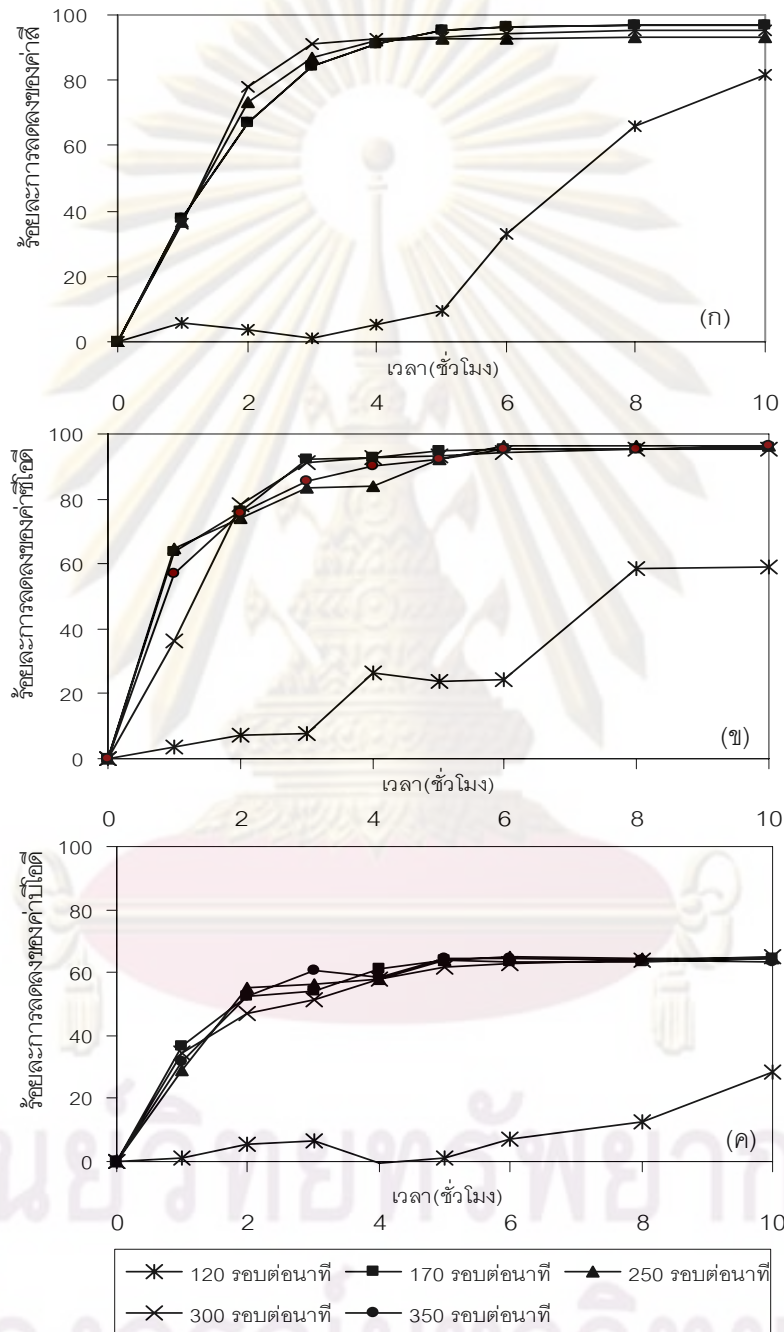
4.2.2.3 ผลของความเร็วยของการเขย่า

การศึกษาผลของความเร็วยในการเขย่าต่อการลดของสารมลพิษจะศึกษาทั้งหมด 5 ค่า คือ 120 170 250 300 และ 350 รอบต่อนาที โดยใช้น้ำเสียที่มีการเจือจาง 50 เท่า (ความเข้มข้นของสี 9300 หน่วยสี และซีไอดี 5400 บีไอดี 3700 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ) ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 และอัตราส่วนระหว่างเหล็กต่อน้ำเสียที่ 10 กรัมต่อลิตร จากภาพที่ 4.6 พบว่าที่อัตราการเขย่า 120 รอบต่อนาที ร้อยละการลดของสีจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงแรกจนถึงชั่วโมงที่ 5 แต่หลังจากชั่วโมงที่ 5 จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนร้อยละการลดลงของซีไอดีจะเหมือนกันกับค่าสีแต่หลังจากชั่วโมงที่ 6 จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และบีไอดีจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามชั่วโมง ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากที่อัตราการเขย่าต่ำการสัมผัสกันระหว่างเหล็กนาโนและสารมลพิษอาจเกิดขึ้นอย่างไม่ทั่วถึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียต่ำ แต่เมื่อเพิ่มการเขย่าเป็น 170-350 รอบต่อนาที พบว่าร้อยละการลดของสี ซีไอดี และบีไอดี จะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยร้อยละการลดของสารมลพิษจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วใน 6 ชั่วโมงแรกและหลังจากนั้นมีแนวโน้มคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากการเขย่าจะเป็นการเพิ่มโอกาสการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคของเหล็กนาโนและสารมลพิษ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการเขย่าที่เพียงพอจะช่วยการลดข้อจำกัดในการถ่ายโอนมวลในระบบอีกด้วย (Nam และ Tratnyek 2000)

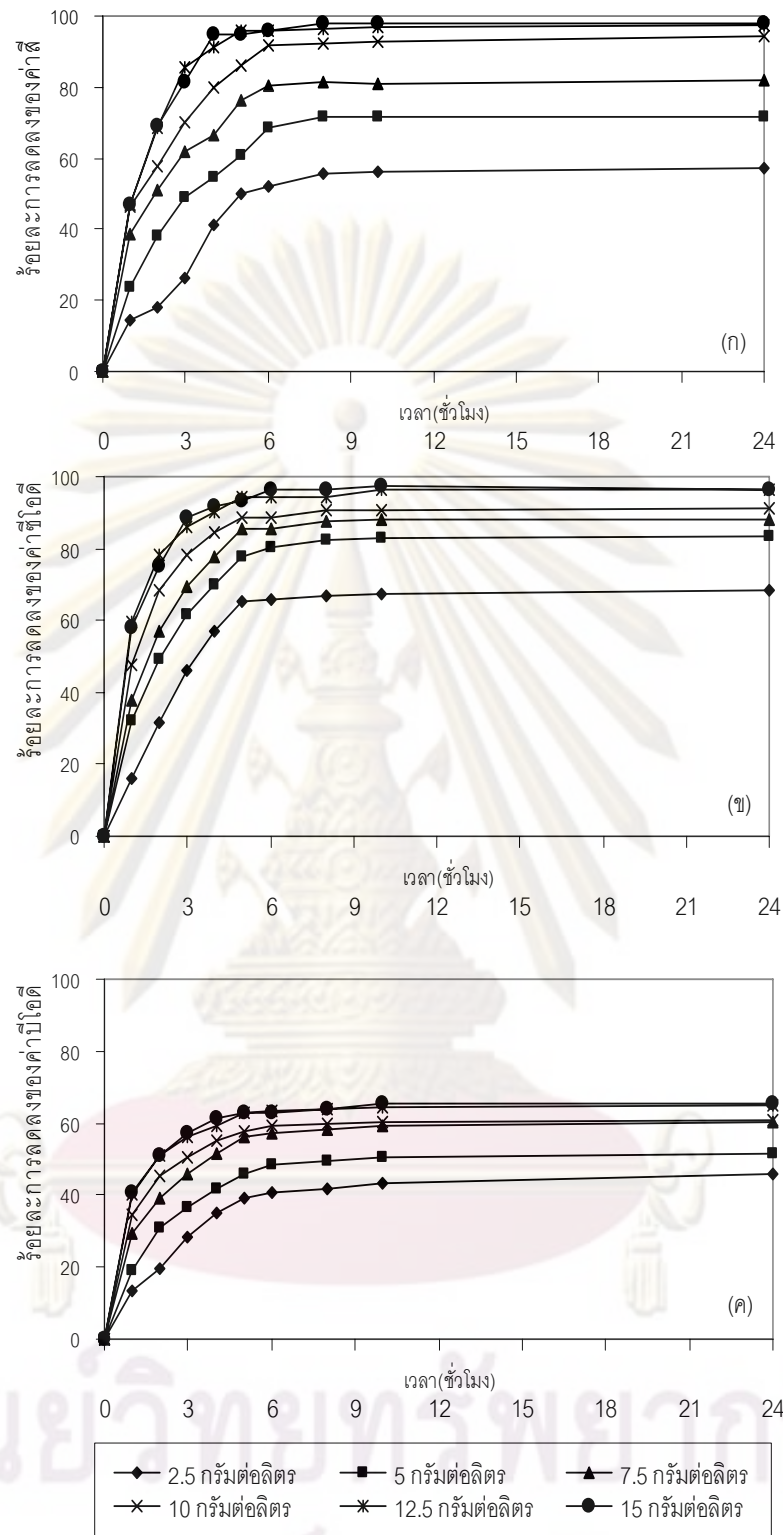
4.2.2.4 ผลของอัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนต่อน้ำเสีย

ภาพที่ 4.7 แสดงผลของอัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนต่อน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียในช่วง 2.5-15 กรัมต่อลิตร โดยใช้น้ำเสียที่อัตราการเจือจางน้ำเสีย 50 เท่า (ความเข้มข้นของสี 10600 หน่วยสี และซีไอดี 6900 บีไอดี 5400 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ) ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 และเขย่าด้วยความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กนาโนจาก 2.5 กรัมต่อลิตรไปที่ 12.5 กรัมต่อลิตร ร้อยละการลดของสารมลพิษจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือร้อยละการลดลงของสี ซีไอดี และบีไอดีจะมีค่าเท่ากับร้อยละ 93.3 90.5 และ 60.8 เมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง เนื่องจากเมื่อใช้ปริมาณเหล็กมากขึ้นระบบจะมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น (Ma และคณะ 2004) ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้น อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการบำบัดจะคงที่เมื่อเวลามากกว่า 6 ชั่วโมง ทั้งนี้อาจเนื่องจากเมื่อเวลาของการบำบัดมากขึ้น ความเข้มข้นของสารมลพิษในน้ำเสียน้อยลง ส่งผลให้ระบบถูกควบคุมด้วยการถ่ายโอนมวลของสารมลพิษมาที่พื้นผิวของเหล็ก หรืออาจเนื่องจากระบบเข้าภาวะสมดุลทำให้เหล็กไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้มากกว่านี้แล้วจึงส่งผลให้ร้อยละการลดของสารมลพิษคงที่ และเมื่อเพิ่ม

ปริมาณเหล็กนาโนในระบบจนถึง 15 กรัมต่อลิตร พบว่าร้อยละการลดของสารมลพิษจะไม่แตกต่างกับร้อยละการลดเมื่อเติมเหล็กนาโน 12.5 กรัมต่อลิตร เนื่องจากเมื่อมีปริมาณเหล็กนาโนมาก



ภาพที่ 4.6 ผลของการเขย่าต่อร้อยละการลดของสารมลพิษ โดยใช้อัตราการเจือจางน้ำเสีย 50 เท่า ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 และอัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนต่อน้ำเสียเท่ากับ 10 กรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4.7 ผลของอัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนและน้ำเสียต่อร้อยละการดูดซับของสารมลพิษ โดยใช้อัตราการใช้เจือจางน้ำเสีย 50 เท่า ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 และเขย่าที่

ความเร็ว 170 รอบต่อนาที

ปริมาณสารมลพิษในระบบจะลดอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้การถ่ายโอนมวลของสารมลพิษมาที่พื้นผิวของเหล็กนาโนเป็นตัวควบคุมระบบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cao และคณะ (1999) Deng และคณะ (2000) และ Ghauch และคณะ (2001) จากผลการทดลองในส่วนนี้จึงกล่าวได้ว่าปริมาณเหล็กนาโนที่เหมาะสมคือ 12.5 กรัมต่อลิตร

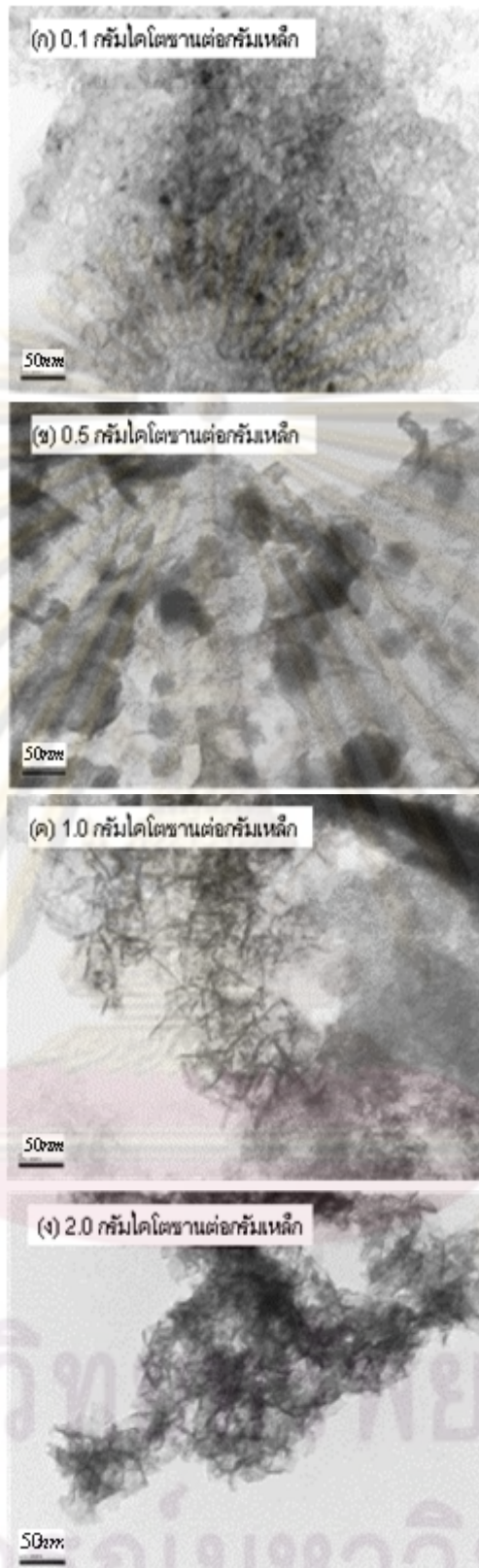
4.2.3 ภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียด้วยเหล็กนาโนดัดแปร

4.2.3.1 ผลของตัวรองรับ

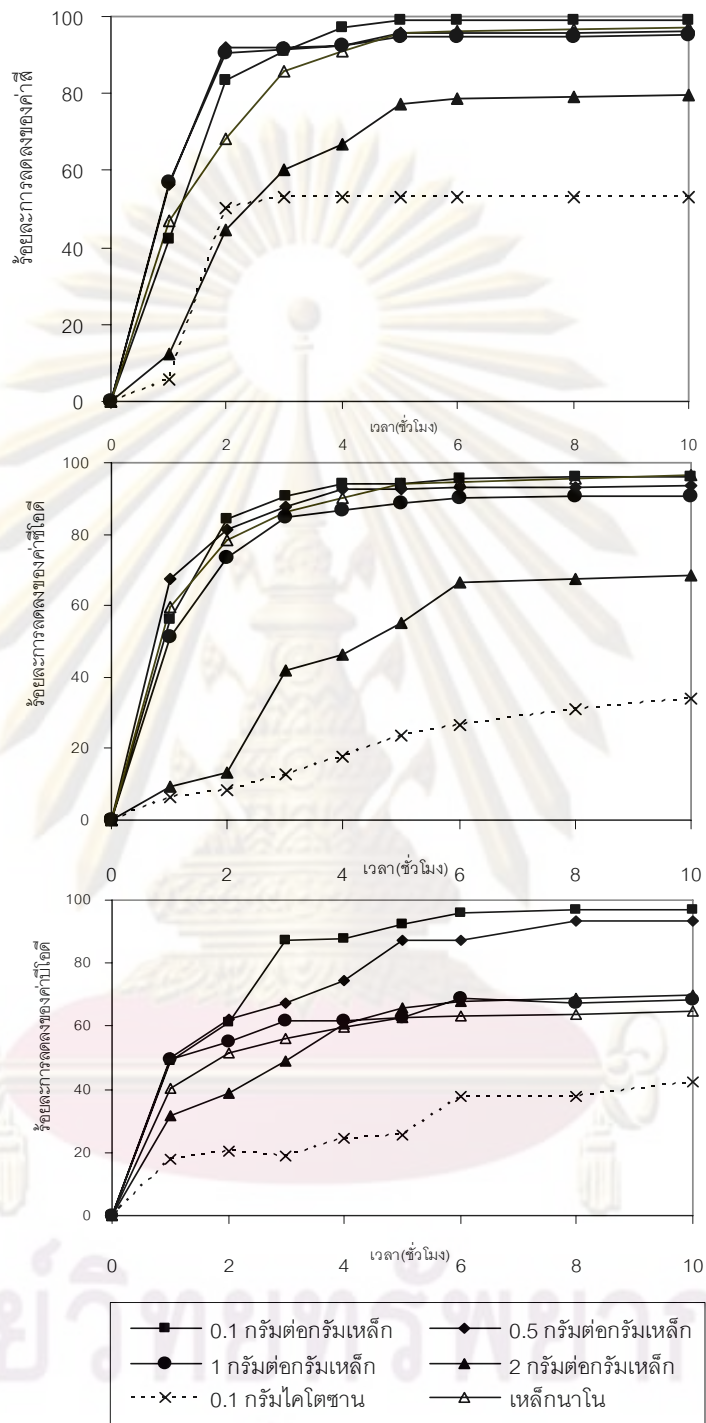
จากการบำบัดน้ำเสียด้วยเหล็กนาโนในหัวข้อ 4.2.2 พบว่าการบำบัดน้ำเสียด้วยเหล็กนาโนสามารถลดสีและซีโอดีในน้ำเสียได้มากกว่าร้อยละ 95 ที่ภาวะที่น้ำเสียผ่านการเจือจาง 50 เท่า ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 อัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนและน้ำเสีย 12.5 กรัมต่อลิตร และเขย่าที่ความเร็ว 170 รอบต่อนาที เมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง แต่ที่ภาวะดังกล่าวสามารถลดบีโอดีได้เพียงร้อยละ 64.8 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดสารมลพิษในน้ำเสีย ในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลของการเติมตัวรองรับ โดยตัวรองรับที่จะใช้มี 2 ชนิด คือไคโตซานและซิลิกาฟูม โดยจะศึกษาปริมาณตัวรองรับใน 4 ค่าในช่วง 0.1 0.5 1 และ 2.0 กรัมต่อกรัมเหล็ก ใช้น้ำเสียผ่านการเจือจาง 50 เท่า ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 อัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนดัดแปรและน้ำเสีย 12.5 กรัมต่อลิตรและเขย่าที่ความเร็ว 170 รอบต่อนาที ภาพที่ 4.8 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาของเหล็กนาโนบนไคโตซานด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่กำลังขยาย 200,000 เท่า พบว่าเหล็กนาโนบนตัวรองรับไคซานที่ปริมาณ 0.1 กรัมต่อกรัมเหล็ก (ภาพที่ 4.8 (ก)) จะมีลักษณะกลมเล็กกระจายกันอย่างไม่เป็นระเบียบ สามารถมองเห็นอนุภาคของเหล็กและไคโตซานในปริมาณที่น้อย ส่วนเหล็กนาโนบนตัวรองรับไคซานที่ปริมาณ 0.5 กรัมต่อกรัมเหล็ก จะประกอบด้วยอนุภาคเหล็กนาโนขนาดเล็กและใหญ่ปะปนกันอยู่อย่างกระจาย โดยจะเห็นไคโตซานกระจายอยู่รอบนอกและปกคลุมเม็ดเหล็กบางส่วน ดังแสดงในภาพที่ 4.8 (ข) เมื่อเพิ่มปริมาณไคโตซานเป็น 1.0 กรัมต่อกรัมเหล็ก (ภาพที่ 4.8 (ค)) พบว่าจะเห็นภาพของโครงสร้างไคโตซานเป็นส่วนใหญ่ โดยอนุภาคของเหล็กนาโนเกาะตามกิ่งของไคโตซานบางส่วน และเมื่อเพิ่มปริมาณไคโตซานเป็น 2.0 กรัมต่อกรัมเหล็ก พบว่าจะเห็นไคโตซานอย่างหนาแน่นและไม่สามารถมองเห็นอนุภาคของเหล็กนาโน (ภาพที่ 4.8 (ง))

ภาพที่ 4.9 แสดงร้อยละการลดของสารมลพิษในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยโคโตซาน (0.1 กรัมต่อลิตร) และเหล็กนาโนบนโคโตซานที่ปริมาณต่างๆ พบว่าเมื่อในระบบมีแต่โคโตซานเพียงอย่างเดียว ร้อยละการลดสี ซีไอดี และ บีไอดี จะมีค่าประมาณร้อยละ 52.1 28.0 และ 37.8 ตามลำดับ ที่เวลา 6 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาร้อยละการลดของสารมลพิษในน้ำเสียเมื่อผ่านการบำบัดด้วยเหล็กนาโนบนโคโตซาน พบว่าร้อยละการลดของสีและซีไอดีในน้ำเสียจะไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อผ่านการบำบัดด้วยเหล็กนาโนบนโคโตซานที่มีปริมาณโคโตซาน 0.1-1.0 กรัมต่อกรัมน้ำเสีย และจะให้ผลไม่แตกต่างกับการบำบัดด้วยเหล็กนาโนเพียงอย่างเดียว โดยร้อยละการลดของสีและซีไอดีจะอยู่ในช่วงร้อยละ 94.0-99.2 และ 90.1-96.4 ตามลำดับ ที่เวลา 6 ชั่วโมง แต่เมื่อพิจารณาการลดของบีไอดีในน้ำเสียพบว่าเหล็กนาโนบนโคโตซานจะสามารถลดค่าบีไอดีได้มากกว่าการใช้เหล็กนาโนอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากโคโตซานมีประจุบวกและมีความพรุนจึงสามารถดูดซับสารมลพิษได้ นอกจากนี้การใช้โคโตซานเป็นตัวรองรับยังช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาอีกด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณโคโตซานมากขึ้น พบว่าประสิทธิภาพในการลดค่าบีไอดีจะต่ำลง กล่าวคือ เมื่อเพิ่มโคโตซานจาก 0.1 กรัมต่อกรัมเหล็ก เป็น 1.0 กรัมต่อกรัมเหล็ก บีไอดีจะลดจากร้อยละ 96.0 เป็นร้อยละ 68.6 เนื่องจากการมีโคโตซานที่มากเกินไปจะทำให้อนุภาคของเหล็กถูกบดบัง ส่งผลให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาลดซึ่งสอดคล้องกับภาพที่ 4.8 และเมื่อเพิ่มปริมาณโคโตซานเป็น 2.0 กรัมต่อกรัมเหล็ก พบว่าร้อยละการลดของสารมลพิษทั้ง 3 ชนิดจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือการลดสีจะลดจากร้อยละ 94.4 เป็นร้อยละ 93.8 การลดซีไอดีจะลดจากร้อยละ 90.2 เป็นร้อยละ 66.4 และการลดบีไอดีจะลดจากร้อยละ 68.6 เป็นร้อยละ 66.0 เนื่องจากปริมาณโคโตซานที่มากเกินไปบดบังพื้นที่ผิวของเหล็กในการเกิดปฏิกิริยาทำให้การลดของสารมลพิษต่ำนั่นเอง

ภาพที่ 4.10 แสดงสีของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยเหล็กนาโนบนโคโตซานที่ปริมาณโคโตซานต่างๆ พบว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยเหล็กนาโนบนโคโตซานจะมีสีเข้มขึ้นเมื่อมีปริมาณโคโตซานในระบบเพิ่มขึ้นโดยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยเหล็กบนโคโตซานที่มีโคโตซานเท่ากับ 0.1 กรัมต่อกรัมเหล็ก จะมีสีที่ใสที่สุด

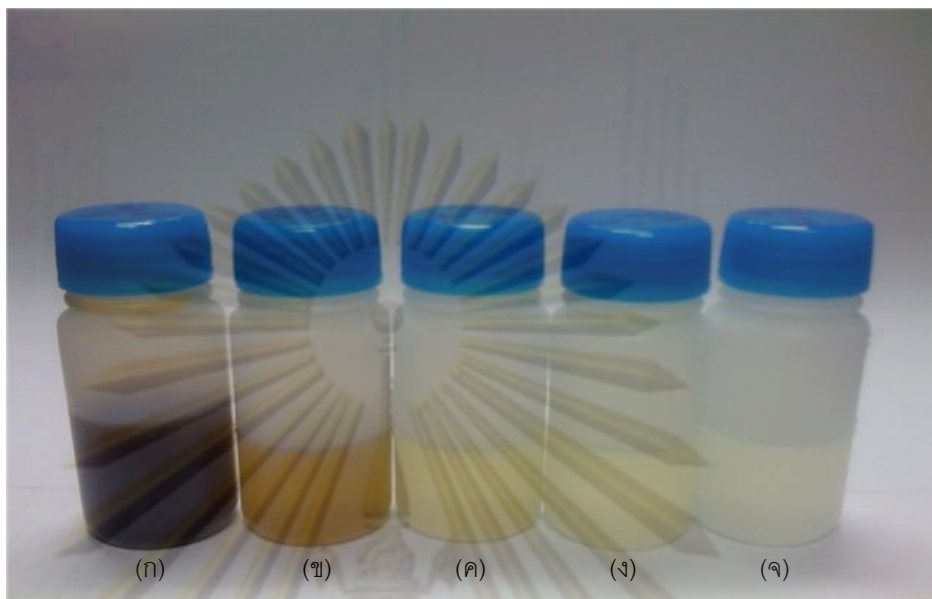


ภาพที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของเหล็กนาโนบนตัวรองรับโคโตซานที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่กำลังขยาย 200,000 เท่า



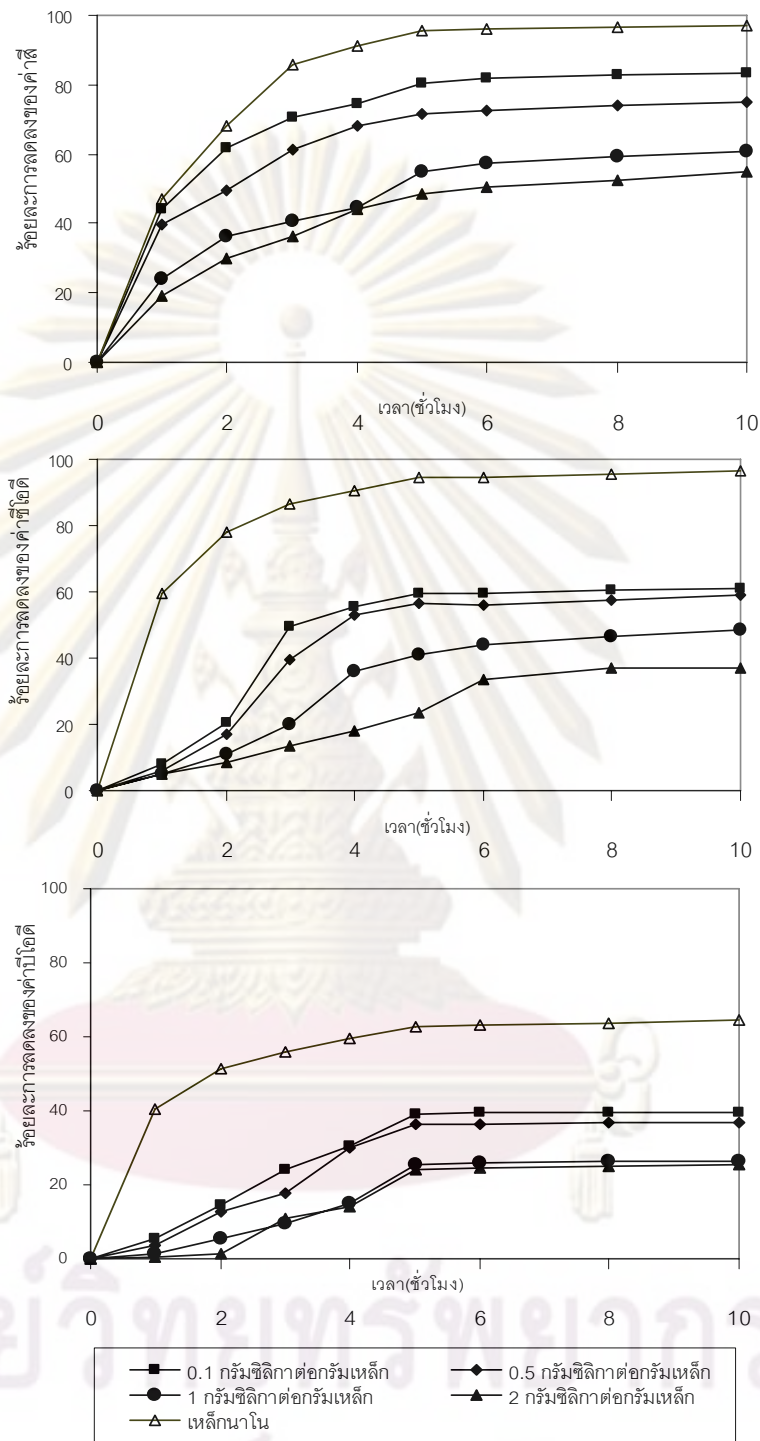
ภาพที่ 4.9 ผลของตัวรองรับโคโคซานต่อร้อยละการงอกของสารมลพิษ โดยใช้อัตราการเจือจางน้ำเสีย 50 เท่า ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 อัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนบนโคโคซานต่อน้ำเสีย

เท่ากับ 12.5 กรัมต่อลิตร และเขย่าที่ความเร็ว 170 รอบต่อนาที

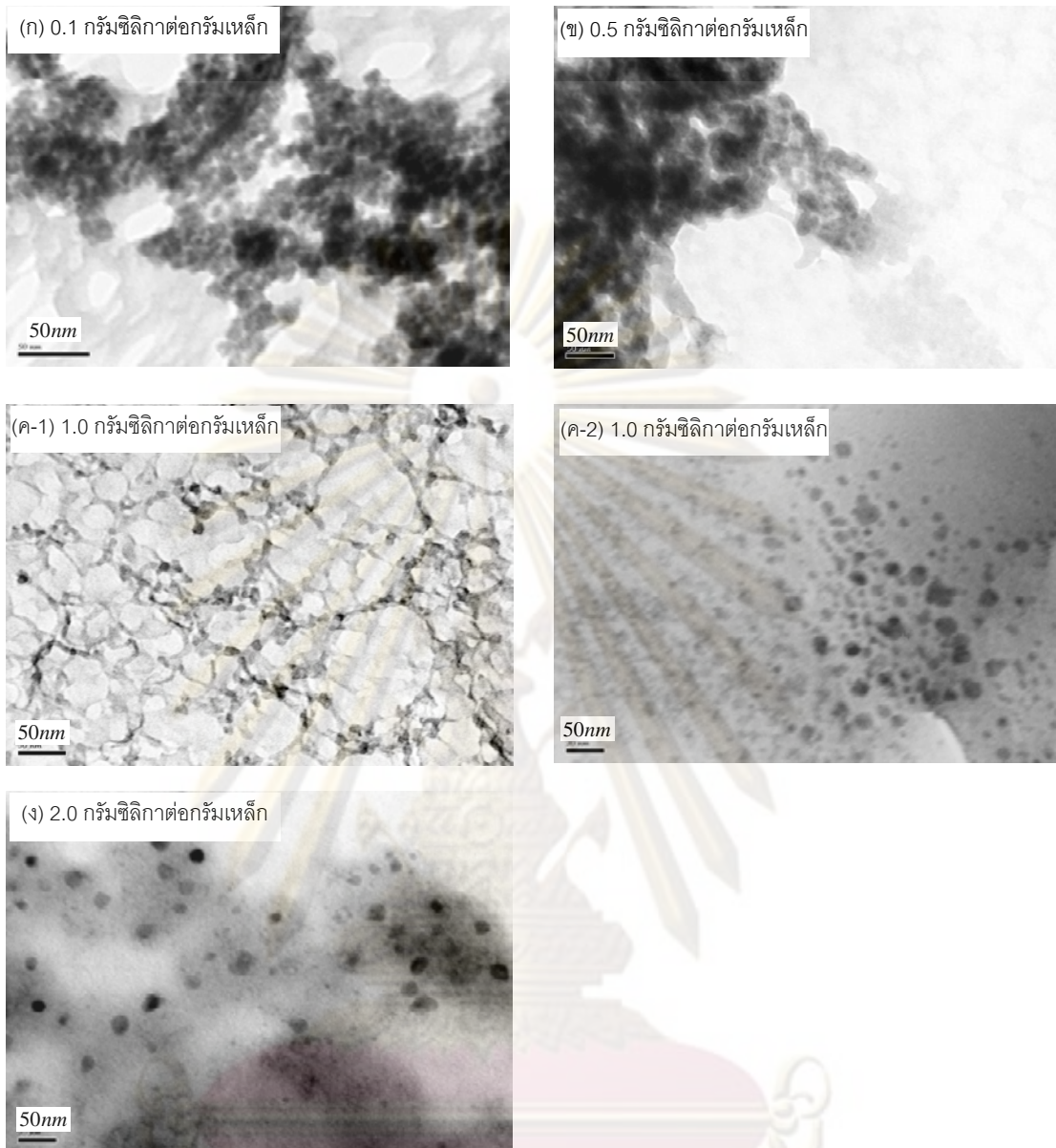


ภาพที่ 4.10 ลักษณะของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยเหล็กนาโนบนตัวรองรับไคโตซานที่มีปริมาณไคโตซาน (ก) น้ำเสียเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองเมื่อผ่านการเจือจาง 50 เท่า (ข) 2.0 กรัมต่อกรัมเหล็ก (ค) 1.0 กรัมต่อกรัมเหล็ก (ง) 0.5 กรัมต่อกรัมเหล็ก และ (จ) 0.1 กรัมต่อกรัมเหล็ก

ผลของตัวรองรับซิลิกาต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยเหล็กนาโนบนตัวรองรับจะศึกษาที่อัตราส่วนระหว่างซิลิกาต่อเหล็กนาโนเท่ากับ 0.1 0.5 1.0 และ 2.0 กรัมซิลิกาต่อกรัมเหล็กนาโน โดยใช้ น้ำเสียที่ผ่านการเจือจางน้ำเสีย 50 เท่า (ความเข้มข้นของสี 9800 หน่วยสี และซีไอดี 5400 บีไอดี 3700 มิลลิกรัมต่อลิตร) ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 อัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนบนซิลิกาต่อน้ำเสียเท่ากับ 12.5 กรัมต่อลิตร และเขย่าด้วยความเร็วที่ 170 รอบต่อนาที พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยเหล็กนาโนบนซิลิกาจะต่ำกว่าการบำบัดน้ำเสียด้วยเหล็ก นาโนเพียงอย่างเดียวดังแสดงในภาพที่ 4.11 โดยเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกามากขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจะยิ่งต่ำลง เนื่องจากซิลิกาที่เติมลงไปไม่ได้ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาแต่ไปบดบังพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาซึ่งสามารถยืนยันได้จากภาพถ่ายด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (ภาพที่ 4.12) ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าอนุภาคของเหล็กนาโนจะมีลักษณะเป็นเม็ดกลมและถูกปกคลุมด้วยซิลิกาซึ่งมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง โดยเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาอนุภาคของเหล็กก็จะถูกปกคลุมด้วยฟิล์มที่หนาขึ้น

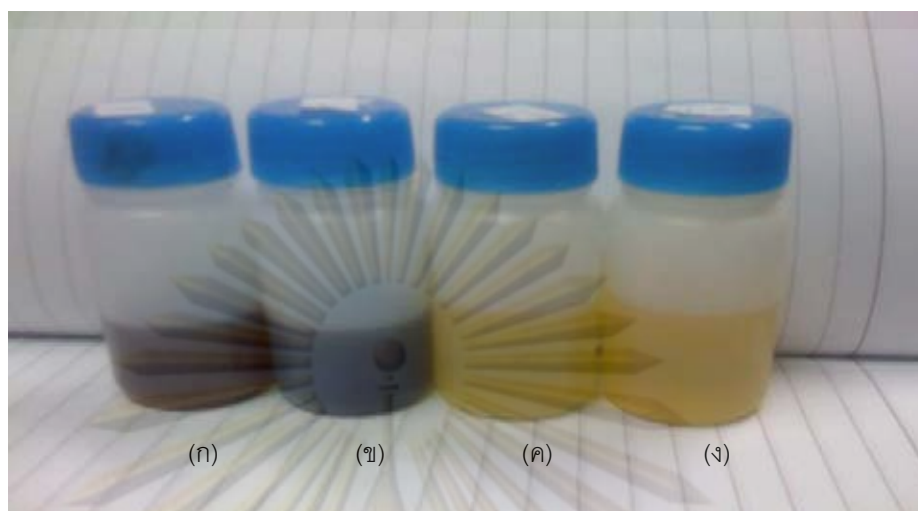


ภาพที่ 4.11 ผลของตัวรองรับซิลิกาต่อร้อยละการลดของสารมลพิษ โดยใช้อัตราการเจือจางน้ำเสีย 50 เท่า ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 อัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนบนโคโคซานต่อน้ำเสียเท่ากับ 12.5 กรัมต่อลิตร และเขย่าที่ความเร็ว 170 รอบต่อนาที



ภาพที่ 4.12 สัณฐานวิทยาของเหล็กนาโนบนตัวรองรับซิลิกาที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อวิเคราะห์ด้วย เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่กำลังขยาย 200,000 ((ก) (ข) และ (ค-1)) และ กำลังขยาย 300,000 เท่า ((ค-2) และ (ง))

ภาพที่ 4.13 แสดงลักษณะของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยเหล็กนาโนบนตัวรองรับซิลิกาที่ปริมาณซิลิกาต่างๆ พบว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยเหล็กนาโนซิลิกาจะมีสีเข้มขึ้นขึ้นเมื่อมีปริมาณซิลิกาในระบบเพิ่มขึ้น โดยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยเหล็กนาโนซิลิกาที่มีซิลิกาเท่ากับ 0.1 กรัมต่อกรัมเหล็ก จะมีสีอ่อนที่สุดแต่ไม่ว่าจะแสดงว่าน้ำเสียดังกล่าวยังมีสารมลพิษเจือปนอยู่ค่อนข้างมาก

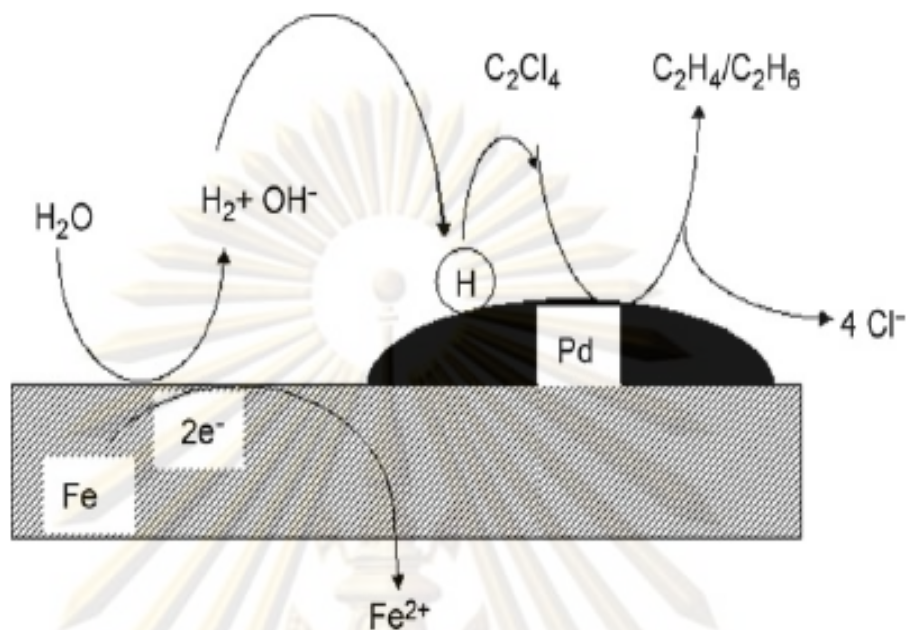


ภาพที่ 4.13 ลักษณะของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยเหล็กนาโนบนตัวรองรับซิลิกาที่มี ปริมาณซิลิกา (ก) 2 กรัม (ข) 1 กรัม (ค) 0.5 กรัม และ (ง) 0.1 กรัม

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยเหล็กนาโนบนโคโตซานและเหล็กนาโนบนซิลิกาจะพบว่าเหล็กนาโนบนโคโตซานมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าเหล็กนาโนบนซิลิกา อย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือเมื่อใช้ตัวรองรับที่ปริมาณเท่ากัน เช่น 0.1 กรัมตัวรองรับต่อกรัมเหล็กนาโน พบว่าร้อยละการลดของสี ซีไอดี และบีไอดี จะมีค่าประมาณ 99.1 96.1 และ 97.2 ตามลำดับ ที่เวลา 6 ชั่วโมง เมื่อบำบัดด้วยเหล็กนาโนบนโคโตซาน และมีค่าประมาณร้อยละ 77.6 59.6 และ 39.5 ที่เวลาเดียวกัน เมื่อบำบัดด้วยเหล็กนาโนบนซิลิกา

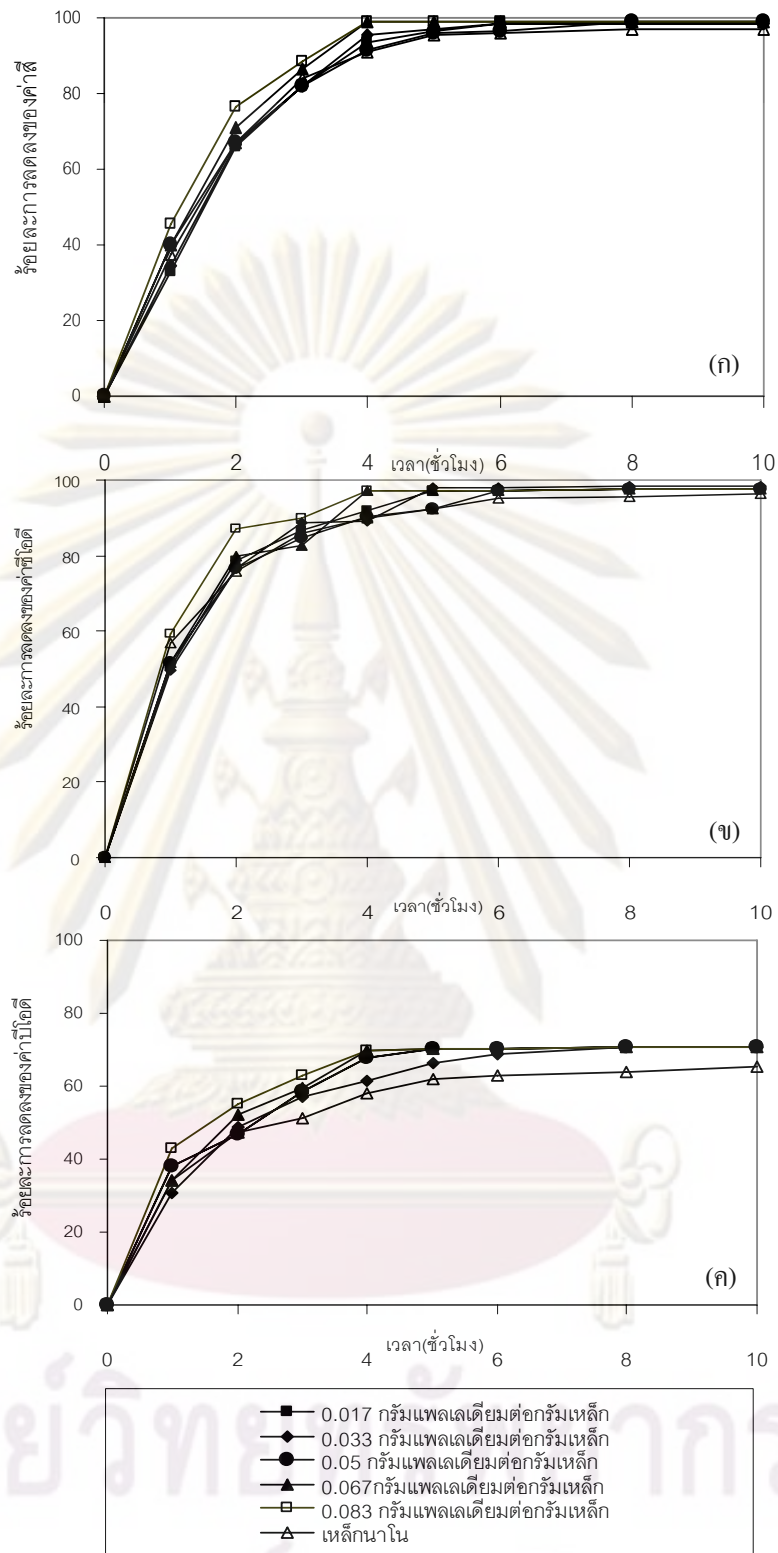
4.2.3.2 ผลของโลหะตัวที่สอง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้รายงานว่าการเติมโลหะตัวที่สองหรือตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะแทรนซิชัน เช่น แพลทินัม หรือ แพลเลเดียม ลงบนเหล็กนาโนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย (Lien และ Zhang 2007 และ Wang และคณะ 2009) เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะไปเกาะอยู่บนผิวของเหล็กนาโนส่งผลให้เหล็กนาโนมีพื้นที่ผิวสัมผัสในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นและแพลเลเดียมสามารถดูดซับไฮโดรเจนและสารมลพิษที่มีในระบบเกิดปฏิกิริยา ไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) ดังแสดงในภาพที่ 4.14 จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้นเมื่อรวมกับปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็กนาโน นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยายังสามารถลดการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการได้อีกด้วย



ภาพที่ 4.14 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของโลหะคู่ผสม (Lien และ Zhang 2007)

ในงานวิจัยนี้จึงสนใจผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงในเหล็กนาโนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือแพลเลเดียม โดยจะทำการศึกษามลของอัตราส่วนของแพลเลเดียมต่อเหล็กนาโนใน 5 อัตราส่วน ในช่วงร้อยละ 0.017-0.083 กรัมแพลเลเดียมต่อกรัมเหล็ก และนำมาบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการเจือจางน้ำเสีย 50 เท่า (ความเข้มข้นของสี 9800 หน่วยสี และซีไอดี 5400 บีไอดี 3700 มิลลิกรัมต่อลิตร) ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 อัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโน-แพลเลเดียมต่อน้ำเสียเท่ากับ 12.5 กรัมต่อลิตร และเขย่าด้วยความเร็วที่ 170 รอบต่อนาที จากผลการทดลองที่แสดงในภาพที่ 4.15 พบว่าการเติมแพลเลเดียมจะมีผลต่อร้อยละการลดของสารมลพิษเล็กน้อย โดยเมื่อปริมาณแพลเลเดียมเพิ่มขึ้นร้อยละการลดของสารมลพิษก็จะเพิ่มขึ้น กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณแพลเลเดียมจาก 0.017 กรัม ไปที่ 0.083 กรัม จะให้ร้อยละการลดของสี ซีไอดี และบีไอดี เพิ่มขึ้นจาก 96.1 เป็น 99.0 จาก 95.4 เป็น 97.5 และจาก 55.3 เป็น 70.8 ตามลำดับ ที่เวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งจากผลการทดลองในส่วนนี้จะเห็นว่าการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์ด้วยโลหะคู่ผสมเหล็กนาโน-แพลเลเดียมจะให้ผลไม่แตกต่างกับการบำบัดด้วยเหล็กนาโนเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 4.15 ผลของปริมาณแพลเลเดียมในโลหะคูปผสมเหล็กนาโน-แพลเลเดียมต่อร้อยละการลดของสารมลพิษโดยใช้อัตราการเจือจางน้ำเสีย 50 เท่า ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 อัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนบนโคโตซานต่อน้ำเสียเท่ากับ 12.5 กรัมต่อลิตร และเขย่าที่ความเร็ว 170 รอบต่อนาที

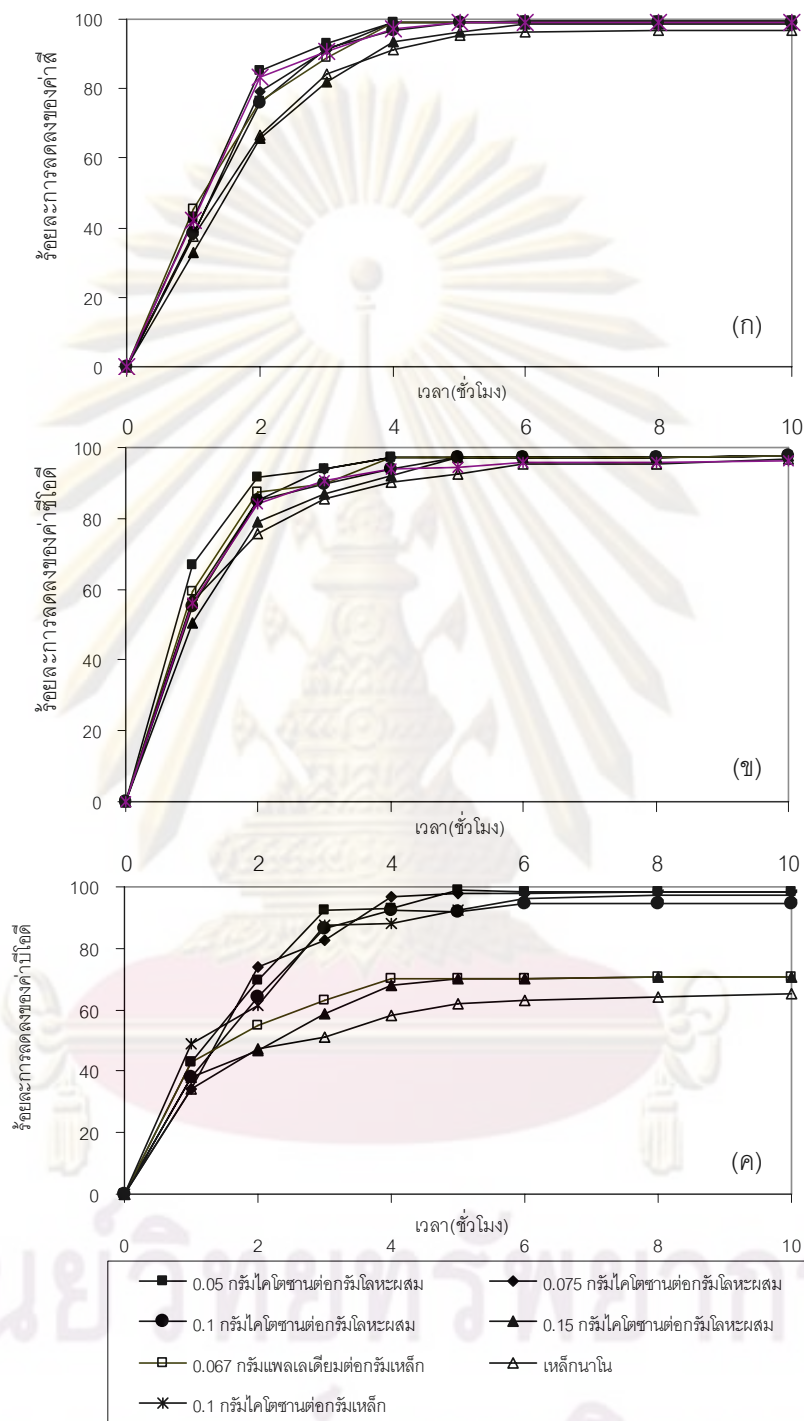
4.2.3.3 ผลของโลหะผสมบนตัวรองรับ

จากผลการทดลองที่ผ่านมาจะเห็นว่าประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์ด้วยเหล็กนาโน เหล็กนาโนบนตัวรองรับ และเหล็กนาโน-แพลเลเดียม จะยังไม่สูงมากนัก โดยประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยเหล็กนาโนบนโคโตซานจะมีค่าสูงที่สุดคือมากกว่าร้อยละ 96 ที่เวลา 6 ชั่วโมง ในหัวข้อต่อไปนี้จะสนใจการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยเหล็กนาโนบนโคโตซานโดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียม

ภาพที่ 4.16 แสดงผลของปริมาณตัวรองรับในเหล็กนาโน-แพลเลเดียมบนตัวรองรับต่อร้อยละการลดของสารมลพิษ โดยตัวรองรับที่เลือกใช้คือโคโตซานในช่วง 0.05 –0.15 กรัมต่อกรัมโลหะผสม โดยใช้น้ำเสียที่ผ่านการเจือจาง 50 เท่า (ความเข้มข้นของสี 12000 หน่วยสี และซีไอดี 7600 บีไอดี 5200 มิลลิกรัมต่อลิตร) ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 อัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโน-แพลเลเดียมบนโคโตซานเท่ากับ 12.5 กรัมต่อลิตร และความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 170 รอบต่อนาที พบว่าร้อยละการลดของสีและซีไอดีในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยเหล็กนาโน-แพลเลเดียมบนโคโตซานที่ปริมาณโคโตซานต่างๆ กัน จะแตกต่างกับร้อยละการลดของสารมลพิษในน้ำเสียเมื่อผ่านการบำบัดด้วยเหล็กนาโนบนโคโตซานเล็กน้อย กล่าวคือสามารถลดสีและซีไอดีได้ร้อยละ 99.4 และ 97.5 ตามลำดับ เมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง แสดงว่าการเติม โคโตซานสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยเหล็กนาโน-แพลเลเดียมได้ แต่การเติมโคโตซานที่ปริมาณแตกต่างกันจะมีผลเพียงเล็กน้อยต่อร้อยละการลดของสารมลพิษที่เกิดจากสารประกอบที่ทำให้เกิดสีและสารประกอบที่ย่อยสลายได้ง่ายทางเคมีได้ อย่างไรก็ตามการเติมโคโตซานจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการลดบีไอดีได้เล็กน้อย กล่าวคือการเติมโคโตซานในเหล็กนาโนบนโคโตซานที่ปริมาณ 0.075 กรัมต่อกรัมโลหะผสมจะช่วยลดระยะเวลาในการลดบีไอดี ที่ร้อยละ 95.0 จากเวลา 6 ชั่วโมง เป็น 4 ชั่วโมง

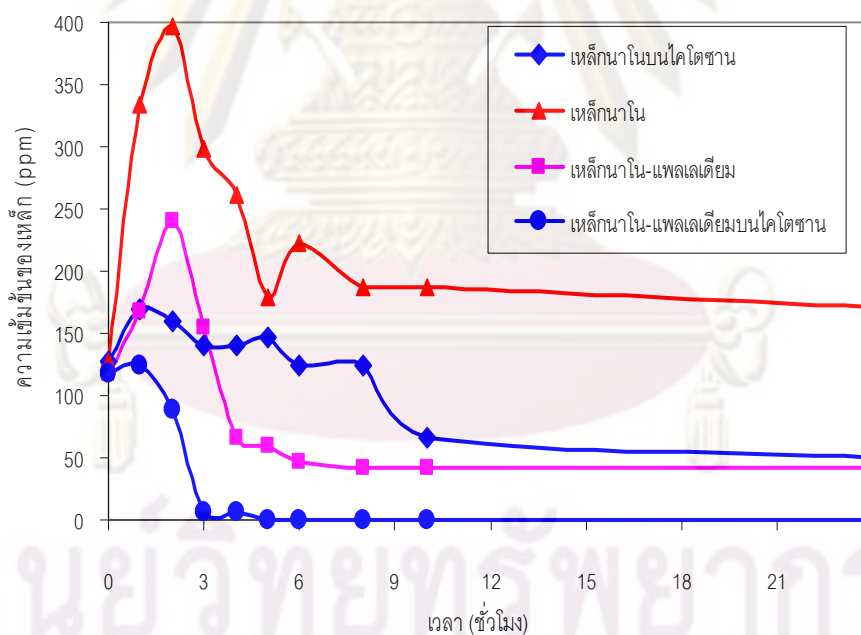
ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.16 ผลของปริมาณโคโตซานในเหล็กนาโน-แพลเลเดียมต่อร้อยละการลดของสารมลพิษ โดยใช้อัตราการเจือจางน้ำเสีย 50 เท่า ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 อัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนกับโคโตซานต่อน้ำเสียเท่ากับ 12.5 กรัมต่อลิตร และเขย่าที่ความเร็ว 170 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.17 แสดงปริมาณไอออนของเหล็กที่ตกค้างในน้ำเสียเมื่อผ่านการบำบัดด้วยเหล็กนาโนและเหล็กนาโนดัดแปร พบว่าปริมาณเหล็กในน้ำเสียจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกเมื่อบำบัดด้วยเหล็กนาโนและเหล็กนาโน-แพลเลเดียม โดยค่าการปนเปื้อนจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกถึงชั่วโมงที่ 2 หลังจากนั้นจะลดเรื่อยๆ จนคงที่ใน 24 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงแรกเหล็กจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังแสดงในปฏิกิริยา (4.2) (4.4) และ (4.5) ส่งผลให้ปริมาณไอออนของเหล็กในระบบสูงขึ้น และในขณะเดียวกันน้ำจับตัวกับอิเล็กตรอนในระบบเกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจนและไฮดรอกไซด์ ไอออนดังแสดงในปฏิกิริยา (4.6) เมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้นระบบมีการผลิตไฮดรอกไซด์ไอออนมากขึ้นด้วย โดยไฮดรอกไซด์ไอออนดังกล่าวสามารถทำปฏิกิริยากับไอออนของเหล็กและตกตะกอนแยกออกจากน้ำเสีย ส่งผลให้ปริมาณไอออนของเหล็กลด เมื่อพิจารณาในระบบที่มีโคโคซานพบว่าปริมาณไอออนของเหล็กในน้ำเสียจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในช่วงเวลาแรกและลดอย่างรวดเร็วเนื่องจากโคโคซานมีสมบัติในการดูดซับไอออนของโลหะ



ภาพที่ 4.17 ผลของความเข้มข้นของปริมาณเหล็กปนเปื้อนหลังการบำบัดที่ภาวะเหมาะสม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

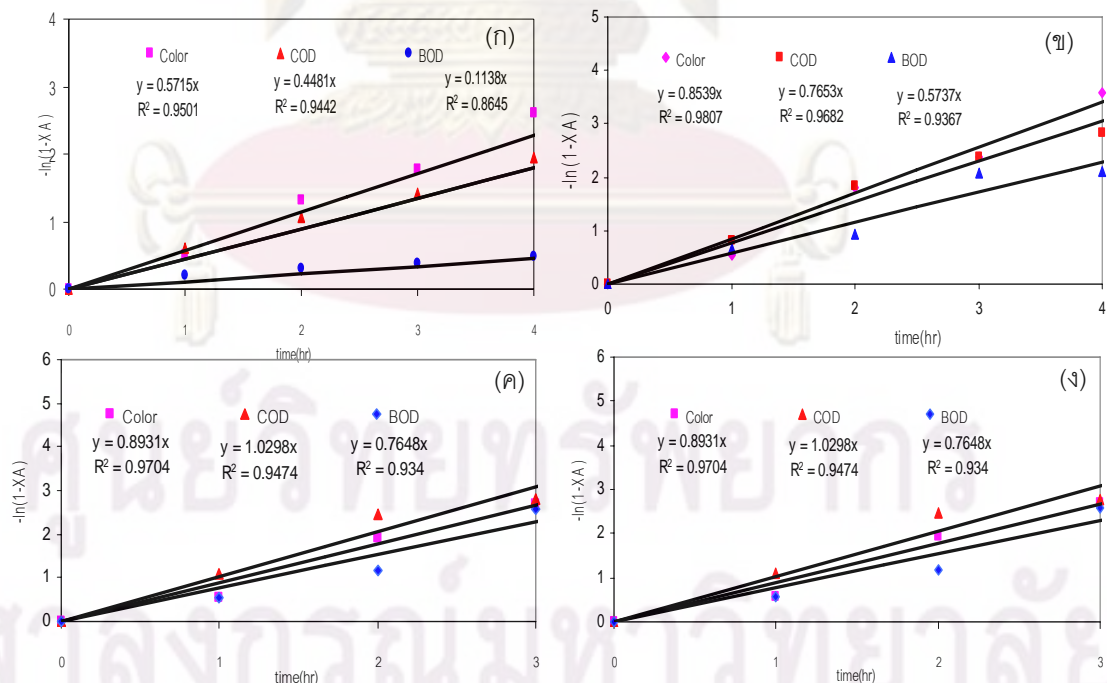
จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการลดของสี ซีไอดี และบีไอดี พบว่าปฏิกิริยาการลดลงของสารมลพิษจะลดลงตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ดังแสดงในสมการ (4.9) หรือ (4.10) ซึ่งหมายถึงอัตราการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพียงชนิดเดียว ในที่นี้น่าจะหมายถึงปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบและเมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $-\ln(1-X_A)$ และ t ดังแสดงในภาพที่ 4.8

$$C_t = C_0 \exp(-kt) \quad (4.9)$$

เมื่อ C_t คือ ความเข้มข้นของสารมลพิษที่เวลาใดๆ C_0 คือ ความเข้มข้นของสารมลพิษที่เวลาเริ่มต้น k คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยา และ t คือ เวลา

หรือ
$$-\ln(1-X_A) = kt \quad (4.10)$$

เมื่อ X_A คือ เศษส่วนโมล



ภาพที่ 4.18 กราฟแสดงค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาของเหล็กนาโน (ก) เหล็กนาโนบนไคโตซาน (ข) เหล็กนาโน-แพลเลเดียม (ค) และเหล็กนาโน-แพลเลเดียมบนไคโตซาน (ง)

พบว่าค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาในการลดสี ซีไอดี และบีไอดีในน้ำเสียจะมีแนวโน้มเดียวกันดังแสดงในตารางที่ 4.2 กล่าวคือค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเมื่อใช้เหล็กนาโนบนโคโตซานจะมีค่า 0.854 มากกว่าเมื่อใช้เหล็กนาโนหรือเหล็กนาโน-แพลเลเดียมมีค่า 0.572 และ 0.641 ตามลำดับ แต่มีค่าน้อยกว่าการใช้เหล็กนาโน-แพลเลเดียมบนโคโตซานซึ่งมีค่า 0.893 และเมื่อพิจารณา ค่าคงที่ของร้อยละการลดของซีไอดี และบีไอดี พบว่าค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเมื่อใช้เหล็กนาโนบนโคโตซานจะมีค่า 0.765 0.574 มากกว่าเมื่อใช้เหล็กนาโนหรือเหล็กนาโน-แพลเลเดียมมีค่า 0.448 0.114 และ 0.656 0.340 ตามลำดับ แต่มีค่าน้อยกว่าการใช้เหล็กนาโน-แพลเลเดียมบนโคโตซานซึ่งมีค่า 1.03 และ 0.934 ตามลำดับ และเพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายและลดขั้นตอนในการเตรียมเหล็กนาโนดัดแปร จึงสามารถสรุปได้ว่าเหล็กนาโนบนโคโตซานเป็นตัวที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา

ชนิดของเหล็กนาโนและเหล็กนาโนดัดแปร	สี		ซีไอดี		บีไอดี	
	k (ชั่วโมง) ⁻¹	R^2	k (ชั่วโมง) ⁻¹	R^2	K (ชั่วโมง) ⁻¹	R^2
เหล็กนาโน	0.5715	0.9501	0.4481	0.9442	0.1138	0.8645
เหล็กนาโนบนโคโตซาน	0.8539	0.9807	0.7653	0.9682	0.5737	0.9367
เหล็กนาโน-แพลเลเดียม	0.6409	0.9894	0.6557	0.9315	0.3296	0.9560
เหล็กนาโน-แพลเลเดียมบนโคโตซาน	0.8931	0.9704	1.0298	0.9474	0.7648	0.9340

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณสารมลพิษและร้อยละการลดของสารมลพิษในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตแอลกอฮอล์เมื่อบำบัดด้วยด้วยเหล็กนาโนและกระบวนการเคมีไฟฟ้า พบว่าประสิทธิภาพในการลดค่าสีด้วยการบำบัดด้วยเหล็กนาโนจะใกล้เคียงกับการบำบัดด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าทั้งในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและแบบต่อเนื่อง แต่ประสิทธิภาพในการลดซีไอดีและบีไอดีจะสูงกว่าการบำบัดด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้เหล็กนาโนบนโคโตซาน อนุภาคโคโตซานสามารถช่วยดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้น

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบปริมาณสารมลพิษและร้อยละการลดของสารมลพิษในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตแอลกอฮอล์เมื่อบำบัดด้วย
กระบวนการต่างๆ

ผู้วิจัย	สี		สีโอดี		ปีโอดี	
	ปริมาณเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการลด สี	ปริมาณเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการลด สีโอดี	ปริมาณเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการ ลดปีโอดี
Vlissidis A. และคณะ (1993) ^(ก)	-	-	23,000-190,000	71±5	42,000-120,000	86±4
บัณฑิต (2549) ^(ข)	100,000-180,000	99	65,600-143,462	35	15,750-88,500	99
Piya-areetham และ คณะ (2006) ^(ค)	180,000-220,000	92.24	84,000-100,000	89.62	36,000-204,000	83.80
งานวิจัยนี้ ^(ง)	9600	99	5400	98	3700	99

- หมายเหตุ
- (ก) กระบวนการย่อยด้วยจุลินทรีย์ที่ไม่อาศัยออกซิเจน
 - (ข) กระบวนการทางเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (น้ำเสียเจือจาง 10 เท่า)
 - (ค) กระบวนการทางเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ
 - (ง) เหล็กนาโนบนตัวรองรับโคโตซาน (น้ำเสียเจือจาง 50 เท่า)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์ด้วยเหล็กนาโนและเหล็กนาโนดัดแปร โดยตัวแปรที่ศึกษาเมื่อบำบัดด้วยเหล็กนาโนได้แก่ การเจือจาง ความเป็นกรด-เบส ความเร็วรอบในการเขย่า อัตราส่วนระหว่างเหล็กนาโนและปริมาตรน้ำเสีย ต่อย่อยละการลดลงของสี ซีไอดี และบีไอดี ส่วนตัวแปรที่ศึกษาสำหรับเหล็กนาโนดัดแปรคือชนิดและปริมาณของตัวรองรับ และปริมาณโลหะตัวที่สอง พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยเหล็กนาโนดัดแปรจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าเหล็กนาโนอย่างเดียว โดยเหล็กนาโนบนไคโตซานจะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียใกล้เคียงกับเหล็กนาโน-แพลเลเดียมบนไคโตซาน แต่เพื่อลดต้นทุนและขั้นตอนในการทำงาน จึงกล่าวได้ว่าเหล็กนาโนบนไคโตซานมีความเหมาะสมเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์ โดยปริมาณไคโตซานที่เหมาะสมคือ 0.1 กรัมต่อกรัมเหล็ก และภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียคือ ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 3 อัตราการเจือจางน้ำเสีย 50 เท่า อัตราส่วนระหว่างเหล็กต่อน้ำเสีย 12.5 กรัมต่อลิตร และอัตราความเร็วในการเขย่าที่ 170 รอบต่อนาที ซึ่งสามารถลดค่าสี ซีไอดี และบีไอดี ได้ร้อยละ 93.9 90.5 และ 60.8 ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

- ศึกษาผลของโลหะตัวที่สองหรือตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น เช่น นิกเกิล ทองแดง เพื่อลดเวลาในการบำบัด
- ศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยเหล็กนาโนดัดแปรในระดับขยายส่วนเพื่อใช้ในการพัฒนาและขยายขนาด และนำไปประยุกต์ใช้จริงกับอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กมลศิริ พันธนียะ. 2545. บทความนานาสาระ ไคติต-โคโตซาน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : www.nicaออนไลน์.com/articles9/site/view_article.asp?idarticle [23 พฤษภาคม 2546]
- กรมสรรพสามิต. 2544. สถิติปริมาณที่เสียภาษีสุราปีงบประมาณ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.exd.mof.go.th/> [3 เมษายน 2545]
- แก้วตา กิตติกนกรัตน์. 2542. การกำจัดคลอรีนเดือไดรคาร์บอนจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมีโดยใช้ผงเหล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- โครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. 2004. การผลิตแอลกอฮอล์. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : www.ryt9.com/general/tag/สารานุกรม/2007-11-13-10:45:12/ [13 พฤศจิกายน 2007]
- ทัตชลิท สุขทวี และยุทธนา เจริญราช. 2549. การกำจัดฟีนอลและสีด้วยเหล็กนาโน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.
- บัณฑิต เลิศประชานุรักษ์. 2549. การบำบัดสีและสารประกอบอินทรีย์ในกากสาโดยเครื่องปฏิกรณ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุนแบบพัลส์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บุญศรี จงเสวีจิตต์. 2545. วารสารวิทยาศาสตร์. การผลิตกลูโคสจากเซลลูโลสของแบคทีเรียโดยใช้เอนไซม์เซลลูเลสจากเชื้อรา. 114-124. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : มิตรนราการพิมพ์, เบญญาทิพย์ ไพบูลย์ และตุลวิทย์ สถาปนจารุ. 2550. การกำจัดสีด้วยวิธีการกรองผ่านอนุภาคเหล็กขนาดนาโนสเกล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พิชญ์ ศุภผล. 2549. เส้นใยไทเทเนียม. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : www.research.chula.ac.th/rs_news/2549/N003_04.htm. [12 กันยายน 2549]
- มาลี วิศวจารย์. 2530. การใช้ประโยชน์จากน้ำกากส่าโรงงานสุราในการผลิตก๊าซชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สหสาขาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- เวฬุรีย์ ทองคำ. 2549. นาโนเทคโนโลยีเพื่อชีวิต. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : www.nanotec.or.th/th/index.php?type...room [7 มิถุนายน 2549]

ศูนย์วิจัยนาโนเทคโนโลยีบูรณาการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
2550. นาโนเทคโนโลยี คืออะไร. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.nano.kku.ac.th> [20
กุมภาพันธ์ 2551]

สมนึก บุญพาไสว. 2545. นาโนเทคโนโลยี. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา :
<http://www.ipst.ac.th/design/document21stcenturytechnology> [พฤษภาคม-มิถุนายน
2545]

สิริพัฒน์ ประโทนเทพ. 2552. นาโนเทคโนโลยีคืออะไรกันแน่. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา :
www.vcharkarn.com [12 มกราคม 2552]

ภาษาอังกฤษ

Bao W.Z., Li T.T., and Feng J., 2006. Reductive dechlorination of 1,2,4-trichlorobenzene with palladized nanoscale Fe⁰ particles supported on chitosan and silica. Chemosphere. 65:1137–1145.

Cao J., Wei L., Huang Q., Wang L., and Han S., 1999. Reducing degradation of azo dye by zero-valent iron in aqueous solution. Chemosphere. 38:565–571.

Deng N., Luo F., Wu F., Xiao M., and Wu X., 2000. Discoloration of aqueous reactive dye solution in the UV/Fe⁰ system. Water Res. 34:2408–2411.

Feng J., and Lim T.T., 2007. Iron-mediated reduction rates and pathways of halogenated methanes with nanoscale Pd/Fe: Analysis of linear free energy relationship. Chemosphere. 66:1765–1774

Ghauch A., Gallet C., Charef A., Rima J., and Martin-Bouyer M., 2001. Reductive degradation of carbaryl in water by zero-valent iron. Chemosphere. 42:419–424.

He F., and Zhao D., 2008. Hydrodechlorination of trichloroethene using stabilized Fe-Pd nanoparticles: Reaction mechanism and effects of stabilizers, catalysts and reaction conditions. Applied Catalysis B: Environmental. 84:533–540.

Lien H.L., and Zhang W.X., 2001. Nanoscale iron particles for complete reduction of chlorinated ethenes. Physicochemical and Engineering. 191:97–105.

Lien H.L., and Zhang W.X., 2007. Nanoscale Pd/Fe bimetallic particles: Catalytic effects of palladium on hydrodechlorination. Applied Catalysis Environmental. 77:110–116.

- Lim T.T., and Wei Zhu B., 2008. Effects of anions on the kinetics and reactivity of nanoscale Pd/Fe in trichlorobenzene dechlorination. Chemosphere. 73:1471–1477.
- Ma L.M., Ding Z.G., Gao T.Y., Zhou R.F., Xu W.Y., and Liu J., 2004. Discoloration of methylene blue and wastewater from a plant by a Fe/Cu bimetallic system. Chemosphere. 55:1207-1212.
- Nam S., and Tratnyek P.G., 2000. Reduction of azo dyes with zero-valent iron, Water Research. 34 (6):1837-1845.
- Piya-areetham P., Shenchunthichai K., and Hunsom M., 2006. Application of electrooxidation process for treating concentrated wastewater from distillery industry with a voluminous electrode, Water Research, 40(15):2857-2864.
- Rachna P., and Suresh S., 2006. Decolourization of azo dyes using magnesium–palladium system. Journal of Hazardous Materials.137:1729–1741
- Shih Y.h., Chen Y.C., Chen M.y., Tai Y.t., and Tso C.p., 2009. Dechlorination of hexachlorobenzene by using nanoscale Fe and nanoscale Pd/Fe bimetallic particles. Colloids and Surfaces area. Physicochemical Engineer. 332:84–89
- Sun H., Wang L., Zhang R., Sui J., and Xu G., 2006. Treatment of groundwater polluted by arsenic compounds by zero valent iron. Journal of Hazardous Materials.129: 297–303.
- Tee Y.H., Grulke E., and Bhattacharyya B., 2005. Role of Ni/Fe Nanoparticle Composition on the Degradation of Trichloroethylene from Water.Ind. Engineer Chemical Research. 44:7062-7070.
- Üzüm C., Shahwan T., Eroglu A.E., Lieberwirth I., Scott T.B., and Hallam .R., 2008. Application of zero-valent iron nanoparticles for the removal of aqueous Co^{2+} ions under various experimental conditions. Chemical Engineering Journal. 144:213–220.
- Vlissidis A., and Zouboulis A.I., 1993. Thermophilic anaerobic digestion of alcohol distillery wastewaters. Bioresource Technology. 43 :131-140.
- Wang C.B., and Zhang W.X., 1997. Synthesizing nanoscale iron particles for rapid and complete dechlorination of TCE and PCBs. Environmental Science and Technology. 30:1195-1203.
- Wang X., Chao C., Ying C., and Huiling L., 2009. Dechlorination of chlorinated methanes by Pd/Fe bimetallic nanoparticles. Journal of Hazardous Materials. 161:815-823.

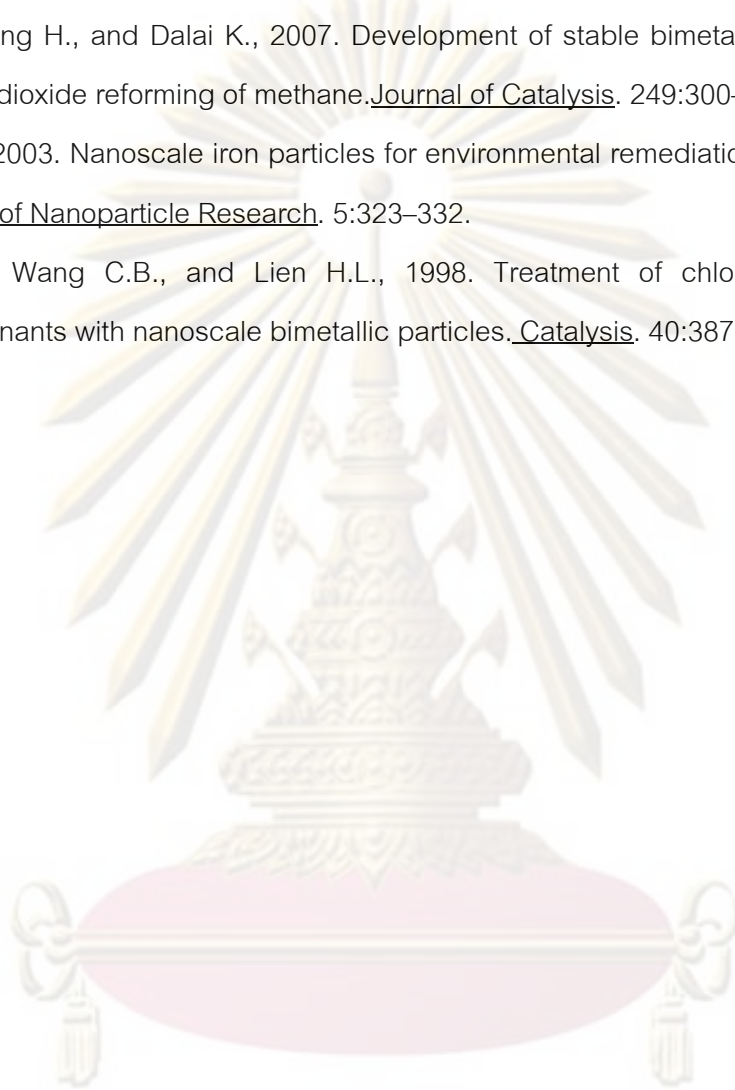
Xie L., and Shang C., 2006. Effects of copper and palladium on the reduction of bromate by Fe⁽⁰⁾. Chemosphere. 64:919–930.

Xu .Y, and Zhao D., 2007. Reductive immobilization of chromate in water and soil using stabilized iron nanoparticles. Water research. 41:2101–2108.

Zhang J., Wang H., and Dalai K., 2007. Development of stable bimetallic catalysts for carbon dioxide reforming of methane. Journal of Catalysis. 249:300–310.

Zhang W.X., 2003. Nanoscale iron particles for environmental remediation: An overview. Journal of Nanoparticle Research. 5:323–332.

Zhang W.Z., Wang C.B., and Lien H.L., 1998. Treatment of chlorinated organic contaminants with nanoscale bimetallic particles. Catalysis. 40:387-395.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ความหมายของค่าพารามิเตอร์ในน้ำเสีย (เกรียงศักดิ์, 2543)

ค่าพารามิเตอร์ (Parameter)

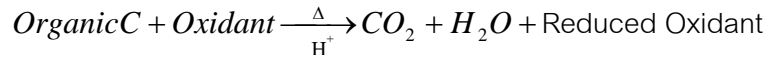
จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าสิ่งเจือปนในน้ำเสียมีหลายชนิด ดังนั้นเพื่อความเหมาะสมและสะดวกในการวิเคราะห์สิ่งเจือปนดังกล่าว จึงได้มีการกำหนดใช้ค่าพารามิเตอร์ค่าที่สำคัญและมักจะกำหนดในมาตรฐานน้ำทิ้งที่ควรทราบ

1. ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) เป็นค่าที่แสดงถึงภาวะความเป็นกรดและเบส ซึ่งสิ่งที่ชี้บอกความเป็นกรดคือความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน $[H^+]$ และสิ่งที่ชี้บอกความเป็นเบสคือความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน $[OH^-]$ เนื่องจากความเป็นกรด-เบสมีสเกลอยู่ในช่วง 0 ถึง 14 โดยสามารถแบ่งภาวะความเป็นกรด เบส และกลางได้ดังนี้ กล่าวคือ เมื่อความเป็นกรด-เบสมีค่าเท่ากับ 7 แสดงว่าสารละลายมีสภาพเป็นกลาง ถ้าค่าความเป็นกรด-เบสมีค่าน้อยกว่า 7 แสดงว่าสารละลายเป็นกรด หรือค่าความเป็นกรด-เบสมีค่ามากกว่า 7 แสดงว่าสารละลายเป็นเบส โดยทั่วไปค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายในสภาพปกติจะมีค่าอยู่ในช่วง 6-8 ซึ่งจะไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ค่าความเป็นกรด-เบสมีสมการดังนี้

$$pH = -\log[H^+]$$

2. ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) หมายถึง ปริมาณออกซิเจนที่แบคทีเรียใช้ย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดที่ย่อยสลายได้ภายใต้ภาวะที่มีออกซิเจน โดยผลพลอยได้จากการออกซิเดชันนี้ทำให้แบคทีเรียได้รับพลังงานไปใช้ในการเจริญเติบโตเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ หรือแอมโมเนีย ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหาร ซึ่งค่าบีโอดีหาได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยการวัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen, DO) ที่ถูกใช้ไปโดยจุลินทรีย์ ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ณ ปัจจุบัน เรียกว่า DO_0 และในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในเวลา 5 วัน ภายใต้อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เรียกว่า DO_5

3. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) หมายถึง ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการเพื่อใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำทางเคมีให้กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยอาศัยหลักการที่สารอินทรีย์เกือบทั้งหมดสามารถที่จะถูกออกซิไดซ์โดยตัวเติมออกซิเจนอย่างแรงภายใต้ภาวะเป็นกรด ดังสมการ



ค่าซีโอดีจัดเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงให้เห็นว่าน้ำนั้นมีความสกปรกที่เกิดจากสารอินทรีย์อยู่ในระดับมากน้อยเพียงใด

4. ของแข็งทั้งหมด (Total solid: TS) หมายถึง สารหรือสิ่งเจือปนที่เหลืออยู่ภายหลังจากผ่านการนำน้ำออกแล้ว ไม่รวมถึงสารที่ระเหยไปกับน้ำ สิ่งที่เหลืออยู่หรือตะกอนมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งอาจจะละลายน้ำหรือไม่ละลายน้ำก็ได้ สามารถแบ่งของแข็งออกเป็นชนิดต่างๆ

4.1 ของแข็งละลายน้ำ (Total Dissolved Solid, TDS) คือ ของแข็งส่วนที่ละลายในน้ำได้ ได้แก่ เกลืออนินทรีย์ต่างๆหรืออินทรีย์สาร

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

4.2.1 Suspended Solids คือ ของแข็งที่ไม่ละลายน้ำและสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ ตะกอนมีขนาดเล็กน้ำหนักเบา

4.2.2 Stable Solids คือของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ ตะกอนมีขนาดใหญ่และมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำ เมื่อตั้งทิ้งไว้สามารถตกตะกอนลงมานอนที่ก้นภาชนะได้

4.3 ของแข็งระเหย (Volatile Solids) คือของแข็งที่ระเหยได้เมื่อนำไปเผาในอากาศที่อุณหภูมิสูง 550-600 องศาเซลเซียส

4.4 ของแข็งคงตัว (Fixed Solids) คือของแข็งหรือซีเมนต์ที่เหลือจากการเผาของแข็งที่อุณหภูมิสูง 550-600 องศาเซลเซียส

5. โลหะหนัก สารเหล่านี้ได้แก่ นิเกิล แมงกานีส โครเมียม สังกะสี ปปรอท ทองแดง เหล็ก เป็นต้น ถ้ามีธาตุเหล่านี้มากเกินไปในน้ำก็จะเป็นพิษร้ายแรงต่อสิ่งมีชีวิต น้ำเสียเป็นผลมาจากการใช้น้ำเพื่อการอุปโภค-บริโภคของมนุษย์ทั้งในกิจวัตรประจำวัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข1 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพของน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรด-เบส (pH value)	5.5 – 9.0	pH meter
2. ค่า TDS (Total Dissolved Solid)	- ไม่เกิน 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันแต่แต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร - น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือลงสู่ทะเล ค่า TDS ในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่า TDS ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันแต่แต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มิลลิกรัมต่อลิตร	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc)
4. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส	เครื่องวัดอุณหภูมิวัดขณะเก็บตัวอย่าง
5. ซัลไฟด์ (Sulfide as H ₂ S)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	ไทเทรต
6. ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร	กลั่นและตามด้วยวิธี Pyridine Barbituric Acid
7. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันแต่แต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงาน	สกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน

ดัชนีคุณภาพของน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
	อุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มิลลิกรัมต่อลิตร	
8. สีและกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่ได้กำหนด
9.ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	Spectrophotometry
10. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	กลั่นและตามด้วยวิธี 4-Aminoantpyrine
11. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	Iodometric Method
12. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ (Pesticide)	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด	Gas Chromatography
13. ค่าบีโอดี 5 วัน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (Biochemical Oxygen Demand : BOD)	ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันแต่เฉพาะประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงาน อุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	Azide Modification ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน
14. ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl)	ไม่เกิน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันแต่เฉพาะประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงาน อุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร	Kjeldahl
15. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD)	ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันแต่เฉพาะประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงาน อุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อลิตร	Potassium Dichromate Digestion
16. โลหะหนัก (Heavy Metal) 1. สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Direct Aspiration หรือวิธี Plasma Emission

ดัชนีคุณภาพของน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
		Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma : ICP
2. โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร	
3. โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (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 Direct Aspiration หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma : ICP
11. ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร	Atomic Absorption Cold Vapor Technique
12. เซเลเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร	Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Direct Aspiration หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma : ICP

แหล่งที่มา : ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539

ภาคผนวก ค

การหาค่าสมบัติของน้ำเสีย

1. pH

วิธีวิเคราะห์

วิเคราะห์โดยตรงด้วยเครื่อง pH meter 7020 Electronic Instrument Limited

หมายเหตุ: รายละเอียดการใช้เครื่อง pH meter ศึกษาได้จากคู่มือเฉพาะเครื่องนั้นๆ

2. ค่าการนำไฟฟ้า

วิธีวิเคราะห์

วิเคราะห์โดยตรงด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า

หมายเหตุ: รายละเอียดการใช้เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า ศึกษาได้จากคู่มือเฉพาะเครื่องนั้นๆ

3. สี (Color)

การวัดสีของน้ำเสียด้วยวิธี การใช้วิธีเปรียบเทียบโดยใช้หลอดเนสเตอร์ (Nester tube) ซึ่งตัวอย่างน้ำที่ต้องการวัดสีจะถูกเปรียบเทียบกับสารละลายสีมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นในการวัดสีครั้งนี้ใช้เครื่อง Spectrophotometer ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Absorbance กับค่าหน่วยสีของสารละลายสีมาตรฐานซึ่งจะใช้เป็น Calibration Curve ในการหาหน่วยสีของน้ำเสียที่ต้องการวัด

อุปกรณ์ที่ใช้

1. UV-Spectrophotometer รุ่นV-530
2. เครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลางสารเคมีที่ใช้

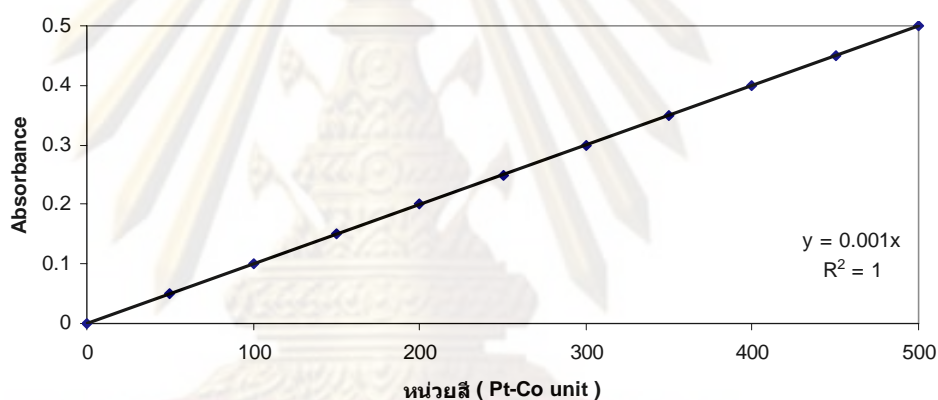
สารเคมีที่ใช้

สารละลายสต็อกมีมาตรฐาน โดยละลายโพแทสเซียมคลอโรแพลททิน (K₂PtCl₆) 1.246 กรัม และโคบอลต์ดีคลอไรด์ (CoCl₂.6H₂O) 1.00 กรัม ในน้ำกลั่นซึ่งเติมกรดไฮโดรคลอริก 100 มิลลิลิตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ซึ่งจะได้สารละลายที่มีความเข้มข้นของสีเท่ากับ 500

วิธีวิเคราะห์

1. เตรียมอนุกรมสารละลายสีมาตรฐานที่มีสี 50 100 200 300 และ 400 หน่วยโดยทำการเจือจางปริมาตรสารละลายสีต่อกลีมาตรฐานด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 100 มิลลิลิตร
2. นำอนุกรมสีทั้งหมดมาทำการวัด Absorbance ด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer โดยใช้ความยาวคลื่นในการวัดคือ 465 นาโนเมตร
3. ทำการเหยียงแยกตะกอนของน้ำเสียที่ต้องการวัดสี ด้วยเครื่องเหยียงหนีศูนย์กลาง และนำน้ำที่ผ่านการเหยียงแยกตะกอนมาวัดค่า Absorbance
4. แทนค่า Absorbance ลงในสมการที่ได้จากข้อ 3 เพื่อทราบค่าหน่วยสีของน้ำเสีย

ภาพที่ (ค1) Calibration Curve ของการวัดสีด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer



4. การวิเคราะห์หาของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)

ของแข็งที่แขวนลอยทั้งหมดหมายถึงส่วนของของแข็งที่เหลือค้างอยู่บนกระดาษกรองใยแก้วหลังจากการกรองน้ำตัวอย่างที่ทราบปริมาตรแน่นอน แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส และทำให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นคือน้ำหนักของของแข็งแขวนลอยทั้งหมดต่อปริมาตรตัวอย่างน้ำที่ใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. โถดูดความชื้น (Dedicator)
2. ตู้อบ (Oven) ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 103-105 องศาเซลเซียส
3. เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance) สามารถชั่งได้ถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง
4. กระดาษกรอง GF/C (Glass fiber filter) เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 เซนติเมตร

5. เครื่องดูดสุญญากาศ (Suction pump) พร้อมขวดดูดสุญญากาศ
6. ถ้วยระเหย (Evaporating dishes)

วิธีวิเคราะห์

1. นำกระดาษกรอง GF/C ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น
2. ชั่งน้ำหนักกระดาษกรอง GF/C สมมุติมีน้ำหนัก A กรัม
3. ต่อบชุดเครื่องมือสำหรับกรอง ใช้ปากคีบกระดาษ GF/C วางบนกรวยบุคเนอร์ เปิดเครื่องดูดสุญญากาศ ล้างกระดาษกรองด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง โดยใช้ครั้งละ 20 มิลลิลิตร เปิดเครื่องดูดสุญญากาศต่อให้ดูดนํ้าออกจนแห้ง ทิ้งน้ำล้างไป
4. เลือกปริมาตรตัวอย่างน้ำที่จะใช้ ซึ่งควรเลือกให้มีค่าของแข็งแขวนลอยที่ติดบนกระดาษกรองไม่เกิน 200 มิลลิกรัม และไม่ควรมากกว่า 1 มิลลิกรัม เมื่อเลือกปริมาตรแล้ว ทำการเขย่าตัวอย่างน้ำให้เข้ากันอย่างดี เทตัวอย่างน้ำที่ทราบปริมาตรลงกรองโดยค่อยๆ เททีละน้อยอย่างต่อเนื่องจนหมด ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างภาชนะที่ใช้ตวงตัวอย่าง และฉีดน้ำกลั่นที่ด้านข้างของกรวยบุคเนอร์รวมทั้งบนกระดาษกรอง GF/C ปล่อยให้เครื่องดูดสุญญากาศดูดนํ้าออกจนแห้ง ปิดเครื่อง
5. นำกระดาษกรองใยแก้วไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส อย่างน้อยเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักกระดาษกรอง สมมุติมีน้ำหนัก B กรัม
6. ทำข้อ 5 ซ้ำ จนได้น้ำหนักคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักน้อยกว่า 4% ของน้ำหนักครั้งก่อน

การคำนวณ

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

A = น้ำหนักกระดาษกรองอย่างเดียว (กรัม)

B = น้ำหนักกระดาษกรองและของแข็ง (กรัม)

C = ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)

5. การวิเคราะห์หาของแข็งละลายน้ำ (TDS)

ของแข็งละลายน้ำหมายถึงส่วนของน้ำตัวอย่างที่กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้วแล้วนำไปใส่ในถ้วยระเหยที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน และนำไประเหยด้วยไอน้ำจนแห้งแล้วจึงนำไปอบแห้งที่ 103-105 องศาเซลเซียส น้ำหนักส่วนที่เพิ่มคือน้ำหนักของของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. โถดูดความชื้น (Desiccators)
2. ตู้อบ (Oven) ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 103-105 องศาเซลเซียส
3. เครื่องชั่งรายละเอียด (Analytical balance) สามารถชั่งได้ถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง
4. กระดาษกรอง GF/C (Glass fiber filter) เส้นผ่าศูนย์กลาง 5.5 เซนติเมตร
5. เครื่องดูดสูญญากาศ (Suction pump) พร้อมขวดดูดสูญญากาศ
6. ถ้วยระเหย (Evaporating dishes)

วิธีวิเคราะห์

1. นำน้ำตัวอย่างมากรองเอาสารแขวงลอยออกทั้งหมดก่อนโดยกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้วและเครื่องกรองสูญญากาศ
2. นำน้ำตัวอย่างที่ได้จากการกรองใส่ถ้วยระเหยนำไปอบแห้งที่ 103-105 องศาเซลเซียส ปลอบให้เย็นในโถดูดความชื้นชั่งหาน้ำหนัก

การคำนวณ

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

A = น้ำหนักถ้วยระเหยอย่างเดียว (กรัม)

B = น้ำหนักถ้วยระเหยและของแข็ง (กรัม)

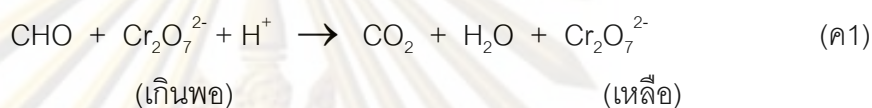
C = ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)

6. การวิเคราะห์หาซีโอดีด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิด (Closed Reflux, Titrimetric method)

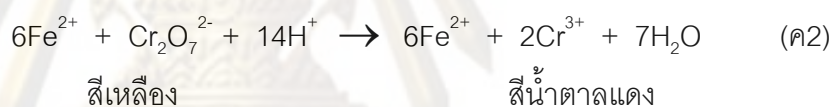
สำหรับการวิเคราะห์ COD มี 2 แบบ คือวิธีฟลักซ์แบบปิด และวิธีฟลักซ์แบบเปิด แต่ในการทดลองที่จะใช้วิธีฟลักซ์แบบปิด โดยมีหลักการดังนี้

ภายใต้สภาวะการรีฟลักซ์ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่มีอุณหภูมิสูง สารอินทรีย์ในน้ำจะถูกออกซิไดซ์โดยสารละลายโปตัสเซียมไดโครเมตที่ทราบความเข้มข้นและมีปริมาณเกินพอที่ทราบจำนวน หลังจากรีฟลักซ์แล้ว ทำการวัดปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตที่เหลือ โดยนำไปไทเทรตกับเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous Ammonium Sulfate, FAS) และใช้เฟอโรอิน (Feroin) เป็นอินดิเคเตอร์ ทำให้ทราบปริมาณของโปตัสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการออกซิไดส์ สารอินทรีย์ได้ปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

เมื่อรีฟลักซ์ด้วย $K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4$



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



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

เครื่องมือและอุปกรณ์

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

สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตสำหรับย่อยสลาย (Standard potassium digestion solution) 0.1 นอร์มัล

- นำ $K_2Cr_2O_7$ อบที่ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนัก $K_2Cr_2O_7$ มา 4.913 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 167 มิลลิลิตร และเติมปรอทซัลเฟต 33.3 กรัม ปล่อยให้ละลายและปล่อยให้เย็นจึงเจือจางด้วยน้ำกลั่นเป็น 1,000 มิลลิลิตร

2. กรดซัลฟิวริกที่เติมซิลเวอร์ซัลเฟต (Conc. sulfuric acid with silver sulfate)

- ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) 22 กรัม เติมลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นซึ่งมีน้ำหนัก 41 กิโลกรัม (2.5 ลิตร) ทิ้งไว้ 1-2 วัน ซิลเวอร์ซัลเฟตจึงละลาย

3. สารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟตไทเทรนต์ (Ferrous ammonium sulfate titrant) เข้มข้นโดยประมาณ 0.05 นอร์มัล

- ละลายไอร์ออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟต ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) ชนิด AR. Grade ประมาณ 19.6 กรัม ในน้ำกลั่น เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร ปล่อยให้เย็นแล้วจึงเจือจาง 1,000 มิลลิลิตร

- สารละลายนี้ต้องนำมาหาความเข้มข้นที่แน่นอน (Standardize) ก่อนใช้ทุกครั้ง ด้วยสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต ทำได้ดังนี้ คือนำ $K_2Cr_2O_7$ 5 มิลลิลิตร มาเติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร แล้วเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 15 มิลลิลิตร ปล่อยให้เย็นแล้วนำมาไทเทรตกับสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตโดยใช้เฟอโรอิน (Ferro in) จำนวน 2-3 หยด เป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลแดง

4. สารละลายเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ (Ferro in Indicator)

5. สารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไฮโดรเจนฟทาเนต (Potassium Hydrogen Phthalate หรือ KHP)

- ชั่ง KHP จำนวน 425 มิลลิลิตร ที่บดแห้งและอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส ละลายด้วยน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร สารละลายนี้จะมีค่า ซีไอดี 500 มิลลิลิกกรัมต่อลิตร (ปกติเก็บไว้ในตู้เย็นได้นาน 3 เดือน)

วิธีวิเคราะห์

1. ต้กล้างหลอดแก้วและฝาปิดด้วยกรดซัลฟิวริก 20% เสมอ ทุกครั้งก่อนใช้งาน

2. เลือกขนาดของหลอดแก้วสำหรับตัมซีไอดีที่เหมาะสม

3. ถ้าตัวอย่างน้ำมีซีไอดี ต่ำ ให้เลือกใช้หลอดแก้วขนาด 25x150 มิลลิลิตร (ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 5 มิลลิลิตร) และถ้าซีไอดีสูงสามารถใช้หลอดแก้วขนาด 16x100 มิลลิลิตร (ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 2.5 มิลลิลิตร)

4. การเลือกปริมาตรน้ำตัวอย่างถ้าเป็นน้ำสะอาด น้ำธรรมชาติ หรือน้ำที่มีค่าซีไอดีต่ำๆ (< 40 มิลลิกรัมต่อลิตร) ควรใช้น้ำตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร โดยใช้หลอดแก้วขนาด 25x150 มิลลิลิตร แต่ถ้าซีไอดีสูงกว่านั้นให้ใช้หลอดแก้วขนาด 20x150 โดยเลือกใช้ปริมาตรน้ำตัวอย่างน้ำมากที่สุด 5 มิลลิลิตร หรือน้อยกว่าแล้วเติมน้ำกลั่นให้เป็น 5 มิลลิลิตร และถ้าตัวอย่างน้ำมีค่าซีไอดีสูงมาก ต้องเจือจางตัวอย่างน้ำก่อนนำมาใช้ การเลือกขนาดตัวอย่างน้ำที่จะใช้วิเคราะห์ให้เหมาะสมอาจดูได้จาก ตารางที่ ค.1

5. ใส่น้ำตัวอย่างลงในหลอดแก้วขนาดเหมาะสม เติมน้ำย่าย่อยสลายหรือโปตัสเซียมไดโครเมต ตามด้วยกรดกำมะถันอย่างช้าๆ ในปริมาณที่แสดงอยู่ในตารางที่ ค2 ปิดฝาให้แน่นและเขย่าผสมกันให้ดี สำหรับแบลนด์ใช้น้ำกลั่นแล้วทำเหมือนตัวอย่างทุกอย่าง

ตารางที่ ค.1 ปริมาณน้ำตัวอย่างและอัตราเจือจางที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์หาซีไอดี*

ช่วงซีไอดี	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

6. วางหลอดแก้วในบล็อกลูกแล้วใส่ตู้อบ ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 150 ± 2 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

7. เมื่อครบ 2 ชั่วโมงแล้ว อาจนำออกจากตู้อบปล่อยให้เย็น

8. เทสารละลายออกจากหลอดแก้วลงในขวดรูปกรวย ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างสารละลายในหลอดแก้วให้หมดแล้วเทรวมลงในขวดรูปกรวย เติมเฟอโรซีนอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด แล้วไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน FAS สีของสารละลายจะค่อยๆ เปลี่ยนจากสีเหลือง → เขียวอมเหลือง → ฟ้า → น้ำตาลแดง ซึ่งแสดงว่าถึงจุดยุติ จุดปริมาณของ FAS ที่ใช้ไทเทรต

ตารางที่ ค.2 ขนาดของหลอดแก้ว ปริมาณตัวอย่างตัวอย่างน้ำและสารเคมีที่เหมาะสม

ขนาด หลอดแก้ว (มิลลิลิตร)	ปริมาตร ตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)	สารละลาย ไดโครเมต (มิลลิลิตร)	สารละลาย กรดซัลฟิวริก (มิลลิลิตร)	ปริมาตร ทั้งหมด (มิลลิลิตร)
16x100	2.5	1.5	3.5	7.5
20x150	5.0	3.0	7.0	15.0
25x150	10.0	6.0	14.0	30.0

การคำนวณ

$$\text{ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(A - B) \times N \times 8000}{\text{ปริมาตรน้ำเสียตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}}$$

เมื่อ A = ปริมาณของ FAS ที่ไทเทรตกับ Blank (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรของ FAS ที่ไทเทรตกับน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

N = ความเข้มข้นของ FAS

V = ปริมาตรน้ำเสียตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

7. การวิเคราะห์ห่าบีไอดี

การวิเคราะห์ห่าบีไอดี BOD วิธีการวิเคราะห์มี 2 วิธี คือ วิธีแบบโดยตรงและวิธีโดยอ้อม แต่ในการทดลองจะใช้วิธีแบบโดยอ้อม ซึ่งวิธีแบบโดยอ้อมแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

วิธีแบบอ้อมใช้สำหรับตัวอย่างที่มีความสกปรก เช่น มีค่าบีไอดีเกิน 7 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากปริมาณของออกซิเจนที่ใช้ไปในการย่อยสลายสารอินทรีย์จะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับ

จำนวนสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำนั้น เมื่อตัวอย่างน้ำมีสารอินทรีย์จำนวนมาก จึงต้องเจือจางตัวอย่าง เพื่อให้มีออกซิเจนเพียงพอที่แบคทีเรียจะใช้ในการย่อยสลายอินทรีย์นั้น ซึ่งวิธีแบบเจือจางจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ ไม่ต้องเติมหัวเชื้อและต้องเติมหัวเชื้อ ในการทดลองเลือกแบบไม่ต้องเติมหัวเชื้อ

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ขวดบีโอดี (BOD Bottle) ขนาด 250-300 มิลลิลิตร พร้อมจุกปิดสนิท
2. ตู้ควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 20 ± 1 องศาเซลเซียสและต้องมืด
3. อุปกรณ์และเครื่องแก้วต่างๆ เช่น กระจกบดตวง บิวเรต ขวดรูปชมพู่ เป็นต้น
4. เครื่องจ่ายลม แบบเดียวกันกับที่ใช้กับตู้เลี้ยงปลาสวยงามและหัวลูกฟูก (หัวจ่ายลม)

สารเคมี

1. น้ำกลั่น

- ต้องมีคุณภาพสูง ควรมีทองแดงน้อยกว่า 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร ปราศจากคลอรีน คลอรามีน สารอินทรีย์ กรด-เบส ต้องเป็นกลาง

2. สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.2

- ละลายโปแตสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) 8.5 กรัม ไดโปแตสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4) 21.75 กรัม แอมโมเนียคลอไรด์ (NH_4Cl) 17.2 กรัม และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{PO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 33.4 กรัม และละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร แล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร

3. สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

- ละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 22.5 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร

4. สารละลายแคลเซียมคลอไรด์

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

5. สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์

- ละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 0.25 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร

6. สารละลายแมงกานีสซัลเฟต

- ละลายแมงกานีสซัลเฟตโมโนไฮเดรต ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 364 กรัม หรือ แมงกานีสซัลเฟตเตตระไฮเดรต ($\text{MnSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 400 กรัมในน้ำกลั่น กรองแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร

7. สารละลายอัลคาไล-ไอโอดัด-ไฮไซต์

- ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 500 กรัม โซเดียมไอโอดัด (NaI) 135 กรัม ในน้ำกลั่นเจือจางให้ได้ 950 มิลลิลิตร และทำให้เย็นจากนั้นค่อยๆ เติมสารละลายโซเดียมไฮไซต์ (NaN_3) ที่ละลายในน้ำ 40 มิลลิลิตร อย่างช้าๆ ทำให้มีฤทธิ์เป็นกรดและเจือจางจนได้ปริมาตร 1 ลิตร

8. สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 นอร์มัล

- ละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตเพนตะไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 24.82 กรัม ในน้ำต้มที่เย็นแล้ว เติมคลอโรฟอร์ม 5 มิลลิลิตร หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 กรัม เพื่อเก็บไว้ใช้นานๆ ปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร เมื่อใช้งานให้เจือจางเป็น 0.025 นอร์มัล

9. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น

10. น้ำแป้ง

วิธีวิเคราะห์แบบเจือจางที่ไม่ต้องเติมหัวเชื้อ Seed

1. การเตรียมน้ำเจือจาง โดยน้ำกลั่นมาแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส และพ่นอากาศก่อนทำการเจือจางอย่างน้อย 1 ชั่วโมง แล้วเติมสารเคมีข้อ 2-5 อย่างละ 1 มิลลิลิตรต่อน้ำ 1 ลิตร

2. การเลือกปริมาณตัวอย่างที่จะใช้ ถ้าไม่ทราบค่าบีโอดีโดยประมาณของตัวอย่างน้ำ ต้องหาซีโอดีก่อนหรืออาจจะดูจากค่า Rapid COD (ซีโอดีอย่างง่าย) พร้อมกับพิจารณาลักษณะของตัวอย่างน้ำ แหล่งเก็บตัวอย่างน้ำร่วมด้วย เพื่อกะประมาณค่าซีโอดี เช่น น้ำตัวอย่างที่มีค่าของแข็งละลายมาก ควรจะมีค่าบีโอดีระหว่าง 100-300 มิลลิกรัมต่อลิตร การเลือกปริมาณตัวอย่างนิยมเลือกให้มีปริมาณออกซิเจนเหลืออยู่อย่างน้อย 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และควรจะมีการให้ออกซิเจนอย่างน้อย 2 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อทราบค่าบีโอดีโดยประมาณ ควรเลือกปริมาณตัวอย่างที่คาดได้ว่าจะให้ค่าบีโอดีอยู่ในช่วงที่กำหนดแล้วจึงเลือกปริมาณตัวอย่างที่ใช้ให้สูงและต่ำกว่าที่อยู่ติดกันตามตารางที่ ค.3 เช่น ปริมาณค่าบีโอดีไว้ประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเลือกใช้ปริมาณตัวอย่าง 10 มิลลิกรัม เลือกสูงขึ้นไปเป็น 5 มิลลิลิตรและต่ำลงเป็น 20 มิลลิลิตร

3. บีเปิดตัวอย่างตามจำนวนที่เลือกไว้ลงในขวดบีโอดี ขนาด 300 มิลลิลิตร อย่างละ 2 ขวด

4. เติมน้ำสำหรับใช้เจือจางจนเต็มขวดบีโอดี ต้องระมัดระวังพยายามอย่าให้เกิดฟองอากาศ ปิดฝาให้แน่น

5. นำขวดบีโอดีขวดหนึ่งของแต่ละปริมาณที่เลือกมาหาค่าออกซิเจนละลายที่มีเริ่มต้น สมมุติเป็น DO₀ ส่วนอีกขวดนำไปบ่มที่ตู้ควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน

6. เมื่อครบ 5 วันนำขวดบีโอดีที่บ่มไว้มาหาค่าออกซิเจนละลายที่เหลืออยู่ เรียกว่า DO₅

ตารางที่ ค.3 การเลือกปริมาณน้ำตัวอย่างและอัตราเจือจางสำหรับช่วงบีโอดี

ปริมาณน้ำตัวอย่าง (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	1500
0.50	1,200-4,200	600
1.0	600-2,100	300
2.0	300-1050	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

หมายเหตุ ถ้าปริมาณตัวอย่างที่ใช้้น้อยกว่า 1.0 มิลลิลิตร ควรเจือจางตัวอย่างก่อนปิเปตใส่ขวดบีโอดี

การวิเคราะห์ค่า DO

1. เก็บน้ำตัวอย่างวิธีการเก็บน้ำตัวอย่าง ลงในขวดบีโอดี ให้เต็มขวดพร้อมปิดจุก

2. เติมสารละลาย $MnSO_4$ 1.0 มิลลิลิตร และละลายอัลคาไล-ไฮโดรไดต์-เฮไลต์ 1.0 มิลลิลิตร โดยใช้ปิเปตวัดปริมาตรและจุ่มลงใต้ผิวน้ำตัวอย่างปิดจุกอย่างระมัดระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศ เขย่าโดยคว่ำขึ้น-ลง แรงๆ หลายๆ ครั้ง ให้ผสมเข้ากันปล่อยให้เกิดการตกตะกอนและเขย่าใหม่ซ้ำอีกครั้งหนึ่ง

3. เมื่อตกตะกอนได้ส่วนใหญ่มากกว่า 100 มิลลิลิตร เปิดจุกแล้วค่อยๆ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2.0 มิลลิลิตร ให้ไหลรินตามคอขวดบีโอดี

4. ปิดจุกและทำการเขย่าคว่ำขึ้น-ลง จนเห็นไอโอดีนกระจายทั่ว (I_2 มีสีเหลืองแกมน้ำตาล) และตะกอนละลายหมด

5. ปิเปตใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร จำนวน 203 มิลลิลิตร* นำไปไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.025 นอร์มัล เมื่อสารละลายได้สีเหลืองฟางให้เติมน้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ 1-2 มิลลิลิตร และไทเทรตต่อจนสีน้ำเงินจางหายไป

การคำนวณ $DO_{(ppm)} = (\text{ปริมาตรของ } 0.025 \text{ นอร์มัลของโซเดียมไทโอซัลเฟต} \times 0.2/200) \times 1000$

ข้อสังเกต

- การนำสารละลายจากข้อ 4 มาไทเทรตจำนวน 203 มิลลิลิตร แต่ในการคำนวณคิดปริมาณเพียง 200 เนื่องจากมาเทียบจากเมื่อใช้น้ำ 300 มิลลิลิตร เติมสารเคมีจากข้อ 1 ลงไป 4 มิลลิลิตร น้ำตัวอย่างเหลือในขวดเพียง 296 มิลลิลิตร

- น้ำตัวอย่าง 296 มิลลิลิตร เมื่อเทียบกับสารละลาย 300 มิลลิลิตร ดังนั้น ต้องการสารละลาย 200 มิลลิลิตร จะต้องใช้สารละลายในขวด = $(300 \times 200) / 296 = 203$ มิลลิลิตร

การคำนวณค่าบีโอดี

BOD (มิลลิลิตรออกซิเจนต่อลิตร) = $(DO_0 - DO_5) \times$ อัตราส่วนเจือจาง

เมื่อ DO_0 = ค่าออกซิเจนละลายที่ไทเทรตได้ในวันแรก

DO_5 = ค่าออกซิเจนละลายที่ไทเทรตได้ในวันที่ 5

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

ปริมาตรตัวอย่างที่ใช้

8. การวิเคราะห์หาปริมาณทีเคเอ็นไนโตรเจน (TKN)

ทีเคเอ็น หมายถึง ผลรวมของแอมโมเนียและสารอินทรีย์ไนโตรเจน การหาทีเคเอ็นทำได้ โดยการเปลี่ยนสารอินทรีย์ไนโตรเจนให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียก่อนแล้วจึงวัดปริมาณของแอมโมเนียทั้งหมด ไนโตรเจนที่ได้คือ ทีเคเอ็น แต่ถ้านำไปวิเคราะห์หาแอมโมเนียก่อนแล้วนำมาวิเคราะห์ต่อด้วยวิธีนี้ ไนโตรเจนที่ได้ คือ สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ชุดย่อยสลาย (Digestion apparatus) ประกอบด้วย Kjeldahl flask ขนาด 750-800 มิลลิลิตร และเตาให้ความร้อน (Heating device) ขนาด 300-400 องศาเซลเซียส
2. Distillation apparatus ประกอบด้วย Kjeldahl flask มีกระเปราะข้างบน และ Condenser ในแนวตั้ง

สารเคมี

1. น้ำยาสำหรับย่อยสลาย (Digestion reagent):
 - a. ละลายโพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) 134 กรัม ในน้ำกลั่น 650 มิลลิลิตร แล้วค่อยๆ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 200 มิลลิลิตร ลงไปคนให้เข้ากันและเติมสารละลายปรอทซัลเฟต 25 มิลลิลิตร (เตรียมจากปรอทออกไซด์ : HgO (red) 2 กรัม ในกรดซัลฟิวริก 6 นอร์มัล 100 มิลลิลิตร) เจือจางด้วยน้ำกลั่นให้สารละลายมีปริมาณ 1 ลิตร เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์- โซเดียมไทโอซัลเฟต (Sodium hydroxide- sodium thiosulfate reagent)
 - b. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 500 กรัม และโซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$) 25 กรัม ในน้ำและเจือจางเป็น 1 ลิตร
2. สารละลายอินดิเคเตอร์ผสม (Mixed indicator solution)
 - a. ละลายเมธิลเรด 200 มิลลิลิตร ในเอทิลแอลกอฮอล์ 95% หรือ ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร
 - b. สารละลายเมธิลีนบลู 100 มิลลิลิตร ในเอทิลแอลกอฮอล์ 95% หรือ ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 50 มิลลิลิตร
 - c. นำทั้งสองผสมกัน สารละลายนี้ไม่ควรเก็บไว้เกิน 1 เดือน
3. สารละลายกรดบอริกที่มีอินดิเคเตอร์ผสม (Indicating boric acid solution)

a. สารละลายกรดบอริก (H_3BO_3) 20 กรัม ในน้ำกลั่นเติมสารละลายอินดิเคเตอร์ ผสม 10 มิลลิลิตร เจือจางให้เป็น 1 ลิตร ไม่ควรเก็บไว้เกิน 1 เดือน

b. สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก 0.02 นอร์มัล ก่อนใช้ทุกครั้งควรไทเทรตหา ความเข้มข้นที่แน่นอนกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมคาร์บอเนต

4. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์วิธีการทดลอง

วิธีการทดลอง

1. การเลือกตัวอย่างน้ำ (ขึ้นอยู่กับปริมาณอินทรีย์ไนโตรเจนที่คาดว่าจะมีเจือปนในน้ำเสีย)

ตารางที่ ค.4 การเลือกปริมาณน้ำตัวอย่าง

Organic-N ในน้ำเสีย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ขนาดตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
0-1	500
1-10	250
10-20	100
20-50	50
50-100	25

กรณีที่มีสารอินทรีย์ไนโตรเจนมากๆ ให้ใช้วิธีเจือจางให้มีปริมาตรเป็น 300 แล้วปรับค่า ความเป็นกรด-เบสให้เป็นกลาง จากนั้นนำไปใส่ขวดเคลดดาห์ล

2. การย่อยสลาย (Digestion)

ก. นำตัวอย่างน้ำที่มีปริมาตรตามข้อ (1) มาเติมน้ำยาสำหรับย่อยสลาย 50 มิลลิลิตร นำไปต้มในตู้ควันเพื่อดูด่างพิษพวก SO_2 หรือ SO_3 ออก ต้มจนสารละลายใสหรือมีสี เหลืองฟาง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นจึงเติมน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร

ข. ใส่ฟีนอล์ฟทาลีน 0.5 มิลลิลิตรผสมให้เข้ากันแล้วเติมน้ำยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไทโอซัลเฟต 50 มิลลิลิตรจะเกิดเป็นชั้นของด่าง (Alkaline layer) อยู่ที่ก้นขวดนำไป ต่อกับเครื่องกลั่นแล้วผสมให้เข้ากันดี สีของของผสมจะเป็นสีชมพูอ่อน ถ้ายังไม่เกิดให้เติมน้ำยา โซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปอีก

3. กลั่น (Distillation)

ก. ตัวอย่างน้ำที่ย่อยสลายแล้วมาต่อเข้าเครื่องกลั่นโดยให้ส่วนที่กลั่นออกมาได้ (Distillate) จุ่มอยู่ใต้สารละลายกรดบอริก 50 มิลลิลิตร ใช้เป็นสารจับแอมโมเนียในไนโตรเจนสารที่กลั่นออกมาได้มีปริมาตรประมาณ 200 มิลลิลิตร

ข. ในการวิเคราะห์ทุกครั้งให้ทำแบลนด์เพื่อหาปริมาณไนโตรเจนในน้ำกลั่น

ค. โดยทำทุกขั้นตอนเช่นเดียวกันกับการหาตัวอย่าง

ง. การไทเทรต (Titration) นำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก 0.02 นอร์มัล เมื่อถึงจุดยุติสีจะเปลี่ยนจากเขียวเป็นม่วงอ่อน

การคำนวณ

$$\text{ค่าที่เคเอ็น (มิลลิกรัมของไนโตรเจนต่อลิตร)} = \frac{A - B \times 10^6}{\text{ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}}$$

A = ปริมาตรของกรดซัลฟิวริกที่ใช้กับตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรของกรดซัลฟิวริกที่ใช้กับ Blank (มิลลิลิตร)

9. การวิเคราะห์หาไขมัน

การสกัดไขมันออกด้วยการแยก (Partition- Gravimetric method) ไขมันหรือน้ำมันที่อยู่ในรูปสารละลาย หรือไม่ละลายในตัวอย่างน้ำจะถูกทำให้เป็นกรดด้วยการปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้ต่ำกว่า 2 และสกัดไขมันออกจากตัวอย่างน้ำโดยการนำไปเขย่ากับตัวทำละลาย เช่น ฟริออน หรือ เฮกเซนในกรวยแยกจากนั้นระเหยตัวทำละลายจนแห้ง ทิ้งให้เย็นในโถการทำแห้ง วิธีนี้จะเหมาะสมสำหรับน้ำที่ประกอบด้วยไขมันและน้ำมันที่มีจุดเดือดสูง

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. กรวยแยกที่มีจุกปิดด้วย ขนาด 500 มิลลิลิตร
2. ขวดก้นกลมขนาด 125 มิลลิลิตร
3. เครื่องอังไอน้ำ
4. กระดาษกรอง
5. เครื่องชั่งละเอียด

สารเคมี

1. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Conc. H₂SO₄)

2. เฮกเซน (n-Hexane) หรือ ฟริออน
3. โซเดียมซัลเฟต ปราศจากน้ำ (Sodium sulfate anhydrous)

วิธีการวิเคราะห์

1. นำตัวอย่างน้ำที่ทราบปริมาตรแน่นอน (500 มิลลิลิตร) ใส่ในบีกเกอร์ที่ล้างด้วยเฮกเซน แล้วเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น จนมีค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า
2. เทตัวอย่างน้ำลงในกรวยแยก ล้างภาชนะที่ใส่ตัวอย่างน้ำด้วยเฮกเซน 30 มิลลิลิตร แล้วเทใส่กรวยแยกปิดฝาและเขย่าอย่างแรง 2 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้สารผสมแยกชั้น ชั้นเฮกเซนจะอยู่ข้างบน ตัวอย่างน้ำจะอยู่ด้านล่าง
3. ถ่ายชั้นตัวอย่างน้ำไว้ในบีกเกอร์ที่สะอาดเพื่อนำมาสกัดซ้ำอีกครั้งหนึ่ง ถ่ายชั้นเฮกเซนที่มีไขมันและน้ำมันละลายอยู่ หลังการสกัดเก็บไว้ในฟลasks หรือขวดก้นกลมซึ่งทำให้แห้งและมีน้ำหนักคงที่ซึ่งได้ชั่งไว้แล้ว สมมุติมีน้ำหนัก = A กรัม
4. นำตัวอย่างน้ำที่เก็บไว้จากข้อ 3 กลับมาสกัดอีกครั้งด้วยเฮกเซน 15-20 มิลลิลิตร สกัดด้วยวิธีเดียวกันที่กล่าวมาข้างต้นทำหลาย ๆ ครั้งจนไขมันและน้ำมันถูกสกัดออกจากน้ำตัวอย่างทั้งหมด
5. นำขวดชมพูที่มีเฮกเซนไขมัน และน้ำมันที่ได้จากการสกัด มาระเหยเฮกเซนออกบนเครื่องอ้งน้ำจนแห้งปราศจากความชื้นแล้วนำมาทำให้เย็นในโถปิ้งประมาณ 30 นาที แล้วชั่งสมมุติน้ำหนักที่ชั่งได้เป็น B กรัม

การคำนวณ

$$\text{ไขมันและน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(A - B) \times 10^6}{\text{ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}}$$

$$A = \text{น้ำหนักของขวดชมพู (กรัม)}$$

$$B = \text{น้ำหนักของขวดชมพู และไขมันกับน้ำมัน (กรัม)}$$

หมายเหตุ ในกรณีที่ชั้นของตัวทำละลายมีน้ำปนอยู่ให้ใส่โซเดียมซัลเฟต จนได้สารละลายใสหรือใสโซเดียมซัลเฟตจับตัวกันดี กลิ้งไปกลิ้งมาได้ไม่เหลว และควรใส่โซเดียมซัลเฟตไว้บนกระดาษกรองด้วย แล้วจึงเทตัวทำละลายที่ใสผ่านกระดาษกรองเพื่อให้อิมัลชันและโซเดียมซัลเฟตจับกับน้ำ

10. การวิเคราะห์ X-rays diffraction

การคำนวณขนาดอนุภาคของเหล็กนาโนจากการวิเคราะห์ X-rays diffraction (XRD) สามารถคำนวณได้จากสมการของ Debye-Scherrer

$$L_{111} = \frac{0.9\lambda_{k\alpha 1}}{B_{2\theta} \cos \theta_{\max}} \quad (\text{ค.3})$$

โดยที่ L_{111} คือขนาดอนุภาคของแพลทินัมที่มีระนาบผลึกเป็น [111] (นาโนเมตร)
 $\lambda_{k\alpha 1}$ คือความยาวคลื่นของ X-rays ในที่นี้คือ 0.154056 นาโนเมตร
 $\beta_{2\theta}$ คือความกว้างที่ความเข้มครึ่งหนึ่งของพีค Pt (111) (เรเดียน)
 θ_{\max} คือมุม Bragg ของการสะท้อนของรังสี (เรเดียน)

โดยทั่วไปแล้วจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ค่า $\beta_{2\theta}$ และค่า θ_{\max} จะมีค่าอยู่ในหน่วยขององศา ดังนั้นต้องทำการเปลี่ยนค่าให้อยู่ในรูปของเรเดียนโดยใช้สมการ (ค.4)

$$Rad = \frac{Deg \times \pi}{180} \quad (\text{ค.4})$$

โดยที่ Rad คือค่าในหน่วยเรเดียน
 Deg คือค่าในหน่วยองศา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนงานวิจัย

นางสาวภัศกนก หอมหวล เกิดวันที่ 26 มกราคม 2524 ณ จังหวัดอุบลราชธานี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี ในปีการศึกษา 2547 ได้เข้าทำงานในตำแหน่งนักเทคนิค บริษัท เค็มคิเมียประเทศไทย จำกัด และได้ลาออกเพื่อเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อภาคปลายของปีการศึกษา 2548



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย