

การลดซีไอดีและสีในน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบของเสียอันตราย
โดยใช้เฟอริกคลอไรด์ ซีโอไลต์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

นางสาววรินทร์ คำพิลา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

COD AND COLOUR REMOVAL OF SECURE LANDFILL LEACHATE BY FERRIC
CHLORIDE, ZEOLITE AND HYDROGEN PEROXIDE.

Miss Warunthorn Kumpila

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

วันธร คำพิลา: การลดซีไอดีและสีในน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบของเสียอันตรายโดยใช้
เฟอริกคลอไรด์ ซีโอไลต์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์. (COD AND COLOUR REMOVAL
OF SECURE LANDFILL LEACHATE BY FERRIC CHLORIDE, ZEOLITE AND
HYDROGEN PEROXIDE.) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์, 167 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการลดซีไอดีและสีในน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบของเสีย
อันตรายซึ่งมีความสกปรกในรูปของค่าซีไอดีสูงมาก มีค่าประมาณ 43,478 มก./ล. และมีสีน้ำตาลดำ โดย
ใช้วิธีรวมตะกอนด้วยสารสร้างตะกอนคือเฟอริกคลอไรด์ และการดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์ และการ
ออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับเพอร์รัสซัลเฟต ผลการศึกษาพบว่าวิธีรวมตะกอนทางเคมี
ด้วยเฟอริกคลอไรด์ 700 มก./ล ที่พีเอช 4 ประสิทธิภาพในการลดค่าซีไอดีและความเข้มสีร้อยละ 55.79
และ 51.32 จากนั้นนำน้ำชะขยะที่ผ่านกระบวนการรวมตะกอนทางเคมี หาสภาวะที่เหมาะสมในการ
บำบัดค่าซีไอดีและสีด้วยการดูดติดผิวโดยใช้ซีโอไลต์พบว่า ซีโอไลต์ 9 กรัม พีเอช 4 ที่เวลาสัมผัส 90 นาที
สามารถกำจัดค่าซีไอดีและสีมีประสิทธิภาพร้อยละ 17.96, 85.70 ตามลำดับ นำน้ำชะขยะที่ผ่านการรวม
ตะกอนทางเคมีด้วยเฟอริกคลอไรด์และดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์แล้วมาศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของ
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และพีเอชต่อการบำบัดค่าซีไอดีและสีพบว่า ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
เท่ากับ 150 กรัมต่อลิตร พีเอช 4 ลดค่าซีไอดีและความเข้มสีร้อยละ 4.92 และ 94.68 ตามลำดับ จากนั้น
นำน้ำชะขยะที่ผ่านการรวมตะกอนทางเคมีด้วยเฟอริกคลอไรด์และดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์แล้วมาหาสภาวะ
ของเพอร์รัสซัลเฟตร่วมกับการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์พบว่าที่พีเอช 4 ไฮโดรเจนเปอร์
ออกไซด์ 150 กรัมต่อลิตร เพอร์รัสซัลเฟต 0.03 กรัม สามารถกำจัดซีไอดีได้เพียงร้อยละ 1.28 ส่วนความ
เข้มสีนั้นให้ค่าร้อยละที่ติดลบ -32.72 ดังนั้นการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับ
เพอร์รัสซัลเฟตจึงไม่มีความเหมาะสม เมื่อพิจารณากระบวนการทั้งหมดอันประกอบด้วยการรวมตะกอน
ทางเคมีด้วยเฟอริกคลอไรด์ การดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์ และการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดีและสีคิดเป็นร้อยละ 65.52 และ 99.64 ตามลำดับ ค่าใช้จ่ายของสารเคมี
ในกระบวนการทั้งหมดนี้เท่ากับ 1,260 บาทต่อน้ำชะขยะ 1 ลบ.ม

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2554.....

#5170449121 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : LEACHATE/ FERRIC CHLORIDE/ ZEOLITE/ HYDROGEN PEROXIDE

WARUNTHORN KUMPILA: COD AND COLOUR REMOVAL OF SECURE
LANDFILL LEACHATE BY FERRIC CHLORIDE, ZEOLITE AND HYDROGEN
PEROXIDE: ADVISOR: ASSOC. PROF. THARES SRISATIT, Ph.D., 167 pp.

The objective of this study is to remove COD and colour of leachate from secure landfill which is high COD about 43,478 mg/l and black brown colour, by using ferric chloride, zeolite and hydrogen peroxide. The results found that coagulation process the concentration of ferric chloride 700 mg/l at pH 4 can reduce 55.79% of COD and 51.32% of colour. Using the treated leachate by ferric chloride, at pH 4 to remove COD and colour by zeolite. The adsorption efficiency by 9 g of zeolite at pH 4 and contact time 90 min can reduce 17.96% of COD and reduce 85.70% of colour. Using the treated leachate by ferric chloride and optimum dose of zeolite to remove COD and colour by H₂O₂ found that the concentration of H₂O₂ 150 mg/l at pH 4 can reduce COD and colour 4.92%, 94.68% respectively. Using the treated leachate by ferric chloride and optimum dose of zeolite at pH 4 the concentration of H₂O₂ 150 mg/l at and oxidized by Fe²⁺ found that the optimum dose of Fe²⁺ 0.03 g can reduce 1.28%, -32.72% of COD and colour respectively. Totally these processes include that coagulation by ferric chloride, adsorption by zeolite and oxidation by hydrogen peroxide can remove 65.52% of COD and 99.64% of colour. The total chemical cost of treatment is 1,260 Baht per one cubic meter of leachate.

Department:.....Environmental Engineering..... Student's Signature

Field of Study:.....Environmental Engineering..... Advisor's Signature

Academic Year:.....2011.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือที่ดีจากหลายฝ่ายด้วยกัน
 ดังนั้นผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคล และหน่วยงานต่างๆ ดังนี้

รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัช ศรีสถิตย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้
 คำแนะนำ คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยด้วยดีเสมอมา และได้สละเวลาอันมีค่าในการ
 ช่วยตรวจสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนมีความสมบูรณ์ถูกต้องมากยิ่งขึ้น รวมถึงทุนวิจัยที่
 อาจารย์ได้มอบให้เพื่อสนับสนุนงานวิจัยนี้ ตลอดจนความห่วงใย และกำลังใจที่ได้รับโดยเสมอมา

รองศาสตราจารย์วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถพันธ์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ และอาจารย์ ดร. พรรณวดี สุวัฒิกะ คณะกรรมการ
 วิทยานิพนธ์ ที่ช่วยให้คำชี้แนะ และตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชา
 ความรู้แก่ผู้วิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ภาควิชาสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวก
 ความสะดวกในการติดต่อประสานงานด้านต่างๆ ตลอดช่วงระยะเวลาที่ได้เข้ารับการศึกษ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยปริญญาโท หน่วยวิจัยกากของเสียอุตสาหกรรม
 ห้องปฏิบัติการขยะมูลฝอย ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ
 วิศวกรรมศาสตร์

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้การ
 สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อใช้ในการวิจัยนี้ และวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรม
 ราโชปถัมภ์ ที่สนับสนุนค่าเดินทาง อาหาร และที่พัก ไปนำเสนอผลงานวิจัย ณ ฮานอย ประเทศ
 เวียดนาม

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ ทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือทุกครั้งเมื่อมีปัญหา และ
 กำลังใจในการทำงานมาโดยตลอด

คุณความดีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบให้แก่บิดามารดา และญาติพี่น้องทุก
 ท่าน ผู้ที่มีพระคุณอย่างสูง ซึ่งให้การอบรม การเลี้ยงดู การศึกษา มาตั้งแต่เยาว์วัย และยังได้ให้
 คำปรึกษา คำแนะนำ และกำลังใจที่ดีที่สุดในระหว่างการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์มาโดย
 ตลอดจนเสร็จสมบูรณ์ในที่สุด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การฝังกลบอย่างปลอดภัย.....	5
2.1.1 หลักเกณฑ์ในการเลือกที่ตั้งของหลุมฝังกลบอย่างปลอดภัย.....	6
2.1.2 โครงสร้างของหลุมฝังกลบแบบปลอดภัย.....	6
2.1.3 การฝังกลบและบันทึกข้อมูลการฝังกลบ.....	11
2.1.4 การดูแลพื้นที่หลังปิดหลุมฝังกลบ.....	12
2.2 น้ำชะขยะ.....	15
2.2.1 แหล่งกำเนิดของน้ำชะขยะ.....	15
2.2.2 องค์ประกอบของน้ำชะขยะและปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะสมบัติของ น้ำชะขยะ.....	16
2.2.3 การบำบัดน้ำชะขยะ.....	18
2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี.....	20
2.4 กระบวนการรวมตะกอนทางเคมี.....	21
2.4.1 พฤติกรรมของคอลลอยด์.....	22

	หน้า
2.4.2 การเลือกใช้สารสร้างตะกอน.....	30
2.4.3 กลไกโคแอกกูเลชันด้วยเฟอริกคลอไรด์.....	31
2.5 การดูดติดผิว.....	34
2.5.1 กลไกการดูดติดผิว.....	34
2.5.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล.....	36
2.5.3 สมดุลการดูดติดผิว.....	37
2.5.4 ไอโซเทอมการดูดติดผิว.....	37
2.6 ซีโอไลต์.....	41
2.6.1 นิยามของซีโอไลต์.....	41
2.6.2 สมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์.....	45
2.6.3 ประโยชน์ของซีโอไลต์.....	46
2.7 กระบวนการออกซิเดชันด้วยสารเคมี.....	49
2.7.1 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	50
2.7.2 กระบวนการออกซิเดชันด้วยเฟนตันรีเอเจนต์.....	52
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	53
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย.....	61
3.1 สถานที่ดำเนินการศึกษาวิจัย.....	61
3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	61
3.2.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์.....	61
3.2.2 สารเคมี.....	62
3.3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	62
3.3.1 ศึกษาลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำชะขยะ.....	66
3.3.2 ศึกษาความสามารถในการลดซีโอดีของเฟอริกคลอไรด์.....	67
3.3.3 ศึกษาความสามารถในการลดซีโอดีของซีโอไลต์.....	69
3.3.4 ทำการทดสอบไอโซเทอม.....	71
3.3.5 ศึกษาความสามารถของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการลดซีโอดีของน้ำชะขยะ.....	73

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลทดลอง.....	76
4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำชะขยะ.....	76
4.2 ผลการตกตะกอนโดยการทำจาร์เทสต์ โดยใช้เฟอริกคลอไรด์ เป็นสารสร้างตะกอน.....	79
4.2.1 ผลการหาค่าความเข้มข้นเฟอริกคลอไรด์ที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการรวมตะกอน.....	79
4.2.2 ผลการหาค่าพีเอชที่เหมาะสม.....	81
4.3 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว.....	83
4.3.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณซีโอไลต์.....	83
4.3.2 ผลการหาค่าพีเอชที่เหมาะสม.....	86
4.3.3 ผลการหาระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสม.....	88
4.3.4 ผลการทดสอบไอโซเทอม.....	90
4.4 ผลการศึกษาความสามารถของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการลดสี ของน้ำชะขยะ.....	93
4.4.1 ผลการหาปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เบื้องต้น.....	93
4.4.2 ผลการหาค่าพีเอช (pH) ที่เหมาะสม.....	95
4.4.3 ผลการหาปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม.....	97
4.4.4 ผลการศึกษาผลของเหล็กในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการออกซิเดชัน ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	99
4.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและความเข้มข้นโดยรวมทั้งกระบวนการ.....	102
4.6 การประเมินค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำชะขยะ.....	105
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	106
รายการอ้างอิง.....	108
ภาคผนวก.....	113
ภาคผนวก ก. วิธีวิเคราะห์สี.....	114
ภาคผนวก ข. การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	122

	หน้า
ภาคผนวก ค. มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมภายใน นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด.....	125
ภาคผนวก ง. ภาพถ่ายอุปกรณ์บางอย่างที่ใช้ในงานวิจัย.....	127
ภาคผนวก จ. ผลการรวมตะกอนน้ำชะขยะด้วยเฟอริกคลอไรด์.....	131
ภาคผนวก ฉ. ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวของซีโอไลต์.....	136
ภาคผนวก ช. ผลการศึกษาไอโซเทอม.....	143
ภาคผนวก ซ. ผลการศึกษาปัจจัยที่มีต่อการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..	145
ภาคผนวก ฌ. ผลการวิเคราะห์ XRF.....	154
ภาคผนวก ญ. ผลการวิเคราะห์โลหะหนัก ด้วยเครื่อง ICP.....	156
ภาคผนวก ฎ. ภาพรวมผลการทดลอง.....	159
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	165

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 เกณฑ์เฉลี่ยปริมาณสารอันตรายในน้ำชะขยะ.....	13
ตารางที่ 2-2 สารประกอบอินทรีย์ในน้ำชะขยะ.....	17
ตารางที่ 2-3 กระบวนการต่างๆ ที่ใช้ในการบำบัดน้ำชะขยะ.....	19
ตารางที่ 2-4 คุณสมบัติของเฟอริกคลอไรด์.....	32
ตารางที่ 2-5 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี.....	35
ตารางที่ 2-6 สรุปผลการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	60
ตารางที่ 3-1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	63
ตารางที่ 3-2 การศึกษาสมบัติของน้ำชะขยะ.....	66
ตารางที่ 4-1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำชะขยะ.....	77
ตารางที่ 4-2 ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดีและความเข้มข้นของเฟอริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	79
ตารางที่ 4-3 ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนน้ำชะขยะ.....	81
ตารางที่ 4-4 ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดีและความเข้มข้นหลังผ่านการบำบัดด้วยซีไอไลต์ในปริมาณต่างๆ.....	84
ตารางที่ 4-5 ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดีและความเข้มข้นหลังผ่านการบำบัดด้วยซีไอไลต์ที่พีเอชต่างๆ.....	86
ตารางที่ 4-6 ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดีและความเข้มข้นหลังผ่านการบำบัดด้วยซีไอไลต์ ณ เวลาต่างๆ.....	88
ตารางที่ 4-7 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับค่าซีไอดีในน้ำชะขยะเมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีไอไลต์.....	90
ตารางที่ 4-8 ค่าคงที่ของซีไอไลต์จากสมการของแลงมัวร์.....	92
ตารางที่ 4-9 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีและสี หลังเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นต่างๆ.....	93

	หน้า
ตารางที่ 4-10 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและสี หลังเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำชะ ขยะที่พีเอชต่างๆ.....	94
ตารางที่ 4-11 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและสี หลังเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความ เข้มข้นต่างๆ ในน้ำชะขยะที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4.....	96
ตารางที่ 4-12 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและสี หลังเติมเฟอร์รัสซัลเฟต ในน้ำชะขยะที่ พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4ที่และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 150 กรัมต่อลิตร.....	98
ตารางที่ 4-13 ผลการบำบัดน้ำชะขยะทั้งหมดที่สภาวะที่เหมาะสม.....	101
ตารางที่ 4-14 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำชะขยะหลังการ บำบัด.....	102

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2-1 การรองพื้นหลุมฝังกลบกากอุตสาหกรรมอันตราย.....	8
ภาพที่ 2-2 การปลูกพืชคลุมดินบนพื้นที่ฝังกลบกากอุตสาหกรรม.....	10
ภาพที่ 2-3 การเกิดน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบของเสียอันตราย.....	15
ภาพที่ 2-4 โมเดลที่ใช้อธิบาย Electrical Double Layer Theory.....	24
ภาพที่ 2-5 แรงระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ที่ระยะห่างต่างๆ.....	25
ภาพที่ 2-6 ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับคอลลอยด์.....	26
ภาพที่ 2-7 การเปรียบเทียบปริมาณโคแอกกูแลนต์ ที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพ ของคอลลอยด์ด้วย.....	27
ภาพที่ 2-8 ไดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมโคแอกกูแลนต์ด้วยเฟอริกคลอไรด์.....	33
ภาพที่ 2-9 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์.....	36
ภาพที่ 2-10 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบพื้นฐาน.....	38
ภาพที่ 2-11 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดิช.....	39
ภาพที่ 2-12 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์.....	40
ภาพที่ 2-13 หน่วยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์ เตตระฮีดรอลสองหมู่ของ SiO ₄ /AlO ₄	41
ภาพที่ 2-14 รูปทรงเตตระฮีดรอลของออกซิเจนโคออร์ดิเนตกับซิลิกอน หรืออะลูมิเนียม.....	42
ภาพที่ 3-1 ท่อน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบของเสียอันตราย.....	64
ภาพที่ 3-2 กองกากของเสียอุตสาหกรรม.....	65
ภาพที่ 3-3 ขั้นตอนการวิจัย.....	68
ภาพที่ 3-4 แผนการวิจัยการหาปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมในการทดลอง.....	70
ภาพที่ 3-5 แผนการวิจัยการหาสถานะที่เหมาะสมของซีโอไลต์ (แบบไม่ต่อเนื่อง).....	72
ภาพที่ 3-6 แผนการวิจัยการหาไอโซเทอมการดูดซับ.....	75
ภาพที่ 3-7 แผนการวิจัยการศึกษาความสามารถของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในการลดสีของน้ำชะขยะ.....	75



	หน้า
ภาพที่ 4-1 ลักษณะน้ำชะขยะเปรียบเทียบกับน้ำประปา.....	78
ภาพที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและพีเอชหลังการตกตะกอนกับร้อยละการกำจัด ซีโอดี.....	80
ภาพที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเฟอริกคลอไรด์กับร้อยละการกำจัดซีโอดี และค่าพีเอชหลังตกตะกอน.....	82
ภาพที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีโอไลต์กับประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีและ ความเข้มสี.....	85
ภาพที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีและ ความเข้มสี.....	86
ภาพที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่างๆ กับประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีและ ความเข้มสี.....	89
ภาพที่ 4-7 ไอโซเทอมการดูดติดแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์.....	91
ภาพที่ 4-8 ไอโซเทอมการดูดติดแบบแลงมัวร์ของซีโอไลต์.....	91
ภาพที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับร้อยละการบำบัด สีและซีโอดี.....	93
ภาพที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับร้อยละการบำบัดสีและซีโอดี.....	95
ภาพที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับร้อยละการกำจัด สีและซีโอดี.....	96
ภาพที่ 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟอรัสซัลเฟต กับร้อยละการบำบัดสีและซีโอดีใน น้ำชะขยะที่ผ่านการตกตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์และออกซิเดชันด้วย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 150 กรัม/ลิตร.....	99
ภาพที่ 4-13 ลักษณะน้ำชะขยะหลังผ่านการบำบัดเปรียบกับก่อนบำบัด.....	102

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มลพิษจากของเสียอันตราย เป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญและมีแนวโน้มที่จะรุนแรงขึ้น ทั้งนี้ เพราะของเสียอันตรายที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมต่างๆ ทั่วประเทศ ทั้งจากอุตสาหกรรม เกษตรกรรม ชุมชน พาณิชยกรรม การบริหารท่าเรือ การเดินเรือ โรงพยาบาลและห้องปฏิบัติการ กิจกรรมด้านการทหาร สาธารณูปโภค และกิจกรรมต่างๆ ได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยมีประมาณ 1.862 ล้านตัน ในปี 2551 (กรมควบคุมมลพิษ, 2552) ซึ่งปริมาณของเสียอันตรายที่เกิดขึ้นนี้ยังไม่สามารถกำจัดได้ทั้งหมด โดยในภาคอุตสาหกรรมสามารถกำจัดของเสียอันตรายได้ประมาณปีละ 530,000 ตัน จาก 950,000 ตัน ส่วนมูลฝอยติดเชื้อที่เกิดขึ้นปีละ 110,000 ตัน สามารถกำจัดโดยการเผาในเตาได้เพียง 40,000 ตัน สำหรับของเสียอันตรายจากชุมชนที่เกิดขึ้นประมาณปีละ 360,000 ตัน ยังไม่มีการรวบรวม หรือกำจัดอย่างถูกวิธี และถูกทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อมร่วมกับมูลฝอยชุมชน ทำให้มีการรั่วไหลหรือแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน รวมทั้งก่อให้เกิดความเสื่อมโทรมของระบบนิเวศ และทัศนียภาพ

แนวทางการกำจัดขยะมูลฝอยอันตรายในประเทศไทยนั้นจะถูกบำบัดโดยวิธีฝังกลบอย่างปลอดภัย (Secure landfill) ซึ่งการฝังกลบทำให้เกิดน้ำจากขยะมูลฝอย รวมทั้งน้ำฝนที่ตกลงมาสู่หลุมฝังกลบ โดยน้ำฝนจะพาสารละลายและสารแขวนลอยออกมา ทำให้เกิดเป็นน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสูง เรียกว่า น้ำชะขยะ (Leachate) ซึ่งจะปนเปื้อนแหล่งน้ำผิวดินบริเวณใกล้เคียง เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจึงต้องมีการบำบัดก่อนระบายสู่สิ่งแวดล้อม

น้ำชะขยะเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีและชีวภาพในหลุมฝังกลบขยะ น้ำชะขยะมักมีสีน้ำตาลดำที่เกิดจากสารประกอบฮิวมิก (Humic Substance) ซึ่งสีของน้ำชะขยะนี้นอกจากจะก่อให้เกิดความรู้สึกพึงรังเกียจต่อผู้ที่พบเห็นแล้ว หากน้ำชะขยะมีความเข้มข้นสูงปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำจะขัดขวางการเดินทางของแสงแดดลงสู่แหล่งน้ำ เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศในน้ำ นอกจากนี้ยังมีสารเคมีหรือสารพิษประเภทต่างๆ สะสมอยู่ในน้ำชะขยะ อาทิ โลหะหนักต่างๆ สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOC) เป็นต้น น้ำชะขยะที่เกิดขึ้นสามารถบำบัดโดยวิธีทางชีวภาพ (Biological) ภายภาพ

(Physical) เคมี (Chemical) หรือแบบผสมของวิธีดังกล่าว การเลือกใช้วิธีการบำบัดขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำชะขยะ

ข้อดีของวิธีการบำบัดน้ำชะขยะแบบต่างๆ เช่น กระบวนการรวมตะกอนทางเคมี มีหลักการทำงานที่แน่นอนไม่ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมมากเหมือนกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา อีกทั้งยังสามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้และสามารถปรับสภาพของน้ำให้เหมาะสมกับความต้องการได้ ถ้าหากผู้ควบคุมการทำงานของระบบทราบทฤษฎีหลักการการทำงานตลอดจนขั้นตอนต่างๆ เป็นอย่างดี ว่าการใส่สารเคมีลงไปแล้วจะทำให้เกิดผลตามที่ต้องการได้อย่างไร และไม่เกิดปัญหาในการควบคุมหรือเกิดขึ้นก็สามารถทราบสาเหตุและวิธีการแก้ไขได้โดยง่าย กระบวนการดูดติดผิว เป็นกระบวนการที่สามารถทำได้สะดวก ไม่ต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาสูง สามารถกำจัดสารปนเปื้อนที่มีอยู่ในน้ำเสียค่อนข้างมีประสิทธิภาพที่ดี กระบวนการออกซิเดชันเป็นกระบวนการที่เกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียอิเล็กตรอน (Electron) ของอะตอม ดังนั้น โดยอาศัยหลักการนี้ การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีนี้จึงเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนสภาพของมลสารที่อยู่ในน้ำจากมลสารประเภทมีพิษมากไปเป็น มลสาร ประเภทมีพิษน้อยหรือไม่มีพิษ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ ๒๕๓๙) และผลิตภัณฑ์ สุดท้ายที่ได้ ยัง สามารถถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ คือ

ปัจจุบันที่หลุมฝังกลบกากของเสียอันตรายของ บริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (GENCO) ในการจัดการกากของเสียอันตรายในบริเวณมาบตาพุด มีวิธีการจัดการน้ำชะขยะ โดยได้ทำการรวบรวมน้ำชะมูลฝอยนี้ประมาณวันละ 20-30 ลูกบาศก์เมตร ส่งเผาในอัตราการจ้างทำลายประมาณ 3,000-4,000 บาทต่อลูกบาศก์เมตรน้ำชะขยะ ทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงมากในแต่ละวัน แต่ถ้าจะส่งไปบำบัดที่โรงบำบัดของการนิคมอุตสาหกรรมจะต้องทำการลดค่าซีโอดีลงให้ไม่เกิน 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงจะสามารถนำส่งไปยังโรงบำบัดน้ำเสียรวมของการนิคมอุตสาหกรรมได้ ซึ่งเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการบำบัดขั้นต้น ก่อนที่จะส่งให้โรงบำบัดน้ำเสียของการนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการบำบัดน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบของเสียอันตราย ซึ่งมีความสกปรกในรูปของค่าซีโอดีสูงมาก โดยมีค่าประมาณ 30,000-50,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีสีน้ำตาลดำ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการบำบัด โดยการรวมตะกอนทางเคมี ซึ่งสารรวมตะกอนที่เลือกคือ เฟอร์ริกคลอไรด์ และใช้ซีโอไลต์เป็นตัวดูดติดผิว เพื่อลดค่าซีโอดี ลดสีด้วยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. หาประสิทธิภาพโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์ตามด้วย การดูดซับด้วยซีโอไลต์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ร่วมกับเฟอร์ริสซัลเฟต ในการลดค่าซีโอดีและสีในน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบของเสียอันตราย

2. หาสมภาวะที่เหมาะสม อาทิ พีเอชของน้ำชะมูลฝอย ปริมาณสารรวมตะกอน สารดูดติดผิวและสารกำจัดสี ในการลดค่าซีโอดีและสีในน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบของเสียอันตราย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ณ หน่วยวิจัยการจัดการของเสียอุตสาหกรรมห้องปฏิบัติการ ขยะมูลฝอย (Solid waste laboratory) ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีการกำหนดขอบเขตของการวิจัยไว้ดังนี้

1. น้ำชะขยะที่ใช้เป็นน้ำชะขยะจริงจากหลุมฝังกลบของเสียอันตราย บริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (GENCO)

2. ใช้วิธีจาร์เทสต์ในการทดสอบความสามารถในการเป็นโคแอกกูแลนต์ของเฟอริกคลอไรด์

3. ใช้การดูดซับน้ำชะขยะเพื่อทดสอบความสามารถในการเป็นสารดูดติดผิวของซีโอไลต์

4. ลดสีของน้ำชะขยะโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับเฟอร์ริสซัลเฟต

5. พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์น้ำชะขยะ คือ พีเอช ซีโอดี บีโอดี และค่าความเข้มสี

6. การทดลองนี้เป็นการบำบัดเบื้องต้นเพื่อให้สามารถส่งไปบำบัดต่อไปที่โรงบำบัดน้ำเสียรวมของการนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด

7. การประเมินค่าใช้จ่ายในเรื่องสารเคมี ไม่รวมค่าไฟและค่าแรง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบแนวทางที่เหมาะสมในการลดค่าซีโอดีและนำไปบำบัดโดยวิธี ที่เหมาะสมกว่าการนำไปเผาในเตา
2. ทราบถึงประสิทธิภาพของเฟอริกคลอไรด์ ซีโอไลต์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการบำบัดน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบกากของเสียอันตรายเพื่อการพัฒนาวิธีการในการลดค่าซีโอดีของน้ำเสียที่มีความสกปรกสูงจากแหล่งอื่นๆ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ของเสียอันตราย หรือ ขยะอันตราย (Hazardous waste) หมายถึง เศษสิ่งของที่ไม่ใช้แล้วหรือเสื่อมสภาพ รวมถึงภาชนะบรรจุภัณฑ์ต่างๆ ที่เป็นอันตราย การจัดการของเสียอันตราย นอกจากการลดหรือการใช้ประโยชน์จากของเสียอันตรายแล้ว การกำจัดของเสียอันตรายก็เป็นสิ่งที่ต้องดำเนินการด้วย คือ การฝังกลบแบบปลอดภัย (Secure landfill) เป็นกระบวนการกำจัดขั้นสุดท้าย โดยนำของเสียอันตรายที่ผ่านการปรับเสถียรแล้ว ไปฝังในหลุมฝังกลบที่มีการออกแบบเป็นพิเศษ เช่น มีวัสดุกันซึม 2 ชั้น (Double liners) มีการติดตั้งบ่อสังเกตการณ์เพื่อติดตามตรวจสอบการรั่วไหลของสารพิษ เป็นต้น สำหรับรายละเอียดจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548)

2.1 การฝังกลบอย่างปลอดภัย (Secure landfill) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548)

หลักการทั่วไปของการฝังกลบอย่างปลอดภัยโดย โครงสร้างของหลุมจะต้องมีการป้องกันการรั่วซึมของน้ำและสารปนเปื้อนอย่างรัดกุมทั้งที่ก้นหลุม ด้านข้างหลุม และด้านบนของหลุม ส่วนล่างของหลุมจะต้องมีระบบระบายน้ำชะขยะ (Leachate) เพื่อนำมาบำบัดภายนอกต่อไป

เมื่อของเสียเต็มหลุมต้องทำการปิดหลุมด้วยวัสดุป้องกันการรั่วซึมชนิดต่างๆ แล้วปูทับด้วยดินอีกชั้นแล้วทำการปรับพื้นที่ปลูกพืชคลุมดินไว้เพื่อลดการชะล้างพังทลายของหน้าดินออก จากนั้นด้านบนของหลุมฝังกลบจะต้องมีท่อระบายก๊าซ (Gas venting pipe) เพื่อระบายก๊าซที่เกิดขึ้นภายในออกสู่ภายนอก เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการอัดตัวของก๊าซจนดันหลุมฝังกลบให้มีรอยแตกได้ หลุมฝังกลบจะต้องมีคูระบายน้ำโดยรอบ (Drainage ditch) เพื่อช่วยระบายน้ำที่ไหลจากด้านบนของหลุมฝังกลบซึ่งจะมีความสำคัญมากในช่วงฤดูฝน ด้านข้างของหลุมฝังกลบทั้ง 2 ด้านต้องมีบ่อบาดาลเป็นบ่อสังเกตการณ์ (Observation well) เพื่อตรวจสอบการรั่วไหลของของเสียลงสู่ใต้ดิน โดยต้องทำการเก็บตัวอย่างน้ำในบ่อทั้งสองรวมทั้งตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำผิวดินบริเวณใกล้เคียงมาตรวจสอบปริมาณสารปนเปื้อนอยู่เสมอ

ของเสียที่ฝังในหลุมอาจฝังโดยบรรจุอยู่ในภาชนะหรือไม่ก็ได้ อย่างไรก็ตามห้ามฝังของเสียที่อยู่ในรูปของของเหลวลงในหลุมเนื่องจากมีศักยภาพที่จะรั่วไหลสู่ภายนอกได้ง่าย

2.1.1 หลักเกณฑ์ในการเลือกที่ตั้งของหลุมฝังกลบอย่างปลอดภัย

หลักเกณฑ์ทั่วไปในการเลือกที่ตั้งของหลุมฝังกลบอย่างปลอดภัย มีดังนี้

- มีพื้นที่เพียงพอที่จะฝังกลบของเสียซึ่งมีปริมาณตามที่คาดการณ์ไว้
- มีแนวกันชนโดยรอบพื้นที่
- ต้องไม่ห่างไกลจากแหล่งกำเนิดหรือบริเวณที่ทำการบำบัดของเสียอันตรายมากนักเพื่อจะได้ไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการขนส่งของเสีย
- เป็นบริเวณที่มีการคมนาคมสะดวก สามารถเข้า-ออกได้ทุกฤดูกาล
 - อยู่ห่างจากทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงจังหวัดไม่น้อยกว่า 100 เมตร แต่ไม่เกิน 10 กิโลเมตร
 - อยู่ห่างจากชุมชนเมือง อำเภอ ตำบล หมู่บ้าน และแหล่งพักอาศัยไม่น้อยกว่า 3 กิโลเมตร
 - อยู่ห่างจากแม่น้ำลำคลอง และแหล่งน้ำต่างๆ ไม่น้อยกว่า 300 เมตร และไม่อยู่ในบริเวณพื้นที่ต้นน้ำลำธาร
 - อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินไม่น้อยกว่า 1.5 เมตร
 - ไม่อยู่ในพื้นที่ที่มีน้ำท่วมหรืออยู่ในบริเวณที่มีสภาพดินที่มีน้ำซึมผ่านได้ง่าย
 - ไม่อยู่ในพื้นที่สำคัญทางศาสนา และพื้นที่อนุรักษ์ เช่น อุทยานประวัติศาสตร์ ป่าสงวนแห่งชาติ ป่าชายเลน
 - ไม่อยู่ในพื้นที่ที่มีการทำเหมืองแร่ หรือห่างจากพื้นที่ที่มีแผ่นดินเลื่อนมากกว่า 100 เมตร

2.1.2 โครงสร้างของหลุมฝังกลบแบบปลอดภัย

โครงสร้างของหลุมฝังกลบแบบปลอดภัยประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

- ส่วนบนกั้นหลุม เพื่อใช้รวบรวมน้ำชะขยะที่อาจเกิดขึ้นเพื่อนำมาบำบัดภายนอกหลุมฝังกลบ และให้เกิดการเคลื่อนย้ายมลสารต่างๆ ออกสู่ภายนอก
- ส่วนปิดด้านบนหลุม เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำจากภายนอกซึมผ่านเข้าสู่หลุม และเพื่อให้เกิดการปลดปล่อยมลสารออกจากหลุมฝังกลบ

ก่อนฝังกลบจะต้องมีการปูพื้นและด้านข้างหลุมฝังกลบโดยวัสดุที่ใช้ในการปู (Lining materials) นี้ ต้องมีความแข็งแรงและหนาเพียงพอที่จะทนต่อการรับน้ำหนักและแรงดันที่จะเกิดขึ้นทั้งหมด และจะต้องมีองค์ประกอบอย่างน้อยดังต่อไปนี้ (ภาพที่ 2-1)

2.1.2.1 บุด้านข้างและด้านข้างโดยรอบหลุมฝังด้วยวัสดุต่างๆ (Liners) หลายชั้นเพื่อป้องกันการซึมผ่านของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วออกสู่น้ำใต้ดินหรือน้ำผิวดินที่อยู่ใกล้เคียง โดยปูตามลำดับชั้นตั้งแต่ชั้นล่างสุดจนถึงบนสุด คือ

- ชั้นดินธรรมชาติหรือดินเดิมที่บดอัดแน่น ที่สามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกด้านบนได้ทั้งหมด และป้องกันความเสียหายต่อวัสดุปูพื้นด้านล่างโดยบดอัดแน่นหนาไม่ต่ำกว่า 30 เซนติเมตร และมีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 85% ของความหนาแน่นมาตรฐาน (Standard proctor test) โดยการบดอัดดินให้แน่นที่ระดับความหนา (Lift) ทุกๆ 15 เซนติเมตร

- ชั้นกันซึมทุติยภูมิชั้นล่าง (Secondary protective barrier) ประกอบด้วยชั้นดินเหนียวที่ยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) ได้ไม่เกินกว่า 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที (ประมาณ 0.1 ฟุตต่อปี) มีความหนาไม่ต่ำกว่า 90 เซนติเมตร และแผ่นวัสดุที่บ่มน้ำสังเคราะห์โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene) มีความหนาอย่างต่ำ 1.5 มิลลิเมตร ในกรณีที่ใช้วัสดุธรณีสังเคราะห์แบบคอมโพสิต (Geocomposite) จะต้องได้ชั้นกันซึมที่มีค่าอัตราการซึมนั้น และคุณสมบัติการดูดซับ (Sorptions capacity) เทียบเท่ากับชั้นกันซึมดังกล่าวหรือดีกว่า

- ชั้นระบบรวบรวมน้ำ (Secondary leachate collection layer) จะต้องประกอบด้วยชั้นกรวดทราย ซึ่งเป็นหินกรวดคัดขนาด (Graded sand and gravel) ที่ยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) ได้ไม่ต่ำกว่า 1×10^{-2} เซนติเมตรต่อวินาที และมีความหนาไม่ต่ำกว่า 30 เซนติเมตร ในกรณีที่ใช้วัสดุธรณีสังเคราะห์แบบ Geonet จะต้องได้ชั้นรวบรวมน้ำที่มีค่าอัตราการไหลของน้ำ (Transmissivity) ไม่ต่ำกว่า 3×10^{-5} ตารางเมตรต่อวินาที

- ชั้นกันซึมปฐมภูมิชั้นบน (Primary protective barrier) ประกอบด้วยแผ่นวัสดุที่บ่มน้ำสังเคราะห์ โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene) มีความหนาอย่างต่ำ 1.5 มิลลิเมตร ในกรณีที่ใช้วัสดุธรณีสังเคราะห์แบบคอมโพสิต (Geocomposite) จะต้องได้ชั้นกันซึมที่มีค่าอัตราการซึมน้ำและคุณสมบัติการดูดซับ (Sorptions capacity) เทียบเท่ากับชั้นกันซึมดังกล่าวหรือดีกว่า

- ต้องมีชั้นกรอง (Filter zone) ซึ่งเป็นวัสดุกรองใยสังเคราะห์ (Geotextile) ที่สามารถระบายน้ำส่วนที่อิ่มตัว (Standard hydraulic conductivity) ได้ไม่ต่ำกว่า 1×10^{-2} เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งใช้แยกชั้นระบบรวบรวมน้ำเสียออกจากชั้นที่บรรจุสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว

2.1.2.2 ต้องมีระบบนำน้ำออกจากชั้นกันซึมปฐมภูมิชั้นบน (Primary protective barrier) และชั้นกันซึมทุติยภูมิชั้นล่าง (Secondary protective barrier) โดยน้ำที่รวบรวมจากแต่ละชั้นในหลุมฝังกลบ จะต้องระบายออกไปเก็บในบ่อสูบ (Sump) ที่แยกกัน เพื่อมิให้เกิดการขังของน้ำภายในหลุมฝังกลบและใช้เป็นระบบตรวจสอบการรั่ว (Leak detection system) ของชั้นกันซึมด้วย

2.1.2.3 การระบายที่กันหลุมฝังกลบต้องมีความลาด (Slope) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 1 เพื่อให้การระบายน้ำกันหลุมเป็นไปอย่างสะดวก

โครงสร้างส่วนบนกันหลุมดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 2-1 การรองพื้นหลุมฝังกลบกากอุตสาหกรรมอันตราย
ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2548)

เมื่อหลุมฝังกลบเต็มแล้ว ให้ทำการปิดหลุม (Capping) ด้วยวัสดุต่างๆ หลายชั้นเพื่อป้องกันมิให้น้ำหรือสิ่งรบกวนจากภายนอกเข้ามาสัมผัสกับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วภายในหลุมฝังกลบ โดยปูตามลำดับชั้นตั้งแต่ล่างสุดจนถึงบนสุด (ภาพที่ 2-2) คือ

2.1.2.4 ชั้นดินเหนียวที่ยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) ได้ไม่เกินกว่า 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที มีความหนาไม่ต่ำกว่า 30 เซนติเมตร แล้วปูทับด้วยแผ่นวัสดุที่บีนน้ำสังเคราะห์โพลีเอธิลีนความหนาแน่นสูงที่มีความหนาน้อย 1.5 มิลลิเมตรหรือแผ่นวัสดุสังเคราะห์อื่นที่มีคุณสมบัติเทียบเท่าหรือดีกว่า

2.1.2.5 ชั้นกรวดทรายคัดขนาดเพื่อช่วยในการระบายน้ำหนาน้อย 30 เซนติเมตร ซึ่งใช้ระบายน้ำที่อิ่มตัว (Saturated hydraulic conductivity) ได้ไม่ต่ำกว่า 1×10^{-2} เซนติเมตรต่อวินาที

2.1.2.6 วัสดุรองใยสังเคราะห์และชั้นดินธรรมดาที่เหมาะสมสำหรับปลูกพืชคลุมดินเป็นชั้นบนสุด มีความหนาน้อย 90 เซนติเมตร หากสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วสามารถก่อให้เกิดก๊าซขึ้นได้ในภายหลังการฝังกลบให้จัดให้มีระบบท่อรวบรวมและระบายก๊าซออกไปอย่างเพียงพอแผ่นวัสดุที่บีนน้ำสังเคราะห์โพลีเอธิลีนความหนาแน่นสูงที่ใช้ต้องมีความทึบน้ำ ทนทานต่อสภาพการกัดกร่อนทางเคมีและต่อสภาวะแวดล้อม มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะทนต่อการรับน้ำหนักและแรงดันที่จะเกิดขึ้นทั้งหมด

2.1.2.7 แผ่นวัสดุที่บีนน้ำสังเคราะห์โพลีเอธิลีนความหนาแน่นสูงนี้ต้องเป็นชนิดคุณภาพสูง (High grade) ซึ่งทำจากโพลีเอธิลีนเรซิน (Polyethylene resin) หรือเอธิลีนโคโพลีเมอร์เรซิน (Ethylene copolymer resin) หรือส่วนผสมของโพลีเอธิลีนเรซินเป็นส่วนใหญ่ กับโพลีเอธิลีนเพียงเล็กน้อยจะต้องเป็นของใหม่ไม่เคยใช้งานมาก่อน ผลิตสำเร็จภาพจากโรงงานของผู้ผลิตที่ได้รับมาตรฐานสากลทางด้านการผลิต และต้องมีสีสม่ำเสมอ ไม่มีคราบเหนียว หรือข้อบกพร่องต่างๆ ที่อาจมีผลเสียต่อการใช้งาน เช่น รอยพอง รอยฉีกขาด ตำหนิ ซึ่งเกิดจากสิ่งแปลกปลอม เป็นต้น การเชื่อมต่อแผ่นวัสดุที่บีนน้ำสังเคราะห์โพลีเอธิลีนความหนาแน่นสูง ให้ต่อโดยวิธีเชื่อมด้วยความร้อน โดยต้องเป็นแบบ wedge weld ชนิด dual track หรือ extrusion joint ตามความเหมาะสมของวิธีการ โดยมีระยะทางตามคำแนะนำของผู้ผลิต หรือไม่น้อยกว่า 10 เซนติเมตร เมื่อทดสอบ shear test และ peel test ของจุดเชื่อมตามมาตรฐาน ASTM D4437 จะต้องมีคุณสมบัติต่างๆ ไม่ต่ำกว่าแผ่นวัสดุที่บีนน้ำสังเคราะห์โพลีเอธิลีนความหนาแน่นสูงเอง และให้ทดสอบรอยรั่วจากการเชื่อมโดยวิธี air pressure test สำหรับ dual track และโดยวิธี vacuum box test สำหรับ extrusion welding หากใช้แผ่นวัสดุที่บีนน้ำสังเคราะห์ (Geomembrane) ประเภทอื่นๆ ต้องมีคุณสมบัติเทียบเท่ากับแผ่นวัสดุที่บีนน้ำ

สังเคราะห์โพลีเอทิลีน ความหนาแน่นสูงหรือสูงกว่า และต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม วัสดุธรณีสังเคราะห์ (Geosynthetics) ประเภทอื่นๆที่นำมาใช้ต้องได้รับการพิจารณาและเห็นชอบจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม

2.1.2.8 หลุมฝังกลบจะต้องได้รับการออกแบบให้สามารถควบคุมการไหลท่วมและซังนองของปริมาณน้ำฝนในรอบ 24 ชั่วโมง ของคาบการตกของฝนในรอบ 25 ปีได้ โดยจัดให้มีระบบป้องกันมิให้น้ำฝนหรือน้ำไหลบ่าจากด้านนอกหลุมฝังกลบเข้ามาสัมผัสกับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วในหลุมฝังกลบระหว่างการฝังกลบ รวมทั้งจัดให้มีระบบระบายน้ำออกจากบริเวณหลุมฝังกลบได้อย่างรวดเร็วและเหมาะสม หากน้ำที่สัมผัสกับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ไม่ว่าจะในกรณีใด ให้ถือเสมือนหนึ่งเป็นน้ำเสียที่ต้องผ่านการบำบัดจนมีคุณลักษณะได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งตามที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด จึงระบายออกทิ้งได้

โครงสร้าง ส่วนปิดด้านบนหลุม แสดงรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 2-2 การปลูกพืชคลุมดินบนพื้นที่ฝังกลบกากอุตสาหกรรม

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2548)

2.1.3 การฝังกลบและบันทึกข้อมูลการฝังกลบ

2.1.3.1 สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่นำมาฝังกลบนั้น เมื่อทำการสกัดและวิเคราะห์ตามวิธีที่กำหนดในข้อ 6.2 6.3 และ 6.4 ของภาคผนวกที่ 2 ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 จะต้องมีค่าความเข้มข้นของสารอันตรายต่างๆ ไม่มากกว่าที่ระบุไว้ในข้อ 5.2 ของภาคผนวกที่ 2 ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับดังกล่าว และจะต้องทำให้เป็นก้อนแข็งก่อนดำเนินการฝังกลบ โดยให้มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- สามารถรับแรงอัด (Unconfined compressive strength) ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D-1633 และ D-2166 ได้ ไม่น้อยกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือต้องสามารถรับน้ำหนักที่กดทับด้านบนเมื่ออยู่ในหลุมฝังกลบ (Secure Landfill) ได้อย่างปลอดภัย

- มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.15 ตันต่อลูกบาศก์เมตร

2.1.3.2 ห้ามมิให้ฝังกลบสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ซึ่งมีส่วนประกอบที่เป็นของเหลวอิสระ (Free liquid) โดยให้ทดสอบสถานะของของเหลวอิสระด้วยมาตรฐาน Paint filter liquids test – USEPA (United States Environment Protection Agency) SW-846 Method 9095 ทุกครั้ง

2.1.3.3 ให้จัดทำบันทึกการดำเนินงาน ซึ่งมีรายการแสดงเกี่ยวกับประเภท ชนิด ปริมาณ วิธีการฝังรวมทั้งฝังการจัดแบ่งส่วน (Cell) หลุมฝัง และชนิดของสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ที่อยู่ในแต่ละส่วนของหลุมฝัง โดยให้เก็บรักษานี้ไว้ เพื่อให้กรมโรงงานอุตสาหกรรมสามารถตรวจสอบได้ทุกเมื่อ

2.1.3.4 เมื่อเลิกใช้หลุมฝังกลบในบางบริเวณเป็นการชั่วคราว ต้องจัดให้มีการปิดคลุมด้วยแผ่นวัสดุที่บดน้ำสังเคราะห์โพลีเอธิลีนความหนาแน่นสูง ที่มีความหนาไม่ต่ำกว่า 1.5 มิลลิเมตร และจัดระบบระบายน้ำออกจากพื้นที่นั้นให้เพียงพอ พร้อมทั้งให้มีวิธีการป้องกันการชะล้างโดยวิธีที่ได้รับความเห็นชอบจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม

2.1.3.5 จัดให้มีวัสดุปิดคลุมสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วในหลุมฝังกลบหลังจากเสร็จสิ้นภาระกิจการฝังในแต่ละวันเพื่อลดการกระจายของฝุ่นอันตรายอันอาจเกิดจากแรงลม วัสดุปิดคลุมอาจเป็นวัสดุสังเคราะห์หรือวัสดุธรรมชาติ ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมเห็นชอบ

2.1.3.6 ให้ปลูกพืชคลุมดินบนหลุมฝังกลบที่ปิดแล้ว เพื่อลดความรุนแรงของการพังทลายของผิวดิน โดยพืชที่ปกคลุมดินจะต้องเป็นพืชรากสั้น หรือมีเอกสารที่พิสูจน์ได้ว่าความยาวที่สุดของรากจะยาวน้อยกว่า 90 เซนติเมตร

2.1.3.7 ผู้ประกอบกิจการโรงงานจะต้องแจ้งให้กรมโรงงานอุตสาหกรรมทราบถึง กำหนดการปิดหลุมฝังกลบขั้นสุดท้าย เพื่อให้กรมโรงงานอุตสาหกรรมทำการตรวจสอบความเรียบร้อย ของหลุมฝังกลบก่อนการปิดหลุม หากต้องแก้ไขและมีค่าใช้จ่ายเกิดขึ้นเท่าใด ให้อยู่ในความรับผิดชอบ ของผู้ประกอบกิจการโรงงานทั้งหมด

2.1.3.8 เมื่อเลิกใช้หลุมฝังกลบโดยปิดคลุมด้านบนเรียบร้อยแล้ว ผู้ประกอบกิจการ โรงงานจะต้องรับผิดชอบดูแลรักษาและตรวจสอบหลุมฝังกลบไปอีกเป็นระยะเวลา 30 ปี นับจากวันที่ ปิดหลุมฝังกลบเสร็จเรียบร้อย ในกรณีที่ยังไม่แน่ใจในความปลอดภัยของหลุมฝังกลบนั้น กรมโรงงาน อุตสาหกรรมอาจพิจารณากำหนดระยะเวลาดังกล่าวให้นานขึ้นตามความเหมาะสมได้

2.1.3.9 ค่าใช้จ่ายของการแก้ไขหลุมฝังกลบที่เกิดมีรอยรั่ว การฉีกขาด หรือเกิด ข้อบกพร่องใดๆ ที่ก่อให้เกิดการรั่วไหลของสารต่างๆ ออกสู่ภายนอกหลุม ทั้งในระหว่างการฝังและ ในช่วงระยะเวลาการดูแลของผู้ดำเนินการฝังหลังการปิดหลุมฝังกลบแล้ว ให้อยู่ในความรับผิดชอบ ของผู้ประกอบกิจการโรงงานทั้งหมด

2.1.4 การดูแลพื้นที่หลังปิดหลุมฝังกลบและการตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อม

2.1.4.1 ต้องจัดสร้างบ่อสังเกตการณ์ (Monitoring well) สำหรับตรวจสอบคุณลักษณะ ของน้ำใต้ดินในชั้นไม่อิ่มตัว (Unsaturated zone) และชั้นอิ่มตัว (Saturated zone) ที่ตื้นที่สุดที่ไหล ผ่านบริเวณหลุมฝังกลบ โดยตั้งอยู่ที่บริเวณเหนือน้ำ (Upgradient) และได้น้ำ (Downgradient) ของ หลุมฝังกลบตามทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน สถานที่ตั้งและจำนวนของบ่อสังเกตการณ์ ให้กำหนด ตามความจำเป็นและเหมาะสมต่อการที่จะให้ได้ตัวอย่างของน้ำใต้ดินที่สามารถใช้เป็นตัวแทน คุณภาพน้ำใต้ดินธรรมชาติจากบริเวณด้านเหนือน้ำ (Upgradient) และด้านได้น้ำ (Downgradient) หลุมฝังกลบ เพื่อสามารถไปทำการเปรียบเทียบวิเคราะห์และประเมินผลความปลอดภัยของหลุมฝัง กลบ

2.1.4.2 การกำหนดชนิดและปริมาณของสารเพื่อใช้ในการตรวจสอบน้ำในบ่อ สังเกตการณ์ จะแตกต่างกันไปตามสถานที่ตั้งของหลุมฝังกลบแต่ละแห่งตามความเหมาะสม ขึ้นกับ คุณสมบัติของน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินเดิม โดยพิจารณาจากความเข้มข้นก่อนการประกอบการ (Background concentrations) ตลอดจนชนิดและปริมาณของสารที่ฝังกลบ

2.1.4.3 น้ำใต้ดินที่เก็บจากบ่อสังเกตการณ์ด้านไดน้ำ (Downgradient) ของหลุมฝังกลบจะต้องมีลักษณะไม่เกินกว่าเกณฑ์เฉลี่ยที่กำหนดไว้ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2-1 เกณฑ์เฉลี่ยปริมาณสารอันตรายในน้ำชะขยะที่เก็บจากบ่อสังเกตการณ์ด้านไดน้ำของหลุมฝังกลบเปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ชนิดของสารอันตราย	ปริมาณสูงสุดไม่เกิน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	น้ำชะขยะ	มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง
อาร์ซีนิก	0.05	0.25
แคดเมียม	0.01	0.03
โครเมียม	0.05	-
โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์	-	0.25
โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์	-	0.75
ตะกั่ว	0.05	0.2
ปรอท	0.002	0.005
นิกเกิล	0.05	1.0
แมงกานีส	0.3	5.0
ทองแดง	5.0	2.0
สังกะสี	5.0	5.0
เงิน	0.05	-
แบเรียม	1.0	1.0
ซิลิเนียม	0.01	0.02
ซิลเว็กซ์ (Silvex)	0.01	-
2,4-ดี (2,3-D)	0.1	-
ทอกซาฟีน (Toxaphene)	0.005	-
เมธอกซิลคลอร์ (Methoxychlor)	0.1	-
ลินเดน (Lindane)	0.004	-
เอนดริน (Endrin)	0.0002	-

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548

2.1.4.4 ให้ตรวจสอบคุณภาพน้ำใต้ดินที่เก็บจากบ่อสังเกตการณ์อย่างสม่ำเสมอตั้งแต่ก่อนเริ่มดำเนินการฝัง ระหว่างดำเนินการฝัง และระหว่างการดูแลหลุมฝังกลบหลังจากเลิกใช้ โดยเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำใต้ดินก่อนทำการฝังอย่างน้อย 6 ครั้ง ในระยะเวลาต่างๆ กันของปี เพื่อใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบ (Baseline data) เก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำใต้ดินจากบ่อสังเกตการณ์ทุกบ่อในระหว่างดำเนินการฝังอย่างน้อยเดือนละ 1 ครั้ง และเก็บผลวิเคราะห์น้ำใต้ดินจากบ่อสังเกตการณ์ทุกบ่อในช่วงการดูแลหลุมฝังกลบ หลังจากเลิกใช้อย่างน้อยทุก 6 เดือน ตามลำดับ

2.1.4.5 ให้ตรวจสอบการรั่วซึมของชั้นบน (Primary protective barrier) ของหลุมฝังกลบ หากพบว่ามียัตราการรั่วซึม (Active leakage rate) เกินกว่า 17 มิลลิลิตรต่อตารางเมตรต่อวัน ให้ถือว่าชั้นกันซึมนั้นหมดประสิทธิภาพในการใช้งานแล้ว และต้องดำเนินการแก้ไข ตามวิธีที่ได้รับความเห็นชอบจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม

2.1.4.6 หากผลการตรวจสอบในข้อ 2.1.5.4 พบว่าคุณภาพของน้ำใต้ดินสูงเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในข้อ 2.1.5.3 หรือสามารถพิสูจน์ได้ว่าการรั่วซึมของหลุมฝังกลบเกิดขึ้น ผู้ประกอบกิจการโรงงานจะต้องทำการแก้ไขทันที โดยวิธีการทำผนังกัน (Cut-off wall confinement) ซึ่งประกอบด้วยวัสดุผสมของดินและเบนโทไนท์ (Soil - bentonite admixture) หรือวัสดุผสมของซีเมนต์ และเบนโทไนท์ (Cement-bentonite admixture) ที่ยอมให้มีอัตราการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) ได้ไม่เกินกว่า 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที มีความหนา 60 เซนติเมตร แล้วจึงแทรกเสริมระหว่างผนังด้วยแผ่นวัสดุทึบน้ำสังเคราะห์ (Geomembrane) ประเภทโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene) หนาอย่างต่ำ 1.5 มิลลิเมตร จำนวน 1 ชั้น ในแนวตั้งจากผิวดินถึงชั้นทึบน้ำใต้ดิน (Impervious Layer) เบื้องล่างโดยรอบบริเวณหลุมฝังกลบ ทั้งนี้อาจใช้วิธีการป้องกันโดยวิธีอื่นที่ได้ผลเทียบเท่าหรือดีกว่าและจะต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม หากได้หลุมฝังกลบมีลักษณะรอยแตกหรือร้าว (Hydraulic fracturing) ให้เทปูนกราดตั้งกันซึมด้านล่าง (Grouting) เพื่อกันมิให้สารหรือของเหลวใดๆ ออกมาจากหลุมฝังกลบ และปนเปื้อนดินรองรับบริเวณหลุมฝังกลบแพร่กระจายต่อไปได้ หรืออาจใช้วิธีการอื่นที่ได้ผลเทียบเท่าหรือดีกว่า และต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม

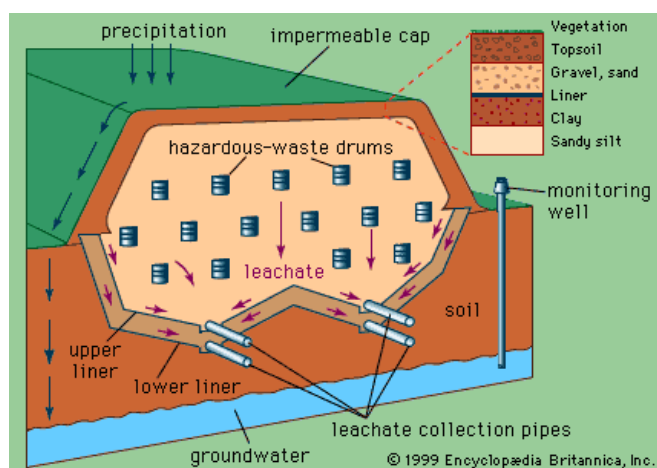
2.1.4.7 ให้ตรวจสอบคุณภาพของน้ำในบ่อสูบที่รวบรวมได้จากชั้นรวบรวมน้ำทุกครั้งก่อนระบายออกทิ้ง ถ้าพบว่ามีค่าความสกปรกเกินมาตรฐานน้ำทิ้งตามที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด จะต้องทำการบำบัดจนมีคุณลักษณะเป็นไปตามมาตรฐานนั้นเสียก่อน

2.2 น้ำชะขยะ (Leachate)

2.2.1 แหล่งกำเนิดของน้ำชะขยะ

น้ำชะขยะเกิดจากของเหลวที่ซึมผ่านชั้นมูลฝอยในหลุมฝังกลบ แล้วชะละลายเอาสารละลายหรือสารแขวนลอยต่างๆ ออกมากับของเหลวนั้น ซึ่งของเหลวที่ซึมผ่านลงมานี้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำฝนที่ตกลงมาบริเวณหลุมฝังกลบ

น้ำฝนที่ตกลงมาบริเวณหลุมฝังกลบส่วนหนึ่งจะกลายเป็นน้ำบนผิวดิน (Surface Runoff) ภายหลังจากที่ผ่านการระเหย การคายน้ำของดินและพืช ส่วนที่เหลือจะถูกเก็บกักไว้ในชั้นดิน จนกระทั่งความชื้นที่สะสมในชั้นดินเกินความจุภาคสนาม (Field Capacity) ของดินน้ำจะซึมลงสู่ชั้นของขยะ ของเหลวที่ซึมลงมานี้จะสะสมอยู่ในชั้นของขยะ จนกระทั่งถึงค่าความจุภาคสนามของมูลฝอย น้ำเหล่านี้จะชะละลายสารต่างๆ ออกจากขยะ และซึมลงไปสะสมตัวที่พื้นข้างใต้หลุมฝังกลบ เรียกว่า น้ำชะขยะ (Leachate) ลักษณะการเกิดน้ำชะขยะดังภาพ (2-3) นอกจากนี้แหล่งที่มาของของเหลวที่ทำให้เกิดน้ำชะขยะยังมาจากแหล่งอื่นๆ ได้อีก เช่น น้ำใต้ดิน น้ำพุใต้ดิน และของเหลวที่ถูกผลิตขึ้นจากการย่อยสลายของขยะมูลฝอย (Tchobanoglous, Theisen และ Vigil, 1993)



ภาพที่ 2-3 การเกิดน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบของเสียอันตราย

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2548)

2.2.2 องค์ประกอบของน้ำชะขยะและปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะสมบัติของน้ำชะขยะ

ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณและลักษณะสมบัติของน้ำชะขยะ ได้แก่

2.2.2.1 ชนิดขยะ มีผลต่อลักษณะสมบัติน้ำชะขยะกล่าวคือ ขยะที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น ซากพืช ซากสัตว์ จะทำให้น้ำชะขยะมีสารอินทรีย์ อยู่ในปริมาณมาก ส่วนประกอบของสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะดังตารางที่ 2-2 ขยะจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ รวมทั้งโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ นอกจากนี้ในน้ำชะขยะอาจมีสารพิษที่ปนเปื้อนมาจากสารเคมี ได้แก่ ยาฆ่าแมลง ยาปราบศัตรูพืช รวมทั้งเชื้อโรคต่างๆ เช่น แบคทีเรียและไวรัส

2.2.2.2 สภาพหลุมฝังกลบ มีผลต่อปริมาณน้ำชะขยะโดยตรง คือ การบดอัดดิน การใช้วัสดุปูพื้น การระบายอากาศ ลักษณะการฝังกลบ การปกคลุมหลุมฝังกลบ การระบายน้ำจากภายนอก และการรวบรวมน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบเอง เพราะหากรวบรวมได้ไม่ดีอาจมีการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้ เช่น มีการรั่วของวัสดุปูพื้น ทำให้น้ำชะขยะไหลซึมลงเบื้องล่างแล้วอาจไปปนเปื้อนแหล่งน้ำใต้ดินได้

2.2.2.3 สภาพภูมิอากาศที่บริเวณหลุมฝังกลบ จะเป็นปัจจัยสำคัญต่อปริมาณน้ำชะขยะซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณน้ำฝนตลอดปี ปริมาณน้ำผิวดินที่ซึมเข้ากองขยะ อุณหภูมิ ในพื้นที่ที่มีฝนตกมากก็จะมีปริมาณน้ำชะขยะมาก สำหรับความชื้นก็จะมีผลต่อปริมาณน้ำชะขยะ ซึ่งขึ้นกับความสามารถในการดูดซับความชื้นจากบรรยากาศของขยะ

2.2.2.4 ชนิดของดิน จะมีผลต่อปริมาณน้ำชะขยะ ซึ่งจะมีปริมาณมากในบริเวณที่ดินมีสมบัติความให้ซึมน้ำได้สูง

2.2.2.5 อายุการฝังกลบ หลุมฝังกลบที่มีอายุน้อย น้ำชะขยะที่ออกมาจะมีความเข้มข้นสูง มีสีดำมาก และมีกลิ่นเหม็น เนื่องจากการทำงานของจุลินทรีย์ยังทำงานได้ไม่เต็มที่ และจำนวนจุลินทรีย์ยังมีน้อย ส่วนหลุมฝังกลบที่มีอายุมาก ความเข้มข้นของน้ำชะขยะจะลดลง เนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์ต่างๆ ถูกย่อยสลายไปมากแล้ว แต่น้ำเสียนี้จะมีความคงตัวสูง ทำให้สลายทางชีวภาพได้ยาก

ตารางที่ 2-2 สารประกอบอินทรีย์ในน้ำชะขยะอันตราย

สารประกอบ	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	% of TOC
Aliphatic carboxylic acids	30,000	>95 (volatile fatty acids)
Aromatic carboxylic acids	1000	–
Methylphenols	100	–
Ethylphenols	50	–
Alkylbenzenes	1.21	–
Aliphatic compounds (hydrocarbons, alcohols and ketone)	300	0.04 (0.7 of alcohols)
Amines	300	0.8
Humic and fulvic acids	100–420	1.3

ที่มา : Tatyana และ คณะ (2008)

2.2.3 การบำบัดน้ำชะขยะ

เนื่องจากความเข้มข้นของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในน้ำชะขยะมีค่าสูงจึงจำเป็นต้องบำบัดก่อนปล่อยออกสู่ธรรมชาติ มลสารที่จะต้องบำบัดขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของแต่ละประเทศ โดยทั่วไปมีแนวโน้มที่จะต้องบำบัดมลสารเหล่านี้ คือ สารอินทรีย์ สี แอมโมเนีย Halogenated Hydrocarbon โลหะหนัก และสารพิษ (ตารางที่ 2-3)

การบำบัดน้ำชะขยะมีหลายวิธี สรุปได้ดังนี้

- 1) การบำบัดทางชีววิทยาโดยใช้ออกซิเจน
- 2) การบำบัดทางชีววิทยาโดยไม่ใช้ออกซิเจน
- 3) การบำบัดทางกายภาพและเคมี
- 4) การหมุนเวียนคืนลงไปในหลุมฝังกลบ (Recycling Leachate Through Landfill)
- 5) การบำบัดโดยปล่อยบนพื้นดิน (Land Treatment)
- 6) การบำบัดร่วมกับน้ำเสียชุมชน

สำหรับในรายละเอียด จะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 2-3 กระบวนการต่างๆ ที่ใช้ในการบำบัดน้ำชะขยะ

วิธีการบำบัด	จุดประสงค์การใช้งาน	หมายเหตุ
<p>กระบวนการทางชีววิทยา</p> <p>ระบบเอเอส</p> <p>บ่อเติมอากาศ</p> <p>กระบวนการฟิล์มตรึง</p> <p>บ่อไร้อากาศและถังไร้อากาศ</p> <p>ไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน</p>	<p>กำจัดสารอินทรีย์</p> <p>กำจัดสารอินทรีย์ <input type="checkbox"/></p> <p>กำจัดสารอินทรีย์ <input type="checkbox"/></p> <p>กำจัดสารอินทรีย์ <input type="checkbox"/></p> <p>กำจัดไนโตรเจน</p>	<p>อาจเกิดปัญหาฟองต้องการถังรวมตะกอน</p> <p>ต้องใช้พื้นที่มาก</p> <p>ประหยัดพลังงาน</p> <p>อาจใช้ร่วมกับกำจัดสารอินทรีย์ <input type="checkbox"/></p>
<p>กระบวนการทางเคมี</p> <p>การทำให้เป็นกลาง</p> <p>การรวมตะกอน</p> <p>ออกซิเดชันรีดักชัน</p>	<p>ควบคุมพีเอช</p> <p>กำจัดโลหะและไอออนลบ</p> <p>กำจัดสารอินทรีย์ <input checked="" type="checkbox"/></p> <p>ลดความเป็นพิษ</p>	<p>ใช้ได้กับน้ำเสียบางอย่ง</p> <p>เกิดปัญหาสลัดจ์ <input type="checkbox"/></p> <p>เหมาะกับน้ำเสียที่เจือจางมาแล้ว <input type="checkbox"/></p>
<p>กระบวนการทางกายภาพ</p> <p>การรวมตะกอน</p> <p>การกรอง</p> <p>การดักจับด้วยอากาศ</p> <p>การดูดติดผิว</p> <p>การแลกเปลี่ยน</p> <p>การใช้ชุดรั้วฟิล์มตรึง</p> <p>การระเหย</p>	<p>กำจัดสารแขวนลอย</p> <p>กำจัดสารแขวนลอย</p> <p>กำจัดแอมโมเนียหรือสารอินทรีย์ <input type="checkbox"/></p> <p>ระเหย</p> <p>กำจัดสารอินทรีย์ <input type="checkbox"/></p> <p>กำจัดสารอินทรีย์ละลาย</p> <p>กำจัดแบคทีเรียและสารอินทรีย์ <input type="checkbox"/></p> <p>มวลโมเลกุลสูง</p> <p>เป็นการเจือจางน้ำเสียกำจัดน้ำเสียขยะในพื้นที่หุ้มถังน้ำเสีย</p>	<p>ต้องใช้พื้นที่รวมด้วย</p> <p>ต้องการการบำบัดต่อ</p> <p>ต้องมีอุปกรณ์ควบคุมมลพิษอากาศ</p> <p>ต้องการการบำบัดต่อ</p> <p>เกิดปัญหา fouling</p> <p>ค่าใช้จ่ายสูง</p> <p>อาจเกิดปัญหาสลัดจ์ <input type="checkbox"/></p>

ที่มา : Tchobanoglous, Theisen และ Vigil, 1993

2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี (Chemical Treatment Process)

ระบบบำบัดน้ำเสียในระยะแรกๆ ประมาณ 200 ปีที่แล้วมา ได้รู้จักการใช้สารเคมีเพื่อช่วยรวมตะกอนของแข็งแขวนลอย (Suspended solids) และอนุภาคขนาดเล็กออกจากน้ำเสีย แต่ก็มีปัญหาอยู่ที่ไม่สามารถกำจัดมลสารอินทรีย์ที่อยู่ในสภาพของสารละลาย (soluble organics) ออกได้ ทำให้ในระยะต่อมาได้เปลี่ยนมาใช้ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาแทน จนกระทั่งเมื่อประมาณ 50 ปีที่ผ่านมา นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรได้เริ่มให้ความสนใจในการใช้กระบวนการทางฟิสิกส์-เคมีมากขึ้น เพื่อลดมลสารอาหารเสริม (nutrients) เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และใช้ในการปรับสภาพของตะกอน (sludge conditioning) ช่วยในการรวมตะกอน และกำจัดสารโลหะต่างๆ ที่มีมากขึ้นในน้ำเสีย วัตถุประสงค์ในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมี แบ่งออกเป็นหัวข้อใหญ่ๆ ได้ดังนี้

1. สร้างตะกอนให้ใหญ่ขึ้นเพื่อให้สามารถรวมตะกอนได้ง่าย (coagulation and flocculation)
2. ทำให้มลสารที่ละลายอยู่ในน้ำรวมตะกอน (precipitation) หรือทำให้ไม่ละลายน้ำ (insolubilization)
3. ปรับสภาพของน้ำให้เหมาะสมกับความต้องการ เช่น ปรับค่าความเป็นกรดต่าง (pH) เติมน้ำอาหารเสริม (nutrients)
4. ฆ่าเชื้อโรค (disinfection)
5. ปรับสภาพของตะกอน (sludge conditioning) เพื่อใช้ในกระบวนการย่อยตะกอน และ/หรือ แยกเอาน้ำออกจากตะกอน

กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี มีหลักการทำงานที่แน่นอนไม่ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมมาก เหมือนกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา

2.4 กระบวนการรวมตะกอนทางเคมี (Chemical Coagulation)

กระบวนการโคแอกกูเลชัน หมายถึง กระบวนการทั้งหมดในการทำให้อนุภาคคอลลอยด์มารวมกันเป็นกลุ่มก้อน (Floc) ซึ่งมี 2 ขั้นตอน คือ

1. การทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ของคอลลอยด์ เช่น ลดแรงผลักระหว่างอนุภาคโดยทางใดทางหนึ่ง เป็นต้น
2. การทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ เคลื่อนที่มาสัมผัสกันให้มากที่สุด (Transport of Colloidal Particle) เมื่ออนุภาคถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว การสร้างโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคย่อมเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าเดิม เมื่ออนุภาคต่างๆ สัมผัสกันแล้วควรเกาะติดกันแน่นและหลุดน้อยที่สุด

ความสำคัญของทั้ง 2 ขั้นตอนมีความเท่าเทียมกัน และต้องมีทั้ง 2 ขั้นตอนจึงจะเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันที่สมบูรณ์ ปฏิกริยา coagulation จะเกิดเกือบสมบูรณ์เมื่อสารเคมีละลายน้ำได้หมด โดยในขั้นแรกจะเกิดตะกอนขนาดเล็กและรวมตัวกันใหญ่ขึ้น เนื่องจากเกิดการลดประจุไฟฟ้าของอนุภาค และ Brownian movement จากนั้นจึงส่งเข้ากระบวนการ flocculation เพื่อกวาดเข้าๆ ให้อนุภาคมาชนกันและมีขนาดใหญ่ขึ้น จนสามารถแยกออกได้ง่าย

การที่จะแยกอนุภาคออกจากของเหลวได้นั้น สามารถทำได้หลายวิธี เช่น ใช้การแยกโดยถังรวมตะกอน แต่ถ้าจะแยกอนุภาคโดยการรวมตะกอนและอาศัยแรงดึงดูดของโลกแล้ว ขนาดของอนุภาคที่จะแยกจะต้องมีขนาดใหญ่พอและรวมตะกอนได้ง่าย จึงทำให้ต้องอาศัยกระบวนการ Coagulation และ flocculation ร่วมกัน

แรงที่กระทำต่ออนุภาค นอกจากแรงดึงดูดของโลกแล้วยังมีแรง Electrostatic และ interionic ซึ่งสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของอนุภาค ในกรณีที่อนุภาคมีขนาดเล็กมาก แรงทั้งสองจะมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดของโลก ทำให้เกิดแรงยึดระหว่างอนุภาค จนไม่สามารถรวมตะกอนได้ ดังนั้นจึงต้องใส่สารเคมี (coagulant) ลงไปเพื่อลด (destabilize) แรงที่กระทำที่ผิวโดยประจุไฟฟ้า ทำให้อนุภาคสามารถมาสัมผัสและรวมตัวกันให้ใหญ่ขึ้นได้

2.4.1 พฤติกรรมของคอลลอยด์

มันสิน ตัณฑุลเวศม์ (2542) ได้กล่าวถึงเสถียรภาพของคอลลอยด์ และการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ไว้ว่า การที่อนุภาคคอลลอยด์ สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้โดยไม่รวมตะกอน เนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์มีประจุไฟฟ้า ซึ่งอาจมีประจุบวกหรือลบก็ได้ ทำให้มีแรงผลักระหว่างอนุภาคจึงเป็นสาเหตุให้อนุภาคต่างๆ กระจายอยู่ในน้ำโดยไม่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน หรือฟลอค ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าประจุไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพ ในน้ำอนุภาคคอลลอยด์จะมีแรงกระทำซึ่งกันและกันอยู่ 2 ชนิด คือ แรงดูดระหว่างอนุภาคและแรงผลักระหว่างไฟฟ้า ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการที่ผิวของอนุภาคมีประจุชนิดเดียวกัน จึงเกิดการผลักรัน บทบาทของแรงทั้งสองมีผลต่อเสถียรภาพของคอลลอยด์ แรงผลักระหว่างอนุภาคจะตั้งสูงกว่าแรงดึงดูด จึงจะทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพ ถ้าแรงดูดมากกว่าแรงผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ สามารถจับกันเป็นกลุ่มก้อน หรือฟลอคได้ ทำให้คอลลอยด์ไม่มีเสถียรภาพ ผลลัพธ์ของแรงระหว่างอนุภาคทั้ง 2 ชนิดขึ้นกับระยะห่างระหว่างอนุภาค แรงดึงดูดมีอำนาจเหนือกว่าแรงผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันมากๆ แต่ถ้าหากอนุภาคคอลลอยด์มีประจุไฟฟ้าสูง หรือมีชั้นกระจาย (diffuse layer) หนาจะทำให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคสูงกว่าแรงดูด

2.4.1.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์

อนุภาคคอลลอยด์แตกต่างจากตะกอนแขวนลอย อะตอม และโมเลกุลขนาดเล็กทั้งขนาดและคุณสมบัติทางไฟฟ้า อนุภาคคอลลอยด์อาจมีทั้งประจุบวกหรือลบก็ได้ แต่ที่พบในงานด้านสิ่งแวดล้อมมักเป็นประจุลบ และเป็นอนุภาคแบบไฮโดรโฟบิก (อนุภาคที่ไม่ชอบน้ำ) ตัวอย่างของอนุภาคประจุลบในน้ำ คือ ความขุ่นในน้ำผิวดิน ส่วนอนุภาคประจุบวกมักเป็นอินทรีย์สารอนุภาคแบบไฮโดรฟิลิก

อนุภาคคอลลอยด์มีประจุไฟฟ้า จึงทำให้มีแรงดันระหว่างอนุภาค เป็นสาเหตุให้อนุภาคต่างๆ กระจายอยู่ในน้ำ โดยไม่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน หรือฟลอค (Floc) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าประจุไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพ

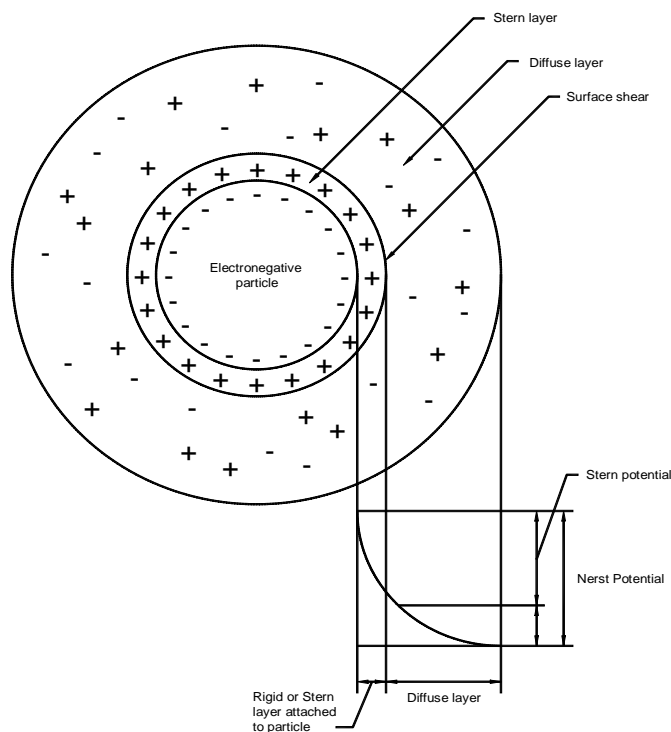
2.4.1.2 Electric Double Layer Theory

ความแตกต่างระหว่างคอลลอยด์แบบไฮโดรโฟบิกและแบบไฮโดรฟิลิก คือ เสถียรภาพ (Stability) ของคอลลอยด์ คอลลอยด์แบบไฮโดรโฟบิกจะมีเสถียรภาพ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงผลักระหว่างอิออนชนิดเดียวกัน ส่วนเสถียรภาพของคอลลอยด์แบบไฮโดรฟิลิกจะเกิดขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของน้ำที่ห่อหุ้มอนุภาค (Particle Solvation) ความแตกต่างดังกล่าวมีความสำคัญมากต่อกลไกในการทำลายเสถียรภาพ

ทฤษฎีที่ใช้อธิบายคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคอลลอยด์ คือ Electric Double Layer Theory พิจารณาอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ ซึ่งอนุภาคนี้สามารถสร้างแรงดึงดูดที่ทำให้อิออนประจุบวก (ประจุตรงกันข้าม) ที่อยู่ในน้ำวิ่งเข้ามาหาทำให้ประจุบวกแอดดูดอยู่ใกล้อนุภาคคอลลอยด์ อิออนบวกนี้ เรียกว่า Counter Ion ความหนาแน่นของอิออนบวกสูงที่สุดในบริเวณที่อยู่ติดกับอนุภาคคอลลอยด์ และลดน้อยลงไปตามระยะห่างจากอนุภาค ทั้งนี้เป็นไปตามศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ผิว (Nernst Potential) และน้อยลงเมื่อห่างออกไป ณ ตำแหน่งที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ แสดงว่าไม่อยู่ภายใต้อำนาจไฟฟ้าของคอลลอยด์ ทำให้การกระจายตัวของอิออนบวกและลบเป็นไปตามปกติ ตามทฤษฎีของ Double Layer นั้นเชื่อว่าอิออนบวกชั้นในสุดไม่สามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ทั้งนี้เพราะอิออนบวกก็มีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้มอยู่ ระยะห่างระหว่างผิวอนุภาคคอลลอยด์กับจุดศูนย์กลางของอิออนที่อยู่ใกล้ที่สุด (ขึ้นอยู่กับการขนาดของอิออน) คล้ายเปลือกทรงกลมบางๆ วางอยู่ เปลือกหรือชั้นบางนี้เรียกว่า Stern Layer และถือว่าเป็นชั้นในสุด ศักย์ไฟฟ้าที่เปลือกนี้มีค่าเท่ากับ Stern Potential ส่วนเปลือกชั้นนอกมีชื่อเรียกว่า ชั้นกระจาย (Diffuse Layer) ครอบคลุมจากเปลือกชั้นในไปถึงตำแหน่งที่อนุภาคคอลลอยด์หมดอำนาจไฟฟ้าพอดี (ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์)

ขนาดของประจุไฟฟ้าบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์หรือ Nernst Potential ไม่สามารถวัดได้โดยตรง แต่อาศัยการวัดอัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามไฟฟ้า (Electrophoretic Mobility) และคำนวณศักย์ไฟฟ้าจากค่าที่วัดได้ ศักย์ไฟฟ้าที่คำนวณได้ เรียกว่า ซีตาโพเทนเชียล (Zeta Potential, Z_p) ซีตาโพเทนเชียล หมายถึง ศักย์ไฟฟ้าที่ผิว (หรือเปลือก) นอกสุดของน้ำเคลื่อนที่ไปพร้อมกับอนุภาคคอลลอยด์ ผิววนอกสุดนี้เรียกว่า Plane of Shear ดังแสดงในภาพที่ 2-4 ตำแหน่งที่แน่นอนของ Plane of Shear ยังไม่เป็นที่ทราบ ประเมินว่าอยู่นอก Stern Layer แต่ยังคงอยู่ใน Diffuse Layer อย่างแน่นอน บทบาทของซีตาโพเทนเชียลมีมากกว่าศักย์ไฟฟ้าตัวอื่นๆ เนื่องจากซีตาโพเทนเชียลใช้เป็นพารามิเตอร์ที่บอกถึงระดับของเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้ ระบบคอลลอยด์ที่มี

เสถียรภาพสูงหรือคอลลอยด์มีแรงผลักระหว่างอนุภาคสูง จะมีค่าซีตาโพเทนเชียลสูงด้วย ในทางตรงกันข้าม ระบบคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพต่ำ จะมีค่าซีตาโพเทนเชียลต่ำ และทำให้รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนหรือฟลอคได้ง่าย



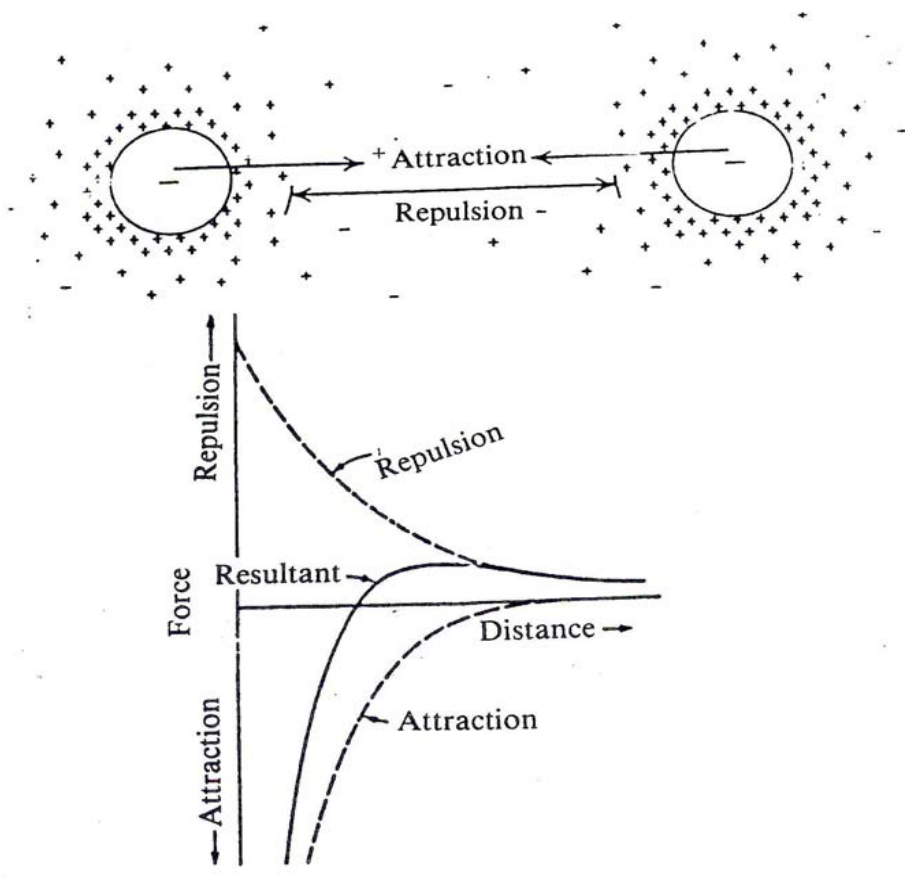
ภาพที่ 2-4 โมเดลที่ใช้อธิบาย Electrical Double Layer Theory

ที่มา: Amirtharajah และ O'Melia, 1999

2.4.1.3 เสถียรภาพของคอลลอยด์

เมื่อคอลลอยด์ยังคงมีเสถียรภาพ จะสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้โดยไม่รวมตะกอน ในระยะเวลาสั้นๆ แต่เมื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ทำให้เกิดการรวมตะกอนแยกตัวออกจากน้ำ ดังนั้นเสถียรภาพของคอลลอยด์ จึงขึ้นอยู่กับแรงดูดและแรงผลักระหว่างอนุภาค ถ้าคอลลอยด์มีเสถียรภาพแสดงว่ามีแรงผลัที่สูงกว่าแรงดูด แต่ถ้าอนุภาคมีแรงดูดมากกว่าแรงผลั ทำให้สามารถจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Floc) ได้ ทำให้คอลลอยด์ไม่มีเสถียรภาพ แรงดูดระหว่างอนุภาค เรียกว่า แรงวัน

เดอว์วาลส์ (Van Der Waals Force) เป็นแรงอ่อนที่มีอำนาจเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กัน ส่วนแรงผลักระหว่างอนุภาคเป็นผลมาจากประจุไฟฟ้าของอนุภาคหรือซีตาโพเทนเชียล ผลลัพธ์ของแรงระหว่างอนุภาคทั้งสองชนิดขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอนุภาค ดังภาพที่ 2-5 เป็นแรงอ่อนที่มีอำนาจเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กัน ส่วนแรงผลักระหว่างอนุภาคเป็นผลมาจากประจุไฟฟ้าของอนุภาคหรือซีตาโพเทนเชียล ผลลัพธ์ของแรงระหว่างอนุภาคทั้งสองชนิดขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอนุภาค แรงดูดมีอำนาจเหนือแรงผลักร์ก็ต่อเมื่ออนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันมากๆ โดยปกติแรงผลักร์ซึ่งเกิดจากซีตาโพเทนเชียล จะไม่ยอมให้อนุภาคต่างๆ เข้ามาใกล้กันจนเกิดการดูดเข้าหากัน



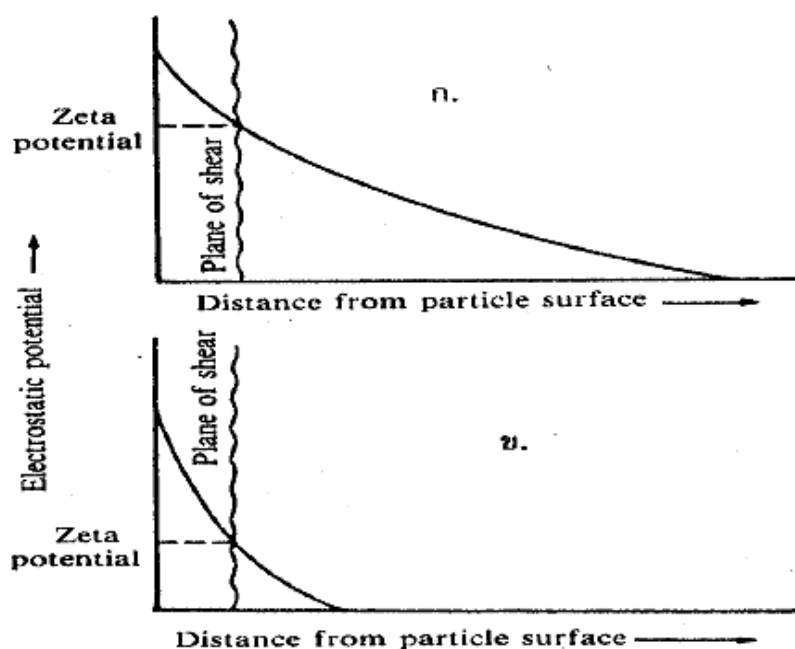
ภาพที่ 2-5 แรงระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ที่ระยะห่างต่างๆ
ที่มา: Samuel และ Osman, 1983

2.4.1.4 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์

การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ สามารถทำได้โดยอาศัยกลไก 4 แบบ คือ

1. กลไกลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse layer)

การเพิ่มจำนวนของไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุของอนุภาคเป็นการเพิ่มความหนาของ Counter Ion ในชั้นกระจาย ผลที่เกิดขึ้นคือ ชั้นกระจายมีความหนาลดลง ทำให้ซีตาโพเทนเชียลลดลงตามไปด้วย ดังภาพที่ 2-6



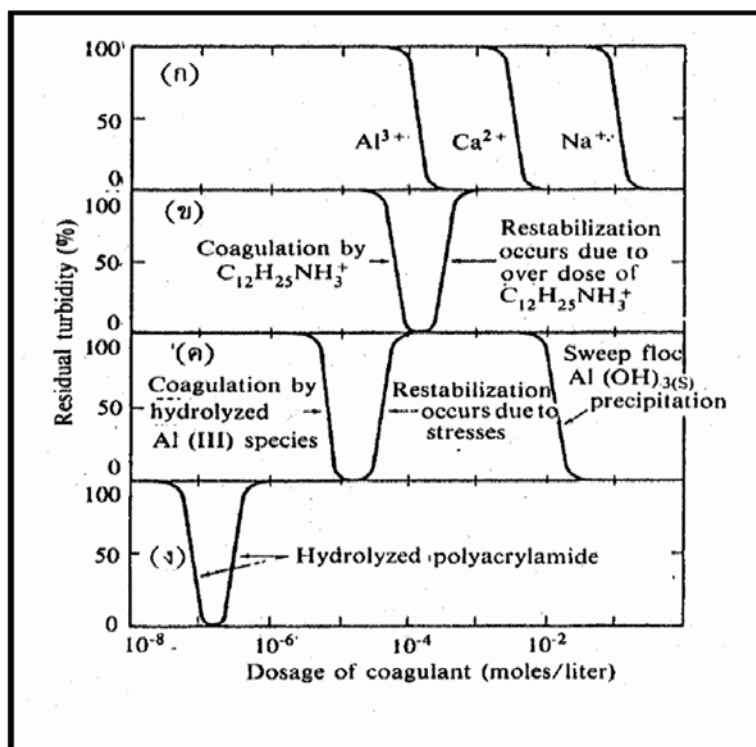
ภาพที่ 2-6 ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับคอลลอยด์

(ก) ก่อนเติมไอออน (ข) หลังจากการเติมไอออนแล้ว

ที่มา: มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538

ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากมีประจุบวกเข้าไปออกันอยู่ใกล้ผิวของอนุภาคคอลลอยด์เพิ่มขึ้น ทำให้อำนาจของประจุลบของอนุภาคไม่สามารถส่งออกไปได้ไกลเท่าเดิม ไอออนต่างๆ มีอำนาจในการลดความหนาของชั้นกระจาย (ซึ่งเท่ากับลดซีตาโพเทนเชียล) ได้ไม่เท่ากัน ไอออนที่มีเวเลนซ์ (Valence)

1 2 และ 3 มีอำนาจในการลดความหนาของชั้นกระจายเป็นสัดส่วน 1: 10: 1000 ตามลำดับ ยกตัวอย่างเช่น Al^{3+} จะให้ผลดีกว่า Ca^{2+} ถึง 1000 เท่า ดังภาพ 2-7



ภาพที่ 2-7 การเปรียบเทียบปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบต่างๆ

ที่มา: Samuel และ Osman, 1983

2. การดูดติดและการทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption/Charge Neutralization)

อนุภาคคอลลอยด์สามารถดูดติด (Adsorb) สารเคมีบางชนิดไว้ที่ผิวได้ ถ้าสารเคมีนั้นมีประจุไฟฟ้าตรงกันข้ามกับคอลลอยด์ การดูดติดผิวจะมีผลในการลดศักย์ไฟฟ้าและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ กลไกแบบดูดติดผิวนี้นี้แตกต่างจากกลไกแบบแรกที่กล่าวไว้ในข้อ (ซึ่งอิออนต่างประจุหรือ Counter Ion อยู่ในชั้นกระจายโดยไม่ดูดติดผิวอนุภาคคอลลอยด์) 3 ประการ ดังนี้

ก) กลไกแบบดูดติดผิวต้องการอิออนที่ต่างชนิดน้อยกว่าแบบแรก เนื่องจากอิออนต่างประจุสามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคคอลลอยด์ การทำลายศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์จึงได้ผลดีกว่า อิออนต่างประจุที่ไม่สามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคได้

ข) การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบดูดติดผิวนั้นเป็นแบบสโตยชิโอเมตริก (Stoichiometric) ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ใช้จะมากหรือน้อยตามปริมาณของอนุภาคคอลลอยด์ แต่การทำลายเสถียรภาพแบบลดความหนาของชั้นกระจายไม่เป็นไปตามสโตยชิโอเมตริก

ค) กลไกแบบดูดติดผิว สามารถเปลี่ยนประจุอนุภาคคอลลอยด์ให้เป็นตรงกันข้ามกับของเดิมโดยการใช้สารสร้างตะกอนที่มากเกินไปโดยการลดความหนาของชั้นกระจายไม่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนประจุเป็นตรงกันข้าม อาจเป็นเพราะจำนวนอิออนต่างชนิดในชั้นกระจายถูกจำกัดด้วยศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์ อิออนต่างประจุ (สารสร้างตะกอน) ส่วนที่เติมเกินพอจะอยู่นอกชั้นกระจาย ดังนั้น ไม่ว่าจะใช้สารสร้างตะกอนมากเท่าใดก็ไม่สามารถเปลี่ยนประจุคอลลอยด์ให้เป็นตรงกันข้ามได้ ข้อควรสังเกตเกี่ยวกับการเปลี่ยนประจุคอลลอยด์ของกลไกแบบดูดติดผิวก็คือ การที่อิออนต่างประจุสามารถดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์จนประจุเปลี่ยนเป็นตรงกันข้ามย่อมแสดงว่ามีปฏิกิริยาเคมีระหว่างอิออนต่างประจุกับอนุภาคคอลลอยด์ จนเอาชนะแรงผลักระหว่างประจุชนิดเดียวกันได้

3. กลไกการสร้างตะกอนขึ้นมาเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มาเกาะจับ (Sweep coagulation)

ถ้าเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิดลงไปใต้น้ำในปริมาณที่พอเพียงจะมีการรวมตะกอนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนในของ ตะกอนดังกล่าวเพื่อทำให้ตะกอนมีขนาดใหญ่หรืออาจจับตัวรวมกับตะกอน ลักษณะที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ อาจถือว่าการเพิ่มขนาดหรือน้ำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ เป็นผลให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและสามารถรวมตะกอนได้ โคแอกกูแลนต์ดังเช่น สารส้ม เพอริกคลอไรด์ แมกนีเซียมคาร์บอเนต และปูนขาวสามารถทำให้เกิดโคแอกกูแลชันได้โดยการสร้าง $Al(OH)_3$, $Fe(OH)_3$, $Mg(OH)_2$ และ $CaCO_3$ ซึ่งล้วนแต่เป็นตะกอนสารที่ไม่ละลายน้ำ การกำจัดคอลลอยด์โดยกลไกแบบนี้เรียกว่า sweep flocculation coagulation หรือ sweep coagulation หรือ ห่อหุ้มคอลลอยด์

กลไกที่ใช้ตะกอนสารอินทรีย์ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ มีลักษณะที่แตกต่างจากกลไก 2 แบบแรก คือ ปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสม (Optimum Dosage) แปรผกผันกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ กล่าวคือ น้ำที่มีปริมาณมลสารน้อยต้องใช้สารสร้างตะกอนจำนวนมากจึงจะเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันได้ดี ในทางตรงข้าม น้ำที่มีปริมาณมลสารมากอาจใช้ปริมาณสารสร้างตะกอนน้อยกว่า เพราะน้ำที่มีปริมาณมลสารน้อยจะมีโอกาสที่จะสัมผัสระหว่างอนุภาคน้อย ดังนั้นแม้ว่าจะเกิดการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์แล้ว แต่กระบวนการโคแอกกูเลชันอาจเกิดได้ไม่ดีเท่าที่ควร จึงต้องใช้ปริมาณสารสร้างตะกอนสูง เพื่อสร้าง ตะกอนจำนวนมากสำหรับเป็นเป้าสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ แต่ในกรณีที่น้ำมีปริมาณมลสารอยู่มากโอกาสสัมผัสย่อมมีมากจึงไม่จำเป็นต้องอาศัยเป้าสัมผัสจากภายนอกมากเท่าในกรณีแรก

เนื่องจากกลไกแบบที่สามนี้ไม่จำเป็นต้องทำลายประจุที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ กระบวนการโคแอกกูเลชันจึงไม่จำเป็นต้องเกิดในขณะที่ค่าซีตาโพเทนเชียลมีค่าต่ำที่สุด แต่ค่าที่มีบทบาทสำคัญมากต่อกลไกนี้คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ดังนั้นสารสร้างตะกอนแต่ละชนิดจะมีระดับค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมที่สุดแตกต่างกัน

4. กลไกสร้างสะพานเชื่อมต่ออนุภาคคอลลอยด์ (Polymer bridging)

การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยสารอินทรีย์ ทั้งที่เป็นสารประกอบตามธรรมชาติหลายชนิด เช่น แป้ง เซลลูโลส น้ำตาลบางชนิด และโปรตีนบางชนิด รวมทั้งสารอินทรีย์พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองที่เรียกว่า Polymer bridging

ตามทฤษฎีนี้ โมเลกุลของสารพอลิเมอร์สามารถเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง การเกาะติดอาจเป็นผลเนื่องจากประจุที่ต่างกันของพอลิเมอร์และคอลลอยด์ อนุภาคที่มีพอลิเมอร์เกาะติดอยู่โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะบนอนุภาคอื่น ถือได้ว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว (Destabilized particle) อนุภาคดังกล่าวนี้สามารถจับกับอนุภาคตัวอื่นๆ โดยมีพอลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อม การเชื่อมต่อดังกล่าวเกิดขึ้นได้ตลอดเท่าที่มีพอลิเมอร์และตำแหน่งว่างที่ผิวอนุภาค ถ้าปลายอิสระของพอลิเมอร์ไม่มีที่สำหรับเกาะจับอนุภาคอื่น (ไม่ว่าเหตุผลใดก็ตาม) ปลายอิสระก็จะเกาะจับบนอนุภาคเดิม ซึ่งทำให้เสียประโยชน์ 2 ประการ คือ ทำให้ไม่มีปลายอิสระไว้จับอนุภาคอื่น และทำให้ตำแหน่งว่างบนอนุภาคสำหรับยึดเกาะมีน้อยลง อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกสารพอลิเมอร์ยึดเกาะหลายตำแหน่งจนไม่มีปลายอิสระและไม่มีที่ว่างเรียกว่า อนุภาคที่มีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ (Restabilized particle) การใช้สารพอลิเมอร์มากเกินไป ทำให้พอลิเมอร์หลายโมเลกุล

ไปเกาะอยู่บนอนุภาคคอลลอยด์ จนกระทั่งไม่มีที่ว่างบนอนุภาคสำหรับเป็นที่จับของปลายอิสระของ โพลีเมอร์ที่อยู่บนอนุภาคอื่น การกวนน้ำที่แรงเกินไปหรือนานเกินไปทำให้ฟลอคที่เกิดขึ้นมาแล้วแตก ออกเป็นส่วนๆ และอาจทำให้ปลายอิสระของโพลีเมอร์เกาะจับบนอนุภาคอันเดิม เสถียรภาพของ คอลลอยด์จึงกลับคืนมาใหม่

2.4.2 การเลือกใช้สารสร้างตะกอน

สารเคมีที่ใช้การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีการรวมตะกอนในปัจจุบันมีหลายประเภท เช่น กลุ่มที่มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ เช่น โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (PACI) ซึ่งมีอำนาจในการสร้างและ รวมตะกอนสูง รวมตะกอนเร็วกว่าสารส้ม ใช้เวลาในการกวนเร็ว น้อย ละลายน้ำได้ดีแต่ราคาค่อนข้าง สูง กลุ่มที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ เช่น เพอร์ริกซัลเฟต ($Fe_2(SO_4)_3$) ซึ่งสามารถรวมตะกอนได้ดีที่พี เอช 4-9 ตะกอนเคมีของ Ferric มีน้ำหนักมากพอสมควรทำให้รวมตะกอนได้ดี และการใช้ปูนขาว (Lime) เพื่อทำให้เกิดตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งวิธีนี้ปกติจะใช้ในการกำจัดฟอสเฟตเท่านั้น แต่ก็สามารถใช้บำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์เพื่อลดค่าบีโอดี ซีโอดี ของแข็งแขวนลอย ได้ด้วย ดังนั้นในการบำบัดน้ำเสียเพื่อลดค่าซีโอดีควรมีการศึกษาเปรียบเทียบการเลือกใช้สารเคมีเพื่อ ลดต้นทุนและก่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

ในปัจจุบันสารสร้างตะกอนจะแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

1. กลุ่มที่มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ หรืออะลูมิเนียมโคแอกกูแลนต์

เมื่อเติมสารสร้างตะกอนในกลุ่มที่มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ หรืออะลูมิเนียมโคแอกกูแลนต์ ลงในน้ำโมเลกุลของมันจะแตกตัวเป็น อะลูมิเนียมอิออน (Al^{3+}) และสารประกอบเชิงซ้อนจำนวนมาก (Complex ion)

2. กลุ่มที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบหรือไอออนโคแอกกูแลนต์

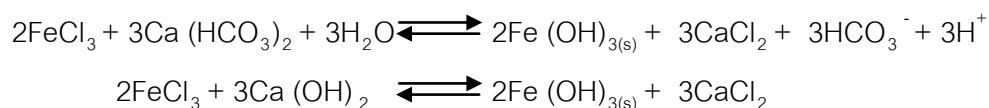
ไอออนโคแอกกูแลนต์จะทำงานในสภาวะที่มีพีเอชต่ำกว่า อะลูมิเนียมโคแอกกูแลนต์ นอกจากนี้ $Fe(OH)_3$ ฟลอค ยังหนักกว่า $Al(OH)_3$ ฟลอค ทำให้รวมตะกอนได้เร็วกว่า

3. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide, Ca(OH)₂)

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือ ปูนขาวผึ่งน้ำ เป็นสารเคมีที่ใช้กันมากในการรวมตะกอน ความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยทำให้เกิดตะกอนในภาพหินปูน การเก็บรักษาจึงค่อนข้างยุ่งยาก การป้อนปูนขาวผึ่งน้ำจะต้องให้ในลักษณะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Slurry) ข้อดีในการใช้ปูนขาวผึ่งน้ำ คือ มีราคาถูก เมื่อเติมลงไปใต้น้ำจะทำปฏิกิริยากับด่างและฟอสฟอรัสที่มีอยู่กลายเป็นสารตัวใหม่รวม ตะกอนและชะพาเอาสารแขวนลอยตกลงมาด้วย

2.4.3 กลไกโคแอกกูเลชันด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์

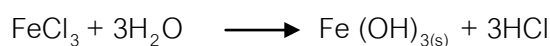
เฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric chloride) มีสูตรทางเคมีว่า FeCl₃·6H₂O หรือ FeCl₃ anhydrous มีลักษณะตะกอนสีน้ำตาลหรือเหลือง เป็นเม็ดสีเขียวหรือดำ และมีภาพสารละลาย สีน้ำตาลแกมเหลือง ปกติจะละลายน้ำได้ดีและเติมน้ำดิบในภาพของสารละลาย สารละลายจะมีฤทธิ์ เป็นกรดและกัดกร่อน คุณสมบัติดังตารางที่ 2-4 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะได้ตะกอนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (Fe(OH)₃) เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นสารเคมีที่แตกตัวในน้ำ ภาพแบบของสารประกอบเหล็กเมื่อละลายน้ำ นั้นจะมีประจุบวก สามารถทำให้เป็นกลางได้โดยใช้ประจุลบที่เกิดจากของแข็งในน้ำตะกอนด้วยเหตุนี้ จึงเป็นสาเหตุของการรวมกลุ่มของตะกอน เฟอร์ริกคลอไรด์จะทำปฏิกิริยากับ Bicarbonate alkalinity ในน้ำตะกอนและเปลี่ยนภาพเป็นเหล็กไฮดรอกไซด์กับ Bicarbonate alkalinity ดังนี้



ตารางที่ 2-4 คุณสมบัติของเฟอริกคลอไรด์ (Ferric chloride)

คุณสมบัติ	
สูตรโมเลกุล	FeCl ₃
น้ำหนักโมเลกุล	162.2 กรัมต่อโมล (anhydrous)
ความหนาแน่น	2.898 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (anhydrous)
จุดหลอมเหลว	306 °C (anhydrous)
จุดเดือด	315 °C (anhydrous)
ค่าการละลายน้ำ	(0 °C) 74.4 g/100 mL, (20 °C) 92 g/100 mL

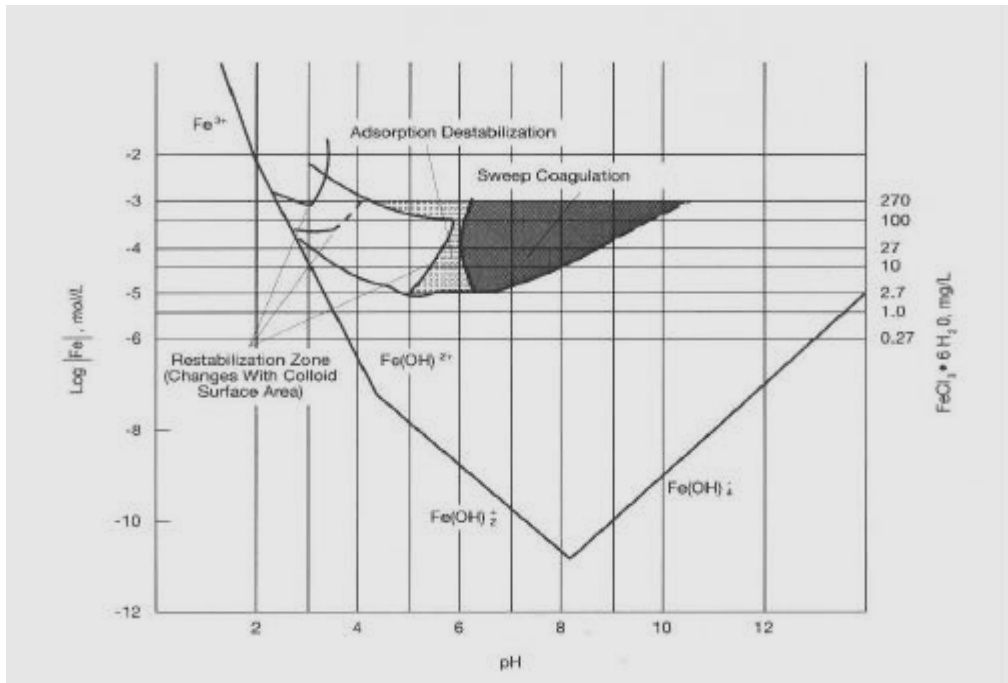
การสร้างโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มไม่อาจได้ผลดีมากนักกับน้ำอ่อนที่มีสีเข้ม กรณีเช่นนี้เฟอริกคลอไรด์ให้ผลดีกว่า เมื่อเติมเฟอริกคลอไรด์ให้กับน้ำ จะมีตะกอนเฟอริกไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นดังนี้ (มันลิน, 2537)



ข้อดีอีกประการหนึ่งของสารเคมีชนิดนี้ คือ สามารถสร้างโคแอกกูเลชันกับน้ำที่มี H₂S ได้ดี และสามารถทำงานในช่วงพีเอชที่กว้างกว่า คือ 4-11 ดังในภาพที่ 2-8 เฟอริกคลอไรด์จะทำหน้าที่เป็นสารสร้างตะกอนในกระบวนการรวมตะกอนได้ทั้ง 2 ขั้นตอนคือ

1. Coagulation เฟอริกคลอไรด์จะทำหน้าที่สะเทินประจุบนผิวของอนุภาคต่างๆ ทั้งที่แขวนลอยและละลายอยู่ในน้ำให้กลายเป็นกลางโดยการดูดซับประจุ และทำปฏิกิริยากับประจุบนผิวของอนุภาคนั้นๆ ซึ่งเป็นผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคอ่อนลง และอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นเกิดเป็นตะกอนเล็กๆ ขนาดระหว่าง 10⁻⁹-10⁻⁷ ม.

2. Flocculation เฟอริกคลอไรด์จะทำหน้าที่รวมตะกอนเล็กๆ ซึ่งเกิดขึ้นจากขั้นตอนที่ 1 ให้เป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ขนาดมากกว่า 10⁻⁷ ม.ซึ่งถือว่าเป็นขนาดของตะกอนที่ใหญ่และหยาบทำให้ง่ายต่อกระบวนการแยกตะกอนออกจากน้ำในกระบวนการต่อไป



ภาพที่ 2-8 ไดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมโคแอกกูเลชันด้วยเฟอริกคลอไรด์

ที่มา: Johnson และ Amirtharajah, 1983

2.5 การดูดติดผิว (Adsorption)

การดูดติดผิวเป็นกระบวนการที่เกิดบริเวณผิวสัมผัสระหว่างสาร 2 สถานะ โดยดึงโมเลกุลที่อยู่ในของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิวของมัน ซึ่งการเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวมายังผิวของของแข็งเป็นส่วนที่สำคัญของกระบวนการนี้ โมเลกุลที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า สารถูกดูดติดผิว (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดติดผิวเรียกว่า สารดูดติดผิว (Adsorbent) การดูดติดผิวสามารถใช้ในการบำบัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียได้ ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยอาศัยกลไกทางกายภาพและเคมี

2.5.1 กลไกการดูดติดผิว (Adsorption Mechanism) (Eckenfelder, 1981)

การดูดติดผิวที่สำคัญมี 2 แบบคือ การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physical Adsorption) และการดูดติดผิวทางเคมี (Chemical Adsorption) การดูดติดผิวทั้ง 2 แบบนี้ เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้และยึดกับผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็งสามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวได้ การดูดติดผิวทางกายภาพเป็นผลมาจากปฏิกิริยาของแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิดคือ แรงกระจาย (Dispersion force) หรือแรงลอนดอน (London force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) ดังนั้นการดูดติดผิวทางกายภาพจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ การกระจายตัว (Dispersion) การเหนี่ยวนำ (Induction) และการจัดเรียงตัวของโมเลกุล (Orientation) สำหรับโมเลกุลที่มีขั้วนั้นแรงดึงดูดจะเกิดจากการเรียงตัวของโมเลกุล ซึ่งเป็นแรงดึงดูดที่เกิดจากโมเลกุลที่มีขั้วสองโมเลกุลคือ ขั้วลบของโมเลกุลหนึ่งดึงดูดกับขั้วบวกของอีกโมเลกุลหนึ่ง ส่วนโมเลกุลที่ไม่มีขั้วการดูดติดผิวจะเกิดแบบกระจายตัวทำให้พลังงานของระบบลดลง ระบบจึงมีความเสถียรขึ้นทำให้โมเลกุลเข้ามาเกาะติดได้ การดูดติดผิวทางเคมีเป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่างสารถูกดูดติดผิวและสารดูดติดผิวเกิดเป็นสารประกอบเคมีซึ่งจะแตกต่างจากการดูดติดผิวแบบกายภาพ เพราะกระบวนการนี้จะมีการถ่ายเทมวลสารจึงทำให้เกิดการดูดติดผิวด้วยพันธะเคมีกับส่วนที่เกิดปฏิกิริยาของสารดูดติดผิวโดยทั่วไปการดูดติดผิวทางเคมีจะมีความแข็งแรงมากกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ของการดูดติดผิวทางกายภาพ

ธिया ชนะศักดิ์ (2542) พบว่าปัจจัยที่สำคัญในการบ่งบอกถึงประเภทของกระบวนการดูดติดผิวโดยพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดติดกับผิวของสารถูกดูดติดผิว ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Forces) จะถูกดูดติดผิวทางกายภาพ (Physical adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวจะเรียกว่า การดูดติดผิวทางเคมี (Chemical adsorption) ดังตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดติดผิวทางกายภาพและการดูดติดผิวทางเคมี

ตัวแปร	การดูดติดผิวทางกายภาพ	การดูดติดผิวทางเคมี
ค่าความร้อนของการดูดติดผิว	น้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล	50-400 กิโลจูลต่อโมล
อุณหภูมิที่เกิดการดูดติดผิว	ต่ำ	สูง
แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ผันกลับไม่ได้
การดูดติดผิวบนก๊าซ-ของแข็ง	เกิดได้เกือบทุกชนิด	เกิดเฉพาะบางระบบ
พลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการเกิด	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
ภาพแบบชั้นของการดูดติดผิว	Monolayer และ Multilayer	Monolayer

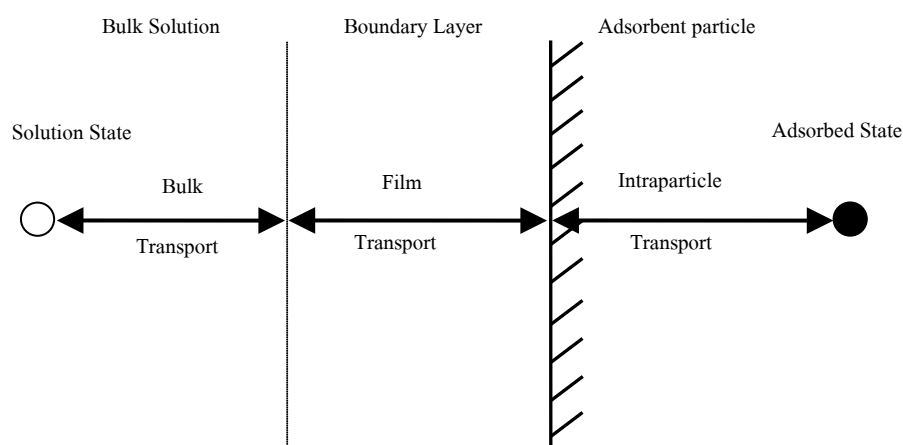
ที่มา: ธिया ชนะศักดิ์ (2542)

2.5.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (rate of molecular transfer) (Eckenfelder, 1981)

อัตราการดูดติดมีความสำคัญ เนื่องจากอัตราการดูดติดที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดติดถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดขั้นตอนหนึ่งจะเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล กลไกการดูดติดมี 3 ขั้นตอน คือ

1. การเคลื่อนที่ของโมเลกุล (Bulk Transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบาง ๆ ที่หุ้มสารดูดติด
2. การเคลื่อนที่ของชั้นฟิล์ม (Film Transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลผิวหน้าของชั้นของเหลวบาง ๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดติด การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดขั้นตอนนี้
3. การเคลื่อนที่ภายในอนุภาค (Intraparticle Transport) เป็นการแพร่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดติด (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดติดภายใน จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดเช่นเดียวกัน

การเคลื่อนที่ของชั้นฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติด แต่ถ้าหากว่าระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดติด ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารถูกดูดติดมายังสารดูดติด ดังภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดติดด้วยถ่านกัมมันต์

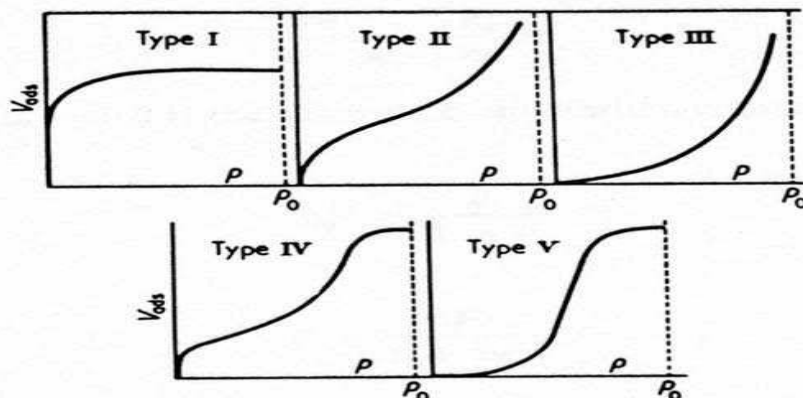
ที่มา: Eckenfelder, 1981

2.5.3 สมดุลการดูดติดผิว (Adsorption Equilibrium)

การดูดติดผิว ความเข้มข้นของสารละลายมีผลต่อตัวถูกละลายบนพื้นผิวของสารดูดติดผิวตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวมีแนวโน้มที่จะหลุดออกสู่สารละลาย เมื่อปริมาณของการดูดติดผิวและหลุดออกจากผิวมีปริมาณเท่ากัน ดังนั้นอัตราการดูดติดผิวและการหลุดออกจากผิวจะเข้าสู่สภาวะคงที่ซึ่งเรียกว่า สมดุลการดูดติดผิว (Adsorption Equilibrium) ที่จุดสมดุลจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของสารดูดติดผิว สมดุลนี้เป็นลักษณะเฉพาะของระบบทั้งหมดไม่ว่าจะเป็นตัวถูกละลาย สารดูดติดผิว ค่าพีเอช อุณหภูมิ และอื่นๆ การแสดงปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยของสารดูดติดผิว ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm)

2.5.4 ไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดติดผิว คือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับและความเข้มข้นของสารนั้นยังเหลืออยู่ในน้ำ แล้วนำไปพลอตกราฟลอการิทึม โดยให้ความเข้มข้นของสารอยู่ในน้ำเป็นแกนนอนและปริมาณสารที่ถูกดูดซับไปต่อน้ำหนักเป็นแกนตั้งไอโซเทอมการดูดติดผิว ซึ่งมีประโยชน์มากในการหาความสามารถในการดูดซับของสิ่งสกปรกในน้ำและเพื่อเปรียบเทียบชนิด สารดูดซับ ที่ดีที่สุด ภาพร่างของไอโซเทอมการดูดติดผิว จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดติดผิวและปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวสารดูดซับ ภาพแบบพื้นฐานของไอโซเทอมการดูดติดผิวมี 5 แบบ ดังแสดงในภาพที่ 2.10 ซึ่งจากไอโซเทอมภาพที่ 1 เป็นระบบที่การดูดติดผิวเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว ส่วนแบบที่เหลือเป็นการดูดติดผิวของโมเลกุลหลายชั้น



ภาพท 2-10 ไอโซเทอมการดูดติดผวแบบพนฐาน

ที่มา: Faust และ Aly, 1987

1. ไอโซเทอมการดูดติดผวแบบฟรุนดิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

สมการการดูดติดผวแบบฟรุนดิชใช้กันอย่างแพร่หลาย ใช้อธิบายกระบวนการดูดติดผวในระบบของเหลว มีสมการดังนี้

$$X/M = KCe^{1/n} \quad (3)$$

เมื่อ

X/M = ปริมาณของสารถูกดูดติดผวต่อน้ำหนักของสารดูดติดผว หน่วย มก. /ก.

Ce = ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผวในสารละลายที่จุดสมดุล หน่วย มก. /ล.

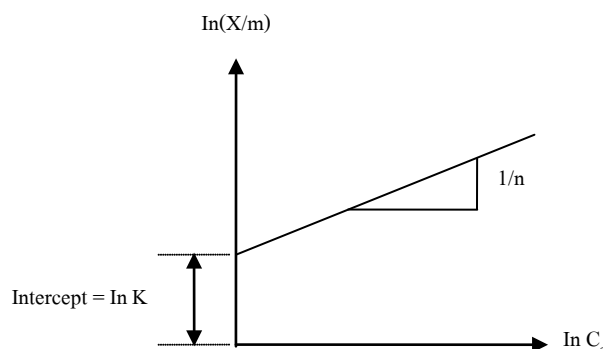
K = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดติดผว

$1/n$ = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดติดผว

จากสมการที่ (3) สามารถเขียนให้อยู่ในภาพของสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\text{Log } (X/M) = \text{log } K + (1/n) \text{ log } Ce \quad (4)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log (X/M)$ กับ $\log C_e$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกนเท่ากับ $\log K$ ดังภาพที่ 2-11 ถ้าค่า $1/n$ มีค่ามากกว่า 1 แสดงถึงการดูดติดผิวที่ดี และถ้าค่า $1/n$ มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงถึงการดูดติดผิวที่ไม่ดี



ภาพที่ 2-11 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดิช

ที่มา: Sunstrom และ Klei, 1979

2. ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

สมมติฐานของไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลง มัวร์ หรือเรียกว่า Localized monolayer model คือ โมเลกุลถูกดูดติดผิวอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดติดผิวแต่ละโมเลกุลเกิดการดูดติดผิวได้โมเลกุลเดียวโดยพื้นที่บริเวณดูดติดผิวมีค่าที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิว และพลังงานการดูดติดผิวแต่ละบริเวณมีค่าเท่ากัน สมการไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์ ดังสมการที่ 5

$$X = \frac{X_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (5)$$

เมื่อ $X = X/m$ ปริมาณของสารถูกดูดติดผิวต่อน้ำหนักสารดูดติดผิว หน่วย มก./ก.

X_m = ปริมาณสารถูกดูดติดผิวมากที่สุดต่อน้ำหนักสารดูดติดผิวเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว หน่วย มก. /ก.

C_e = ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวในสารละลายที่จุดสมดุล หน่วย มก./ล.

b = ค่าคงที่พลังงานของการดูดติดผิว
 จากสมการที่ (5) สามารถจัดให้อยู่ในภาพสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

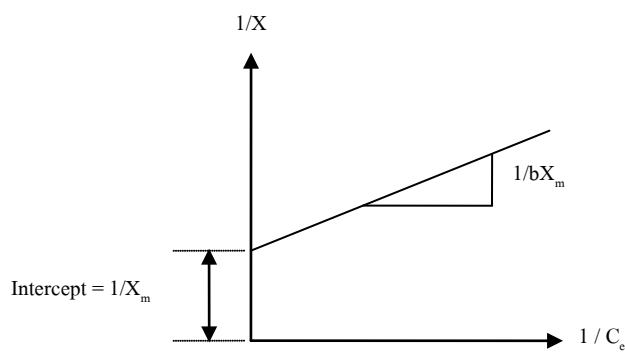
$$\frac{C_e}{X} = \frac{1}{X_m b} + \frac{C_e}{X_m} \quad (6)$$

หรือ

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{X_m} + \frac{1}{b X_m} \frac{C_e}{X} \quad (7)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/(X/M)$ กับ $1/C_e$ จะได้สมการเส้นตรง สามารถหาค่าคงที่ a และ b ได้จากความชันและจุดตัดแกน ดังในภาพที่ 2-12

เราจะพิจารณากราฟจากค่า R^2 ถ้าหาก R^2 ของกราฟไอโซเทอมใดเข้าใกล้ "1" มากกว่า เราจะเลือกไอโซเทอมนั้นมาอธิบายกับงานวิจัยที่เราศึกษา



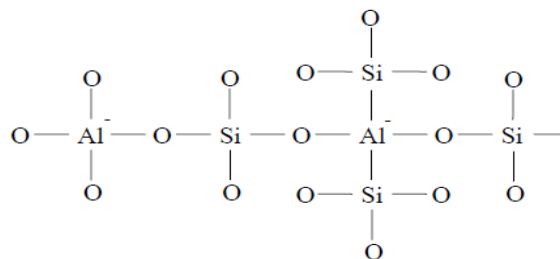
ภาพที่ 2-12 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์

ที่มา: Sunstrom และ Klei, 1995

2.6 ซีโอไลต์

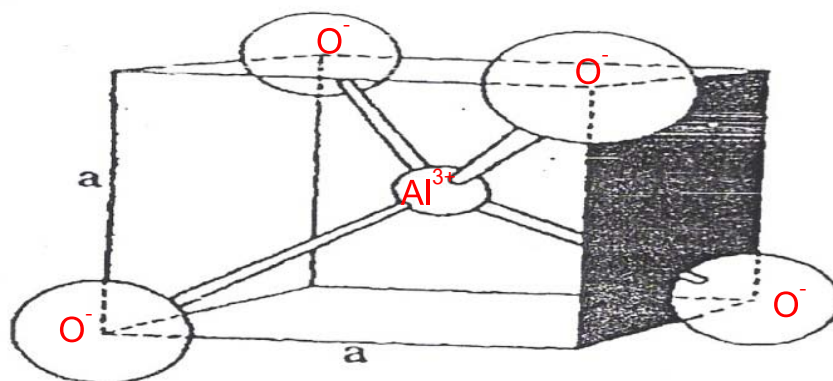
2.6.1 นิยามของซีโอไลต์

ซีโอไลต์ คือ ตะกอนของอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีน้ำตะกอนของโลหะอัลคาไลน์ หรืออัลคาไลน์เอิร์ท ซึ่งโดยมากจะเป็นโลหะโซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) สตรอนเทียม (Sr) และแบเรียม (Ba) โดยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์จะมีลักษณะเป็นโครงสร้าง 3 มิติของอะลูมิเนียมออกซิเจนเตตระฮีดรอล (AlO_4) และซิลิกอนออกซิเจนเตตระฮีดรอล (SiO_4) ดังภาพที่ 2-13 ซึ่งสามารถประกอบกันเป็นอะลูมิเนียมซิลิเกต โดยการเชื่อมต่อของออกซิเจนอะตอมแบบไม่สิ้นสุดเป็นโคพอลิเมอร์ (copolymer) ดังภาพที่ 2-14



ภาพที่ 2-13 หน่วยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์ เตตระฮีดรอลสองหมู่ของ $\text{SiO}_4/\text{AlO}_4$

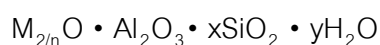
ที่มา: สัญชาต สิทธวารยัน และ สมชาย พานิชสาส์น, 2540



ภาพที่ 2-14 ภาพทรงเตตระฮีดรอลของออกซิเจนโคออร์ดิเนตกับซิลิกอนหรืออะลูมิเนียม

ที่มา: Breck, 1974

สูตรอย่างง่ายของซีโอไลต์คือ

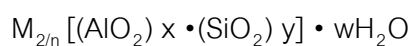


n คือ วาเลนซ์ของแคตไอออน (M) ส่วนมากมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 2 ของโลหะอัลคาไลน์ หรืออัลคาไลน์เอิร์ธ

x คือ จำนวนโมลของ SiO_2 โดยมากจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2

y คือ จำนวนโมลของน้ำที่อยู่ในช่องว่างของตะกอนซีโอไลต์

สูตรแสดงหน่วยเซลล์ของซีโอไลต์



n คือ วาเลนซ์ของแคตไอออน (M)

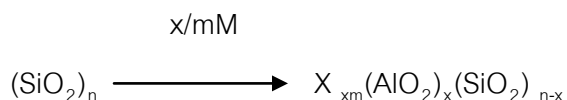
w คือ จำนวนโมลของน้ำต่อหน่วยเซลล์

x+y คือ จำนวนภาพทรงเตตระฮีดรอลทั้งหมดของหน่วยเซลล์

y/x มักจะมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 5 โดยขึ้นกับโครงสร้าง

ซิลิกอน-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (SiO_4) จะมีประจุลบสี่และอะลูมิเนียม-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (AlO_4) มีประจุเป็นลบห้า

การเชื่อมต่อกันของซิลิกอน - ออกซิเจนเตตระฮีดรอลกับอะลูมิเนียม - ออกซิเจนเตตระฮีดรอลเป็นโครงสร้างตาข่ายนั้นทำให้เกิดประจุลบขึ้น เนื่องจาก Al^{3+} แทนที่ Si^{4+} ในโครงสร้างซึ่งถูกทำให้สมดุลโดยประจุบวกจากแคทไอออนของโลหะอัลคาไลน์ หรืออัลคาไลน์เอิร์ท ดังสมการ



M คือ แคทไอออนของโลหะที่มีประจุ +m

x คือ จำนวนอะตอมของอะลูมิเนียม (Al)

n คือ จำนวนโมลของ SiO_2

ซีโอไลต์สามารถเกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือ (Breck, 1974 ; Dyer, 1988)

1) ซีโอไลต์ธรรมชาติ (Natural zeolite) เป็นซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยกระบวนการ Hydrothermal ของสารละลายใต้ผิวโลกที่มีองค์ประกอบของอะลูมินา (Alumina), ซิลิกา (Silica) และสภาวะเป็นเบสอย่างแรง (มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ที่เกิดจากการชะล้างของน้ำฝนผ่านชั้นหินลงมา) ภายใต้อุณหภูมิ 70-350 องศาเซลเซียส และความดันค่อนข้างสูงเป็นเวลานานจนค่อยๆก่อตัวเป็นโครงสร้างซีโอไลต์ ส่วนมากซีโอไลต์ชนิดนี้จะพบในบริเวณที่เป็นหินภูเขาไฟ ใต้พื้นมหาสมุทร บริเวณน้ำพุร้อน ธารน้ำจากแหล่งภูเขาไฟ หรือพื้นผิวดินบางแห่ง ข้อมูลจาก ZEO (2003) ได้ทำการศึกษาซีโอไลต์ธรรมชาติ พบว่า มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) 24.9 ตารางเมตรต่อกรัม ความหนาแน่น (Bulk density) 55 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต และขนาดของ

รูพรุน (Pore diameter) 1000 Å ตัวอย่างซีโอไลต์ธรรมชาติ ได้แก่ Faujasite, Erionite, Offertite, Chabazite, Mordernite และ Heulandite เป็นต้น

เราสามารถแบ่งชนิดของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติตามอุทกศาสตร์ ได้ดังนี้

- Saline alkaline lakes แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามการเปลี่ยนแปลงของผิวโลก คือ เขตแห้งแล้ง และเขตร้อนถึงแห้ง การรวมตะกอนในลักษณะนี้จะทำให้เกิดระบบ Close resin และควบคุมการเปลี่ยนแปลงของ Clastic material และ Basin edge สิ่งเหล่านี้เป็นส่วนสำคัญในการควบคุม Lake chemistry

- Saline alkaline soils ภาวะภูมิอากาศเป็นตัวควบคุมการเกิดซีโอไลต์ใน Saline alkaline soils การก่อตัวใน Arid region และ Semiarid region เกิดจากการระเหยของน้ำที่ผิวดินที่เกิดจากโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนตโดยน้ำฝนจะไหลซึมผ่านชั้นดินแล้วละลายโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนต ทำให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้นและทำให้เกิดอะลูมิโนซิลิเกตในพื้นที่นั้น

- Marine sediment ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากตะกอนที่อยู่ในทะเลภายใต้อุณหภูมิต่ำ และค่าความเป็นกรด-ด่างที่เป็นกลาง

- Open hydrologic systems ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของน้ำใต้ดินที่ไหลผ่าน Porous pyroclastic ซึ่งทำปฏิกิริยากับ Vitric ash

- Hydrothermal systems ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากระบบที่มีอัลคาไลน์กับสารละลายกรดอ่อน การรวมตะกอนถูกกำหนดจากปัจจัยของอุณหภูมิ ความสามารถในการเปียกได้ของแร่หิน และลักษณะของของไหลที่ไหลผ่าน ในส่วนที่ตื้นและเย็นที่สุดจะเกิดซีโอไลต์ชนิด Mordenite และ Clinoptilolite สำหรับในส่วนที่ลึกและร้อนกว่าจะเกิดซีโอไลต์ชนิด analcime และ laumontite

- Burial diagenetic systems ซีโอไลต์ชนิดนี้อยู่ในตะกอนที่เกิดจากภูเขาไฟ (volcanolastic sediment)

- Magmatic systems เป็นซีโอไลต์ที่ตกตะกอนอยู่ระหว่างชั้นของหินแมกมาที่เกิดจากอันตรกิริยาของของเหลวกับหินที่อยู่ล้อมรอบซีโอไลต์ ส่วนมากจะพบในหินอัคนีและอาจพบบ้างใน Imertitial และ Globules

- เป็นซีโอไลต์ที่พบบนปากปล่องภูเขาไฟในประเทศเยอรมัน ช่องว่างภายในตะกอนจะเติมไปด้วย Analcime, Clinoptilolite, Erionite, Harmotone และ Phillipsite

2) ซีโอไลต์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมี (Synthetic zeolites) ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของเบสิกออกไซด์ต่างๆ เช่น AlO_2 , SiO_2 , Na_2O และ K_2O ในระบบที่มีน้ำเพื่อให้ได้ซีโอไลต์ที่มีน้ำตะกอนและการสังเคราะห์สามารถทำให้เกิดขึ้นได้ทั้งในลักษณะที่เป็นเจล (Gelation) เป็นรูพรุน (Porous) และลักษณะที่คล้ายเม็ดทราย (Sandlike) ซึ่งเป็นประโยชน์ในการที่จะได้ซีโอไลต์ที่มีองค์ประกอบและโครงสร้างตามวัตถุประสงค์การใช้งานซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมีวิธีการเรียกชื่อได้หลายวิธี เช่น วิธีเรียกชื่อยุติของระบบของ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) โดยเรียกชื่อเป็นสารประกอบเชิงซ้อน 1 หน่วยเซลล์ เช่น

- Analcime ($\text{Na}_{16}(\text{AlO}_2)_{16}(\text{SiO}_2)_{32} \cdot 16\text{H}_2\text{O}$) เรียกว่า โซเดียม-16-อะลูมิเนียม-32-ซิลิเกต-16-น้ำ

- Jadeite ($\text{Na}_4\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{24}$) เรียกว่า โซเดียม-4-อะลูมิเนียม-8-ซิลิเกต

- Zeolite A ($\text{Na}_{12}(\text{AlO}_2)_{12}(\text{SiO}_2)_{12} \cdot 27\text{H}_2\text{O}$) เรียกว่า โซเดียม-12-อะลูมิเนียม-12-ซิลิเกต-27-น้ำ

การเรียกชื่อดังกล่าวต้องมีความรู้เกี่ยวกับหน่วยเซลล์ สำหรับวิธีอื่นๆ เช่น การใช้ตัวอักษรหรือกลุ่มอักษร และตัวเลข เป็นต้น ซึ่งวิธีหลังจะเป็นที่นิยมมากกว่า ซีโอไลต์สังเคราะห์เหมาะสมสำหรับงานวิจัย และมีประโยชน์กับอุตสาหกรรมมากกว่าซีโอไลต์จากธรรมชาติเนื่องจากโครงสร้างของซีโอไลต์สังเคราะห์จะเป็นแบบเดียวกันมากกว่า และยังมีควมบริสุทธิ์สูงกว่า ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับงานอุตสาหกรรมที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติที่เหมือนกันทุกครั้ง โดยเฉพาะสารเจือปนที่อยู่ในซีโอไลต์ธรรมชาติ เช่น ปริมาณเหล็กเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดความเสียหายในปฏิกิริยา Heterogeneous catalyst

2.6.2 สมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์ (คงศักดิ์ วัฒนวงศ์พิทักษ์, 2543)

- 1) การแลกเปลี่ยนไอออน ซีโอไลต์สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวกได้โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุบวกนี้เป็นกระบวนการแบบผันกลับได้
 - 2) การดูดซับน้ำ ซีโอไลต์สามารถดูดซับน้ำให้เข้าไปอยู่ในช่องว่างบริเวณผนังด้านในของโพรงชนิดต่างๆ ได้ และสามารถกำจัดน้ำออกได้ที่อุณหภูมิที่สูงพอ
 - 3) การคัดขนาดและภาพร่างของโมเลกุลที่ผ่านเข้าออกจากโพรงของซีโอไลต์ ภายในโครงสร้างของซีโอไลต์ประกอบด้วยโพรงขนาดต่างๆ กัน มีทางให้โมเลกุลของสารอื่นผ่านเข้าออกได้ เรียกว่า “ปากโพรง (Aperture)” โดยที่โมเลกุลที่มีภาพร่างและขนาดพอเหมาะสำหรับปากโพรงเท่านั้น จึงจะสามารถผ่านเข้าออกจากโพรงของซีโอไลต์ได้ ทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติในการกรองแยกโมเลกุลได้ (Molecular sieve)
 - 4) สมบัติที่สำคัญอื่นๆ ได้แก่ ความหนาแน่นของตำแหน่งที่เป็นกรด (Acid site density) ความรุนแรงของกรด (Acid strength) และขนาดของรูพรุน (Pore size) ภายในผลึกซึ่งรวมถึงลักษณะภาพทรง และขนาดของทางเข้าออกของรูพรุน (Pore entrance)
- จากสมบัติของซีโอไลต์พบว่าการดูดซับของซีโอไลต์เป็นการดูดซับแบบ Monolayer

2.6.3 ประโยชน์ของซีโอไลต์

จากลักษณะพิเศษของซีโอไลต์ได้มีผู้นำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ มากมายซึ่งพอจะรวบรวมได้ดังนี้

1) ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) ปฏิกิริยาแอลคิเลชัน (Alkylation) ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization) ปฏิกิริยาของเคลาส์ (Claus process) และปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อน (Thermol cracking) เป็นต้น

2) ใช้เป็นสารดูดซับ (Sorption) เนื่องจากลักษณะโครงสร้างที่มีความเป็นรูพรุนของซีโอไลต์ทำให้สามารถดูดซับสารต่างๆ ได้ตามขนาด และโครงสร้างของซีโอไลต์แต่ละชนิด

3) สารลดความกระด้าง (Water softener) ซีโอไลต์เป็นตัวลดความกระด้างของน้ำได้ เนื่องจากในน้ำกระด้างมีแคลเซียมไอออน และแมกนีเซียมไอออนละลายอยู่ ซึ่งซีโอไลต์สามารถแลกเปลี่ยนแคทไอออนในโครงสร้างตะกอนกับแคลเซียมไอออน หรือแมกนีเซียมไอออน

4) ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) จากสมบัติการแลกเปลี่ยนแคทไอออนของซีโอไลต์ทำให้สามารถใช้เป็นเรซินเพื่อแลกเปลี่ยนกับแคทไอออนไดวาเลนต์ (Divalent) ได้ การแลกเปลี่ยนไอออนขึ้นอยู่กับ

- ธรรมชาติของแคทไอออน
- อุณหภูมิที่ใช้
- ความเข้มข้นของแคทไอออนในสารละลาย
- ชนิดของแอนไอออนที่รวมตัวกับแคทไอออนในสารละลาย
- ตัวทำละลาย (การแลกเปลี่ยนส่วนมากเกิดขึ้นได้ดีใน Aqueous solution)
- ลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์

5) ใช้เป็นส่วนผสมในผงซักฟอก (Detergent builders) เนื่องจากซีโอไลต์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับทำผงซักฟอก คือ มีค่าความจุ (Capacity) และจลนพลศาสตร์สูง (Kinetics) ทำให้การแลกเปลี่ยนแคทไอออนเกิดขึ้นได้มากและรวดเร็ว นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังใช้แทนฟอสเฟตได้อีกด้วย เนื่องจากฟอสเฟตที่ผสมในผงซักฟอกถ้าใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้ คือ ฟอสเฟตทำให้พืชน้ำหรือพวกสิ่งมีชีวิตเล็กๆ เจริญเติบโตรวดเร็ว และเมื่อทับถมกันมากเข้าจะทำให้แม่น้ำเน่าเสีย ส่งผลให้เกิดปัญหาในการกำจัด นอกจากนี้ยังทำให้ปริมาณสัตว์น้ำลดลงได้ เนื่องจากขาดออกซิเจนในการย่อยสลาย

6) ใช้ในการเลี้ยงปลา (Aquaculture) การเลี้ยงปลาส่วนมากจะเลี้ยงในบ่อ จึงมีปัญห การกำจัดของเสียที่ปลาปล่อยออกมา เนื่องจากของเสียที่ปล่อยออกมามีปริมาณแอมโมเนียมาก แอมโมเนียเพียงปริมาณ 2-3 มิลลิกรัมต่อลิตร ในบ่อปลาก็สามารถทำให้ปลาเป็นโรคเหงือก หยุดการเจริญเติบโต ทำลายสมอง เป็นหมันและตายในที่สุด การใส่ซีโอไลต์ชนิด Clinoptilolite และ Mordenite ลงในบ่อปลาเพียง 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตรของน้ำในบ่อปลา สามารถกำจัดแอมโมเนียได้ถึงร้อยละ 97-99

7) ใช้เป็นอาหารสัตว์ (Animal nutrition) ใช้ซีโอไลต์เป็นอาหารเสริมสัตว์ปีกและสัตว์ที่กินหญ้าเป็นอาหาร จะช่วยให้เนื้อสัตว์มีคุณภาพดีขึ้น เพิ่มปริมาณไข่ของสัตว์ปีก ปริมาณนมและยังช่วยลดอาการท้องร่วง ลำไส้อักเสบ โรคทางเดินอาหารของสัตว์ได้

8) ใช้ในการปรับปรุงดิน (Soil amendment) ซีโอไลต์แลกเปลี่ยนไอออนและเก็บ ความชื้นได้ดี จึงนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยใช้ซีโอไลต์ชนิด clinoptilolite จะช่วยจับ แอมโมเนียได้สูงและปล่อยออกมาอย่างช้าๆ จึงช่วยให้ดินยึดไนโตรเจนไว้ได้นาน

ตัวอย่างการนำซีโอไลต์ไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ (Breck, 1974)

1) การกำจัดแอมโมเนียในน้ำเสียชุมชน การศึกษาช่วงเริ่มต้นในการใช้หลักการ แลกเปลี่ยนไอออนเพื่อกำจัดแอมโมเนียในกระบวนการกำจัดน้ำเสีย พบว่า สารอินทรีย์หลายชนิดมี ความสามารถเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนได้แต่ก็มีประสิทธิภาพในการดักจับแอมโมเนียได้ต่ำ ทำให้ กำจัดแอมโมเนียได้น้อยและเสียค่าใช้จ่ายสูง นอกจากนี้ยังทำให้เกิดปัญหาเรื่องน้ำเค็มตามมาด้วยวิธี ที่เหมาะสมที่ดีกว่าถูกเสนอเป็นรายงานโดย Ames (1976) ได้แสดงว่า มีการใช้ซีโอไลต์หลายชนิดที่ สามารถเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนได้ และให้ผลดีกว่าแบบดั้งเดิม ซีโอไลต์ชนิด Clinoptilolite และ Union Carbide's 40 เป็นซีโอไลต์ที่เหมาะสมที่สุดหลังจากการทดสอบโดยใช้ในโรงงานต้นแบบ พบว่า แอมโมเนียมนั้นถูกกำจัดออกไปได้มากถึงร้อยละ 95

2) การเติมซีโอไลต์ชนิดที่ใช้ในการคัดเลือกโมเลกุลสารได้ลงในผงซักฟอกหน้าที่หลัก ของฟอสเฟตที่ผสมอยู่ในผงซักฟอก คือ ลดแคลเซียม (Ca^{2+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ที่มีอยู่ใน น้ำกระด้าง โดยใช้ซีโอไลต์ชนิดผงที่สามารถเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนได้ไปทำการกำจัดแคลเซียม ไอออน และแมกนีเซียมไอออนจากสารละลายแล้วแทนที่ด้วยเกลือโซเดียมโดยที่ผงซักฟอกเหล่านี้จะ รับโซเดียมจากซีโอไลต์ชนิด Linde ผงซักฟอกที่มีซีโอไลต์เป็นส่วนผสมจะลดปริมาณฟอสเฟตที่มีอยู่ให้ อยู่ในระดับต่ำหรือไม่มีอยู่เลยนั้นสามารถหาซื้อได้ในหลายพื้นที่ของประเทศสหรัฐอเมริกา ยุโรปและ

สถานที่อื่นๆ นอกจากนี้การใช้ซีโอไลต์ในภาพแบบนี้มีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากการสังเกตปริมาณการใช้ซีโอไลต์ในแต่ละปี พบว่า มีความต้องการเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งในปัจจุบันนี้มีการใช้ในปริมาณหลายล้านปอนด์ทั่วโลกการนำซีโอไลต์มาประยุกต์ใช้แทนสารฟอสเฟตในผงซักฟอกนั้น ในช่วงแรกวิธีนี้ถูกพัฒนาขึ้นโดยนักวิทยาศาสตร์ที่บริษัท เฮนเกล (Henkel) ในประเทศเยอรมัน และบริษัทพรอคเตอร์แอนด์แกมเบิล (Procter&Gamble) ในประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งปัจจุบันนี้มีการพัฒนาในเรื่องนี้อยู่มากมาย

3) การเปลี่ยนเมทานอลไปเป็นน้ำมันเบนซินโดยใช้ซีโอไลต์ เนื่องจากได้มีกา รตระหนักถึงเรื่องของแหล่งพลังงานทั้งหลายที่มีอยู่ในปัจจุบันที่มีโอกาสจะหมดไปในอนาคตจึงได้เริ่มมีการค้นคว้าเพื่อเสาะหาแหล่งพลังงานใหม่ที่ไม่ใช้ปิโตรเลียม และมีศักยภาพเพียงพอที่จะเป็นแหล่งพลังงานในอนาคตเมทานอลเป็นเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่สามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ได้ เนื่องจากสามารถทำการผลิตได้ปริมาณสูงในช่วงเวลาที่สั้นจากถ่านหิน และก๊าซสังเคราะห์โดยใช้เทคนิคที่มีอยู่ในปัจจุบัน สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ทั้งโดยตรงหรือจะนำไปใช้เป็นแบบผสมกับน้ำมันเบนซินก่อนที่จะใช้กับเครื่องยนต์กระบวนการแบบใหม่ที่ใช้ในการเปลี่ยนเมทานอลให้ไปเป็นน้ำมันเบนซิน คือการใช้ ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งกระบวนการนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัท โมบิลออยล์ซึ่งได้ตั้งชื่อกระบวนการนี้ว่า กระบวนการ MTG (Methanol To Gasoline) บริษัท โมบิลออยล์ ได้สร้างโรงงานที่ใช้กระบวนการ MTG และใช้ซีโอไลต์ ZSM-5 เป็นแห่งแรกที่โมทูเนีย ประเทศนิวซีแลนด์ และเริ่มต้นทำการผลิตในปี ค.ศ. 1985 โดยที่โรงงานแห่งนี้ได้ใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดอยู่หนึ่ง (fixed-bed) และที่ประเทศเยอรมันตะวันตกก็ได้มีการพัฒนากระบวนการ MTG เหมือนกัน แต่ต่างกันที่เครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized-bed) เพื่อนำไปใช้ผลิตได้จริงในทางการค้า และสามารถประสบความสำเร็จ โดยได้มีการสร้างโรงงานต้นแบบไว้ที่เมืองเวสเซลิง (Wesseling) กระบวนการเหล่านี้สามารถเปลี่ยนให้ได้น้ำมันเบนซินถึงร้อยละ 90 และมีค่าออกเทน 90.25 กระบวนการที่ใช้ Fluidized-bed ได้มีการปรับปรุงกระบวนการ MTG และทำให้สามารถนำวัตถุดิบชนิดอื่นๆ เช่น ก๊าซธรรมชาติมาใช้แทนเมทานอลได้

4) การแยกและนำโลหะกลับมาใช้ใหม่ ซีโอไลต์หลายชนิดมีความสามารถในการคัดเลือกโลหะหนัก ทำให้สามารถนำโลหะที่มีค่าเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ หรือเอาไว้ใช้กำจัดโลหะหนักที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม และโลหะที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย เนื่องจากเกิดความคั่งพูนในการนำโลหะกลับมาใช้ใหม่ได้ ซีโอไลต์ชนิด Clinoptilolite และ Mordenite ถูกศึกษาเพื่อใช้ในการกำจัดโลหะหนักโดยเฉพาะ Cd ,Cu, Pb ,และ Zn ที่มีอยู่ในน้ำเสีย ซีโอไลต์ที่มีความสามารถในการคัดเลือกโลหะ

ได้จะทำการเปลี่ยนไอออนของโลหะเงิน (Ag) เพื่อดึงเอาโลหะเงินออกจากน้ำเสียจากการรายงานของ Breck (1974) แสดงให้เห็นว่า การใช้ซีโอไลต์ในการแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแยก Co และ Ni ได้ โดยใช้ซีโอไลต์ Linde แบบ A (Linde A Zeolite) นอกจากนี้ยังมีวิธีแยกโลหะเพื่อไม่ให้มีเหล็กอีกหลายวิธี วิธีที่สามารถนำมาใช้โดยการเลือกใช้ซีโอไลต์ชนิดที่เหมาะสม

2.7 กระบวนการออกซิเดชันด้วยสารเคมี (Chemical oxidation)

กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยสารเคมีเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ สารเคมีเป็น สาคัญในการออกซิไดซ์ สารประกอบต่าง ๆ ในน้ำเสียโดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยสารเคมี สามารถใช้งานได้หลายจุดประสงค์ดังนี้

- 1) การกำจัดสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ ที่มีความเข้มข้นต่ำในน้ำบาดาล
- 2) การบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง แต่มีปริมาณน้อย เพื่อลดความเป็นพิษ
- 3) การบำบัดน้ำเสียที่ย่อยสลายได้ยากด้วยกระบวนการทางชีวภาพให้ สามารถย่อยสลายได้ง่ายขึ้น เพื่อส่งไปเข้ากระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพต่อไปได้
- 4) เพื่อลดเวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียเพราะหากใช้ กระบวนการบำบัดด้วยชีวภาพอย่างเดียว อาจทำให้ใช้เวลานานในการลดสารอินทรีย์ให้ได้ตามข้อกำหนด

การเกิดออกซิเดชันทางเคมีเป็น กระบวนการที่เกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสีย อิเล็กตรอน (Electron) ของอะตอม ดังนั้น โดยอาศัยหลักการนี้ การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีนี้จึงเป็น กระบวนการที่เปลี่ยนสภาพของมลสารที่อยู่ในน้ำจากมลสารประเภทมีพิษมากไปเป็น มลสารประเภทมีพิษน้อยหรือไม่มีพิษ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ 2539) และผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้ยังสามารถย่อยสลายทางชีวภาพ หรือถูกกำจัดโดยการดูดซับได้ดียิ่งขึ้น

การเกิดออกซิเดชันทางเคมี (USEPA, 1991) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของสารหลายประเภท เช่น ไฮยาไนด์, สารประกอบอินทรีย์ละลายน้ำบางตัวและซัลไฟด์ ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นคาร์บอนไดออกไซด์, น้ำ, เกลือ, กรดอินทรีย์ และสารที่มีวาเลนซ์สูงขึ้น แต่ละลายน้ำได้น้อยลง เช่น อาร์เซนไนต์ถูกออกซิไดซ์เป็นอาร์เซนเนท

Marco, Esplugas และ Saum (1997) พบว่า กระบวนการออกซิเดชันทางเคมีกลไกของปฏิกิริยาจะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีของสารอินทรีย์ โมเลกุลจะแตกออกเป็นโครงสร้างที่เล็กลง และเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนในโมเลกุลจะสูงขึ้น นอกจากนี้การเกิดออกซิเดชัน

กระดาษและกระดาษ ตัวอย่างของการใช้ประโยชน์จากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในภาคอุตสาหกรรม ได้แก่

- 1) ใช้ในการกำจัดพิษในน้ำเสียที่มีไซยาไนด์เข้มข้นโดยการออกซิไดซ์ไซยาไนด์ไปเป็น ไซยาเนต
- 2) ใช้ในการกำจัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำใต้ดิน โดยการเปลี่ยนสภาพโลหะหนักเหล่านี้ไปอยู่ในสภาพไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำและสามารถกำจัดได้โดยการรวมตะกอนในถังพัก
- 3) ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากการล้างอัดฟิล์ม ซึ่งมีซัลไฟต์และเงินปนเปื้อนอยู่ โดยการเปลี่ยนสภาพไปเป็นซัลเฟตและรวมตะกอนสารประกอบของเงินตามลำดับ
- 4) กำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในก๊าซที่ปล่อยออกจากปล่องควันโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และ แอมโมเนีย
- 5) ป้องกันกลิ่นโดยการเปลี่ยนภาพซัลไฟด์ ไทโออีเธอร์ไดซัลไซด์ ซัลไฟต์และไทโอซัลเฟต ซึ่งเป็นองค์ประกอบของซัลเฟอร์หรือซัลเฟตในสารละลายที่ใช้ทำความสะอาด
- 6) กำจัดก๊าซซัลเฟอร์และไนโตรเจนออกไซด์ที่ถูกปล่อยจากกระบวนการเผาถ่านหิน กระบวนการผลิตกรดซัลฟูริก หรือกระบวนการผลิตทางเคมีอื่นๆ ให้อยู่ในสภาพสารละลายกรด
- 7) กำจัดคลอรีนและสารไฮโปคลอไรท์ส่วนเกินในน้ำเสีย อากาศ หรือในการฟอกสีผ้าหรือกระดาษ โดยการรีดักชันไปเป็นเกลือคลอไรด์

นอกจากนี้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังสามารถใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการทำความสะอาด ตกแต่ง กัดกร่อนพื้นผิวโลหะ ตัวอย่างเช่น โดยปกติในการทำความสะอาดผิวของอะลูมิเนียม มักจะใช้กรดซัลโฟโครมิก แต่กรดนี้มีองค์ประกอบที่เป็นพิษของเฮกซะวาเลนไทโครเมียม การใช้สารทำความสะอาดที่มีองค์ประกอบของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งทำให้ไม่เกิดสารพิษในน้ำทิ้ง และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังใช้ประโยชน์ในการออกซิไดซ์ทองแดงหรือคอปเปอร์ คอปเปอร์ซัลเฟต สำหรับทำความสะอาดทองแดงหรือทองแดงอัลลอยด์

2.7.2 กระบวนการออกซิเดชันด้วยเฟนต์ันรีเอเจนต์ (Fenton's reagent, $\text{Fe}^{2+} / \text{H}_2\text{O}_2$)

เฟนต์ันรีเอเจนต์ (Fenton's reagent) เป็นของผสมระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเกลือ Fe^{2+} ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โมเลกุลมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ได้ทั้งยัง

สามารถเกิดการแตกตัวได้เองเป็น $\cdot\text{OH}$ ซึ่งทำให้มีกำลังออกซิเดชันสูงขึ้นอย่างมาก อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาแตกตัวเองนี้เกิดขึ้นช้ามาก แต่ถ้ามีการเติมเกลือของ Fe^{2+} ลงไปช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัว ให้เกิดเร็วขึ้นอย่างมาก ปฏิกิริยาของ Fenton's reagent มีดังนี้



กระบวนการออกซิเดชันด้วย Fenton's reagent มีข้อได้เปรียบกว่ากระบวนการที่ใช้รังสี UV เมื่อสารที่ต้องการบำบัดเป็นสารที่ดูดกลืนรังสี UV ซึ่งจะขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน กระบวนการ Fenton's reagent มีค่าลงทุนต่ำเมื่อเทียบกับกระบวนการ $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ และ O_3/UV เนื่องจากมีการใช้อุปกรณ์ต่างๆ น้อยกว่า สำหรับค่าดำเนินการส่วนใหญ่เป็นค่าสารเคมีโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าสาร H_2O_2 ซึ่งมีราคาสูงกว่าเกลือ Fe^{2+} ดังนั้นในการบำบัดจะต้องทำการทดลองเพื่อหาปริมาณ H_2O_2 ที่เหมาะสม สำหรับค่าไฟฟ้ากระบวนการนี้จะใช้ต่ำกว่าอีก 2 กระบวนการมาก ในกรณีที่ทำกรบำบัดน้ำและน้ำเสียด้วยกระบวนการ Fenton's reagent จะทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีสี เนื่องจากเกลือ Fe^{2+} และ Fe^{3+} เป็นไอออนที่มีสี

2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จักริน นักร้อง (2549) ศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวสี น้ำชะมูลฝอยโดยใช้ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเมล็ดมะขาม ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้สารซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) และทำการล้างสารกระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้นร้อยละ 5 เปรียบเทียบกับ ถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายตาม ท้องตลาดทั่วไป (Filtrisorb 300) โดยทำการทดลองแบบแบทช์ ถ่านกัมมันต์ปริมาณ 0.5 กรัม สำหรับถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม พบว่าที่พีเอช 8 และเวลาสัมผัส 90 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยดีที่สุด เท่ากับร้อยละ 58.69 และ 61.78 ตามลำดับ จากการทดสอบ ไอโซเทอมการดูดติดผิว สามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมแบบฟรุนลิช โดยมีค่าคงที่สัมพันธ์กับความ สามารถในการดูดติดผิว (K) เท่ากับ 1.65 แพลทตินัม-โคบอลต์ต่อกรัมถ่าน และ $1/n$ มีค่าเท่ากับ 0.7876 ส่วนถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 พบว่าที่พีเอช 8 และเวลาสัมผัส 120 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยดีที่สุดเท่ากับร้อยละ 92.81 และ 92.08 ตามลำดับ จากการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิว พบว่า มีค่า K เท่ากับ 2.05 แพลทตินัม-โคบอลต์ต่อกรัมถ่าน และ $1/n$ มีค่าเท่ากับ 0.9305

จรรยา อินทมณี และ คณะ (2552) ศึกษาการกำจัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งบ่อสุดท้ายโดยใช้การดูดติดผิวร่วมกับปฏิกิริยาเฟนตัน สารดูดติดผิวที่ใช้ คือ ซีโอไลท์จากการเผาเส้นใยและทะเลสาบปาล์มซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อต้มของโรงงาน สารเฟนตันที่ใช้ คือ เพอร์รัสซัลเฟตและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการใช้สารดูดซับและการใช้ปฏิกิริยาเฟนตันร่วมในการบำบัดน้ำทิ้ง จากผลการทดลองพบว่าการใช้สารดูดติดผิวชนิดซีโอไลท์สามารถกำจัดสีและ ซีโอดีในน้ำทิ้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีการใช้ซีโอไลท์ในปริมาณมากซึ่งไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ ส่วนการใช้สารดูด ติดผิวร่วมกับปฏิกิริยาเฟนตัน พบว่าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีโอดี รวมทั้งสามารถลดปริมาณของซีโอไลท์ที่ต้องใช้ได้ถึง 7 เท่า

ปภาวดี โชคสุวรรณกิจ (2550) ศึกษาความสามารถของกากตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปาและเถ้าลอยแอสฟัลท์ในการลดซีโอดีและสีในน้ำกากส่า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารส้มและปูนขาวเป็นโคแอกกูแลนต์โดยใช้ วิธีจาร์เรสต์ผลการศึกษาพบว่าร้อยละการบำบัดซีโอดีจากการรวมตะกอน ปูนขาวมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ กากตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปา สารส้ม และเถ้า

ลอยแอสฟัลท์ ซึ่งมีค่าเป็น ร้อยละ 40.20, 30.77, 22.88 และ 13.51 ตามลำดับ ส่วนร้อยละการบำบัด ความเข้มข้นจากการรวมตะกอนด้วยปูนขาวจะมีค่าสูงสุด รองลงมาคือ สารส้ม กากตะกอนจากระบบ ผลิตน้ำประปา และเถ้าลอยแอสฟัลท์ ซึ่งมีค่าเป็น ร้อยละ 37.76, 26.32, 23.50 และ -15.71 ตามลำดับ และ ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำกากส่าเมื่อใช้กากตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปา และเถ้าลอยแอสฟัลท์ร่วมกับการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยเปรียบเทียบกับสารส้ม และปูนขาว ผลการศึกษาพบว่าร้อยละการบำบัดซีโอดีจากการรวมตะกอนด้วย กากตะกอนจากระบบ ผลิตน้ำประปา มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ สารส้ม เถ้าลอยแอสฟัลท์ และปูนขาว ซึ่งมีค่าเป็น ร้อยละ 51.92, 42.24, 26.87 และ 24.31 ตามลำดับ ส่วนร้อยละการบำบัดความเข้มข้นจากการรวมตะกอน ด้วยเถ้าลอยแอสฟัลท์ จะมีค่าสูงสุด รองลงมาคือ กากตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปา สารส้ม และ ปูนขาวซึ่งมีค่าเป็น ร้อยละ 54.92, 14.85, 11.92 และ 3.20 ตามลำดับ เมื่อพิจารณากระบวนการ บำบัดทั้งหมดพบว่า กากตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปาสามารถบำบัดน้ำกากส่าร่วมกับไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ ให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีรวมมากที่สุด คือ ร้อยละ 67.26 และปูนขาวสามารถ บำบัดน้ำกากส่าร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีรวมมากที่สุด ร้อยละ 43.83

ปธานิน แสงอรุณ (2551) ศึกษาความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอย ถ่านหินด้วยสารละลายต่างที่ใช้แล้ว (Spent alkaline) โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซี โอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ซีโอไลต์จาก เถ้าลอยถ่านหินคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลาย Spent alkaline 3 โมลาร์ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 4 วัน ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยน แคลเซียมไอออนเท่ากับ 470.75 cmol/kg และนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ไปทดสอบความสามารถในการ กำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการทดลอง แบบไม่ต่อเนื่อง พบว่า ปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน จาก น้ำเสียสังเคราะห์ คือ 1 กรัมซีโอไลต์ สามารถกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้ 11.38 มิลลิกรัม แอมโมเนียไนโตรเจน ที่พีเอชน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นเท่ากับ 6 ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม คือ 180 นาที นำไปทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวสามารถอธิบายได้โดย ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ ซึ่งซีโอไลต์ที่ สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินโดยผ่านการกระตุ้นด้วย Spent alkaline มีความสามารถในการกำจัด แอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ได้เท่ากับร้อยละ 82 ของปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน

ทั้งหมด และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน มีความสามารถในการกำจัดแอมโมเนีย ไนโตรเจนในน้ำเสียจริงได้เท่ากับร้อยละ 74.87

สวีณา เกตุสุวรรณ (2543) ศึกษาประสิทธิภาพของสารสร้างตะกอน ได้แก่ โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ เพอร์ริกซัลเฟตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ชนิดแอนไอออนและแคทไอออนและความเป็นกรด-ด่าง ในกระบวนการรวมตะกอนทางเคมีในการลดค่าซีโอดีของน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอจาก การศึกษาพบว่าสารสร้างตะกอนที่ลดค่าซีโอดีน้ำเสียจากบ่อพักได้สูงสุด คือ เพอร์ริกซัลเฟต 250 มก./ล. เมื่อใช้สารช่วยรวมตะกอนชนิดแคทไอออน 3.5 มก./ล. และพีเอชประมาณ 7 แต่ น้ำที่ได้ ค่าพีเอชค่ามากคือ 4.11 ลดค่าซีโอดีได้ ร้อยละ 57.8 ค่าใช้จ่ายขั้นต่ำค่าในการบำบัดน้ำให้ เป็นกลาง รวมกับสารรวมตะกอนประมาณ 28 บาท/ลบ.ม. ส อนุโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ 2,000 มก./ล. ร่วมกับ สารช่วยรวมตะกอนชนิดแคทไอออน 5.0 มก./ล. ที่พีเอชประมาณ 10 ลดค่า ซีโอดีได้ ร้อยละ 51.9 ค่าใช้จ่ายประมาณ 42 บาท/ลบ.ม. และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 400 มก./ล. ร่วมกับสารช่วยรวมตะกอนชนิดแคทไอออน 3.50 มก./ล. ที่พีเอชประมาณ 7.5 ลดค่าซีโอดีได้ร้อยละ 48.3 ค่าใช้จ่ายประมาณ 30 บาท/ลบ.ม. นอกจากนี้สีและสารช่วยย้อมยังมีผลต่อค่าซีโอดีด้วยคือ เมื่อใช้ เพอร์ริกซัลเฟตกับน้ำย้อมประเภทสีดีสเพิส ไดรอกท ริแอกทีฟ เบสิค ลดค่า ซีโอดีได้ ร้อยละ 35.7, 36.2, 38.7 และ 30.7 ตามลำดับ ซึ่งสำหรับสีดีสเพิสและเบสิคใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดค่าซีโอ ดีได้ร้อยละ 36.9 และ 35.7 ส่วนสารช่วยย้อมประเภทน้ำแป้งใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ลดค่าซีโอดีได้ ร้อยละ 43.4 สารช่วยย้อมประเภทโซเดียมซัลเฟตใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดได้ ร้อยละ 42.5 ดังนั้น ประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีกับพีเอช

สิรินันท์ กันศิริ (2550) ศึกษาการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์ จากเถ้าลอยถ่านหิน โดยได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย โซเดียม ไฮดรอกไซด์และสารละลายต่างที่ใช้แล้ว (spent alkaline) ซึ่งมีสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการ สังเคราะห์คือ ที่ความเข้มข้น 3 โมลาร์ อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 วัน ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 517.49 และ 473.74 cmol/kg ตามลำดับ นำซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline ไปกำจัดซีโอดีและสี ในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัด พบว่า ปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์ ที่เหมาะสมในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม คือ 20 กรัม พีเอชน้ำเสียโรงงานฟอก

ข้อมเท่ากับ 7 ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมคือ 120 นาที นำไปทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิว สามารถอธิบายได้โดย ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช ซึ่งสมการไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้คือ $x/m = 5.27 \times 10^{-23} C_e^{10.705}$ พบว่า ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ด้วยถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline 1 กรัม สามารถดูดติดผิวสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดซีโอดีสูงสุดเท่ากับ 24.71 มิลลิกรัม จากการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ใช้แล้วและนำกลับมาใช้ใหม่ในการกำจัด ซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม พบว่าการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ที่ใช้แล้วปริมาณ 5 กรัม ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการสัมผัส 1 และ 3 ชั่วโมง ให้ร้อยละการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสูงสุด คือ 7.94 ซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพสามารถกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมได้ต่ำ นอกจากนี้ซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพทุกภาวะจะทำให้ความเข้มข้นของน้ำเสียเพิ่มมากขึ้นในการศึกษาความสามารถในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป โดยการทดลองแบบต่อเนื่อง (Column test) เก็บตัวอย่างน้ำที่ระดับความลึกของชั้นซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ 30 60 90 และ 120 เซนติเมตร พบว่า สามารถกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมได้ 26.35, 24.19, 24.13 และ 23.59 BV ตามลำดับ และสามารถกำจัดสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมได้ 30.36, 28.19, 26.80 และ 26.59 BV ตามลำดับ ที่จุด breakthrough

Ahn และ คณะ (2002) ได้ทำการศึกษาผลของการกำจัดแอมโมเนียและซีโอดีจากน้ำชะขยะโดยใช้ซีโอไลต์และเพอริกคลอไรด์ในเบื้องต้น ก่อนจะนำเข้าสู่ระบบบำบัดแอกติเวตเต็ดสลัดจ์ (Activated Sludge) โดยการทดลองนี้แบ่งเป็น 3 ถัง ถังแรกเป็นน้ำชะขยะที่ไม่ได้มีกา รกำจัดแอมโมเนียและซีโอดีจากซีโอไลต์และเพอริกคลอไรด์ในเบื้องต้น ถังที่สองเป็นน้ำชะขยะที่ผ่านการกำจัดแอมโมเนียและซีโอดีโดยใช้เพอริกคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์ ถังที่สามเป็นน้ำชะขยะที่ผ่านการกำจัดแอมโมเนียและซีโอดีจากทั้งซีโอไลต์และเพอริกคลอไรด์ ผลการทดลองพบว่า ถังที่สามมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีร้อยละ 83 ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุด ส่วนถังแรกและถังที่สองมีประสิทธิภาพร้อยละ 63 และ 66 ตามลำดับ ส่วนการกำจัดแอมโมเนียนั้นสังเกตเห็นว่าหากมีการกำจัดโดยใช้ซีโอไลต์ก่อนประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียจะเพิ่มสูงขึ้น

Amuda และ Amoo (2007) ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการ Coagulation/ Flocculation โดยใช้เพอริกคลอไรด์และโพลีอิลิกโทไรด์ (non-ionic polyacrylamide) เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำดื่มวัดการกำจัดซีโอดี, ฟอสฟอรัสทั้งหมด และของแข็ง

แขวนลอย ทำการทดลองโดยการใช่วิธีจาร์เทสต์ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดคือ พีเอชเท่ากับ 9 ร้อยละ การกำจัดซีโอดี, ฟอสฟอรัสทั้งหมด และของแข็งแขวนลอยได้ 73, 95, 97 ตามลำดับ ผลจากการ เติมเพอริกคลอไรด์ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัด ซีโอดี, ฟอสฟอรัสทั้งหมด และของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 91, 99, 97 ตามลำดับ และการใช้โพลีอิเล็กโทรไลต์ ร่วมกับโคแอกกูแลนต์ ปริมาณของสลัดจ์ลดลงร้อยละ 60

Azhar และ คณะ (2010) ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอไลต์, ถ่านกัมมันต์, วัสดุผสม ในการดูดซับแอมโมเนียและซีโอดี พบว่า การใช้ตัวดูดซับทั้งสามชนิด ยิ่งใช้ปริมาณ มากประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดียิ่งสูงขึ้นโดยการทดลองนี้ใช้ปริมาณตัวดูดซับ 10 – 60 กรัม พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงขึ้นร้อยละ 10 – 80

Daphne และ คณะ (2009) ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด น้ำชะขยะ ด้วย เบนตันรีเอเจนต์โดยสภาวะที่ทำการศึกษา เช่น ระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยา พีเอช อัตราส่วนของโมลาร์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อโมลาร์ เฟอร์รัส ประเภทของพอลิเมอร์ อุณหภูมิ ผลการทดลองพบว่า เบนตันรีเอเจนต์ สามารถย่อยสลายน้ำชะขยะที่เป็นสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเบนตันรีเอเจนต์ สามารถเกิดขึ้นได้เร็วมากและจะเสร็จสมบูรณ์ในเวลา 30 นาที สภาวะพีเอชที่เหมาะสมคือ 2.5 อัตราส่วนของโมลาร์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อโมลาร์ เฟอร์รัสเท่ากับ 1.5 นอกจากนี้การเติมทั้ง ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสยังช่วยให้เกิดประสิทธิภาพในการกำจัดมากกว่าการเติม ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวประสิทธิภาพของการตกตะกอนของสลัดจ์จะเพิ่มขึ้นถ้ามีการเติม โพลีเมอร์และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะช่วยให้ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นด้วย

Hamidi และ คณะ (2007) ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการ Coagulation-Flocculation ในการกำจัดสีของน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบในมาเลเซีย ใช้เฟอร์รัสซัลเฟต, เพอริกซัลเฟต, เพอริกคลอไรด์และสารส้ม เป็นโคแอกกูแลนต์ทำการทดลองโดยการใช่วิธีจาร์เทสต์ ผลการทดลองพบว่าใช้เพอริกคลอไรด์ปริมาณ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเท่ากับ 4 มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ในการกำจัดสีของน้ำชะขยะได้ร้อยละ 94

Tonni และ Wai (2009) ศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดสารประกอบที่ทนความร้อนในน้ำชะขยะโดยทดลองกับ หลุมฝังกลบขยะแห่งหนึ่ง ในประเทศฮ่องกงด้วยการใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และถ่านกัมมันต์แบบเม็ด ผลการทดลองพบว่า การใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับถ่านกัมมันต์แบบเม็ดจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบที่ทนความร้อนได้ (กำจัดซีไอดีได้ร้อยละ 82 และกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้ร้อยละ 59) มากกว่าการใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว (กำจัดซีไอดีได้ ร้อยละ 33 และกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้ร้อยละ 4.9) และการใช้ถ่านกัมมันต์แต่เพียงอย่างเดียว (กำจัดซีไอดีได้ร้อยละ 58) นอกจากนี้การเติมเฟอร์รัสปริมาณ 1.8 g/L จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 82 เป็นร้อยละ 89

Yanyu และ คณะ (2010) ศึกษาเปรียบเทียบเกี่ยวกับการกำจัดสารประกอบฮิวมิก และซีไอดีออกจากน้ำชะขยะที่มีความเข้มข้นสูงและไม่ย่อยสลายทางชีวภาพด้วยการใช้เฟนต์รีเอเจนต์และกระบวนการรวมตะกอนทางเคมี ผลการทดลองพบว่า สารประกอบฮิวมิก สามารถถูกกำจัดออกจากน้ำชะขยะที่มีความเข้มข้นสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วย เฟนต์รีเอเจนต์ ส่วนซีไอดีสามารถถูกกำจัดออกจากน้ำชะขยะที่มีความเข้มข้นสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางเคมีอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลดีต่อกระบวนการออกซิเดชันที่มีปริมาณ เฟอร์รัสไม่สูงมากนักและจะมีผลน้อยลงเมื่อเฟอร์รัสมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น

Zong และ คณะ (2002) ศึกษาการบำบัดน้ำชะขยะโดยกระบวนการ Coagulation-Photooxidation มีการเปรียบเทียบปริมาณโคแอกกูแลนต์และพีเอชต่างๆ และการเติมโซเดียมออกซาลेट ปริมาณต่างๆ กัน หลังจากการรวมตะกอนทางเคมีด้วยเฟอริกคลอไรด์ผลการทดลองพบว่า พีเอชเท่ากับ 3-8 พีเอชที่ต่ำที่สุดมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง การเติมเฟอริกคลอไรด์ 0.000 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดซีไอดีได้ร้อยละ 24 การฉายแสงอย่างเดียวเป็นเวลา 4 ชั่วโมง สามารถกำจัดซีไอดีได้ร้อยละ 31 และการฉายแสง 4 ชั่วโมง พีเอชเท่ากับ 3 ร่วมกับการเติมเฟอริกคลอไรด์ 0.000 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดซีไอดีได้ร้อยละ 64

สรุปการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยแยกเป็น 3 งาน คือ (ตารางที่ 2-6)

- กระบวนการรวมตะกอนทางเคมี
- กระบวนการดูดติดผิว
- กระบวนการออกซิเดชัน

ตารางที่ 2-6 สรุปการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สรุปผลการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
กระบวนการรวมตะกอนทางเคมี - ปภาวดี ไชคสุวรรณกิจ (2550) - สวีณา เกตุสุวรรณ (2543) - Amuda และ Amoo (2007) - Hamidi และ คณะ (2007) - Zong และ คณะ (2002)	1. สารโคแอกกูแลนต์ที่เลือกใช้คือ เฟอริกคลอไรด์ พีเอชที่เหมาะสมในกระบวนการรวมตะกอน คือ 3-4 และปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม คือ 300-800 มิลลิกรัมต่อลิตร 2. ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีอยู่ระหว่างร้อยละ 70-90 3. เพื่อประสิทธิภาพที่สูงขึ้นควรใช้กระบวนการรวมตะกอนทางเคมีร่วมกับกระบวนการอื่นๆด้วย เช่น กระบวนการดูดติดผิว กระบวนการออกซิเดชัน กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา กระบวนการโฟโตออกซิเดชัน เป็นต้น
กระบวนการดูดติดผิว - จักริน นักรั (2549) - ปธานิน แสงอรุณ 2551) - สิรินันท์ กันศิริ (2550) - Ahn และ คณะ 2002) - Azhar และ คณะ 2010) - Tonni และ Wai 2009)	1. การกำจัดความสกปรกในรูปค่าซีโอดีโดยกระบวนการดูดติดผิวจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่ากระบวนการรวมตะกอนทางเคมี 2. ไอโซเทอมการดูดติดผิวของซีโอไลต์ทำนายได้ด้วยไอโซเทอมแบบแลงมัวร์

ตารางที่ 2-6 สรุปการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

สรุปผลการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
<p>กระบวนการออกซิเดชัน</p> <ul style="list-style-type: none"> - จรรยา อินทมณี และ คณะ (2552) - ปภาวดี โชคสุวรรณกิจ (2550) - Daphne และ คณะ (2009) - Tonni และ Wai (2009) - Yanyu และ คณะ (2010) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ 2. ประสิทธิภาพการกำจัดสารประกอบอินทรีย์จะน้อยลงเมื่อปริมาณเฟอร์รัสเพิ่มขึ้น 3. การกำจัดสารประกอบอินทรีย์และความสกปรกในค่าภาพซีไอออกจากน้ำชะขยะที่มีความเข้มข้นสูงและไม่ย่อยสลายทางชีวภาพจะให้ประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้กระบวนการรวมตะกอนทางเคมีร่วมกับกระบวนการออกซิเดชัน

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดพบว่า งานวิจัยทั้งหมดนี้ล้วนแต่เป็นน้ำชะขยะที่มาจากหลุมฝังกลบมูลฝอยชุมชน ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยนี้ซึ่งเป็นน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบของเสียอันตราย โดยความสกปรกต่าง ๆ นั้น จะย่อยสลายยากกว่าน้ำชะขยะที่มาจากหลุมฝังกลบมูลฝอยชุมชนเป็นอย่างมาก

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

3.1 สถานที่ดำเนินการศึกษาวิจัย

การทดลองวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงการทดลอง (Experimental research) ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) โดยทำการศึกษา ณ หน่วยวิจัยการจัดการของเสียอุตสาหกรรม ห้องปฏิบัติการมูลฝอย (Solid waste laboratory) ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์

1. ตู้อบความร้อน ยี่ห้อ Binder ของ Scientific Promotion
2. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง รุ่น AB204-S ของ Mettler Toledo
3. เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง รุ่น Model BJ 1000C ของ Precisa
4. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง รุ่น SevenEasy ของ Mettler Toledo
5. เครื่องทดสอบการตกตะกอน (Jar test) รุ่น FC 6S ของ VELP scientific
6. เครื่องหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง รุ่น Sigma Laboratory Centrifuges 4-15 ของ Scientific Promotion
7. เครื่องวัดการดูดกลืนแสง รุ่น JO 6749 ของ HACH
8. เครื่องกวนโดยอาศัยแม่เหล็ก (Stirrer)
9. ชุดกรองสูญญากาศ
10. โถดูดความชื้น (Dessicator)
11. เครื่องแก้วอื่นๆ ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

3.2.2 สารเคมี

1. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
2. กรดซัลฟูริก 98% (H_2SO_4)
3. กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
4. กรดไนตริก (HNO_3)
5. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% (H_2O_2)
6. เฟอริกคลอไรด์ ($FeCl_3$)
7. ซีโอไลต์
8. เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$)

3.3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน

- 1) ศึกษาลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำชะขยะ ได้แก่ pH, COD, BOD, TDS, TSS, Heavy Metal, สี เป็นต้น
- 2) ศึกษาความสามารถในการลดค่าซีโอดีของเฟอริกคลอไรด์ โดยทำการทดลองเพื่อหาพีเอชของน้ำชะขยะที่เหมาะสมในการทดลองและหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของเฟอริกคลอไรด์ โดยใช้วิธีจาร์เทสต์
- 3) ศึกษาความสามารถในการลดค่าซีโอดีของซีโอไลต์ โดยใช้วิธีการกรองแบบไม่ต่อเนื่อง
- 4) ศึกษาความสามารถของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการลดสีของน้ำชะขยะ โดยนำน้ำชะขยะที่ผ่านการลดซีโอดีในขั้นตอนสองและขั้นตอนสามแล้วมาทำการปรับพีเอชตามการทดลองขั้นสอง และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นำไปกวนและทิ้งให้รวมตะกอนนำส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าพีเอช ซีโอดี และค่าความเข้มสี พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองดังตารางที่ 3-1
- 5) ศึกษาผลของเหล็กในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำชะขยะ โดยนำน้ำชะขยะที่ผ่านการลดซีโอดีในขั้นตอนสองและขั้นตอนสามแล้วมาทำการปรับพีเอชตามการทดลองขั้นสอง เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเฟอรัสซัลเฟต นำไปกวนและทิ้งให้รวมตะกอนนำส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าพีเอช ซีโอดี และค่าความเข้มสี พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง ดัง

ตารางที่ 3-1

6) สรุปวิธีการที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการลดซีไอดีและสีในน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบ
กากของเสียอันตราย

ตารางที่ 3-1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	pH meter
2. ซีไอดี (COD)	closed reflux, titrimetric method
3. สี (color) วัดเป็นค่า (%) ทรานสมิตแตนซ์	Spectrophotometric method
4. บีไอดี (BOD)	Dilution method
5. ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)	Gravimetric, 103-105° C
6. ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS)	Gravimetric, 103-105° C
7. โลหะหนัก (Heavy Metal) Al, Pb, Cr, Cd, Fe, Mn, Cu, Ni, Zn, Si, Ba	Inductive Coupled Plasma Spectrophotometer
8. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	
8.1 ความเข้มข้น H ₂ O ₂	Permanganate titration
8.2 H ₂ O ₂ คงค้าง	Iodometric titration

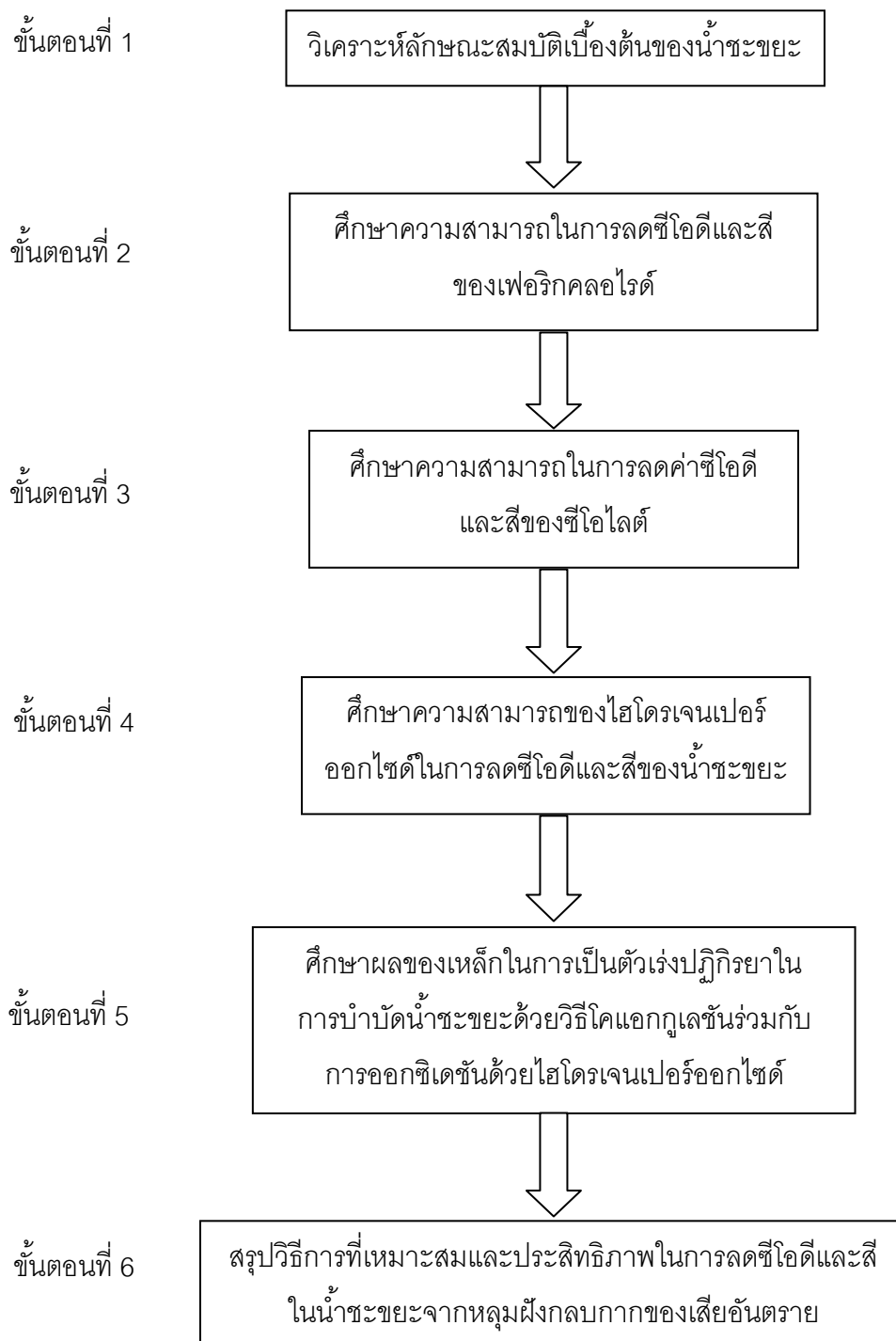
โดยน้ำชะขยะที่ใช้ทดลองได้นำ มาจากหลุมฝังกลบของเสียอันตรายของ บริษัท บริหารและ
พัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (GENCO) สถานที่เก็บน้ำตัวอย่างดังภาพที่ 3-1 และ 3-2
ส่วนขั้นตอนการวิจัยรวมทั้งหมดของการศึกษานี้ดังภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-1 กองกากของเสียอุตสาหกรรม



ภาพที่ 3-2 ท่อน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบของเสียอันตราย



ภาพที่ 3-3 ขั้นตอนการวิจัย

3.3.1 ศึกษาลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำชะขยะ

- ทำการศึกษาสมบัติของน้ำชะขยะ ดังนี้ (ตารางที่ 3-2)

ตารางที่ 3-2 การศึกษาสมบัติของน้ำชะขยะ

<p>สถานที่เก็บตัวอย่างน้ำชะขยะ</p>	<p>หลุมฝังกลบของเสียอันตราย ของ บริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (GENCO) นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด</p>
<p>จำนวนครั้งที่เก็บตัวอย่าง</p>	<p>2 ครั้ง 1) เก็บน้ำชะขยะในช่วงเดือนพฤศจิกายน 2552 2) เก็บน้ำชะขยะในช่วงเดือนมิถุนายน 2553</p>
<p>วิธีการเก็บรักษาตัวอย่างน้ำชะขยะ</p>	<p>1) ส่วนที่จะทำการทดลองต่างๆ เก็บไว้ ณ อุณหภูมิห้อง 2) ส่วนที่จะวิเคราะห์โลหะหนักได้มีการปรับพีเอช ด้วยกรดไนตริก โดยควบคุมพีเอช < 2 และแช่ไว้ในช่องแช่แข็งเพื่อรอการส่งวิเคราะห์</p>
<p>ลักษณะสมบัติเบื้องต้นที่วิเคราะห์</p>	<p>ค่าความเป็นกรด -ด่าง ซีไอดี บีไอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอย ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ปริมาณโลหะหนัก (Total Pb, Total Cd, Total Cr, Total Mn, Total Fe, Total Cu, Total Ni, Total Zn, Total Se, Total Ba)</p>

3.3.2 ศึกษาความสามารถในการลดซีไอดีของเฟอริกคลอไรด์

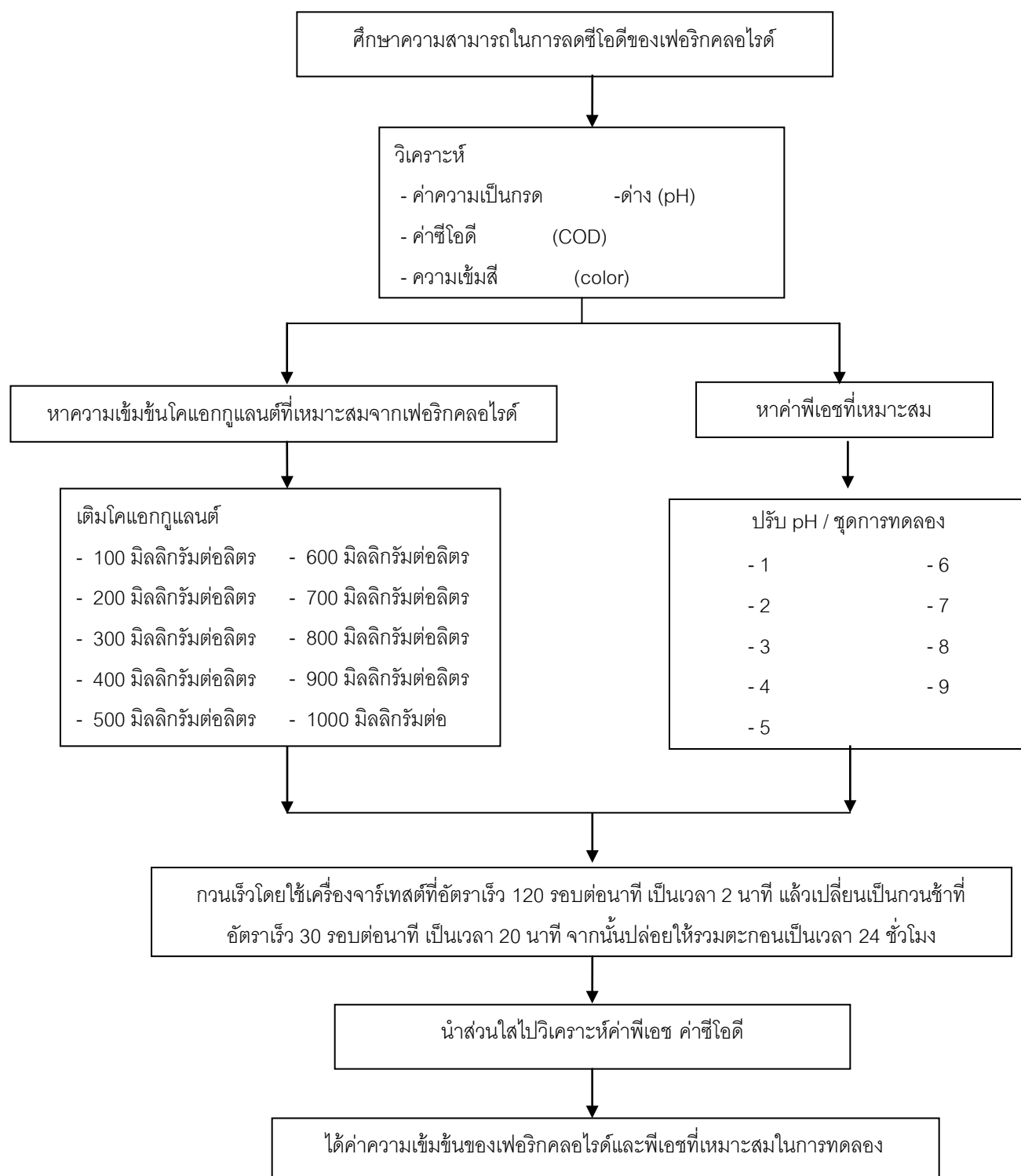
ขั้นตอนการทดลองมีรายละเอียดดังนี้ (ภาพที่ 3-4)

3.3.2.1 การหาความเข้มข้นโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมจากเฟอริกคลอไรด์

- 1) เติมน้ำตัวอย่าง 500 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร และเติมโคแอกกูแลนต์ในความเข้มข้น 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นทำการกวนเร็วโดยใช้เครื่องจาร์เทสต์ที่อัตราเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที แล้วเปลี่ยนเป็นกวนช้าที่อัตราเร็ว 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นปล่อยให้รวมตะกอนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 2) สังเกตจนเห็นปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น นำส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าพีเอช ค่าซีไอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด

3.3.2.2 การหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

- 1) เติมน้ำตัวอย่าง 500 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร และทำการปรับพีเอชน้ำชะขยะให้อยู่ในช่วง 1-9 ด้วย HCl หรือ NaOH
- 2) เติมเฟอริกคลอไรด์ตามความเข้มข้นที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.2.1
- 3) ทำการกวนเร็วที่อัตราเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที แล้วเปลี่ยนเป็นกวนช้าที่อัตราเร็ว 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นปล่อยให้รวมตะกอนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 4) สังเกตจนเห็นปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น นำส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าพีเอช ค่าซีไอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด เพื่อนำไปใช้ในการเลือก ปริมาณโคแอกกูแลนต์ในการทดลองขั้นต่อไป



ภาพที่ 3-4 แผนการวิจัยหาปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมในการทดลอง

3.3.3 ศึกษาความสามารถในการลดซีไอดีของซีไอไลต์

ขั้นตอนการทดลองมีรายละเอียดดังนี้ (ภาพที่ 3-5)

3.3.3.1 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซีไอไลต์

- 1) นำน้ำชะขยะที่ผ่านการบำบัดด้วยการรวมตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์ (3.3.2) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ขวดภาพชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร (ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง)
- 2) เติมซีไอไลต์ที่เตรียมไว้ลงในน้ำหนักที่แน่นอนปริมาณ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11 และ 13 กรัม ลงในขวดแต่ละใบตามลำดับ
- 3) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่มีความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 4) แยกซีไอไลต์ออกโดยการกรองด้วยกระดาษกรอง WHATMAN เบอร์ 42
- 5) นำส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าพีเอช ค่าซีไอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และ ความเข้มข้น

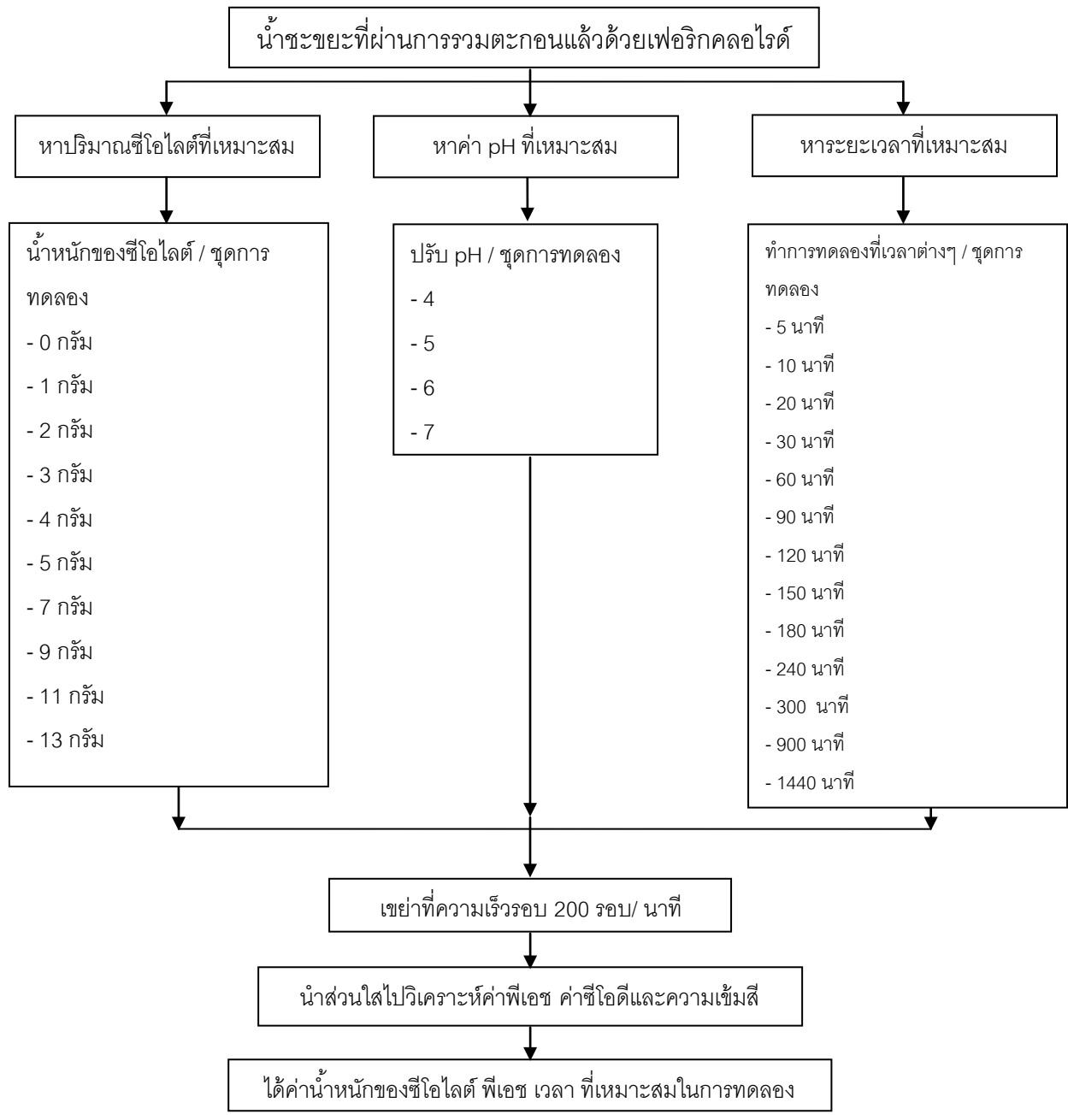
3.3.3.2 ศึกษาผลของ pH

- 1) นำน้ำชะขยะที่ผ่านการบำบัดด้วยการรวมตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์ (3.3.2) มาปรับพีเอช 4, 5, 6 และ 7 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ขวดภาพชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร (ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง)
- 2) เติมซีไอไลต์ปริมาณที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.3.1 ลงในขวดแต่ละใบ
- 3) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่มีความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 4) แยกซีไอไลต์ออกโดยการกรองด้วยกระดาษกรอง WHATMAN เบอร์ 42
- 5) นำส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าพีเอช ค่าซีไอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และ ความเข้มข้น

3.3.3.3 ศึกษาผลของเวลา

- 1) น้ำชะขยะที่ผ่านการบำบัดด้วยการรวมตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์ (3.3.2) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ขวดภาพชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร (ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง)
- 2) ปรับพีเอชที่เหมาะสม (จากข้อ 3.3.3.2) และ เติมซีไอไลต์ ปริมาณที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.3.1 ลงในขวดแต่ละใบ
- 3) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่มีความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที เป็นเวลา 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 300, 900 และ 1440 นาที ตามลำดับ
- 4) แยกซีไอไลต์ออกโดยการกรองด้วยกระดาษกรอง WHATMAN เบอร์ 42

5) นำส่วนใส่ไปวิเคราะห์ค่าพีเอช ค่าซีไอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และ ความเข้มข้น

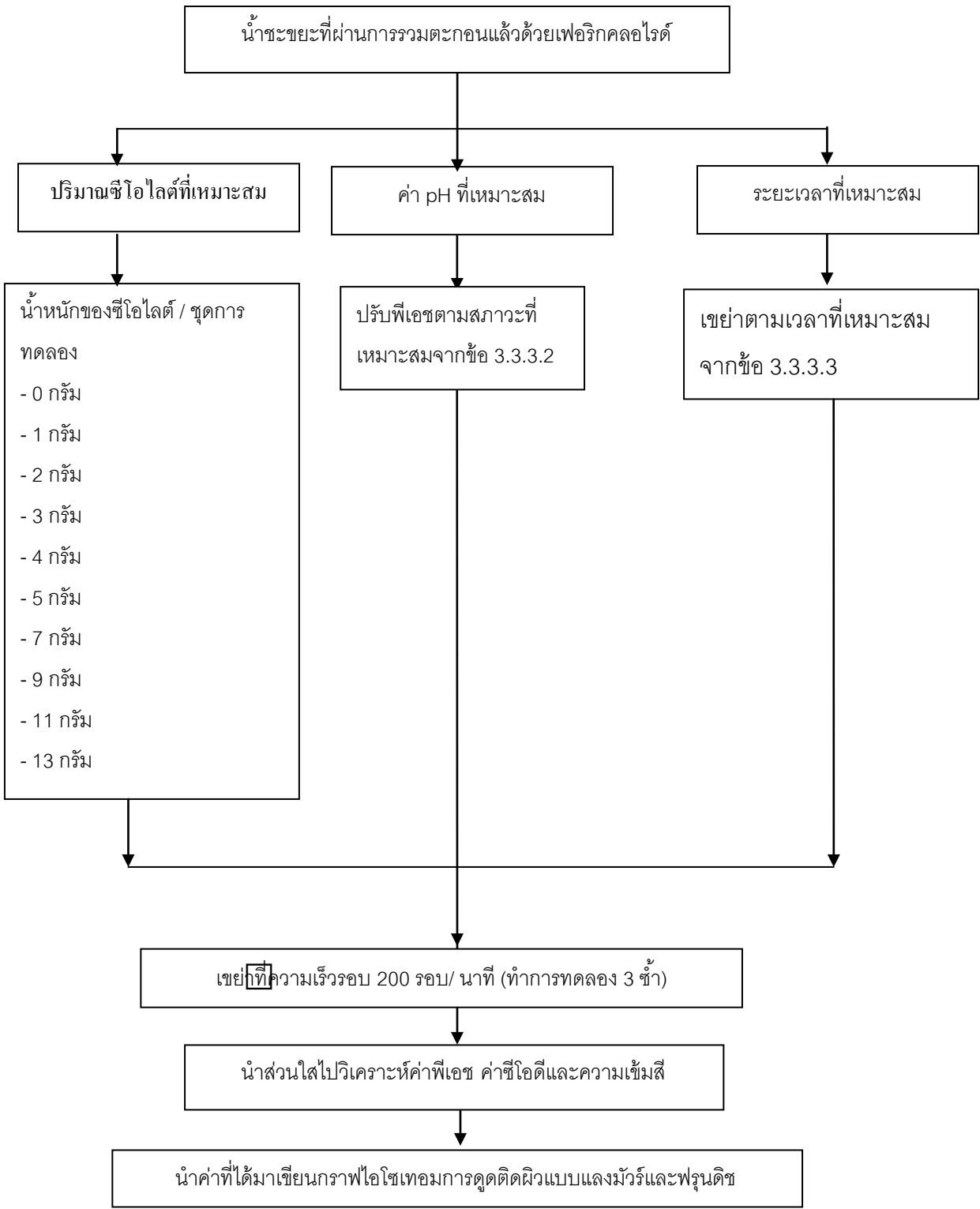


ภาพที่ 3-5 แผนการวิจัยหาสภาวะที่เหมาะสมของซีไอไลต์ (แบบไม่ต่อเนื่อง)

3.3.4 ทำการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดของซีโอไลต์

ขั้นตอนการทดลองมีรายละเอียดดังนี้ (ภาพที่ 3-6)

- 1) นำน้ำชะขยะที่ผ่านการรวมตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์ (การทดลอง 3.3.3) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ขวดภาพชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร (ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง)
- 2) เติมซีโอไลต์ที่เตรียมไว้ ในช่องน้ำหนักที่แน่นอนปริมาณ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11 และ 13 กรัม ลงในขวดแต่ละใบตามลำดับ
- 3) ปรับพีเอชตามสภาวะที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.3.2
- 4) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่มีความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.3.3
- 5) แยกซีโอไลต์ออกโดยการกรองด้วยกระดาษกรอง WHATMAN เบอร์ 42
- 6) นำส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าพีเอช ค่าซีโอดี และความเข้มข้น
- 7) นำค่าที่ได้มาเขียนกราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์และฟรุนดลิช



ภาพที่ 3-6 แผนการวิจัยหาไอโซเทอมการดูดซับ

3.3.5 ศึกษาความสามารถของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการลดสีของน้ำชะขยะ ขั้นตอนการทดลองมีรายละเอียดดังนี้ (ภาพที่ 3-7)

3.3.5.1 วิเคราะห์หาความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนทำการทดลองด้วยวิธี permanganate titration

ในขั้นตอนการทดลองนี้จะนำน้ำชะขยะที่ผ่านการบำบัดด้วยการรวมตะกอนทางเคมีด้วย เฟอริกคลอไรด์ และการดูดซับด้วยซีโอไลต์แล้ว มาทำการบำบัดต่อดังนี้

3.3.5.2 การหาปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เบื้องต้น

1) นำน้ำชะขยะที่ผ่านการบำบัดด้วยการรวมตะกอนทางเคมีด้วยเฟอริกคลอไรด์และการดูดซับด้วยซีโอไลต์แล้ว 50 มิลลิลิตร มาทำการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วง 10 – 200 กรัมต่อลิตร

2) ทำการเดินเครื่องกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทิ้งให้รวมตะกอน 24 ชั่วโมง

3) นำส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าพีเอช ค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ความเข้มข้น และวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงค้างด้วยวิธี iodometric titration รวมทั้งสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเพื่อใช้เลือกพีเอชในขั้นต่อไป

3.3.5.3 การหาค่าพีเอช (pH) ที่เหมาะสม

1) นำน้ำชะขยะที่ผ่านการบำบัดด้วยการรวมตะกอนทางเคมีด้วยเฟอริกคลอไรด์และการดูดซับด้วยซีโอไลต์แล้ว 50 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้อยู่ในช่วง 3-12 ด้วย H_2SO_4 หรือ $NaOH$ จากนั้นเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมจาก ข้อ 3.3.5.2

2) ทำการเดินเครื่องกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทิ้งให้รวมตะกอน 24 ชั่วโมง

3) จากนั้นนำส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าพีเอช ค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ความเข้มข้น และวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงค้างด้วยวิธี iodometric titration

3.3.5.4 การหาปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม

1) นำน้ำชะขยะที่ผ่านการบำบัดด้วยการรวมตะกอนทางเคมีด้วยเฟอริกคลอไรด์และการดูดซับด้วยซีโอไลต์แล้ว 50 มิลลิลิตร ทำการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในช่วงความเข้มข้นที่ใกล้เคียงกับความเข้มข้นที่หาได้จากข้อ 3.3.5.2

2) ปรับพีเอชที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.5.3

3) ทำการเดินเครื่องกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทิ้งให้รวมตะกอน 24 ชั่วโมง

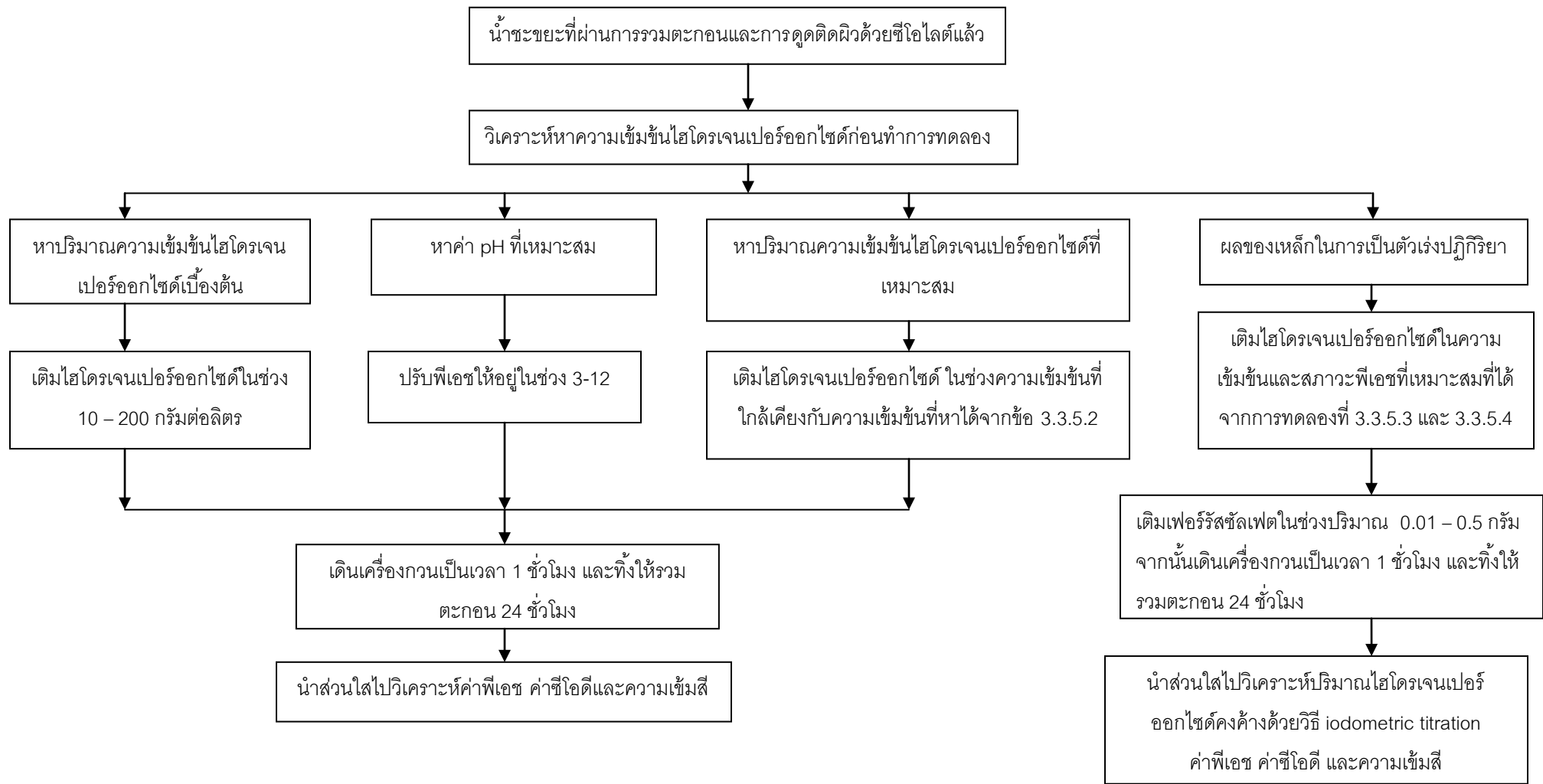
4) นำส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าพีเอช ค่าซีไอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ความเข้มข้น และวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คั่งค้างด้วยวิธี iodometric titration

3.3.5.5 ศึกษาผลของเหล็กในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดน้ำชะขยะด้วยวิธีโคแอกกูเลชันร่วมกับการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

1) นำน้ำชะขยะที่ผ่านการรวมตะกอนทางเคมีด้วยเฟอริกคลอไรด์และการดูดซับด้วยซีโอไลต์แล้วมาเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในความเข้มข้นและสภาวะ พีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 3.3.5.3 และ 3.3.5.4 ตามลำดับ

2) เติมเฟอร์รัสซัลเฟตในช่วงปริมาณ 0.01 – 0.5 กรัม ทำการเดินเครื่องกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทิ้งให้รวมตะกอน 24 ชั่วโมง เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลง

3) จากนั้นนำส่วนใสไปวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คั่งค้างค่าพีเอช ค่าซีไอดี และความเข้มข้น



ภาพที่ 3.7 แผนการวิจัยหาความสามารถของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการลดสีของน้ำชะขยะ

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

จากแผนการทดลองและวิธีการดำเนินการวิจัยที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 3 ผู้วิจัยได้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการและได้สรุปผลการทดลอง แยกเป็นแต่ละการทดลองตามลำดับ ดังนี้

4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำชะขยะ

ตัวอย่างน้ำชะขยะที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้เป็นน้ำชะขยะ จริงจากหลุมฝังกลบของเสียอันตราย ของ บริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (GENCO) จากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของน้ำชะขยะที่ได้จากหลุมฝังกลบของเสียอันตราย สรุปได้ว่า น้ำชะขยะมีค่าพีเอช อยู่ระหว่าง 8.5-8.8 และเมื่อวิเคราะห์หาค่า ซีไอดี โดยวิธี Closed Reflux ผลคือ น้ำชะขยะมีค่าซีไอดีอยู่ระหว่าง 46,000-48,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่การวัดค่าความเข้มข้นน้ำชะขยะ โดยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร มีค่าการดูดกลืนแสง อยู่ระหว่าง 1.123 - 1.132 จากผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี ทำให้ทราบว่าน้ำชะขยะมีค่าความเข้มข้นและค่าซีไอดีสูงมาก เนื่องจากในน้ำชะขยะมีส่วนใหญ่เป็นสาร Humic substance ซึ่งเป็นสารอินทรีย์มีสีน้ำตาลเข้มเกือบดำ (ภาพที่ 4-1) อันเป็นสาเหตุสำคัญในการทำให้น้ำชะขยะมีค่าความเข้มข้น และมีค่าซีไอดีสูง โดยสารเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นสารคอลลอยด์ที่กระจายตัวอยู่ในน้ำชะขยะ ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำชะขยะ ดังตารางที่ 4-1 โดยค่าที่วิเคราะห์ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการไปเก็บน้ำตัวอย่างจำนวนสองครั้ง

ตารางที่ 4-1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำชะขยะ

พารามิเตอร์	ครั้งที่ 1 (วันที่ 19 มิถุนายน 2553)	ครั้งที่ 2 (วันที่ 5 พฤษภาคม 2554)	ค่าเฉลี่ยที่ได้
1. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	8.85	8.87	8.86
2. ซีโอดี (COD)	43,498 mg/l	43,478 mg/l	43,488 mg/l
3. บีโอดี (BOD)	28,763 mg/l	23,421 mg/l	26,092 mg/l
4. ปริมาณของแข็งแขวนลอย (TSS)	97 mg/l	99 mg/l	98 mg/l
5. ปริมาณของแข็งละลายน้ำ ทั้งหมด (TDS)	36,748 mg/l	34,156 mg/l	35,452 mg/l
6. ค่าการดูดกลืนแสง	1.132	1.123	1.127
7. ปริมาณโลหะหนัก			
Total Al	-	6,278 mg/l	-
Total Pb	-	< 20 mg/l	-
Total Cd	-	0.5123 mg/l	-
Total Cr	-	< 5 mg/l	-
Total Fe	-	69.6045 mg/l	-
Total Mn	-	< 10 mg/l	-
Total Cu	-	1.4578 mg/l	-
Total Ni	-	360.14 mg/l	-
Total Zn	-	12.7235 mg/l	-
Total Si	-	61,125 mg/l	-
Total Ba	-	13.508 mg/l	-



ภาพที่ 4-1 ลักษณะน้ำสะอาดเปรียบเทียบกับน้ำประปา

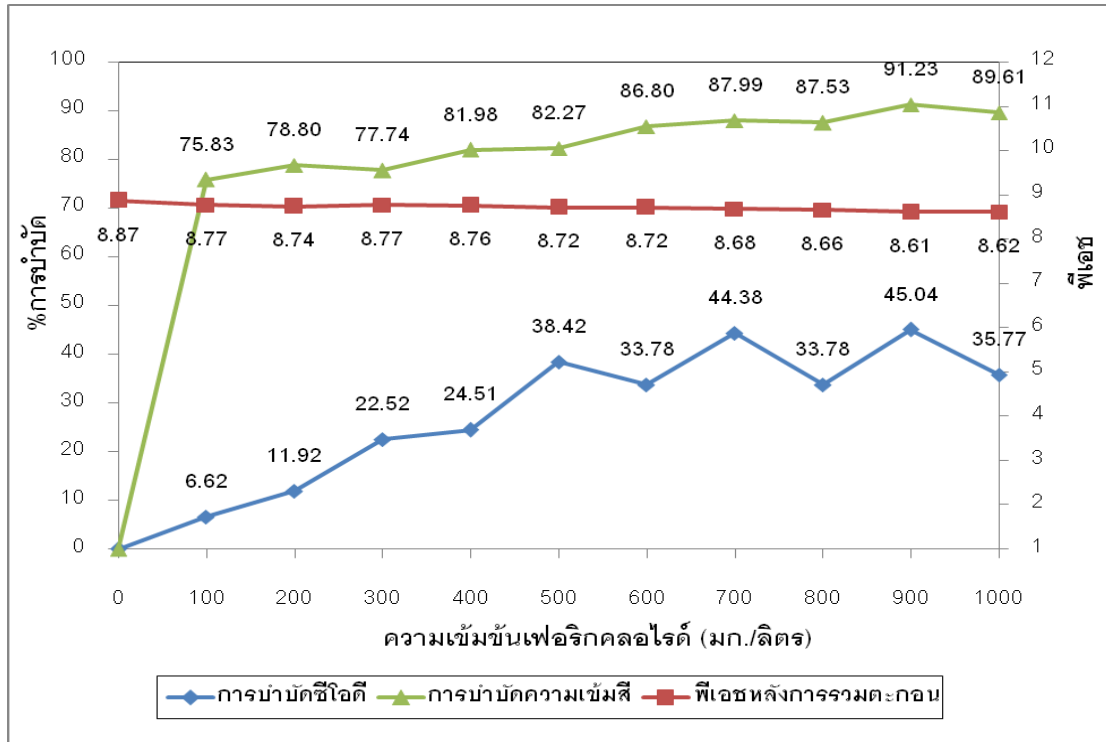
4.2 ผลการรวมตะกอนโดยการทำอาร์เทสต์ โดยใช้เฟอริกคลอไรด์ เป็นสารสร้างตะกอน

4.2.1 ผลการหาความเข้มข้นเฟอริกคลอไรด์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการรวมตะกอนน้ำชะขยะ

ในขั้นตอนนี้ได้นำน้ำชะขยะมาทำการเติมเฟอริกคลอไรด์ในช่วงความเข้มข้น 100 – 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อหาความเข้มข้นของเฟอริกคลอไรด์ที่เหมาะสมที่สุด โดยผลการทดลองที่ได้ดังตารางที่ 4-2 และภาพที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดีและความเข้มข้นโดยใช้เฟอริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นเฟอริกคลอไรด์ (มก/ล.)	pH เริ่มต้น	pH หลังรวมตะกอน	ค่า COD น้ำชะขยะ ก่อนรวมตะกอน (มก/ล.)	ค่า COD น้ำชะขยะ หลังรวมตะกอน (มก/ล.)	ร้อยละการบำบัดค่าซีไอดี (%)	ค่าการดูดกลืนแสง ก่อนการบำบัด	ค่าการดูดกลืนแสง หลังการบำบัด	ร้อยละการบำบัดสี (%)
0	8.86	8.86	43,478	43,478	0	1.123	1.123	0
100	8.86	8.77	43,478	40,598	6.62	1.123	0.271	75.83
200	8.86	8.74	43,478	38,294	11.92	1.123	0.238	78.80
300	8.86	8.77	43,478	33,686	22.52	1.123	0.250	77.74
400	8.86	8.76	43,478	32822	24.51	1.123	0.202	81.98
500	8.86	8.72	43,478	26,774	38.42	1.123	0.199	82.27
600	8.86	8.72	43,478	28,790	33.78	1.123	0.148	86.80
700	8.86	8.68	43,478	24,182	44.38	1.123	0.135	87.99
800	8.86	8.66	43,478	28,790	33.78	1.123	0.140	87.53
900	8.86	8.61	43,478	23,894	45.04	1.123	0.098	91.23
1000	8.86	8.62	43,478	27,926	35.77	1.123	0.117	89.61



ภาพที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเฟอริกคลอไรด์กับร้อยละการบำบัดค่าซีไอดีและความเข้มสีและค่าฟิโชนหลังรวมตะกอน

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4-2 และภาพที่ 4-2 พบว่า ความเข้มข้นเฟอริกคลอไรด์ 900 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการลดค่าซีไอดีและสี โดยคิดเป็นร้อยละ 45.04 สำหรับค่าซีไอดี และร้อยละ 91.23 สำหรับสี แต่เมื่อมาพิจารณาที่ความเข้มข้น เฟอริกคลอไรด์ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีและสีใกล้เคียงกับความเข้มข้นเฟอริกคลอไรด์ 900 มิลลิกรัมต่อลิตร คือ สามารถกำจัดค่าซีไอดีและสีได้ร้อยละ 44.38 และ 87.99 ตามลำดับ และเมื่อมาพิจารณาจากค่าใช้จ่ายเรื่องสารเคมีจะพบว่า เฟอริกคลอไรด์ความเข้มข้น 700 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่า ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงเลือกใช้สภาวะความเข้มข้นของเฟอริกคลอไรด์ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Hamidi และ คณะ (2007) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการ Coagulation-Flocculation ในการกำจัดสีของน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบในมาเลเซีย ใช้เฟอร์ริสซัลเฟต, เฟอริกซัลเฟต, เฟอริกคลอไรด์และสารส้ม เป็นโคแอกกูแลนต์ทำการทดลองโดยใช้วิธีจาร์เทสต์ ผลการทดลองพบว่าใช้เฟอริกคลอไรด์ปริมาณ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ฟิโชนเท่ากับ 4 มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการกำจัดสีของน้ำชะขยะได้ร้อยละ 94

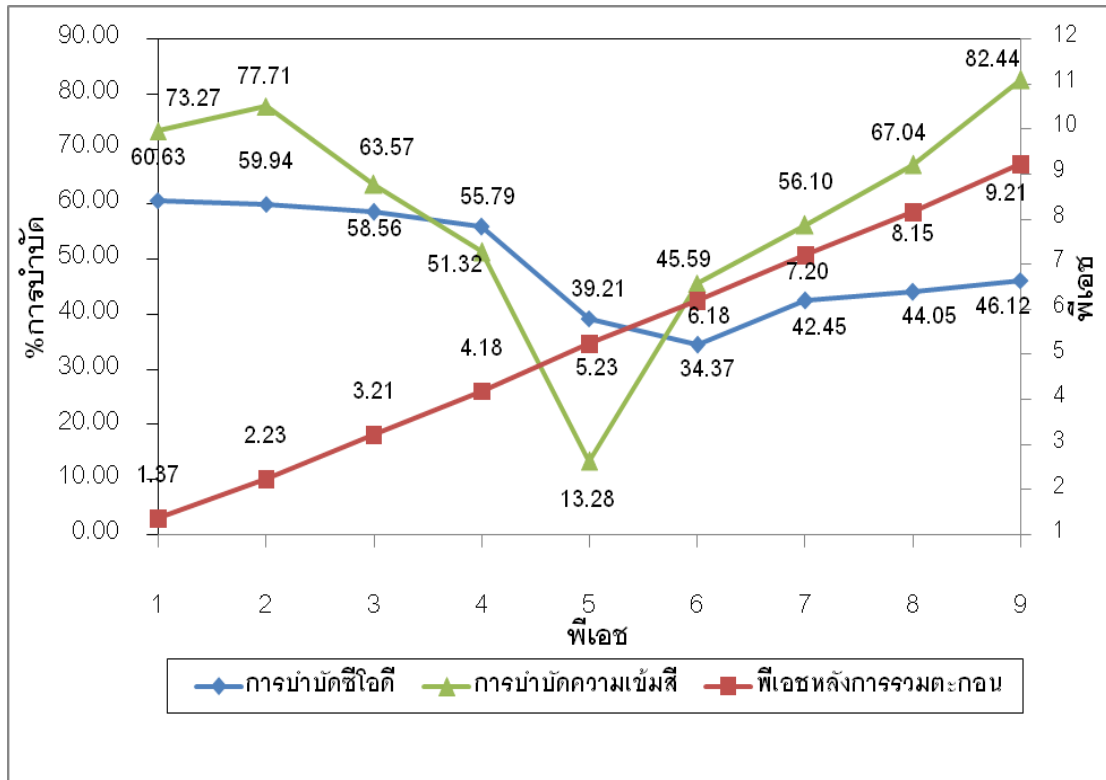
จากผลการทดลอง กลไกที่เกิดขึ้นเมื่อเติมเฟอริกคลอไรด์ลงไป คือ เกิดการรวมตะกอนขึ้น เนื่องจากเฟอริกคลอไรด์ไปทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์โดยการจับอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในตะกอนสารประกอบที่สร้างขึ้น ซึ่งอนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนในของตะกอนดังกล่าวนี้ ซึ่งถือได้ว่าเป็นการเพิ่มขนาดหรือน้ำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้อนุภาคคอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและเกิดการรวมตะกอนได้ โดยกลไกดังกล่าวเรียกว่า Sweep coagulation

4.2.2 ผลการหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการปรับค่าพีเอชของน้ำชะขยะ พีเอชเริ่มต้นของน้ำชะขยะเท่ากับ 8.86 ปรับพีเอชด้วย HCl 1 N และ NaOH 1 N โดยปรับค่าพีเอชให้มีค่าอยู่ในช่วง 1.00 – 9.00 ผลการทดลองที่ได้เป็นดังตารางที่ 4-3 และภาพที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ผลการหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการรวมตะกอนน้ำชะขยะ

pH เริ่มต้น	pH หลังรวมตะกอน	ความเข้มข้นเฟอริกคลอไรด์ (มก./ล.)	ค่า COD น้ำชะขยะ ก่อนการบำบัด (มก./ลิตร)	ค่า COD น้ำชะขยะ หลังการบำบัด (มก./ลิตร)	ร้อยละการบำบัดค่าซีไอดี (%)	ค่าการดูดกลืนแสงก่อนการบำบัด	ค่าการดูดกลืนแสงหลังการบำบัด	ร้อยละการบำบัด (%)
8.86	-	-	43,478	43,478	0	1.123	1.123	0
1	1.37	700	43,478	17,117	60.63	1.123	0.300	73.27
2	2.23	700	43,478	17,418	59.94	1.123	0.250	77.71
3	3.21	700	43,478	18,019	58.56	1.123	0.409	63.57
4	4.18	700	43,478	19,220	55.79	1.123	0.546	51.32
5	5.23	700	43,478	26,432	39.21	1.123	0.974	13.28
6	6.18	700	43,478	28,535	34.37	1.123	0.611	45.59
7	7.2	700	43,478	25,023	42.45	1.123	0.493	56.10
8	8.15	700	43,478	24,324	44.05	1.123	0.370	67.04
9	9.21	700	43,478	23,427	46.12	1.123	0.197	82.44



ภาพที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและพีเอชหลังการรวมตะกอนกับร้อยละการบำบัดซีโอดีและความเข้มข้น

จากผลการทดลอง พบว่า ค่าพีเอชยิ่งสูงขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของน้ำชะขยะจะต่ำลง โดยพีเอชที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด คือ พีเอช 1 โดยพีเอชดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีได้ร้อยละ 60.63 ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุดและที่พีเอชเท่ากับ 9 มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีสูงสุดคือ ร้อยละ 82.44 หากพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายเรื่องสารเคมีในการปรับพีเอชจะพบว่าการปรับพีเอชให้เท่ากับ 1 และ 9 นั้น จะต้องใช้ปริมาณกรดหรือเบสที่สูงมากซึ่งเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่าย ดังนั้นขั้นตอนนี้ต้องพิจารณาที่สภาวะพีเอชอื่นๆ จะพบว่าสภาวะพีเอชเท่ากับ 4 ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีและสีร้อยละ 55.79 และ 51.32 ตามลำดับ เป็นสภาวะที่มีประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีและสีค่อนข้างสูง และเมื่อพิจารณาถึงเรื่องสารเคมีที่ใช้ในการปรับพีเอชพบว่า ใช้ HCl 1 N เท่ากับ 130 มิลลิลิตร ต่อน้ำชะขยะ 500 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการปรับพีเอชที่น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรปรับพีเอชให้เป็น 1, 2 หรือ 3 และเมื่อพิจารณาการทำการทดลองในขั้นตอนการดูดติดผิวผนังได้ทำการศึกษาสภาวะพีเอชที่เหมาะสมด้วย โดยได้ทำการปรับพีเอชระหว่าง 4-7 ดังนั้นหากในการทดลองการดูดติดผิวผนังสภาวะพีเอชที่เหมาะสมคือ 4 จะลดค่าใช้จ่ายในเรื่องสารเคมีลงได้อีก อีกทั้งที่สภาวะพีเอชเท่ากับ 4 นี้ใกล้เคียงกับ งานวิจัยของ Zong และคณะ (2002) โดยได้ศึกษาการบำบัดน้ำชะขยะโดยวิธี Coagulation-Photooxidation มีการ

เปรียบเทียบปริมาณโคแอกกูแลนต์และพีเอชต่างๆ และการเติม โซเดียมออกซาลेट ปริมาณต่างๆ กัน หลังจากการรวมตะกอนทางเคมีด้วยเพอริกคลอไรด์ ผลการทดลองพบว่า ที่พีเอชเท่ากับ 3-8 พีเอชที่ต่ำที่สุดมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง ที่พีเอชเท่ากับ 3 ร่วมกับการเติม เพอริกคลอไรด์ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัด ซีโอดีได้ร้อยละ 64 ดังนั้นจึงเลือกการปรับค่าพีเอชของน้ำชะขยะให้มีค่าเท่ากับ 4 เพื่อใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

จากผลการทดลองกลไกที่เกิดขึ้นเมื่อทำการปรับพีเอชให้เท่ากับ 4 คือ จะทำให้อนุภาคหรือสิ่งสกปรกต่างๆ ที่อยู่ในน้ำตกตะกอนลงมา เนื่องจากการปรับพีเอชให้เท่ากับ 4 เป็นการเติมประจุบวกเข้าไป ซึ่งอนุภาคหรือสิ่งสกปรกต่างๆ ที่อยู่ในน้ำนั้นเป็นประจุลบ จึงเกิดการจับกันกลายเป็นตะกอน และในการทดลองนี้ได้มีเติมเพอริกคลอไรด์ลงไปด้วย เพอริกคลอไรด์จึงไปทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ ทำให้อนุภาคคอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและเกิดการรวมตะกอนได้ดียิ่งขึ้น

4.3 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวของซีโอไลต์

ในการทดลองขั้นต่อไปจะเป็นการใช้ซีโอไลต์ในการกำจัดค่าซีโอดี และค่าความเข้มข้นของน้ำชะขยะหลังการรวมตะกอนแล้ว

4.3.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณซีโอไลต์

จากการทดลองนำน้ำชะขยะที่ผ่านการรวมตะกอนด้วยเพอริกคลอไรด์ปริมาตร 100 มิลลิตร เติมซีโอไลต์ปริมาณ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11 และ 13 กรัม ตามลำดับ จากนั้นนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที แล้วนำน้ำชะขยะมาวิเคราะห์ค่าซีโอดีและค่าความเข้มข้น

ผลการทดลองพบว่า ซีโอไลต์ปริมาณต่างๆ คือ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11 และ 13 กรัม ตามลำดับ สามารถกำจัดความสกปรกในรูปของค่าซีโอดีด้วยการดูดติดผิวมี ประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีเฉลี่ยร้อยละ 0, 8.00, 6.94, 7.73, 9.36, 10.50, 11.68, 16.81, 12.14 และ 8.20 ตามลำดับ และสามารถบำบัดสีได้เฉลี่ยร้อยละ 0, -10.60, 18.27, 54.28, 66.87, 63.53, 58.31, 75.36, 61.21, 65.90 ตามลำดับดังในตารางที่ 4-4 และภาพที่ 4-4

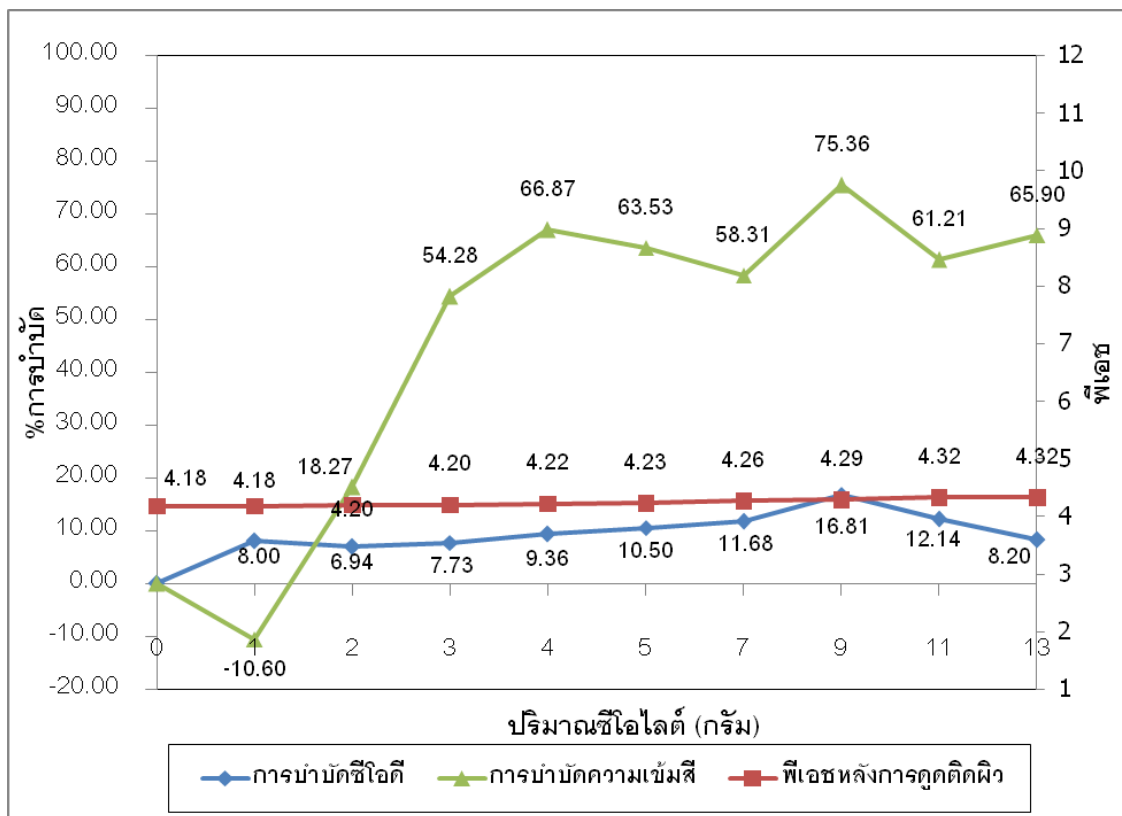
จากการทดลองชี้ให้เห็นว่า ซีโอไลต์ปริมาณมากมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีได้ดีกว่า ซีโอไลต์ปริมาณน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Azhar และ คณะ (2010) ซึ่งได้

ทำการศึกษา เปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้ซีโอไลต์, ถ่านกัมมันต์, วัสดุผสม ในการดูดซับ แอมโมเนียและซีโอดี พบว่า การใช้ตัวดูดซับทั้งสามชนิด ยิ่งใช้ปริมาณมากประสิทธิภาพการกำจัด ซีโอดียิ่งสูงขึ้น โดยการทดลองนี้ใช้ปริมาณตัวดูดซับ 10 – 60 กรัม พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด ซีโอดีสูงขึ้นร้อยละ 10 – 80 ทั้งนี้วิเคราะห์ว่า การใช้ซีโอไลต์ปริมาณมากขึ้นจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว ในการดูดติดผิวมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีและสีดีขึ้น แต่ในการใช้งานจริง จำเป็นต้องใช้ซีโอไลต์ในปริมาณที่เหมาะสมกับค่าความสกปรกในน้ำเสียเนื่องจาก ประสิทธิภาพ การกำจัดค่าซีโอดีที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณซีโอไลต์ที่ใช้จะมีจุดสิ้นสุดที่ปริมาณซีโอไลต์ระดับหนึ่งและ การใช้ซีโอไลต์เพิ่มขึ้นไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้นอีกต่อไป ดังนั้นถ้าหากมีการใช้ ซีโอไลต์ในปริมาณที่เกินจำเป็น จะเป็นการสิ้นเปลืองสารดูดติดผิว

ดังนั้นจากผลการทดลองจะพบว่าแนวโน้มประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีและสีจะ เพิ่มขึ้นตามปริมาณซีโอไลต์ แต่ผลการทดลองอาจจะมีบางช่วงที่ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี และสีสูงขึ้นแล้วต่ำลง อธิบายได้ว่าลักษณะการดูดติดผิวของซีโอไลต์จะเป็นแบบกายภาพ ซึ่ง สามารถที่จะเกิดการหลุดออก (Desorption) ของสารถูกดูด ติดผิว จากสารดูด ติดผิวได้ เพราะ ลักษณะการดูดติดผิวของซีโอไลต์ที่เป็นแบบกายภาพนั้น เป็นการดูด ติดผิว ที่ไม่เกิดการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันและไม่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอน แต่การดูดติดผิวจะเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่าง โมเลกุลอย่างเบาบางคือแรง “แวน เดอ วาลส์” (Van der Waals Forces) จึงทำให้การดูด ติดผิว ประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อยอยู่ในช่วง 0.5 – 5 กิโลแคลอรีต่อโมล และเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ทั้งหมด

ตารางที่ 4-4 ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีและสีหลังผ่านการบำบัดด้วยซีโอดีในปริมาณต่างๆ

pH ก่อนเขย่า	pH หลังเขย่า	ปริมาณซีโอดี (กรัม)	ค่า COD น้ำชะขยะ ก่อนการบำบัด (มก./ลิตร)	ค่า COD น้ำชะขยะ หลังการบำบัด (มก./ลิตร)	ร้อยละการบำบัดค่าซีโอดี (%)	ค่าการดูดกลืนแสง ก่อนการบำบัด	ค่าการดูดกลืนแสง หลังการบำบัด	ร้อยละการบำบัดสี (%)
4.18	-	0	19,220	19,220	0	0.546	0.546	0.00
4.18	4.18	1	19,220	17,683	8.00	0.546	0.604	-10.60
4.18	4.2	2	19,220	17,886	6.94	0.546	0.447	18.27
4.18	4.2	3	19,220	17,735	7.73	0.546	0.250	54.28
4.18	4.22	4	19,220	17,422	9.36	0.546	0.181	66.87
4.18	4.23	5	19,220	17,203	10.50	0.546	0.199	63.53
4.18	4.26	7	19,220	16,976	11.68	0.546	0.228	58.31
4.18	4.29	9	19,220	15,988	16.81	0.546	0.135	75.36
4.18	4.32	11	19,220	16,887	12.14	0.546	0.212	61.21
4.18	4.32	13	19,220	17,644	8.20	0.546	0.186	65.90



ภาพที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์กับประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดีและพีเอช

4.3.2 ผลการหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

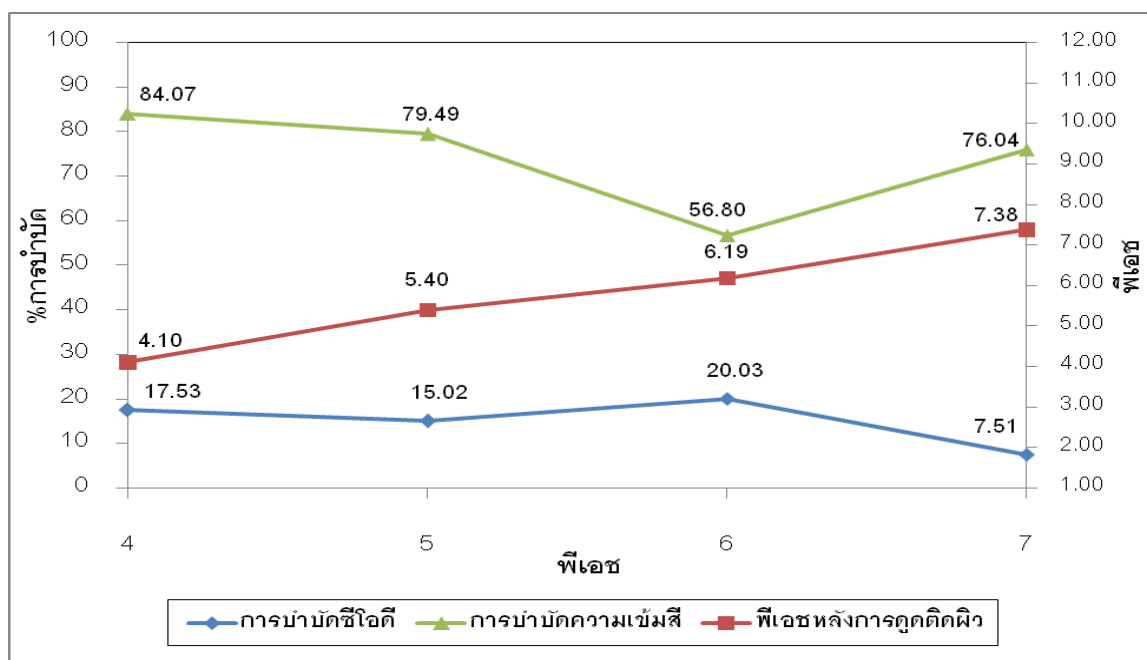
โดยการทดลองนี้จะนำน้ำชะขยะที่ผ่านการรวมตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทำการปรับค่าพีเอชให้มีค่าอยู่ในช่วง 4 – 7 เดิมซีไอดีปริมาณที่เหมาะสมคือ 9 กรัม ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง 4.3.1 แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที แล้วนำน้ำชะขยะไปวิเคราะห์ค่าซีไอดีและค่าความเข้มข้นที่เหลือ

ผลการทดลองพบว่า น้ำชะขยะที่มีค่าพีเอชที่ 4, 5, 6, และ 7 สามารถบำบัดค่าซีไอดีด้วยการกูดติดผิวมีประสิทธิภาพร้อยละ 17.53, 15.02, 20.03 และ 7.51 ตามลำดับ และบำบัดซีไอดีมีประสิทธิภาพร้อยละ 84.07, 79.49, 56.80 และ 76.04 ตามลำดับ ดังในตารางที่ 4-5 และภาพที่ 4-5 โดยน้ำชะขยะที่มีค่าพีเอช 6 จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีไอดีสูงสุด และ น้ำชะขยะที่มีค่าพีเอช 4 จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีสูงสุด ในการทดลองนี้จะเลือกสภาวะพีเอชที่เหมาะสมคือ พีเอช 4 ทั้งนี้เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดีและพีเอชพบว่าที่พีเอช 4 มีประสิทธิภาพร้อยละ 17.53 และ 84.07 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงกระบวนการรวมตะกอนทางเคมีที่ผ่านมามีพบว่าสภาวะพีเอชที่เหมาะสมคือ พีเอช 4 ซึ่งหากการทดลองในขั้นตอนนี้เลือกสภาวะ

พีเอช 4 จะทำให้การสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายเรื่องสารเคมีลดลงอีก ดังนั้นการทดลองนี้จึงเลือกสภาวะที่เหมาะสมคือ พีเอช 4

ตารางที่ 4-5 ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดีและสีหลังผ่านการบำบัดด้วยซีโอไลต์ที่พีเอชต่างๆ

pH ก่อน	pH หลัง	ปริมาณซีโอไลต์ (กรัม)	ค่า COD น้ำชะขยะ ก่อนการบำบัด (มก./ลิตร)	ค่า COD น้ำชะขยะ หลังการบำบัด (มก./ลิตร)	ร้อยละการบำบัดค่าซีไอดี (%)	ค่าการดูดกลืนแสง ก่อนการบำบัด	ค่าการดูดกลืนแสง หลังการบำบัด	ร้อยละการบำบัดสี (%)
4.18	4.18	0	19,220	19,220	0	0.546	0.546	0
4	4.10	9	19,220	15,852	17.53	0.546	0.087	84.07
5	5.40	9	19,220	16,333	15.02	0.546	0.112	79.49
6	6.19	9	19,220	15,371	20.03	0.546	0.236	56.80
7	7.38	9	19,220	17,777	7.51	0.546	0.131	76.04



ภาพที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดีและสี

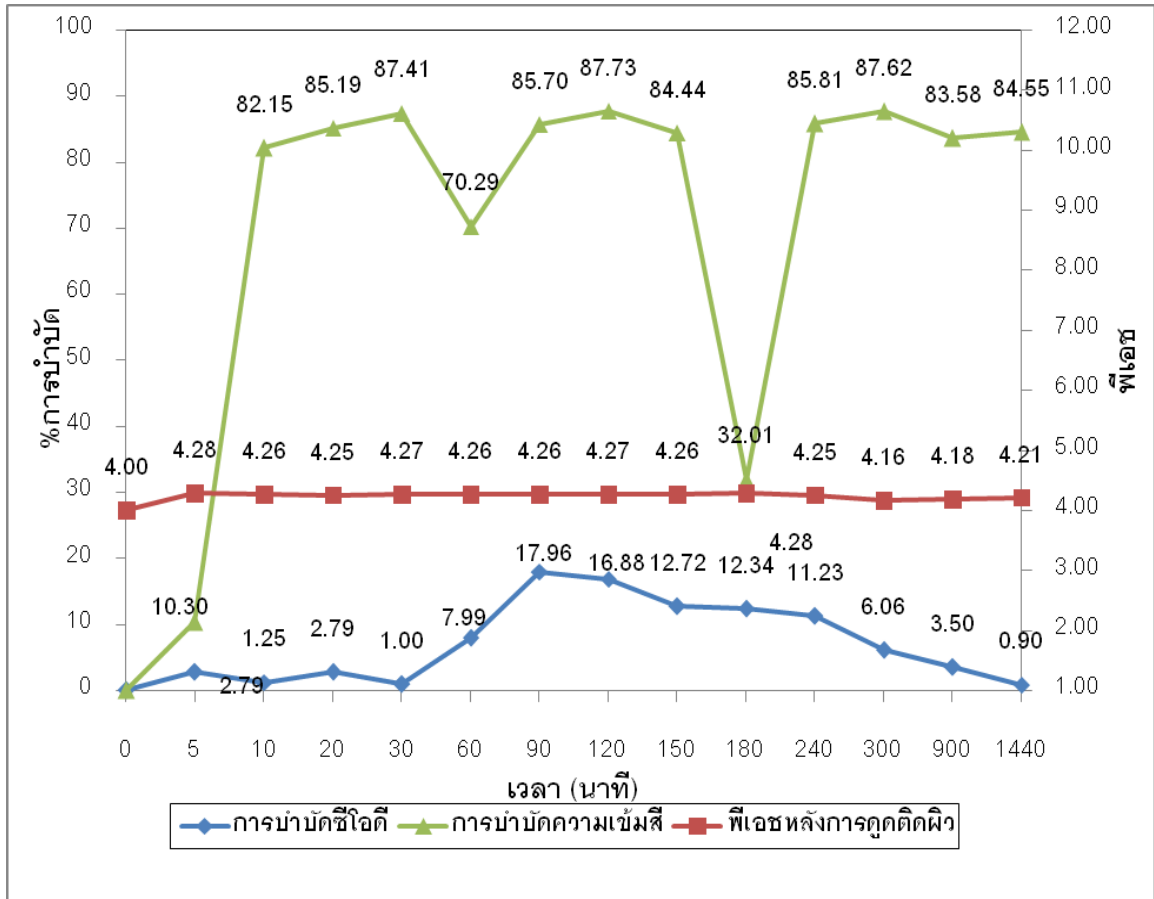
4.3.3 ผลการหาระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสม

โดยการทดลองนี้จะนำน้ำชะขยะที่ผ่านการรวมตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เดิมซีโอไลต์ปริมาณที่เหมาะสม คือ 9 กรัม และทำการปรับค่าพีเอชเท่ากับ 4 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง 4.3.1 และ 4.3.2 ตามลำดับ แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 300, 900 และ 1440 นาที แล้วนำน้ำชะขยะไปวิเคราะห์ค่าซีโอดีและสี

ผลการทดลองพบว่า การเขย่าน้ำชะขยะที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 300, 900 และ 1440 นาที สามารถบำบัดค่าซีโอดีมีประสิทธิภาพร้อยละ 2.79, 1.25, 2.79, 1.00, 7.99, 17.96, 16.88, 12.72, 12.34, 11.23, 6.06, 3.50 และ 0.90 ตามลำดับ และสามารถบำบัดสี ด้วยการดูดติดผิวมีประสิทธิภาพร้อยละ 10.30, 82.15, 85.19, 87.41, 70.29, 85.70, 87.73, 84.44, 32.01, 85.81, 87.62, 83.58 และ 84.55 ตามลำดับ ดังในตารางที่ 4-6 และภาพที่ 4-6 โดย ณ เวลา 90 นาที จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีสูงที่สุด คือ ร้อยละ 17.96 ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดสีนั้น ณ เวลา 120 นาที จะมีประสิทธิภาพการบำบัดสีสูงที่สุด คือ ร้อยละ 87.73 แต่ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีลดลงมาเล็กน้อย ดังนั้นจากการทดลองนี้เวลาที่เหมาะสม คือ เวลา 90 นาที ส่วนกลไกวิเคราะห์ได้ว่ายิ่งเวลานานขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดความสกปรกยิ่งดีขึ้น เนื่องจากน้ำชะขยะสัมผัสกับซีโอไลต์นานขึ้นทำให้ความสกปรกถูกกำจัดด้วยซีโอไลต์ โดยใช้กลไกการดูดติดผิวได้สมบูรณ์ขึ้น แต่ถ้าหากใช้เวลานานเกินไป ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความสกปรกของซีโอไลต์ต่ำลง เนื่องจากพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ส่วนใหญ่มีความสกปรกไปเกาะติดเต็มหมดแล้ว ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความสกปรกลดลง แต่จากผลการทดลองพบว่า เวลา 180 นาที ประสิทธิภาพการบำบัดสีลดลง เหตุผลเป็นเพราะว่า ลักษณะการดูดติดผิวของซีโอไลต์จะเป็นแบบกายภาพ ซึ่ง สามารถที่จะเกิดการหลุดออก (Desorption) ของสารถูกดูดติดผิวจากสารดูดติดผิวได้ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีลดลงเป็นอย่างมาก

ตารางที่ 4-6 ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีและความเข้มข้นหลังจากการบำบัดด้วยซีโอดี ณ เวลาต่างๆ

pH ก่อนเขย่า	pH หลังเขย่า	เวลา (นาที)	ค่า COD น้ำชะขยะ ก่อนการบำบัด (มก./ลิตร)	ค่า COD น้ำชะขยะ หลังการบำบัด (มก./ลิตร)	ร้อยละ การบำบัด ค่าซีโอดี (%)	ค่าการ ดูดกลืนแสง ก่อนการบำบัด	ค่าการ ดูดกลืนแสง หลังการบำบัด	ร้อยละ การบำบัด ความเข้มข้น (%)
4	4.00	0	19,220	19,220	0	0.546	0.546	0
4	4.28	5	19,220	18,684	2.79	0.546	0.490	10.30
4	4.26	10	19,220	18,979	1.25	0.546	0.098	82.15
4	4.25	20	19,220	18,684	2.79	0.546	0.081	85.19
4	4.27	30	19,220	19,027	1.00	0.546	0.069	87.41
4	4.26	60	19,220	17,684	7.99	0.546	0.162	70.29
4	4.26	90	19,220	15,768	17.96	0.546	0.078	85.70
4	4.27	120	19,220	15,976	16.88	0.546	0.067	87.73
4	4.26	150	19,220	16,776	12.72	0.546	0.085	84.44
4	4.28	180	19,220	16,847	12.34	0.546	0.372	32.01
4	4.25	240	19,220	17,062	11.23	0.546	0.078	85.81
4	4.16	300	19,220	18,055	6.06	0.546	0.068	87.62
4	4.18	900	19,220	18,547	3.50	0.546	0.090	83.58
4	4.21	1440	19,220	19,047	0.90	0.546	0.084	84.55



ภาพที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่างๆ กับประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดีและความเข้มข้น

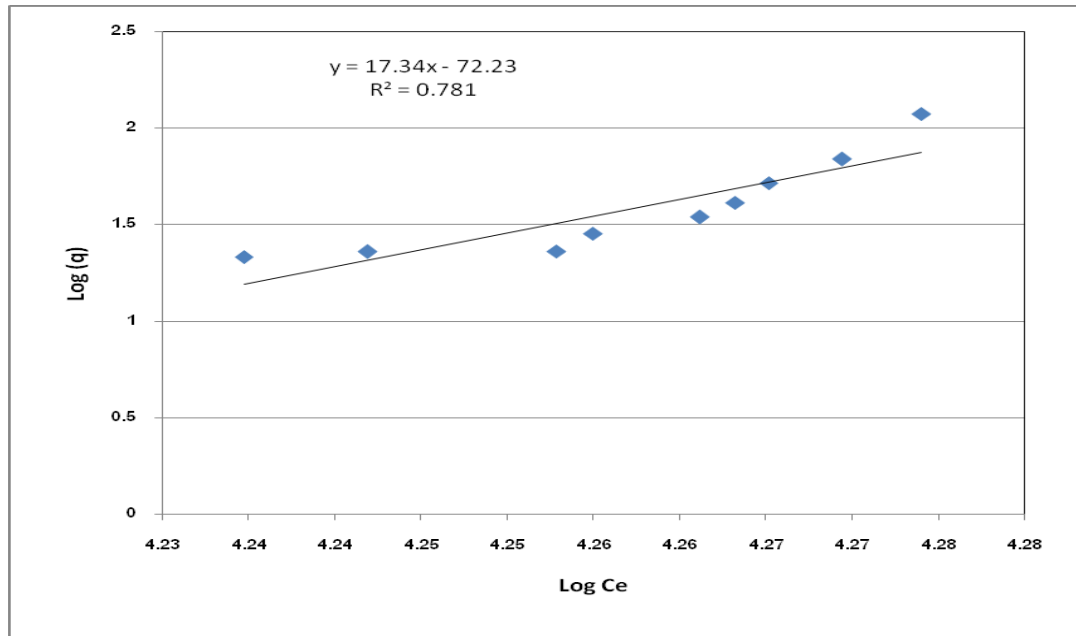
4.3.4 ผลการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดของซีไอไลต์

ในขั้นตอนนี้เป็นการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง โดยปรับพีเอชน้ำชะขยะที่ผ่านการรวมตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์เท่ากับ 4 ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลอง 4.3.2 ใส่น้ำชะขยะปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดภาพชมพูที่มีปริมาณซีไอไลต์อยู่ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11 และ 13 กรัม นำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 90 นาที ซึ่งได้จากการทดลองที่ 4.3.3 จากนั้นนำน้ำชะขยะที่ผ่านการดูดติดผิวไปวิเคราะห์ค่าซีไอดี และทำการทดสอบไอโซเทอม ผลการทดลองที่ได้ แสดงดังตารางที่ 4-7

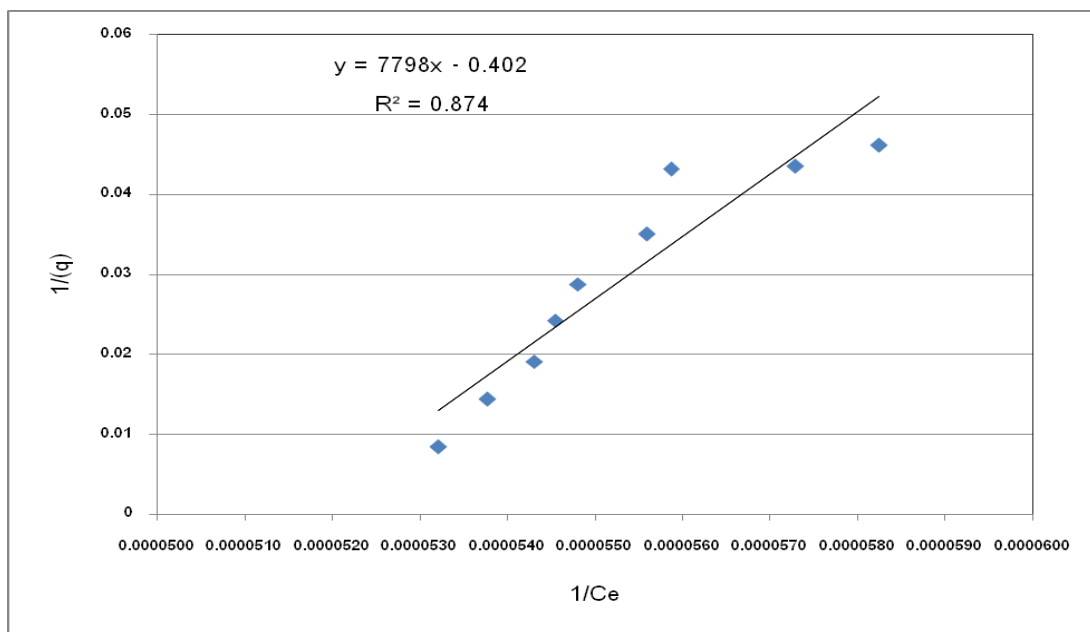
ตารางที่ 4-7 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวค่าซีไอดีในน้ำชะขยะเมื่อใช้ซีไอไลต์เป็นสารดูดติดผิว

m	C ₀ (mg/l)	C _e (mg/l)	C (mg/l)	X (mg)	q (mg/g)	Log(Ce)	Log(q)	1/(Ce)	1/(q)
0	19,983	19,983	0	0	-	-	-	-	-
1	19,983	18,793	1190	119	119	4.27	2.07571867	0.0000532	0.0084
2	19,983	18,596	1387	139	69	4.27	1.84104647	0.0000538	0.01442
3	19,983	18,413	1570	157	52	4.27	1.7187784	0.0000543	0.019108
4	19,983	18,332	1651	165	41	4.26	1.61568708	0.0000545	0.024228
5	19,983	18,245	1738	174	35	4.26	1.54107977	0.0000548	0.028769
7	19,983	17,986	1997	200	29	4.25	1.45528002	0.0000556	0.035053
9	19,983	17,898	2085	208	23	4.25	1.36477777	0.0000559	0.043174
11	19,983	17,454	2529	253	23	4.24	1.36155614	0.0000573	0.043495
13	19,983	17,167	2816	282	22	4.23	1.3356893	0.0000583	0.046165

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-7 นำไปคำนวณเพื่อหาสมการที่เหมาะสมในการอธิบายการดูดติดผิวของซีไอไลต์ ซึ่งสมการที่นิยมใช้ในการอธิบายไอโซเทอมการดูดติดผิวมีอยู่หลายสมการ แต่ในการศึกษานี้จะใช้สมการของ ฟรุนดิชและแลงมัวร์มาอธิบายการดูดติดผิว เป็นการทดสอบไอโซเทอมแบบฟรุนดิชและแลงมัวร์ของซีไอไลต์สามารถวิเคราะห์หาค่า R² (Coefficient of Determination) ของแต่ละไอโซเทอมสำหรับซีไอไลต์ได้ดังนี้ สมการฟรุนดิช คือ 0.781 และสมการแลงมัวร์ คือ 0.874 ค่า R² ของไอโซเทอมแลงมัวร์มีค่ามากกว่าฟรุนดิช ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดติดผิวของซีไอไลต์เป็นการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ ซึ่งผลการคำนวณดังภาพที่ 4-7 และ 4-8



ภาพที่ 4-7 ไอโซเทอมการดูดติดแบบฟรุนดลิชของซีโอไลต์



ภาพที่ 4-8 ไอโซเทอมการดูดติดแบบแลงมั้วร์ของซีโอไลต์

$$\text{จากสมการของแลงมัวร์} \quad X = \frac{X_m b C_e}{1 + b C_e}$$

จากภาพที่ 4-8 จุดตัดแกน $1/(q)$ เท่ากับ -0.402 ดังนั้น $1/X_m = -0.402$

ความชันของเส้นตรงเท่ากับ 7798 ดังนั้น $1/X_m b = 7798$

$$b = -5.156 \times 10^{-5}$$

$$X = 1.28 \times 10^{-4} C_e / [1 + (-5.156 \times 10^{-5}) C_e]$$

จากสมการไอโซเทอมการดูดติดผิวของซีโอไลต์ สามารถอธิบายได้ว่าลักษณะการดูดติดผิวจะเป็นแบบกายภาพ โดยกลไกที่เกิดขึ้นเป็นแบบ mono layer เมื่อทำการแทนค่าความเข้มข้นของค่าซีโอดีเท่ากับ 18,793 มิลลิกรัมต่อลิตร จะได้ค่าความหนาแน่นการดูดติดผิวสูงสุด X_{max} ของซีโอไลต์ ดังแสดงในตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 ค่าคงที่ของซีโอไลต์จากสมการของแลงมัวร์

ซีโอไลต์	$1/X_m b$	b	X_{max} (mg/g)
	7798	-5.156×10^{-5}	80.33

4.4 ผลการศึกษาความสามารถของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการลดสีของน้ำชะขยะ

ทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะขยะที่ผ่านการรวมตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์ และการดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์ มาทำการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยแปรค่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และค่าความเป็นกรด -ด่าง (pH) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการลดซีโอดีและสี ซึ่งพิจารณาจากร้อยละการบำบัดซีโอดีและสี

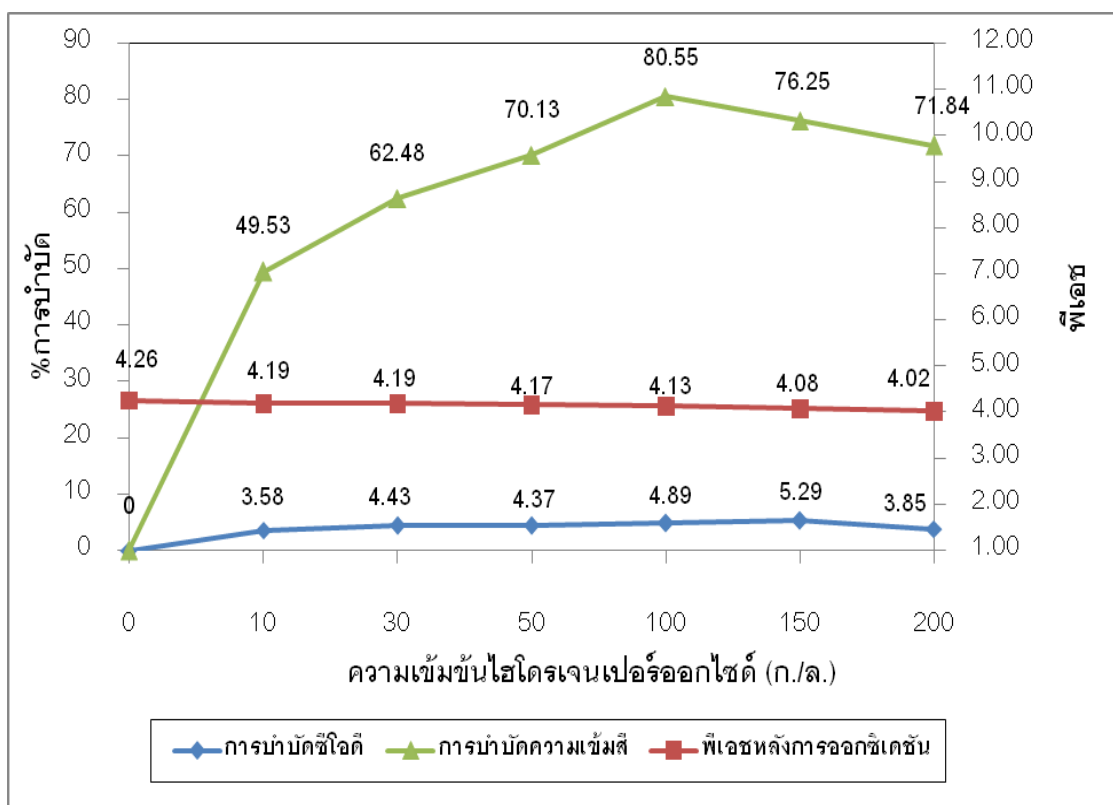
4.4.1 ผลการหาปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เบื้องต้น

การหาปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เบื้องต้นการหาปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เบื้องต้นในน้ำชะขยะที่ผ่านการรวมตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์ และดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์ พบว่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 150 ก./ล. สามารถลดค่าซีโอดีจาก 15,768 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 14,933 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละ 5.29 และ ค่าการดูดกลืนแสงลดลงจาก 0.078 เป็น 0.019 ทำให้ความเข้มข้นสีหลังบำบัดลดลงคิดเป็นร้อยละ 76.25 ดังตารางที่ 4-9 และ ภาพที่ 4-9

จากผลการทดลองกลไกที่เกิดขึ้น คือ ไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ (H_2O_2) จะเป็นตัวออกซิเดนต์ที่แรงในกระบวนการออกซิเดชันโดยจะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีของสารอินทรีย์เป็น โมโนคลอร์ อีนหรือโมเลกุล ที่เล็กลง และเปอร์ ซีนต์ ของออกซิเจนในโมเลกุลจะสูงขึ้น โดยในน้ำชะขยะจะมี สารอินทรีย์ ที่อยู่ในรูปของสารประกอบฮิวมิก ซึ่งเป็นสารที่ทำให้ น้ำชะขยะมีสีเข้ม ดังนั้นการเติม ไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ จึงเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำชะขยะ แต่ประสิทธิภาพการบำบัดความสกปรกในรูปของค่าซีไอดีประสิทธิภาพไม่ได้เท่าที่ควร เพราะ ค่าความสกปรกในรูปของซีไอดีไม่ได้เจาะจงเฉพาะสารประกอบฮิวมิกเท่านั้น ดังนั้นร้อยละการบำบัดความสกปรกในรูปของค่าซีไอดีจึงลดลงไม่มากนัก

ตารางที่ 4-9 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีและสี หลังเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นต่างๆ ในน้ำชะขยะที่ผ่านการรวมตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์และการดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์

ความเข้มข้น hydrogen peroxide (ก. /ล)	ค่า COD น้ำชะขยะ ก่อนการบำบัด (มก./ลิตร)	ค่า COD น้ำชะขยะ หลังการบำบัด (มก./ลิตร)	ร้อยละการบำบัดค่าซีไอดี (%)	ค่าการดูดกลืนแสง ก่อนการบำบัด	ค่าการดูดกลืนแสง หลังการบำบัด	ร้อยละการบำบัดสี (%)	pH หลังออกซิเดชัน
0	15,768	15,768	0	0.078	0.078	0	4.26
10	15,768	15,203	3.58	0.078	0.039	49.53	4.19
30	15,768	15,069	4.43	0.078	0.029	62.48	4.19
50	15,768	15,079	4.37	0.078	0.023	70.13	4.17
100	15,768	14,996	4.89	0.078	0.015	80.55	4.13
150	15,768	14,933	5.29	0.078	0.019	76.25	4.08
200	15,768	15,160	3.85	0.078	0.022	71.84	4.02



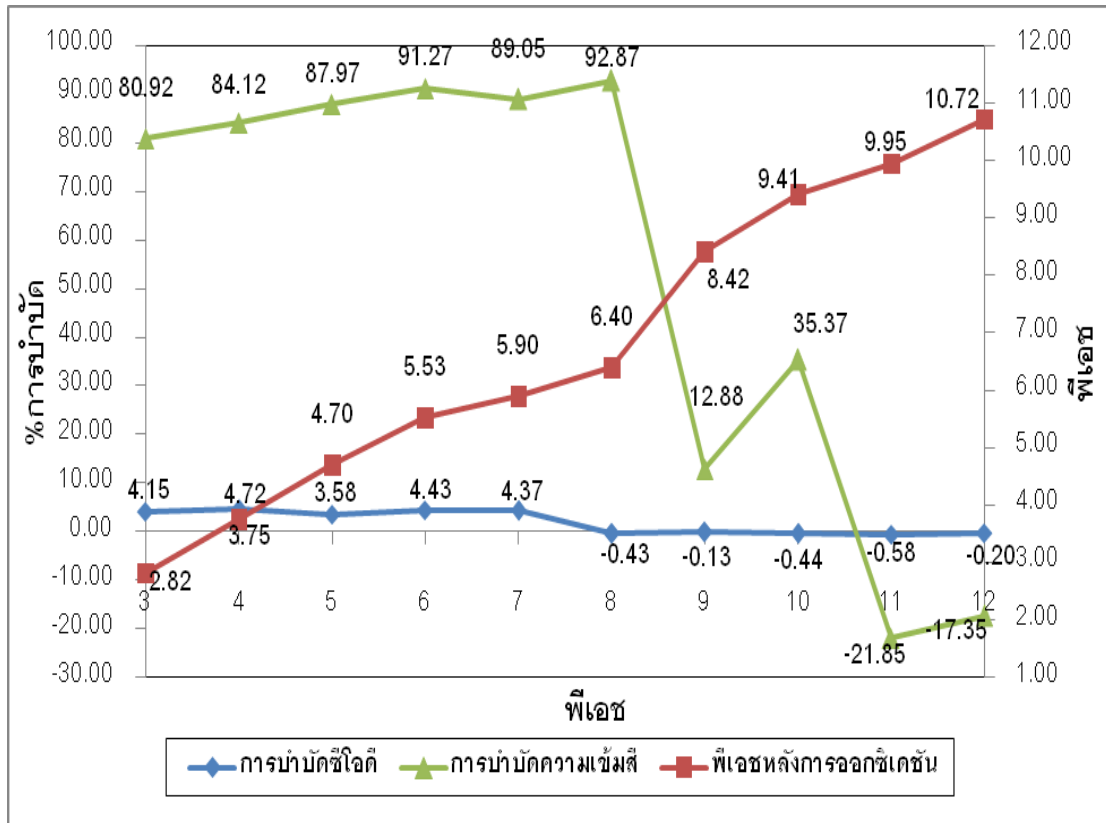
ภาพที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับร้อยละการบำบัดคลอรีน

4.4.2 ผลการหาค่าพีเอช (pH) ที่เหมาะสม

เมื่อแปรค่าพีเอช 3-12 ผลการทดลองที่ได้พบว่าที่พีเอช 4 ให้ร้อยละการบำบัดคลอรีนสูงสุด คือ ร้อยละ 4.72 สามารถลดค่าคลอรีนจาก 15,768 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 15,023 มิลลิกรัมต่อลิตร และ ร้อยละการบำบัดค่าสีคิดเป็นร้อยละ 84.12 โดยลดค่าการดูดกลืนแสงลดลงจาก 0.078 เป็น 0.012 ดังนั้นจึงเลือกสภาวะพีเอช เท่ากับ 4 ไปใช้ในการหาความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมต่อไป ผลที่ได้ดังตารางที่ 4-10 จากผลการทดลองดังในภาพที่ 4-10 จะเห็นได้ว่าพีเอชมีผลต่อการลดค่าคลอรีนด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หากพีเอชมีค่าสูงขึ้นมากรกว่า 4 ร้อยละการบำบัดคลอรีนจะมีค่าลดลงทันที ส่วนร้อยละการบำบัดความเข้มสีเพิ่มมากขึ้นในช่วงที่เป็นกลางแต่ หลังจากพีเอชตั้งแต่ 9-12 จะพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีจะลดลงอย่างมาก เนื่องจากพีเอชดังกล่าวเหล็กที่อยู่ในน้ำจะไม่มีการละลาย โดยจะเกิดเป็นตะกอนของเหล็กที่อยู่ในน้ำชะขยะจะทำให้ น้ำชะขยะมีสีที่ขุ่นมากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีลดลงอย่างรวดเร็ว

ตารางที่ 4-10 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและสี หลังเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำ ชะขะขะที่ผ่านการรวมตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์และการดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์ที่พีเอชต่างๆ

pH ก่อน ออกซิเดชัน	ค่า COD น้ำชะขะขะ ก่อนการ บำบัด (มก./ลิตร)	ค่า COD น้ำชะขะขะ หลังการ บำบัด (มก./ลิตร)	ร้อยละ การบำบัด ค่าซีโอดี (%)	ค่าการ ดูดกลืนแสง ก่อน การบำบัด	ค่าการ ดูดกลืนแสง หลัง การบำบัด	ร้อยละ การบำบัด สี (%)	pH หลัง ออกซิเดชัน
4.26	15,768	15,768	0	0.078	0.078	0	4.26
3	15,768	15,113	4.15	0.078	0.015	80.92	2.82
4	15,768	15,023	4.72	0.078	0.012	84.12	3.75
5	15,768	15,203	3.58	0.078	0.009	87.97	4.70
6	15,768	15,069	4.43	0.078	0.007	91.27	5.53
7	15,768	15,079	4.37	0.078	0.009	89.05	5.90
8	15,768	15,836	-0.43	0.078	0.006	92.87	6.40
9	15,768	15,788	-0.13	0.078	0.068	12.88	8.42
10	15,768	15,837	-0.44	0.078	0.051	35.37	9.41
11	15,768	15,859	-0.58	0.078	0.095	-21.85	9.95
12	15,768	15,799	-0.20	0.078	0.092	-17.35	10.72



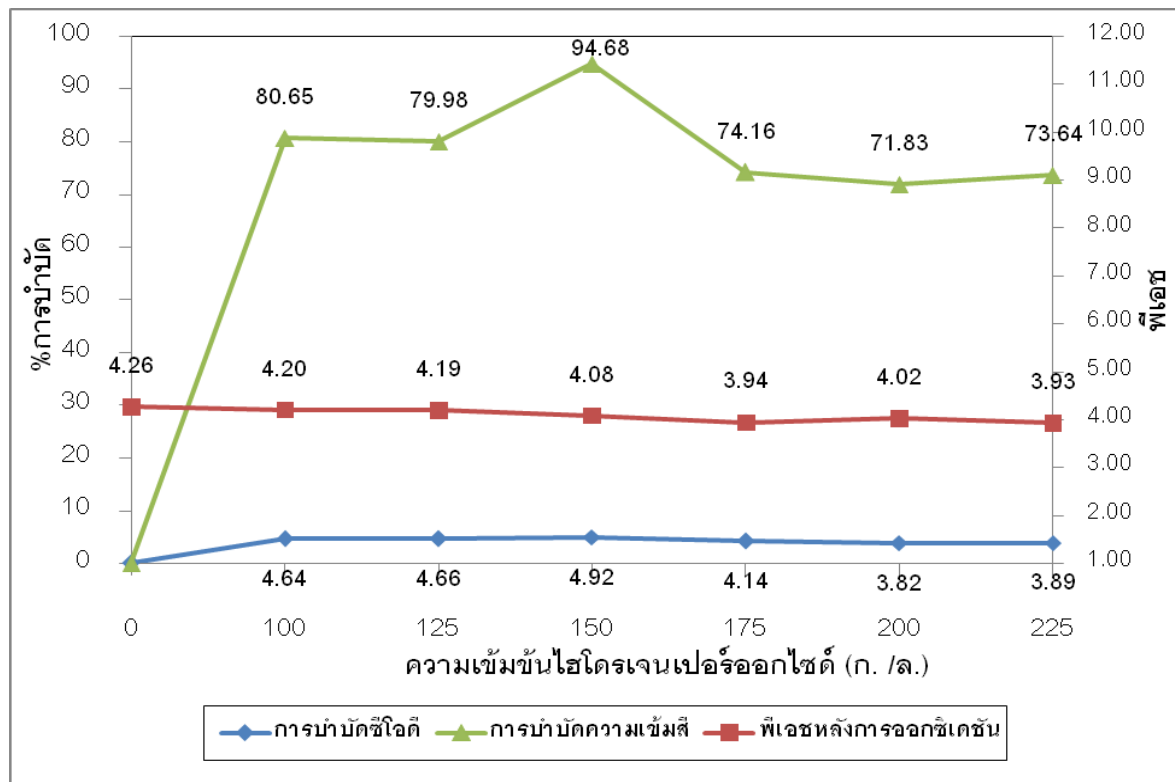
ภาพที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับร้อยละการบำบัดสีและชีโอดี

4.4.3 ผลการหาปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม

การหาปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำชะขยะที่ผ่านการรวมตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์ พบว่า ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 150 กรัม/ลิตร สามารถลดค่าชีโอดีได้มากที่สุดโดยลดค่าชีโอดีจาก 15,768 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 14,992 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นร้อยละ 4.92 และ ค่าการดูดกลืนแสงลดลง จาก 0.078 เป็น 0.004 ทำให้ความเข้มข้นหลังบำบัดลดลงคิดเป็น ร้อยละ 94.68 ดังตารางที่ 4-11 จึงเลือกความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 150 กรัม/ลิตร จากภาพที่ 4-11 เมื่อความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น จะทำให้อัตราการบำบัดชีโอดีและสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จนถึงความเข้มข้นหนึ่งร้อยละ การบำบัดชีโอดีและสีจะลดลง ดังนั้นความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำชะขยะที่ผ่านการรวมตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์ คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 150 กรัม/ลิตร ที่พีเอชเท่ากับ 4

ตารางที่ 4-11 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีและสี หลังเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นต่างๆ ในน้ำชะขยะที่ผ่านการรวมตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์และการดูดติดผิวด้วยซีไอดีที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4

ความเข้มข้น hydrogen peroxide (ก. /ล.)	ค่า COD น้ำชะขยะ ก่อนการบำบัด (มก./ลิตร)	ค่า COD น้ำชะขยะ หลังการบำบัด (มก./ลิตร)	ร้อยละการบำบัดค่าซีไอดี (%)	ค่าการดูดกลืนแสง ก่อนการบำบัด	ค่าการดูดกลืนแสง หลังการบำบัด	ร้อยละการบำบัดความเข้มข้น (%)	pH หลังออกซิเดชัน
0	15,768	15,768	0	0.078	0.078	0	4.26
100	15,768	15,036	4.64	0.078	0.015	80.65	4.20
125	15,768	15,033	4.66	0.078	0.016	79.98	4.19
150	15,768	14,992	4.92	0.078	0.004	94.68	4.08
175	15,768	15,115	4.14	0.078	0.020	74.16	3.94
200	15,768	15,166	3.82	0.078	0.022	71.83	4.02
225	15,768	15,154	3.89	0.078	0.021	73.64	3.93



ภาพที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับร้อยละบำบัดสีและซีไอดี

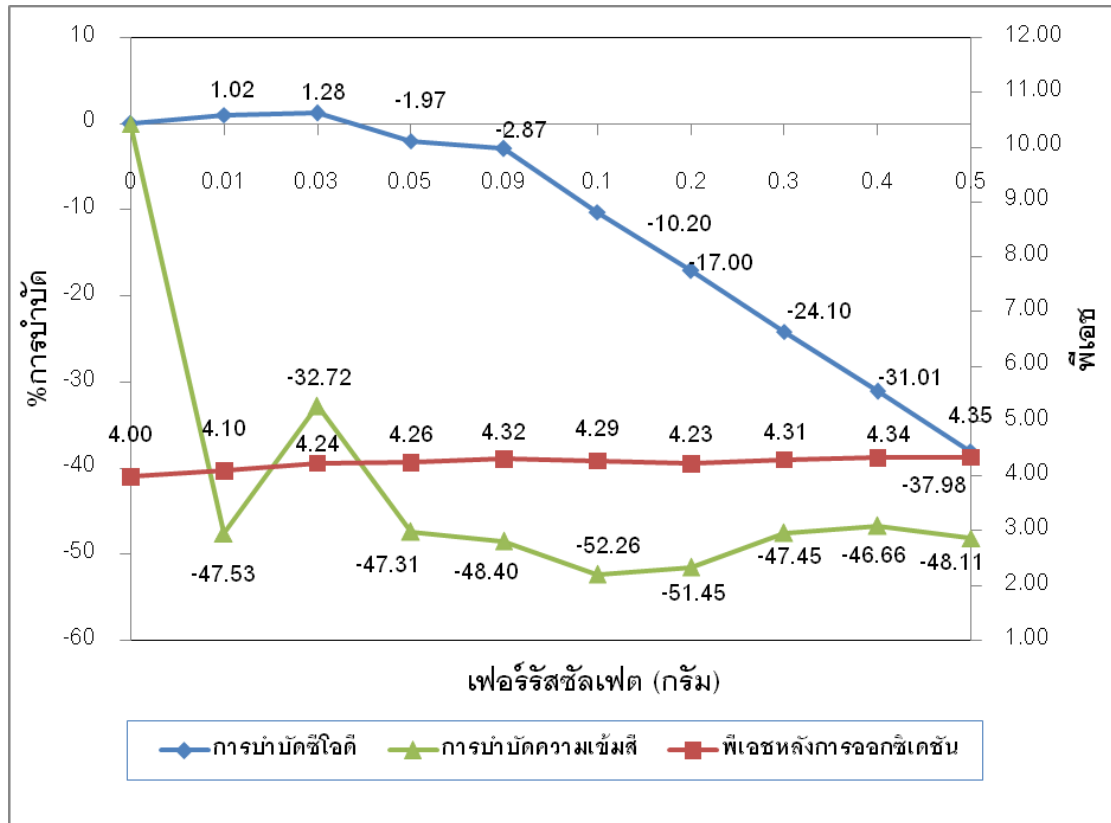
4.4.4 ผลการศึกษาผลของเหล็กในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดน้ำชะขยะด้วยวิธีโคแอกกูเลชันร่วมกับการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การออกซิเดชันทางเคมีโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับเหล็กนั้นเป็นวิธีที่เรียกว่า ฟেন্টอนรีเอเจนต์ (fenton's reagent, mixture of ferrous iron and H_2O_2) ซึ่งเป็นการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์และใช้เหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัล คอล (OH \cdot) (Marechal และคณะ, 1997) ซึ่งมีความสามารถในการออกซิเดชันสารอินทรีย์ได้ 2.8 โวลต์ (Rodriguez, 2003) สูงกว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาผลของเหล็กในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดน้ำชะขยะด้วยวิธีโคแอกกูเลชันร่วมกับการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์ โดยเลือกสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองขั้นต้นมาทำการศึกษาและทำการแปรค่าปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมในการลดซีไอดีและสี ซึ่งพิจารณาจากร้อยละการบำบัดซีไอดีและสี

ผลการทดลองพบว่าเมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมจากข้อ 4.2.1 - 4.3.3 มาทำการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 150 ก. /ล. ที่สภาวะพีเอช 4 และทำการเติมปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตในปริมาณที่ต่างกัน ซึ่งผลการทดลองดังตารางที่ 4-1 2 เมื่อทำการเติมปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตในปริมาณที่ต่างกัน พบว่า เฟอร์รัสซัลเฟต 0.03 กรัม สามารถเพิ่มค่าการ บำบัดซีไอดีได้เพียงร้อยละ 1.28 ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นสีนั้นลดลงจนได้ค่าที่เป็นลบ ดังนั้นการเติมเฟอร์รัสซัลเฟต 0.03 กรัม จึงไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีและสีในน้ำชะขยะ

ตารางที่ 4-12 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีและดี หลังเติมเฟอร์รัสซัลเฟต ในน้ำชะขยะที่ผ่านการรวมตะกอนด้วย เฟอริกคลอไรด์ การดูดติดผิวด้วยซีไอไลต์ และออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 150 กรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4

ปริมาณ เฟอร์รัส ซัลเฟต (กรัม)	ค่า COD น้ำชะขยะ ก่อนการ บำบัด (มก./ลิตร)	ค่า COD น้ำชะขยะ หลังการ บำบัด (มก./ลิตร)	ร้อยละ การบำบัด ค่าซีไอดี (%)	ค่าการ ดูดกลืนแสง หลัง การบำบัด	ค่าการ ดูดกลืนแสง หลัง การบำบัด	ร้อยละ การบำบัด ความเข้มข้น (%)	pH หลัง ออกซิเดชัน
0	15,768	15,768	0	0.078	0.078	0	4.00
0.01	15,768	15,607	1.02	0.078	0.115	-47.53	4.10
0.03	15,768	15,566	1.28	0.078	0.104	-32.72	4.24
0.05	15,768	16,078	-1.97	0.078	0.115	-47.31	4.26
0.09	15,768	16,221	-2.87	0.078	0.116	-48.40	4.32
0.1	15,768	17,376	-10.20	0.078	0.119	-52.26	4.29
0.2	15,768	18,448	-17.00	0.078	0.118	-51.45	4.23
0.3	15,768	19,568	-24.10	0.078	0.115	-47.45	4.31
0.4	15,768	20,658	-31.01	0.078	0.115	-46.66	4.34
0.5	15,768	21,757	-37.98	0.078	0.116	-48.11	4.35



ภาพที่ 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟอรัสซัลเฟต กับร้อยละการบำบัดคลอไรด์และซีโอทีในน้ำ ชะขวยที่ผ่านการรวมตะกอนด้วย เฟอริกคลอไรด์ การดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์ และออกซิเดชันด้วย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 150 กรัม/ลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4

4.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและความเข้มข้นโดยรวมทั้งกระบวนการ

จากผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมทั้งหมดพบว่า การรวมตะกอนทางเคมีด้วยเฟอริกคลอไรด์ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเท่ากับ 4 สามารถบำบัดค่าซีโอดีและสีได้ร้อยละ 55.79 และ 51.32 ตามลำดับ จากนั้นนำน้ำชะขยะที่ผ่านกระบวนการรวมตะกอนทางเคมีมาศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์ 9 กรัม ที่พีเอช 4 เวลาการสัมผัส 90 นาที สามารถบำบัดค่าซีโอดีและสีได้ร้อยละ 17.96 และ 85.70 ตามลำดับ และนำน้ำชะขยะที่ผ่านการดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์ มาศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์พบว่า ที่พีเอชเท่ากับ 4 ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 150 กรัมต่อลิตร สามารถบำบัดค่าซีโอดีและสีได้ร้อยละ 4.92 และ 94.68 ตามลำดับ เมื่อคิดร้อยละประสิทธิภาพรวมทั้งหมดของการกำจัดซีโอดีและความเข้มข้นเท่ากับ 65.52 และ 99.64 ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.13 และ 4.14) (ดังภาพที่ 4.13)

ตารางที่ 4-13 ผลการบำบัดน้ำชะขยะทั้งหมดที่สภาวะที่เหมาะสม

กระบวนการที่ใช้ในการบำบัด	COD น้ำชะขยะ (มก./ล)	ร้อยละการ บำบัดซีโอดี แต่ละ กระบวนการ	ประสิทธิภาพ การบำบัดซีโอดี โดยรวม	ค่าการ ดูดกลืน แสง	ร้อยละการ บำบัดสี แต่ละ กระบวนการ	ประสิทธิภาพ การบำบัดสี โดยรวม
น้ำชะขยะก่อนการบำบัด	43,478	-	65.52	1.123	-	99.64
หลังกระบวนการรวมตะกอนทางเคมี - pH 4, FeCl ₃ 700 mg/l	19,220	55.79		0.546	51.38	
หลังกระบวนการดูดติดผิว FeCl ₃ 700 mg/l, pH 4 + ซีโอไลต์ 9 กรัม, pH 4, 90 นาที	15,768	17.96		0.078	85.71	
หลังกระบวนการออกซิเดชัน FeCl ₃ 700 mg/l, pH 4 + ซีโอไลต์ 9 กรัม, pH 4, 90 นาที + pH 4, H ₂ O ₂ 150 ก./ล	14,992	4.92		0.004	94.87	

ตารางที่ 4-14 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำชะขยะก่อนและหลังการบำบัด

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ยที่ได้	
	ก่อนการบำบัด	หลังการบำบัด
1. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	8.86	4.08
2. ซีโอดี (COD)	43,488 mg/l	14,992 mg/l
3. บีโอดี (BOD)	26,092 mg/l	9,014 mg/l
4. ปริมาณของแข็งแขวนลอย (TSS)	98 mg/l	32 mg/l
5. ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS)	35,452 mg/l	10,400 mg/l
6. ค่าการดูดกลืนแสง	1.127	0.004
7. ปริมาณโลหะหนัก		
Total Al	6,278 mg/l	5,156 mg/l
Total Pb	< 20 mg/l	< 20 mg/l
Total Cd	0.5123 mg/l	< 0.5 mg/l
Total Cr	< 5 mg/l	< 5 mg/l
Total Fe	69.6045 mg/l	60.9905 mg/l
Total Mn	< 10 mg/l	32.314 mg/l
Total Cu	1.4578 mg/l	1.24995 mg/l
Total Ni	360.14 mg/l	291.21 mg/l
Total Zn	12.7235 mg/l	10.878 mg/l
Total Si	61,125 mg/l	51,637.5 mg/l
Total Ba	13.508 mg/l	10.7465 mg/l



ภาพที่ 4-13 ลักษณะน้ำชะขยะหลังผ่านการบำบัดเปรียบกับก่อนบำบัด

4.6 การประเมินค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำชะขยะ

เมื่อใช้ กระบวนการรวมตะกอนทางเคมีโดยมีเฟอริกคลอไรด์ เป็นโคแอกกูแลนต์ กระบวนการดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์ และการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ร่วมกับการเร่งปฏิกิริยาด้วยเฟอร์ริสซัลเฟต ในการกำจัดค่าซีโอดีและค่าความขุ่นสีจากน้ำชะขยะ

มีรายละเอียดดังนี้ (คิดจากน้ำชะขยะ 500 มิลลิลิตร)

- ค่าเฟอริกคลอไรด์: **ขั้นการรวมตะกอนทางเคมี**

เฟอริกคลอไรด์ 40% 1 กิโลกรัม 30 บาท ใช้ไป 0.007 กรัม คิดเป็น 0.000021 บาท

- ค่าซีโอไลต์: **ขั้นการดูดติดผิว**

ซีโอไลต์ 1 กิโลกรัม 35 บาท ใช้ไป 9 กรัม คิดเป็น 0.315 บาท

- ค่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์: **ขั้นการออกซิเดชัน**

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50% 1 กิโลกรัม ราคา 29 บาท ใช้ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 150 กรัมต่อลิตร (ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 4.55 มิลลิลิตร) คิดเป็น 0.32 บาท

ค่าสารเคมีทั้งหมด = $0.000021 + 0.315 + 0.32 = 0.63$ บาทต่อน้ำชะขยะ 500 มล.
คิดเป็นค่าใช้จ่ายต่อน้ำชะขยะ 1 ลบ.ม. เท่ากับ 1,260 บาท

ดังนั้น ค่าสารเคมี ทั้งหมดเมื่อใช้เฟอริกคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์ การดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์ร่วมกับการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับเฟอร์ริสซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเท่ากับ 1,260 บาท ต่อ น้ำชะขยะ 1 ลบ.ม.

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ศึกษาความสามารถในการลดซีไอดีโดยใช้เฟอริกคลอไรด์

ความเข้มข้นเฟอริกคลอไรด์ที่เหมาะสมที่สุดในการรวมตะกอนน้ำชะขยะมีค่าเท่ากับ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร และ พีเอชที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมที่สุด คือ พีเอช 4 โดยมีประสิทธิภาพในการลดค่าซีไอดีและสีได้ร้อยละ 55.79 และ 51.32 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองนี้

5.1.2 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวของซีโอไลต์

ปริมาณซีโอไลต์ที่เหมาะสมที่สุดในการดูดติดผิว คือ ซีโอไลต์ 9 กรัม และพีเอชที่มีประสิทธิภาพที่สุดคือ พีเอชเท่ากับ 4 โดยเวลาที่ใช้ในการดูดติดผิวที่เหมาะสมที่สุด คือ 90 นาที คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีเท่ากับร้อยละ 17.95 และความเข้มสีหลังบำบัดลดลง ร้อยละ 85.70 และสมการที่นำมาอธิบายการดูดติดผิวของ ซีโอไลต์ คือ สมการแลงมัวร์ โดยซีโอไลต์ สามารถดูดติดผิวสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดซีไอดีสูงสุดเท่ากับ 80.33 มิลลิกรัม

5.1.3 ผลการศึกษาความสามารถของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการลดสีของน้ำชะขยะ

ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 150 กรัม/ลิตร สามารถลดค่าซีไอดีได้มากที่สุดโดยลดค่าซีไอดีจาก 15,778 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 15,002 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นร้อยละ 4.92 และ ค่าการดูดกลืนแสงลดลง จาก 0.078 เป็น 0.004 ทำให้ความเข้มสีหลัง บำบัดลดลงคิดเป็น ร้อยละ 94.68 เมื่อความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น จะทำให้อัตราการบำบัดซีไอดีและสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงความเข้มข้นหนึ่งร้อยละการบำบัดซีไอดีและสีจะลดลง

5.1.4 ศึกษาผลของเหล็กในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดน้ำชะขยะด้วยวิธีโคแอกกูเลชัน

เฟอ รรัสซัลเฟต 0.03 กรัม สามารถเพิ่มค่าการ บำบัด ซีโอดี ได้เพียงร้อยละ 1.28 ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดความเข้มข้นลดลงจนได้ค่าที่เป็นลบ ซึ่ง ความเข้มข้นที่มากขึ้นเมื่อมีปริมาณเฟอรัสซัลเฟตเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการ บำบัดลดลง ซึ่งเป็นผลจากสีของเฟอ รรัสซัลเฟตที่เติมลงไป ดังนั้น การเติม เฟอ รรัสซัลเฟต 0.03 กรัม จึงไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและสีในน้ำชะขยะ

5.1.5 ผลการบำบัดน้ำชะขยะทั้งกระบวนการ

ซีโอดีเริ่มต้นเท่ากับ 43,488 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าเฉลี่ยซีโอดีหลังการทดลองเท่ากับ 15,002 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 65.52 และ ค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้นเท่ากับ 1.123 ค่าการดูดกลืนแสงหลังการทดลองเท่ากับ 0.004 คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 99.64 จากค่าซีโอดีสุดท้ายหลังการกำจัดนั้น พบว่าก็ยัง เกินกว่าค่ามาตรฐานที่ทางกรมนิคมอุตสาหกรรม (กนอ.) ได้กำหนดไว้เพื่อที่จะนำไปบำบัดในระบบบำบัดส่วนกลาง สาเหตุมาจากความสกปรกในรูปของค่าซีโอดีนั้นจัดเป็น Hard COD ซึ่งกำจัดได้ยาก ดังนั้นวิธีการบำบัดนี้ไม่เหมาะสมที่จะเป็นการบำบัดขั้นสุดท้าย ควรนำกระบวนการบำบัดทางชีววิทยามารับบัดต่อจากกระบวนการนี้ เช่น ระบบ Activated Sludge

5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป

1. การบำบัดน้ำชะขยะควรใช้วิธีทางชีววิทยาร่วมกับวิธีทางเคมีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด เช่น การใช้ราเพื่อช่วยบำบัดสีในน้ำชะขยะ เป็นต้น
2. ศึกษาการใช้ Microfiltration และ Ultrafiltration เพื่อลดซีโอดีและสีของน้ำชะขยะให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรมควบคุมมลพิษ. 2552. สรุปสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย พ.ศ.2551. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2548. ตัวรอกำจัดการมลพิษจากอุตสาหกรรม. กรมโรงงานอุตสาหกรรมและสถาบันสิ่งแวดล้อมไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2549. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.diw.go.th/edit_web_design/html/versionthai/laws/27.pdf [2549, เมษายน 27]
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. วิศวกรรมประปา. 2539. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: มิตรนราการพิมพ์
- คงศักดิ์ วัฒนวงศ์พิทักษ์. 2543. การแยกไขมันไอโซเมอร์ผสมโดยการดูดซับบนซีโอไลต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จักริน นักร้อง. 2549. การกำจัดสีจากน้ำชะมูลฝอยโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จรรยา อินทมณี, จันทิมา ชั่งสิริพร และพรศิริ แก้วประดิษฐ์. 2552. การกำจัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มโดยใช้สารดูดซับร่วมกับปฏิกิริยาเฟนตัน. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7. หน้า 78-81. สงขลา: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ธิดา ชนะศักดิ์. 2542. การดูดซับของฟอสเฟตบนถ่านกัมมันต์เคลือบผิว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ประกาศการนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย . 2541. หลักเกณฑ์ทั่วไปในการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมในนิคมอุตสาหกรรม. การนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร.

- ปภาวดี โชคสุวรรณกิจ. 2550. การบำบัดน้ำกากส่าโดยใช้กากตะกอนระบบผลิตน้ำประปา ถ้ำลอย แอสฟัลท์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. สาขา วิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปธานิน แสงอรุณ. 2551. การกำจัดแอมโมเนียในน้ำทิ้งโดยใช้ไฮโดรไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต . สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันลิน ตันฑุลเวศม์. 2537. วิศวกรรมประปา เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันลิน ตันฑุลเวศม์. 2538. วิศวกรรมประปา เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรารุณ วัดขนาด. 2552. ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมไอออน (II) โดยใช้ทรายที่แช่แล้วจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย คณะกรรมการจัดทำคู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. 2540. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: เรือนแก้วการพิมพ์.
- สัญญาถ สัทวารยัน และสมชาย พานิชสาส์น. 2540. การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ถ่านหิน . โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ สาขาวิชา เคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สวีณา เกตุสุวรรณ. 2543. การลดค่าซีโอดีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีกับโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ เพอร์ริกซัลเฟตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สิรินันท์ กันศิริ. 2550. การกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน . วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. สาขา วิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Ahn, D.H., Chung, Y.C., Chang, W.S. 2002. Use of coagulant and zeolite to enhance the biological treatment efficiency of high ammonia leachate. J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng. 37(2):163-73.
- Azhar, A. Halim., Hamidi, A. A., Megat A. M. and Kamar, S, A. 2010. Comparison study of ammonia and COD adsorption on zeolite, activated carbon and composite materials in landfill leachate treatment. Journal of Desalination 262: 31–35.
- Ames, L.L. 1976. Zeolite removal of ammonium ions from agricultural and other wastewater Proc. Pacific Industrial Waste Conf Washington St. University: 159-163
- APHA, AWWA, and WEF. 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th ed. Maryland: United Book Press.
- Amirtharajah, A. and Mills, P., 1982. Rapid mix design for mechanism of alum coagulation. American Water Works Association April, pp. 210–216
- Amirtharajah, A. and O'Melia, C.R. 1999. Water quality and treatment: a handbook of community water supplies. 5thed. New york: McGraw-Hill.
- Amuda, O.S. and Amoo, I. A. 2007. Coagulation/flocculation process and sludge conditioning in beverage industrial waste water treatment. Journal of Hazardous Materials 141: 778-783.
- Breck, D. W. 1974. Zeolite molecular sieve : Structure, chemistry, and use: John Wiley & Sons.
- Committee Report (1971) State of the art of coagulation. J. AWWA, 63, Feb.,99-108.
- Dyer, A. 1988. Introduction to zeolite molecular sieves : John Wiley & Sons.
- Daphne, H., Manuel, C., Chin, P. H. 2009. Optimization of Fenton process for the treatment of landfill leachate. Science of the Total Environment 407: 3473–3481.
- Eckenfelder W.W. 1981. International Application of Adsorption to Wastewater Treatment Conference. New York: Environmental Press.
- Faust,S.D. and Aly O.M. 1987. Adsorption Processes for Water Treatment. United

States of America: Butterworths.

- Hamidi, A. A., Salina, A., Mohd., N. A., Faridah, Asaari, A.H. and Mohd., S. Z. 2007. Colour Removal from landfill leachate by coagulation and flocculation processes. Journal of Bioresource Technology 98: 218-220.
- Jorgensen, S. E. 1979. Industrial wastewater management. New York: Elsevier Scientific.
- Johnson, P. N. and Amirtharajah, A., 1983. Ferric chloride and alum as single and dual coagulants. Journal of American Water Works Association (May): 232–239.
- Marco, A., Esplugas, S. and Saum, G. 1997. How and why combine chemical and biological processes for wastewater treatment. Water Science and Technology 35: 321-327.
- Marechal, A. M., Slokar Y. M. and Taufer T. 1997. Decoloration of chlorotriazine reactive azo dyes with H₂O₂/U.V. Dye and Pigment 33: 281-298.
- Mohan, S. and Gandhimathi, R., 2009. Removal of heavy metal ions from municipal solid waste leachate using coal fly ash as an adsorbent. Journal of Hazardous Materials 169: 351–359.
- Metcalf & Eddy. 1991. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse. 3rd ed . New York: McGraw-Hill.
- Rodriguez, M. 2003. Fenton and UV-vis based advanced oxidation process in wastewater treatment: degradation, mineralization and biodegradability enhancement. Barcelona: University de Barcelona.
- Sundstrom, D.W. and Klei H. E.. 1979. Wastewater Treatment. United States of American: Prentice-Hall In.
- Samuel, D.F and Osman, M.A. 1983. Chemistry of water treatment. Michigan: An Ann Arbor Science Book.
- Tatyana, P., Luis, G. B., Isaac, C., Ivan, R. C. and Elvira, L. R. 2008. Decomposition of toxic pollutants in landfill leachate by ozone after coagulation treatment. Journal of Hazardous Materials, 152: 1108–1114.

- Tchobanoglous, G. H., Theisen and Vilgil, S. A. 1993. Intergrated solid waste management. International edition. Singapore: McGraw-Hill Book.
- Tonni, A. K., Wai, L. 2009. Removal of refractory compounds from stabilized landfill leachate using an integrated H₂O₂ oxidation and granular activated carbon (GAC) adsorption treatment. Water Research 43 : 4079 – 4091.
- USEPA. 1991. Treatment technologies. 2nd ed. Government Institute.
- Yanyu, W., Shaoqi, Z., Fanghui, Q., Huaping, P., Yanglan, L., Yiming, Lin. 2010. Removal of humic substances from landfill leachate by Fenton oxidation and coagulation. Process Safety and Environmental Protection 88: 276–284.
- Zong, P. W., Zhe, Z., Yue, J. L., Nan, S. D., Tao, T. and Kui, Z. 2002. Landfill leachate treatment by a coagulation–photooxidation process. Journal of Hazardous Materials 95: 153–159.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
วิธีวิเคราะห์สี

สี (Color)

สีในน้ำอาจเป็นผลมาจากไอออนของโลหะ เช่น เหล็ก แมงกานีส เป็นต้น ซากพืชซากสัตว์และของเสียในโรงงานอุตสาหกรรม ในการนำน้ำไปใช้ทั้งในระดับอุตสาหกรรมและการผลิต ต้มน้ำประปา นั้นต้องเป็นน้ำที่มีสีไม่เป็นที่พึงรังเกียจ ส่วนน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ต้องกำจัดสีให้ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ ซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ของระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม ด้วย ตามมาตรฐานของการบำบัดน้ำเสีย ความหมายของสีจะเป็นความหมายเดียวกับ Color หรือ True color ซึ่งหมายถึงสีของน้ำที่กำจัดความขุ่นออกไปแล้ว ขณะที่ Apparent color หมายถึงสีของน้ำที่มีสารแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ ในกรณีของน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีสีพบว่าสีจะกระจายอยู่ทั่วไปในรูปของคอลลอยด์ หรือสารแขวนลอย ซึ่งกรณีนี้จะทำให้ True color ต่างจาก Apparent color ชัดเจน ในการวิเคราะห์สีมีหลายวิธีให้เลือกแล้วแต่ความเหมาะสมซึ่งขึ้นกับคุณลักษณะของน้ำเสีย Visual comparison method วิธีนี้เป็นการวิเคราะห์สีโดยการเปรียบเทียบสีของน้ำตัวอย่าง

Visual comparison method วิธีนี้เป็นการวิเคราะห์สีโดยการเปรียบเทียบสีของน้ำตัวอย่างกับสีของสารละลายมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้น สารละลายมาตรฐานที่ใช้คือ โพแทสเซียมคลอโรแพลทินेट วิธีนี้ควรใช้กับน้ำที่มีสีตามธรรมชาติ หรือน้ำดื่ม ไม่ควรใช้กับน้ำที่มีสีเข้ม เช่น น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

Spectrophotometric method วิธีนี้เป็นการวิเคราะห์สีของน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรองแล้ว เพื่อหา True color โดยใช้ Spectrophotometer ในการวิเคราะห์สีที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับน้ำตัวอย่างนั้นๆ อยู่ในรูปของ %transmittance ซึ่งใช้น้ำกลั่นเป็น blank วิธีนี้สามารถใช้กับน้ำดื่ม น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และน้ำเสียจากชุมชน

Tristimulus filter method วิธีนี้เป็นการวิเคราะห์สีของน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรองแล้วเพื่อหา True colour โดยใช้ filter photometer ในการวิเคราะห์สี ซึ่งใช้น้ำกลั่นเป็น blank วิธีนี้สามารถใช้กับน้ำดื่ม น้ำเสียจากชุมชน และ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

ADMI tristimulus filter method (proposed) วิธีนี้เป็นการวิเคราะห์สีของน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรองแล้วเพื่อหา True color โดยการวิเคราะห์สีเพื่อเปรียบเทียบสีของน้ำตัวอย่างกับสีของสารละลายมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นด้วย filter photometer วิธีนี้สามารถใช้กับน้ำที่มีสีไม่แตกต่างจากสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมคลอโรแพลทินेटและน้ำเสียที่มีสีคล้ายกับสารละลายมาตรฐาน

การวิเคราะห์สี

วิเคราะห์สีตาม standard method of water and wastewater treatment (1995) โดยวิเคราะห์น้ำเสียที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างแล้วด้วยเครื่อง spectrophotometer (Hach) ที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร ซึ่งวิธีการหาความยาวคลื่นเพื่อวิเคราะห์สีมีดังนี้

นำน้ำเสียตัวอย่างมาวิเคราะห์หา %transmittance ที่แต่ละความยาวคลื่นตามตารางที่ ก.1 ด้วยเครื่อง spectrophotometer ในกรณีที่ต้องการความแม่นยำมากในการหาความยาวคลื่น ต้องทำการวิเคราะห์ %transmittance ทั้งหมด 30 ลำดับ แต่ถ้าต้องการหาความยาวคลื่นที่พอใช้งานได้ สามารถวิเคราะห์ %transmittance เพียง 10 ลำดับ คือ ลำดับที่ 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23, 26 และ 29 เมื่อวิเคราะห์ %Transmittance ของน้ำเสียตัวอย่างแล้วให้ทำตาราง %transmittance ที่สอดคล้องกับความยาวคลื่นของตารางที่ ก-1 หาผลรวมของ %transmittance ในแต่ละสดมภ์ของ X, Y และ Z จากนั้นนำผลรวมแต่ละสดมภ์คูณด้วยผลคูณที่เหมาะสม (สำหรับ 10 ลำดับ หรือ 30 ลำดับ) ดังแสดงที่ท้ายตาราง ก-1 ผลลัพธ์ที่ได้เรียกว่า tristimulus value X, tristimulus value Y และ tristimulus value Z จากนั้นคำนวณค่า trichromatic coefficient x,y จาก tristimulus value X, Y และ Z โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \qquad y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

เมื่อได้ค่า Trichromatic coefficient x,y แล้ว นำไปกำหนดจุด (x,y) ใน Chromaticity diagrams ดังรูปที่ ก-1 เพื่อหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับน้ำเสียตัวอย่าง นอกจากนี้สามารถหาสีจากค่าความยาวคลื่นที่ได้โดยใช้ตารางที่ ก-2

ตาราง ก-1 ลำดับของความยาวคลื่นที่ใช้หาความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับน้ำตัวอย่างด้วยเครื่อง Spectrophotometer

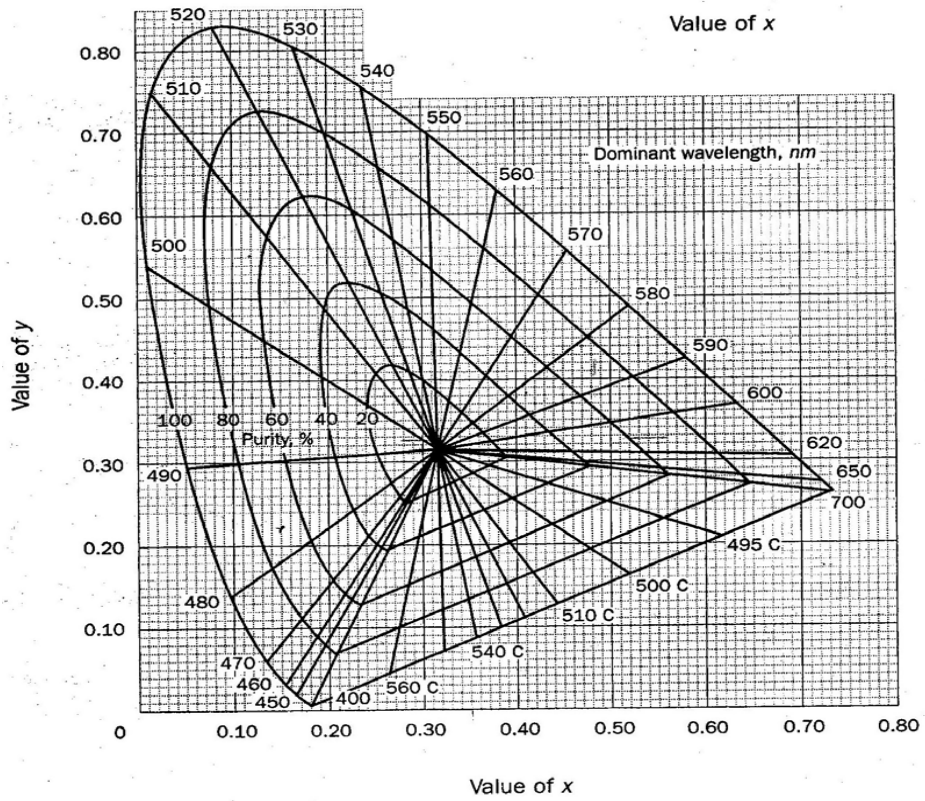
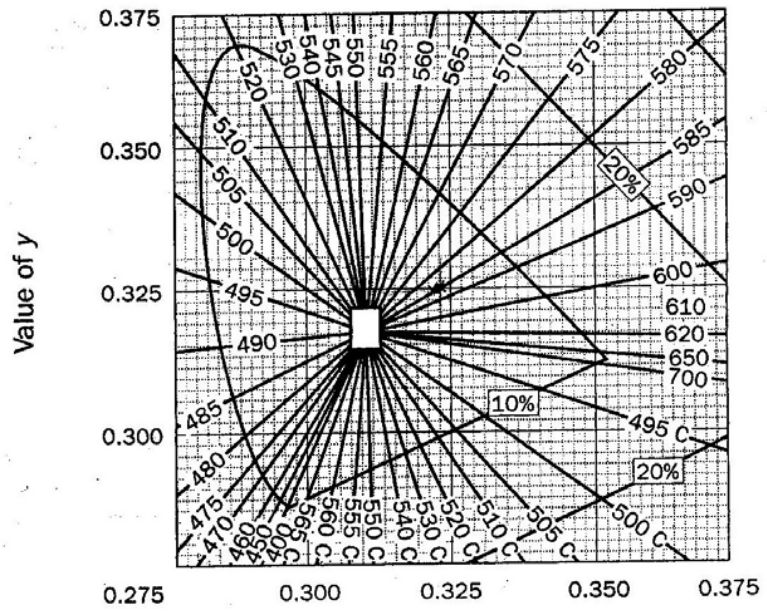
ลำดับที่	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)		
	X	Y	Z
1	424.4	465.9	414.1
2	435.5	489.5	422.2
3	443.9	500.4	426.3
4	452.1	508.7	429.4
5	461.2	515.2	432.0
6	474.0	520.6	434.3
7	531.2	525.4	436.5
8	544.3	529.8	438.6
9	552.4	533.9	440.6
10	558.7	537.7	442.5
11	564.1	541.4	444.4
12	568.9	544.9	446.3
13	573.2	548.4	448.2
14	577.4	551.8	450.1
15	581.3	555.1	452.1
16	585.0	558.5	454.0
17	588.7	561.9	455.9
18	592.4	565.3	457.9
19	596.0	568.9	459.9
20	599.6	572.5	462.0
21	603.3	576.4	464.1
22	607.0	580.4	466.3
23	610.9	584.8	468.7
24	615.0	589.6	471.4
25	619.4	594.8	474.3
26	624.2	600.8	477.7
27	629.8	607.7	481.8
28	636.6	616.1	487.2
29	645.9	627.3	495.2
30	663.0	647.4	511.2

หมายเหตุ:

แฟคเตอร์	X	Y	Z
เมื่อวิเคราะห์ทั้งหมด 30 ลำดับ	0.03269	0.03333	0.03938
เมื่อวิเคราะห์ทั้งหมด 10 ลำดับ	0.09806	0.10000	0.11814

ตาราง ก-2 สีที่สอดคล้องกับช่วงความยาวคลื่นต่างๆ

ช่วงความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	สี
400-465	ม่วง
465-482	น้ำเงิน
482-497	น้ำเงินแกมเขียว
497-530	เขียว
530-575	เขียวแกมเหลือง
575-580	เหลือง
580-587	เหลืองแกมส้ม
587-598	ส้ม
598-620	ส้มแกมแดง
620-700	แดง



รูป n-1 chromaticity diagram

ตารางที่ ก-3 %transmittance 30 ลำดับ ของน้ำชะขยะ ณ ความยาวคลื่นตามตารางที่ ก-1

ลำดับที่	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)		
	X	Y	Z
1	0.307	1.621	0.171
2	0.538	2.774	0.273
3	0.767	3.320	0.341
4	1.078	3.714	0.400
5	1.442	4.066	0.467
6	2.047	4.315	0.516
7	4.856	4.596	0.566
8	5.502	4.755	0.617
9	6.001	4.957	0.679
10	6.230	5.152	0.733
11	6.541	5.366	0.800
12	4.645	5.546	0.866
13	7.100	5.690	0.931
14	7.278	5.930	1.003
15	7.774	6.283	1.078
16	7.614	6.210	1.149
17	7.774	6.406	1.192
18	7.997	4.617	1.277
19	8.229	4.645	1.362
20	8.348	7.061	1.485
21	8.565	7.255	1.575
22	8.810	7.381	1.667
23	9.048	7.584	1.756
24	9.252	7.828	1.901
25	9.430	8.114	2.047
26	9.702	8.421	2.189
27	10.082	8.867	2.381
28	10.294	9.330	2.678
29	10.769	9.865	3.070
30	10.956	10.883	3.866

เมื่อนำมาคำนวณได้ผลดังนี้

%Transmittance	X	Y	Z
ผลรวม	198.976	182.552	39.036
แฟคเตอร์	0.03269	0.03333	0.03938
ผลคูณ	6.504525	6.084458	1.537238
X+Y+Z	14.12622128		

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} = \frac{6.504525}{14.12622128} = 0.460458$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} = \frac{6.084458}{14.12622128} = 0.430721$$

ดังนั้น $(x,y) = (0.460458, 0.430721)$ นำไปกำหนดจุดใน chromaticity diagram ดังรูปที่ ก-1 จะได้ช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสม คือ 580 นาโนเมตร

ภาคผนวก ข.

การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยวิธี Oxidation with Potassium Permanganate (Vogel, 1989)

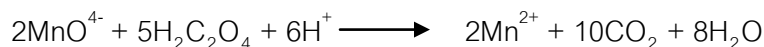
วิธีเตรียม 0.06 M KMnO_4

- ชั่ง KMnO_4 ประมาณ 9.4818 g ใส่ในบีกเกอร์ 1000 ml
- เติมน้ำกลั่น 1 L ปิดฝาครอบทันที และต้มประมาณ 15-30 นาที และวางทิ้งไว้ให้เย็นและนำไปกรอง เก็บใส่ขวดสีชา

วิธีหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย Permanganate (with sodium oxalate)

- ชั่ง sodium oxalate (อบแห้งที่ 105-110 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง) 0.3 g ในบีกเกอร์ 600 ml
- เติมน้ำกลั่น 240 ml และ conc. sulfuric 12.5 ml (หรือ 1 M sulfuric 250 ml) ทิ้งให้เย็นและคนจน oxalate ละลายหมด
- ไทเทรตกับ 0.06 M KMnO_4 พร้อมทั้ง stirrer และให้ความร้อน 55-60 °C
- ไทเทรตจนกระทั่งเกิดสีชมพูประมาณ 30 วินาที

คำนวณจากสมการ



วิเคราะห์ปริมาณ Hydrogen peroxide

Interference: organic matter

- นำ 3 ml ของ 30% wt. Hydrogen peroxide มาใส่ขวดวัดปริมาตร 250 ml และปรับปริมาตร
- ปิเปตมา 25 ml ใส่ flask และเติมน้ำกลั่น 200 ml ตามด้วย H_2SO_4 (1:5) 20 ml
- ไทเทรตกับ 0.06 M KMnO_4 จนเป็นสีชมพู

คำนวณ

$$1 \text{ ml. N- } \text{KMnO}_4 = 0.01701 \text{ g. H}_2\text{O}_2$$

$$\text{หรือ } \% \text{ H}_2\text{O}_2 \text{ (wt.)} = \frac{\text{ml. KMnO}_4 \times \text{N- KMnO}_4 \times 0.01701 \times 1000}{\text{Grams of H}_2\text{O}_2 \text{ sample used}}$$

การหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงค้างด้วยวิธี Standard Iodometric Method
(Kingzett, 1880 ; Kolthoff, 1920)

วิธีหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย Sodium Thiosulfate

- ชั่ง KI 2 g ใส่ใน flask ขนาด 250 ml เติมน้ำกลั่นจนถึง 100 ml
- เติม 0.025 N $K_2Cr_2O_7$ 10 ml และ H_2SO_4 (1+9) 10 ml
- ทิ้งไว้ในที่มืด 5 นาที
- เติมน้ำกลั่นให้ถึง 200 ml
- ไทเทรตกับ 0.025 N $Na_2S_2O_3$ จนได้สีเหลืองอ่อน หยดน้ำแบ่ง 2 ml จะเป็นสีน้ำเงิน
- ไทเทรตต่อจนสีน้ำเงินหายไป

คำนวณ

$$N- Na_2S_2O_3 = \frac{10 \times 0.025}{\text{ml of } Na_2S_2O_3 \text{ for standardization}}$$

วิเคราะห์ปริมาณ Hydrogen peroxide

- นำตัวอย่างใส่ flask ขนาด 250 ml
- เติมน้ำกลั่นจนได้ 50 ml จากนั้นเติมน้ำ H_2SO_4 (1:4) 10 ml และ 1% KI 15 ml ตามด้วยแอมโมเนียมโมลิบเดต 2 หยด
- ไทเทรตกับ 0.025 N Sodium Thiosulfate จนเป็นสีฟางข้าว
- เติมน้ำแบ่ง 2 ml และทำต่อจนสีน้ำเงินหายไป
- ทำซ้ำและทำแบลนด์

คำนวณ

$$H_2O_2 \text{ (mg/l)} = \frac{(A-B) \times N- Na_2S_2O_3 \times 17.01 \times 1000}{\text{ml of } H_2O_2 \text{ sample used}}$$

หรือ

$$\% H_2O_2 \text{ (wt.)} = \frac{(A-B) \times N- Na_2S_2O_3 \times 1.7}{\text{Grams of } H_2O_2 \text{ sample used}}$$

ภาคผนวก ค.

มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมภายในนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด

มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมภายในนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด

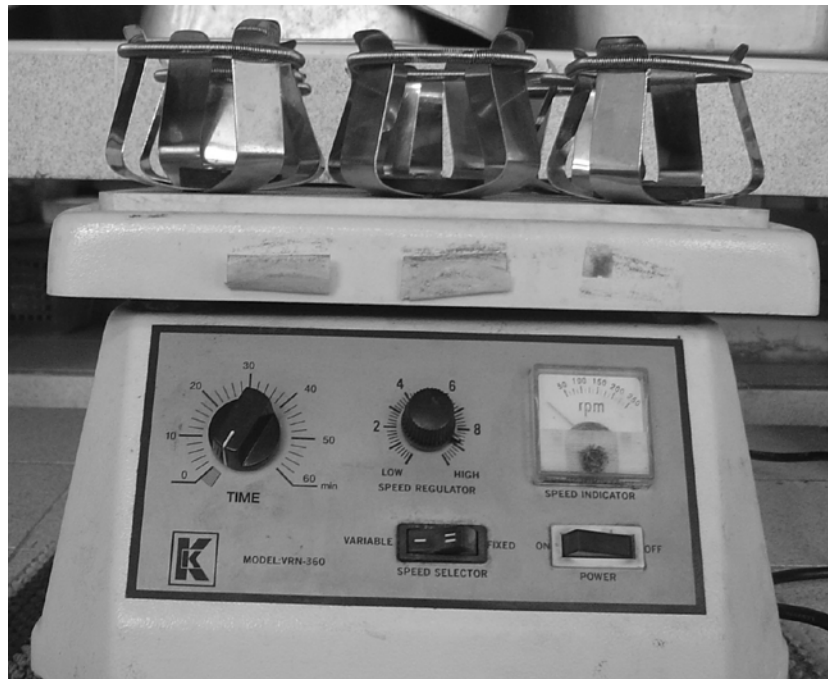
ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมให้ระบายได้	
		ระบบรวบรวมน้ำเสีย ส่วนกลาง	แหล่งน้ำสาธารณะ/รางระบาย น้ำฝน
BOD	มิลลิกรัม/ลิตร	500	20
COD	มิลลิกรัม/ลิตร	750	120
TDS	มิลลิกรัม/ลิตร	3,000	3,000
TKN	มิลลิกรัม/ลิตร	100	100
pH	-	5.5-9.0	5.5-9.0
Hg	มิลลิกรัม/ลิตร	0.005	0.005
Cd	มิลลิกรัม/ลิตร	0.03	0.03
As	มิลลิกรัม/ลิตร	0.25	0.25
Cr ³⁺	มิลลิกรัม/ลิตร	0.75	0.75
Cr ⁶⁺	มิลลิกรัม/ลิตร	0.25	0.25
Cu	มิลลิกรัม/ลิตร	2.0	2.0
Temp.	°C	45	40
Color	-	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ

ที่มา: ประกาศการนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย (2541)

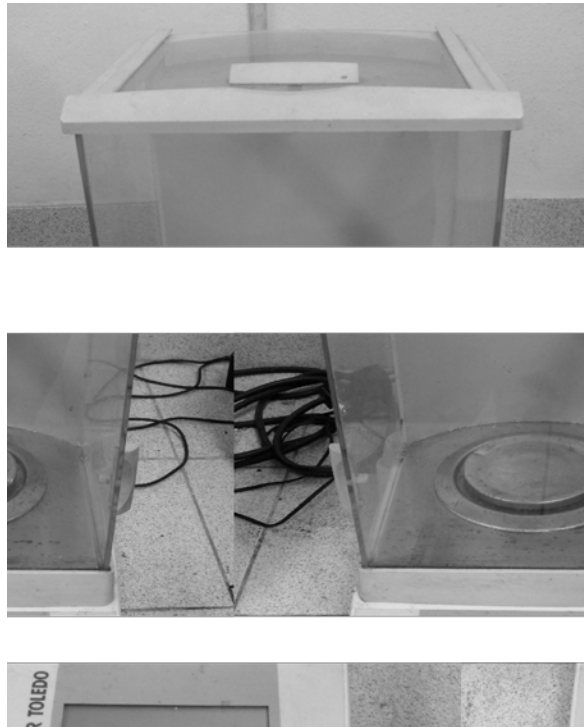
ภาคผนวก ง
ภาพถ่ายอุปกรณ์บางอย่างที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพที่ ง-1 เครื่องทดสอบการตกตะกอน (Jar test) รุ่น FC 6S ของ VELP scientific



ภาพที่ ง-2 เครื่องเขย่าที่ปรับความเร็วรอบได้



ภาพที่ ง-3 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง รุ่น AB204-S ของ Mettler Toledo



ภาพที่ ง-4 ตู้อบความร้อน ยี่ห้อ Binder ของ Scientific Promotion



ภาพที่ ง-5 ซีโอดีที่ใช้ในการทดลอง

ภาคผนวก จ
ผลการรวมตะกอนน้ำชะขยะด้วยเฟอริกคลอไรด์

ตารางที่ ๑-1 ผลการรวมตะกอนน้ำชะขยะด้วยเพอริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้น เพอริก คลอไรด์ (มล.)	ค่า pH เริ่มต้น	ค่า pH หลังการตกตะกอน			เฉลี่ย	ค่า COD น้ำชะขยะ (มก./ล.)			เฉลี่ย	ค่า COD น้ำชะขยะหลังการ ตกตะกอน (มก./ล.)			เฉลี่ย	ประสิทธิภาพในการลด COD (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
		100	8.86	8.78		8.77	8.77	8.77		44,588	43,476	42,397		
200	8.86	8.74	8.75	8.74	8.74	44,588	43,476	42,397	43,478	40,130	38,976	35,776	38,294	11.92
300	8.86	8.77	8.78	8.77	8.77	44,588	43,476	42,397	43,478	31,768	35,985	33,305	33,686	22.52
400	8.86	8.77	8.76	8.76	8.76	44,588	43,476	42,397	43,478	31,123	32,678	34,665	32822	24.51
500	8.86	8.72	8.73	8.72	8.72	44,588	43,476	42,397	43,478	24,986	26,102	29,234	26,774	38.42
600	8.86	8.72	8.72	8.73	8.72	44,588	43,476	42,397	43,478	29,183	28,083	29,104	28,790	33.78
700	8.86	8.69	8.68	8.68	8.68	44,588	43,476	42,397	43,478	23,975	23,873	24,694	24,182	44.38
800	8.86	8.66	8.67	8.66	8.66	44,588	43,476	42,397	43,478	28,425	27,672	30,273	28,790	33.78
900	8.86	8.61	8.62	8.61	8.61	44,588	43,476	42,397	43,478	23,985	24,981	22,716	23,894	45.04
1000	8.86	8.63	8.62	8.62	8.62	44,588	43,476	42,397	43,478	27,321	28,467	27,990	27,926	35.77

ตารางที่ ๑-1 ผลการรวมตะกอนน้ำชะขยะด้วยเฟอริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ต่อ)

ปริมาณเฟอริกคลอไรด์ (มล.)	ค่าการดูดกลืนแสงก่อนการรวมตะกอน			เฉลี่ย	ค่าการดูดกลืนแสงหลังการรวมตะกอน			เฉลี่ย	ร้อยละการบำบัดสี
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
100	1.121	1.132	1.115	1.123	0.263	0.281	0.270	0.271	75.83
200	1.121	1.132	1.115	1.123	0.243	0.226	0.246	0.238	78.80
300	1.121	1.132	1.115	1.123	0.247	0.259	0.244	0.250	77.74
400	1.121	1.132	1.115	1.123	0.209	0.218	0.180	0.202	81.98
500	1.121	1.132	1.115	1.123	0.199	0.191	0.207	0.199	82.27
600	1.121	1.132	1.115	1.123	0.153	0.152	0.140	0.148	86.80
700	1.121	1.132	1.115	1.123	0.135	0.146	0.123	0.135	87.99
800	1.121	1.132	1.115	1.123	0.146	0.134	0.140	0.140	87.53
900	1.121	1.132	1.115	1.123	0.096	0.102	0.098	0.098	91.23
1000	1.121	1.132	1.115	1.123	0.118	0.113	0.119	0.117	89.61

ตารางที่ ๑-2 ผลการรวมตะกอนน้ำชะขยะด้วยเพอริกคลอไรด์ที่พีเอชต่างๆ

ค่า pH ก่อน	ค่า pH หลังการตกตะกอน			เฉลี่ย	ความเข้มข้น เพอริกคลอไรด์ (มล.)	ค่า COD น้ำชะขยะ (มก./ล.)			เฉลี่ย	ค่า COD น้ำชะขยะ หลังการตกตะกอน (มก./ล.)			เฉลี่ย	ประสิทธิภาพ ในการลด COD (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
8.86	8.86	8.85	8.86	8.86	700	44,561	43,476	42,397	43,478	-	-	-	-	-
1	1.37	1.35	1.38	1.37	700	44,561	43,476	42,397	43,478	17,237	18,346	15,768	17,117	60.63
2	2.21	2.24	2.23	2.23	700	44,561	43,476	42,397	43,478	18,645	14,267	19,341	17,418	59.94
3	3.20	3.22	3.21	3.21	700	44,561	43,476	42,397	43,478	17,321	18,346	18,389	18,019	58.56
4	4.18	4.17	4.18	4.18	700	44,561	43,476	42,397	43,478	18,453	17,653	21,555	19,220	55.79
5	5.22	5.24	5.23	5.23	700	44,561	43,476	42,397	43,478	25,645	24,231	29,420	26,432	39.21
6	6.17	6.18	6.18	6.18	700	44,561	43,476	42,397	43,478	29,534	27,924	28,148	28,535	34.37
7	7.21	7.21	7.2	7.21	700	44,561	43,476	42,397	43,478	26,021	26,998	22,051	25,023	42.45
8	8.15	8.15	8.14	8.15	700	44,561	43,476	42,397	43,478	24,045	23,098	25,828	24,324	44.05
9	9.21	9.21	9.22	9.21	700	44,561	43,476	42,397	43,478	24,423	23,521	22,337	23,427	46.12

ตารางที่ ๑-2 ผลการรวมตะกอนน้ำชะขยะด้วยเฟอริกคลอไรด์ที่พีเอชต่างๆ (ต่อ)

ค่า pH ก่อน	ค่าการดูดกลืนแสงก่อนการรวมตะกอน			เฉลี่ย	ค่าการดูดกลืนแสงหลังการรวมตะกอน			เฉลี่ย	ร้อยละการบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
8.86	1.121	1.132	1.115	1.123	1.121	1.132	1.115	1.123	0
1	1.121	1.132	1.115	1.123	0.291	0.297	0.312	0.300	73.27
2	1.121	1.132	1.115	1.123	0.255	0.267	0.229	0.250	77.71
3	1.121	1.132	1.115	1.123	0.410	0.426	0.391	0.409	63.57
4	1.121	1.132	1.115	1.123	0.550	0.547	0.543	0.546	51.32
5	1.121	1.132	1.115	1.123	0.985	0.941	0.994	0.974	13.28
6	1.121	1.132	1.115	1.123	0.616	0.629	0.588	0.611	45.59
7	1.121	1.132	1.115	1.123	0.503	0.489	0.487	0.493	56.10
8	1.121	1.132	1.115	1.123	0.375	0.386	0.350	0.370	67.04
9	1.121	1.132	1.115	1.123	0.199	0.207	0.185	0.197	82.44

ภาคผนวก จ.

ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจของซีอีโอ

ตารางที่ จ-1 ผลการดูดซับน้ำชะขยะที่ผ่านการรวมตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์ที่ปริมาณซีโอไลต์ต่างๆ

ปริมาณซีโอไลต์	ค่า pH เริ่มต้น	ค่า pH หลังการดูดซับ			เฉลี่ย	ค่า COD น้ำชะขยะ (มก./ล.)			เฉลี่ย	ค่า COD น้ำชะขยะหลังการดูดซับ (มก./ล.)			เฉลี่ย	ประสิทธิภาพในการลด COD (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
		1	2	3		1	2	3		1	2	3		
1	4.18	4.18	4.18	4.19	4.18	19,389	18,593	19,678	19,220	16,100	17,120	19,828	17,683	8.00
2	4.18	4.19	4.20	4.20	4.20	19,389	18,593	19,678	19,220	18,130	17,976	17,552	17,886	6.94
3	4.18	4.20	4.20	4.20	4.20	19,389	18,593	19,678	19,220	19,768	16,985	16,452	17,735	7.73
4	4.18	4.22	4.21	4.22	4.22	19,389	18,593	19,678	19,220	16,123	16,678	19,465	17,422	9.36
5	4.18	4.23	4.22	4.23	4.23	19,389	18,593	19,678	19,220	16,986	15,102	19,521	17,203	10.50
7	4.18	4.25	4.26	4.26	4.26	19,389	18,593	19,678	19,220	16,783	15,983	18,162	16,976	11.68
9	4.18	4.29	4.28	4.29	4.29	19,389	18,593	19,678	19,220	15,975	15,873	16,117	15,988	16.81
11	4.18	4.32	4.31	4.32	4.32	19,389	18,593	19,678	19,220	16,025	15,672	18,964	16,887	12.14
13	4.18	4.32	4.32	4.33	4.32	19,389	18,593	19,678	19,220	17,985	16,981	17,966	17,644	8.20

ตารางที่ จ-1 ผลการดูดติดฝัมน้ำชะขยะที่ผ่านการรวมตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์ที่ปริมาณซีโอไลต์ต่างๆ (ต่อ)

ปริมาณซีโอไลต์	ค่าการดูดกลืนแสงก่อนการดูดติดฝัม			เฉลี่ย	ค่าการดูดกลืนแสงหลังการดูดติดฝัม			เฉลี่ย	ร้อยละการบำบัดสี
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	0.545	0.530	0.564	0.546	0.586	0.603	0.624	0.604	-10.60
2	0.545	0.530	0.564	0.546	0.457	0.460	0.423	0.447	18.27
3	0.545	0.530	0.564	0.546	0.260	0.252	0.237	0.250	54.28
4	0.545	0.530	0.564	0.546	0.181	0.161	0.201	0.181	66.87
5	0.545	0.530	0.564	0.546	0.195	0.193	0.210	0.199	63.53
7	0.545	0.530	0.564	0.546	0.223	0.230	0.230	0.228	58.31
9	0.545	0.530	0.564	0.546	0.131	0.136	0.137	0.135	75.36
11	0.545	0.530	0.564	0.546	0.213	0.201	0.223	0.212	61.21
13	0.545	0.530	0.564	0.546	0.182	0.186	0.192	0.186	65.90

ตารางที่ จ-2 ผลการดูดติดินน้ำชะขยะที่ผ่านการรวมตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์ที่พีเอชต่างๆ

ค่า pH ก่อน	ค่า pH หลังการ ตกตะกอน			เฉลี่ย	ปริมาณ ซีโอไลท์ (กรัม)	ค่า COD น้ำชะขยะก่อน การดูดติดิน (มก./ล.)			เฉลี่ย	ค่า COD น้ำชะขยะหลัง การดูดติดิน (มก./ล.)			เฉลี่ย	ประสิทธิภาพ ในการลด COD (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	9	19,389	18,593	19,678	19,220	-	-	-	-	-
4	4.10	4.11	4.10	4.10	9	19,389	18,593	19,678	19,220	15,689	16,213	15,653	15,852	17.53
5	5.41	5.40	5.40	5.40	9	19,389	18,593	19,678	19,220	16,987	16,543	15,469	16,333	15.02
6	6.19	6.2	6.19	6.19	9	19,389	18,593	19,678	19,220	15,632	15,432	15,048	15,371	20.03
7	7.38	7.38	7.37	7.38	9	19,389	18,593	19,678	19,220	17,987	17,908	17,435	17,777	7.51

ตารางที่ จ-2 ผลการดูดติดินน้ำชะขยะที่ผ่านการรวมตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์ที่พีเอชต่างๆ (ต่อ)

ค่า pH ก่อน	ค่าการดูดกลืนแสงก่อนการดูดติดิน			เฉลี่ย	ค่าการดูดกลืนแสงหลังการดูดติดิน			เฉลี่ย	ร้อยละการบำบัดสี
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
4.18	0.545	0.530	0.564	0.546	-	-	-	-	-
4	0.545	0.530	0.564	0.546	0.086	0.087	0.088	0.087	84.07
5	0.545	0.530	0.564	0.546	0.110	0.108	0.118	0.112	79.49
6	0.545	0.530	0.564	0.546	0.235	0.233	0.240	0.236	56.80
7	0.545	0.530	0.564	0.546	0.131	0.126	0.137	0.131	76.04

ตารางที่ จ-3 ผลการดูดติดินน้ำชะขยะที่ผ่านการรวมตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์ที่เวลาต่างๆ

เวลา	ค่า pH เริ่มต้น	ค่า pH หลังการตกตะกอน			เฉลี่ย	ค่า COD น้ำชะขยะ (มก./ล.)			เฉลี่ย	ค่า COD น้ำชะขยะหลังการตกตะกอน (มก./ล.)			เฉลี่ย	ประสิทธิภาพในการลด COD (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
5	4	4.25	4.34	4.25	4.28	19,389	18,593	19,678	19,220	18,765	18,909	18,377	18,684	2.79
10	4	4.25	4.21	4.32	4.26	19,389	18,593	19,678	19,220	18,786	18,746	19,406	18,979	1.25
20	4	4.09	4.21	4.45	4.25	19,389	18,593	19,678	19,220	18,653	18,753	18,645	18,684	2.79
30	4	4.23	4.21	4.37	4.27	19,389	18,593	19,678	19,220	19,365	19,423	18,293	19,027	1.01
60	4	4.32	4.23	4.23	4.26	19,389	18,593	19,678	19,220	17,897	17,654	17,500	17,684	7.99
90	4	4.21	4.25	4.32	4.26	19,389	18,593	19,678	19,220	15,643	15,098	16,564	15,768	17.96
120	4	4.26	4.27	4.28	4.27	19,389	18,593	19,678	19,220	15,987	15,987	15,954	15,976	16.88
150	4	4.24	4.26	4.28	4.26	19,389	18,593	19,678	19,220	16,764	16,876	16,688	16,776	12.72
180	4	4.26	4.27	4.31	4.28	19,389	18,593	19,678	19,220	16,786	16,987	16,769	16,847	12.34
240	4	4.24	4.25	4.26	4.25	19,389	18,593	19,678	19,220	17,098	17,987	16,102	17,062	11.23
300	4	4.15	4.16	4.17	4.16	19,389	18,593	19,678	19,220	18,432	18,675	17,058	18,055	6.06
900	4	4.16	4.17	4.21	4.18	19,389	18,593	19,678	19,220	18,765	18,909	18,350	18,547	3.50
1440	4	4.23	4.22	4.18	4.21	19,389	18,593	19,678	19,220	19,231	19,756	18,155	19,047	0.90

ตารางที่ ๑-3 ผลการดูดซับอินทรีย์ที่ผ่านการรวมตะกอนด้วยเพอริกคลอไรด์ที่เวลาต่างๆ (ต่อ)

เวลา	ค่าการดูดกลืนแสงก่อนการดูดซับอินทรีย์			เฉลี่ย	ค่าการดูดกลืนแสงหลังการดูดซับอินทรีย์			เฉลี่ย	ร้อยละการบำบัดดี
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	0.545	0.530	0.564	0.546	-	-	-	-	-
5	0.545	0.530	0.564	0.546	0.486	0.493	0.491	0.490	10.30
10	0.545	0.530	0.564	0.546	0.100	0.101	0.092	0.098	82.15
20	0.545	0.530	0.564	0.546	0.081	0.080	0.082	0.081	85.19
30	0.545	0.530	0.564	0.546	0.068	0.068	0.070	0.069	87.41
60	0.545	0.530	0.564	0.546	0.165	0.165	0.157	0.162	70.29
90	0.545	0.530	0.564	0.546	0.078	0.079	0.077	0.078	85.70
120	0.545	0.530	0.564	0.546	0.067	0.067	0.068	0.067	87.73
150	0.545	0.530	0.564	0.546	0.082	0.084	0.089	0.085	84.44
180	0.545	0.530	0.564	0.546	0.369	0.371	0.375	0.372	32.01
240	0.545	0.530	0.564	0.546	0.077	0.078	0.078	0.078	85.81
300	0.545	0.530	0.564	0.546	0.068	0.066	0.069	0.068	87.62
900	0.545	0.530	0.564	0.546	0.088	0.090	0.091	0.090	83.58
1440	0.545	0.530	0.564	0.546	0.084	0.082	0.088	0.084	84.55

ภาคผนวก ช.
ผลการศึกษาไอโซเทอม

ตารางที่ ข-1 ผลการหาไอโซเทอมที่มีปริมาณซีโอไลต์ต่างๆ

ปริมาณซีโอไลต์	ค่า pH เริ่มต้น	ค่า pH หลังการตกตะกอน			เฉลี่ย	ค่า COD น้ำชะขยะ (มก./ล.)			เฉลี่ย	ค่า COD น้ำชะขยะหลังการตกตะกอน (มก./ล.)			เฉลี่ย	ประสิทธิภาพในการลด COD (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
		1	2	3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	4.18	4.18	4.18	4.19	4.18	19,389	19,593	20,967	19,983	19,100	17,120	20,158	18,793	5.96
2	4.18	4.19	4.20	4.20	4.20	19,389	19,593	20,967	19,983	18,130	17,976	19,682	18,596	6.94
3	4.18	4.20	4.20	4.20	4.20	19,389	19,593	20,967	19,983	19,768	16,985	17,982	18,245	8.70
4	4.18	4.22	4.21	4.22	4.22	19,389	19,593	20,967	19,983	16,123	16,678	22,195	18,332	8.26
5	4.18	4.23	4.22	4.23	4.23	19,389	19,593	20,967	19,983	16,986	15,102	23,151	18,413	7.86
7	4.18	4.25	4.26	4.26	4.26	19,389	19,593	20,967	19,983	16,783	15,983	21,192	17,986	9.99
9	4.18	4.29	4.28	4.29	4.29	19,389	19,593	20,967	19,983	15,975	15,873	21,847	17,898	10.43
11	4.18	4.32	4.31	4.32	4.32	19,389	19,593	20,967	19,983	16,025	15,672	20,665	17,454	12.66
13	4.18	4.32	4.32	4.33	4.32	19,389	19,593	20,967	19,983	17,985	16,981	16,535	17,167	14.09

ภาคผนวก ซ.

ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับเฟอร์รัสซัลเฟต

ตารางที่ ข-1 ผลการหาปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เบื้องต้น

ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (กรัม/ลิตร)	ค่า pH เริ่มต้น	ค่า pH หลังการออกซิเดชัน			เฉลี่ย	ค่า COD น้ำชะขยะก่อนการออกซิเดชัน (มก./ล.)			เฉลี่ย	ค่า COD น้ำชะขยะหลังการออกซิเดชัน (มก./ล.)			เฉลี่ย	ประสิทธิภาพในการลด COD (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
		1	2	3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	4.26	4.26	4.27	4.26	4.26	15,389	15,593	16322	15768	-	-	-	-	-
10	4.26	4.20	4.19	4.19	4.19	15,389	15,593	16322	15768	15,130	14,976	15,504	15203	3.58
30	4.26	4.19	4.18	4.19	4.19	15,389	15,593	16322	15768	14,768	15,985	14,455	15069	4.43
50	4.26	4.18	4.17	4.17	4.17	15,389	15,593	16322	15768	15,123	14,678	15,437	15079	4.37
100	4.26	4.13	4.12	4.13	4.13	15,389	15,593	16322	15768	15,986	14,102	14,901	14996	4.89
150	4.26	4.08	4.08	4.09	4.08	15,389	15,593	16322	15768	15,783	13,983	15,034	14933	5.29
200	4.26	4.02	4.02	4.03	4.02	15,389	15,593	16322	15768	15,075	15,873	14,533	15160	3.85

ตารางที่ ข-1 ผลการหาปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เบื้องต้น (ต่อ)

ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (กรัม/ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสงก่อนการออกซิเดชัน			เฉลี่ย	ค่าการดูดกลืนแสงหลังการออกซิเดชัน			เฉลี่ย	ร้อยละการบำบัดสี
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	0.078	0.070	0.086	0.078	-	-	-	-	-
10	0.078	0.070	0.086	0.078	0.041	0.038	0.039	0.039	49.53
30	0.078	0.070	0.086	0.078	0.022	0.018	0.048	0.029	62.48
50	0.078	0.070	0.086	0.078	0.022	0.018	0.030	0.023	70.13
100	0.078	0.070	0.086	0.078	0.023	0.022	0.001	0.015	80.55
150	0.078	0.070	0.086	0.078	0.023	0.018	0.014	0.019	76.25
200	0.078	0.070	0.086	0.078	0.018	0.022	0.026	0.022	71.84

ตารางที่ ข-2 ผลการหาค่าพีเอช (pH) ที่เหมาะสม

pH	ค่า pH หลังการออกซิเดชัน			เฉลี่ย	ค่า COD น้ำชะขยะก่อนการออกซิเดชัน (มก./ล.)			เฉลี่ย	ค่า COD น้ำชะขยะหลังการออกซิเดชัน (มก./ล.)			เฉลี่ย	ประสิทธิภาพในการลด COD (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
3	2.82	2.82	2.83	2.82	15,389	15,593	16,322	15,768	15,100	15,120	15,119	15,113	4.15
4	3.74	3.75	3.75	3.75	15,389	15,593	16,322	15,768	14,130	15,976	14,964	15,023	4.72
5	4.70	4.70	4.69	4.70	15,389	15,593	16,322	15,768	14,768	15,985	14,857	15,203	3.58
6	5.53	5.54	5.53	5.53	15,389	15,593	16,322	15,768	15,123	16,678	13,407	15,069	4.43
7	5.91	5.90	5.90	5.90	15,389	15,593	16,322	15,768	15,986	15,102	14,150	15,079	4.37
8	6.40	6.42	6.40	6.40	15,389	15,593	16,322	15,768	15,783	15,983	15,743	15,836	-0.43
9	8.42	8.42	8.41	8.42	15,389	15,593	16,322	15,768	15,975	15,873	15,516	15,788	-0.13
10	9.41	9.42	9.41	9.41	15,389	15,593	16,322	15,768	16,025	15,672	15,814	15,837	-0.44
11	9.95	9.95	9.96	9.95	15,389	15,593	16,322	15,768	15,985	15,981	15,611	15,859	-0.58
12	10.72	10.72	10.71	10.72	15,389	15,593	16,322	15,768	15,985	16,981	14,431	15,799	-0.20

ตารางที่ ข-2 ผลการหาค่าพีเอช (pH) ที่เหมาะสม (ต่อ)

pH	ค่าการดูดกลืนแสงก่อนการออกซิเดชัน			เฉลี่ย	ค่าการดูดกลืนแสงหลังการออกซิเดชัน			เฉลี่ย	ร้อยละการบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
3	0.078	0.070	0.086	0.078	0.018	0.009	0.018	0.015	80.92
4	0.078	0.070	0.086	0.078	0.009	0.015	0.014	0.012	84.12
5	0.078	0.070	0.086	0.078	0.005	0.009	0.015	0.009	87.97
6	0.078	0.070	0.086	0.078	0.005	0.005	0.011	0.007	91.27
7	0.078	0.070	0.086	0.078	0.005	0.013	0.008	0.009	89.05
8	0.078	0.070	0.086	0.078	0.005	0.005	0.006	0.006	92.87
9	0.078	0.070	0.086	0.078	0.066	0.070	0.068	0.068	12.88
10	0.078	0.070	0.086	0.078	0.049	0.046	0.057	0.051	35.37
11	0.078	0.070	0.086	0.078	0.150	0.153	0.155	0.153	-95.74
12	0.078	0.070	0.086	0.078	0.286	0.290	0.302	0.293	-274.58

ตารางที่ ข-3 ผลการปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม

ปริมาณไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ (กรัม/ลิตร)	ค่า pH เริ่มต้น	ค่า pH หลัง การออกซิเดชัน			เฉลี่ย	ค่า COD น้ำชะขยะก่อน การออกซิเดชัน (มก./ล.)			เฉลี่ย	ค่า COD น้ำชะขยะหลัง การออกซิเดชัน (มก./ล.)			เฉลี่ย	ประสิทธิภาพ ในการลด COD (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
		1	2	3		1	2	3		1	2	3		
0	4.26	4.26	4.26	4.26	4.26	15,389	15,593	16,322	15,768	-	-	-	-	-
100	4.26	4.21	4.20	4.20	4.20	15,389	15,593	16,322	15,768	15,130	14,976	15,003	15,036	4.64
125	4.26	4.19	4.18	4.19	4.19	15,389	15,593	16,322	15,768	14,768	15,985	14,347	15,033	4.66
150	4.26	4.08	4.08	4.07	4.08	15,389	15,593	16,322	15,768	15,123	14,678	15,176	14,992	4.92
175	4.26	3.94	3.93	3.94	3.94	15,389	15,593	16,322	15,768	14,986	15,102	15,257	15,115	4.14
200	4.26	4.01	4.02	4.02	4.02	15,389	15,593	16,322	15,768	15,783	14,983	14,732	15,166	3.82
225	4.26	3.93	3.94	3.93	3.93	15,389	15,593	16,322	15,768	14,975	15,873	14,614	15,154	3.89

ตารางที่ ข-3 ผลการปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม (ต่อ)

ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (กรัม/ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสงก่อนการออกซิเดชัน			เฉลี่ย	ค่าการดูดกลืนแสงหลังการออกซิเดชัน			เฉลี่ย	ร้อยละการบำบัดดี
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	0.078	0.070	0.086	0.078	-	-	-	-	-
100	0.078	0.070	0.086	0.078	0.018	0.015	0.013	0.015	80.65
125	0.078	0.070	0.086	0.078	0.018	0.013	0.016	0.016	79.98
150	0.078	0.070	0.086	0.078	0.006	0.004	0.002	0.004	94.68
175	0.078	0.070	0.086	0.078	0.018	0.031	0.011	0.020	74.16
200	0.078	0.070	0.086	0.078	0.019	0.023	0.024	0.022	71.83
225	0.078	0.070	0.086	0.078	0.018	0.022	0.022	0.021	73.64

ตารางที่ ข-3 ผลการศึกษาผลของเหล็กในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดน้ำชะขยะที่ได้จากกุเลนซ์ร่วมกับการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ เฟอร์รัสซัลเฟต	ค่า pH หลังการออกซิเดชัน			เฉลี่ย	ค่า COD น้ำชะขยะ (มก./ล.)			เฉลี่ย	ค่า COD น้ำชะขยะหลัง การออกซิเดชัน (มก./ล.)			เฉลี่ย	ประสิทธิภาพ ในการลด COD (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	4.00	4.00	4.00	4.00	15,389	15,593	16,322	15,768	-	-	-	-	-
0.01	4.10	4.10	4.10	4.10	15,389	15,593	16,322	15,768	15,130	15,976	15,715	15,607	1.02
0.03	4.24	4.24	4.24	4.24	15,389	15,593	16,322	15,768	15,768	14,985	15,945	15,566	1.28
0.05	4.26	4.26	4.26	4.26	15,389	15,593	16,322	15,768	16,123	15,678	16,433	16,078	-1.97
0.09	4.32	4.32	4.32	4.32	15,389	15,593	16,322	15,768	15,986	16,102	16,575	16,221	-2.87
0.1	4.29	4.29	4.29	4.29	15,389	15,593	16,322	15,768	17,783	16,983	17,362	17,376	-10.20
0.2	4.23	4.23	4.23	4.23	15,389	15,593	16,322	15,768	17,975	18,873	18,496	18,448	-17.00
0.3	4.31	4.31	4.31	4.31	15,389	15,593	16,322	15,768	20,025	19,672	19,007	19,568	-24.10
0.4	4.34	4.34	4.34	4.34	15,389	15,593	16,322	15,768	20,985	19,981	21,008	20,658	-31.01
0.5	4.35	4.35	4.35	4.35	15,389	15,593	16,322	15,768	21,985	21,981	21,305	21,757	-37.98

ตารางที่ ข-3 ผลการศึกษาผลของเหล็กในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดน้ำเสียชนิดออกฤทธิ์ร่วมกับสารออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต	ค่าการดูดกลืนแสงก่อนการออกซิเดชัน			เฉลี่ย	ค่าการดูดกลืนแสงหลังการออกซิเดชัน			เฉลี่ย	ร้อยละการบำบัดสี
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	0.078	0.070	0.086	0.078	-	-	-	-	-
0.01	0.078	0.070	0.086	0.078	0.114	0.115	0.117	0.115	-47.53
0.03	0.078	0.070	0.086	0.078	0.103	0.103	0.106	0.104	-32.72
0.05	0.078	0.070	0.086	0.078	0.114	0.114	0.118	0.115	-47.31
0.09	0.078	0.070	0.086	0.078	0.114	0.119	0.115	0.116	-48.40
0.1	0.078	0.070	0.086	0.078	0.120	0.114	0.122	0.119	-52.26
0.2	0.078	0.070	0.086	0.078	0.114	0.124	0.117	0.118	-51.45
0.3	0.078	0.070	0.086	0.078	0.118	0.114	0.115	0.115	-47.45
0.4	0.078	0.070	0.086	0.078	0.115	0.112	0.117	0.115	-46.66
0.5	0.078	0.070	0.086	0.078	0.115	0.118	0.115	0.116	-48.11

ภาคผนวก ฉ.
ผลการวิเคราะห์ XRF

11/13/21

Pag

Chulalongkorn University

Quantified peaks in c:\superq\data\542539_.pks**Summary of results**

Sample: 542539
Measured: 8/11/11 15:36
Quantified: 8/15/11 13:19
Sum: 100. %
RMS: 0.000
Used lines: 10
Traces: Cu
Qual. program: SemiQ2004

Concentrations

Analyte	Type	Calibration status	Compound	Concentration (%)	Calculation method
Na	Sample	Calibrated	Na2O	0.635	Calculate
Si	Sample	Calibrated	SiO2	0.113	Calculate
P	Sample	Calibrated	P2O5	0.595	Calculate
S	Sample	Calibrated	SO3	10.361	Calculate
Cl	Sample	Calibrated	Cl	9.472	Calculate
K	Sample	Calibrated	K2O	1.561	Calculate
Ca	Sample	Calibrated	CaO	0.075	Calculate
Fe	Sample	Calibrated	Fe3O4	76.61	Calculate
Ni	Sample	Calibrated	NiO	0.294	Calculate
Zn	Sample	Calibrated	ZnO	0.284	Calculate

Sample preparation

Sample type: solid
Area ratio: 4.04
Additive/sample: 0.
Normalise: to 100.0%
X-ray path: Helium

Quantify parameters

Recipe: c:\superq\data\new.rcp
Spectrometer resp. file: c:\superq\data\semiq.sti
Use compound list: c:\superq\example\semiq.cpl
Apply drift corr.: No
Apply medium corr.: No
Apply film corr.: Yes
Disall. elem. set: None
Disall. lines set: None
Error weighting: Root
Max. Flow detector intensity: 2000 keps
Max. Sealed detector intensity: 1000 keps
Max. Scint detector intensity: 1000 keps
Max. Duplex detector intensity: 3000 keps

Disallowed elements

No elements disallowed

Disallowed lines

No lines disallowed

ภาคผนวก ญ.
ผลการวิเคราะห์โลหะหนัก ด้วยเครื่อง ICP

ตารางที่ ฅ.-1 ผลการวิเคราะห์โลหะหนัก ด้วยเครื่อง ICP

	Volume	Volume	Al (Wave length 396.152)		Ba (Wave length 455.403)		Cd (Wave length 226.502)		Cr (Wave length 283.563)		Cu (Wave length 324.754)	
			ICP (mg/L)	Sample (mg/L)	ICP (mg/L)	Sample (mg/L)	ICP (mg/L)	Sample (mg/L)	ICP (mg/L)	Sample (mg/L)	ICP (mg/L)	Sample (mg/L)
Detection Limit			0.5	50	0.005	0.5	0.01	1	0.005	0.5	0.05	5
Start 1	0.5	50	65.508	6551	0.1428	14.2800	0.0147	1.4670	*	*	*	*
Start 2	0.5	50	60.055	6006	0.1274	12.7360	0.0145	1.4486	0.0051	0.5123	*	*
Average			62.7815	6278	0.13508	13.5080	0.014578	1.4578	0.0051	0.5123	*	*
Coagulation1	0.5	50	61.490	6149	0.1482	14.8230	0.0135	1.3540	*	*	*	*
Coagulation 2	0.5	50	52.131	5213	0.1105	11.0510	0.0119	1.1864	*	*	*	*
Average			56.8105	5681	0.1294	12.9370	0.0127	1.2702	*	*	*	*
Adsorption 1	0.5	50	54.331	5433	0.1180	11.7970	0.0129	1.2862	*	*	*	*
Adsorption 2	0.5	50	63.661	6366	0.1411	14.1110	0.0134	1.3367	*	*	*	*
Average			58.996	5900	0.1295	12.9540	0.0131	1.3115	*	*	*	*
Oxidation 1	0.5	50	52.674	5267	0.1069	10.6890	0.0114	1.1393	*	*	*	*
Oxidation 2	0.5	50	50.437	5044	0.1080	10.8040	0.0136	1.3606	*	*	*	*
Average			51.5555	5156	0.107465	10.7465	0.0125	1.24995	*	*	*	*

ตารางที่ ฅ.-1 ผลการวิเคราะห์โลหะหนัก ด้วยเครื่อง ICP (ต่อ)

Sample Labels	Fe (Wave length 238.204)		Mn (Wave length 257.610)		Ni (Wave length 230.299)		Pb (Wave length 220.353)		Zn (Wave length 213.857)		Si (Wave length 288.158)	
	ICP (mg/L)	Sample (mg/L)	ICP (mg/L)	Sample (mg/L)	ICP (mg/L)	Sample (mg/L)	ICP (mg/L)	Sample (mg/L)	ICP (mg/L)	Sample (mg/L)	ICP (mg/L)	Sample (mg/L)
Detection Limit	0.05	5	0.1	10	0.01	1	0.2	20	0.1	10	0.5	50
Start 1	0.7473	74.728	*	*	3.7122	371.22	*	*	0.1338	13.379	1263.0	63150
Start 2	0.6448	64.481	*	*	3.4906	349.06	*	*	0.1207	12.068	1182.0	59100
Average	0.696045	69.6045			3.6014	360.14			0.127235	12.7235	1222.5	61125
Coagulation 1	0.8488	84.883	*	*	3.5289	352.89	*	*	0.1202	12.017	1202.6	60130
Coagulation 2	0.7598	75.983	*	*	2.9908	299.08	*	*	*	*	1024.5	51225
Average	0.8043	80.433			3.2599	325.99			0.1202		1113.6	55678
Adsorption 1	0.6960	69.604	0.6848	68.4840	3.0981	309.81	*	*	0.1189	11.886	1069.6	53480
Adsorption 2	0.7805	78.053	0.6621	66.2090	3.5944	359.44	*	*	*	*	1232.8	61640
Average	0.7383	73.829		67.3465	3.3463	334.63			0.1189		1151.2	57560
Oxidation 1	0.5770	57.704	0.3247	32.4670	2.9970	299.70	*	*	*	*	1053.2	52660
Oxidation 2	0.6428	64.277	0.3216	32.1610	2.8272	282.72	*	*	0.1088	10.878	1012.3	50615
Average	0.609905	60.9905		32.314	2.9121	291.21			0.1088		1032.75	51637.5

ภาคผนวก ก.
ภาพรวมผลการทดลอง



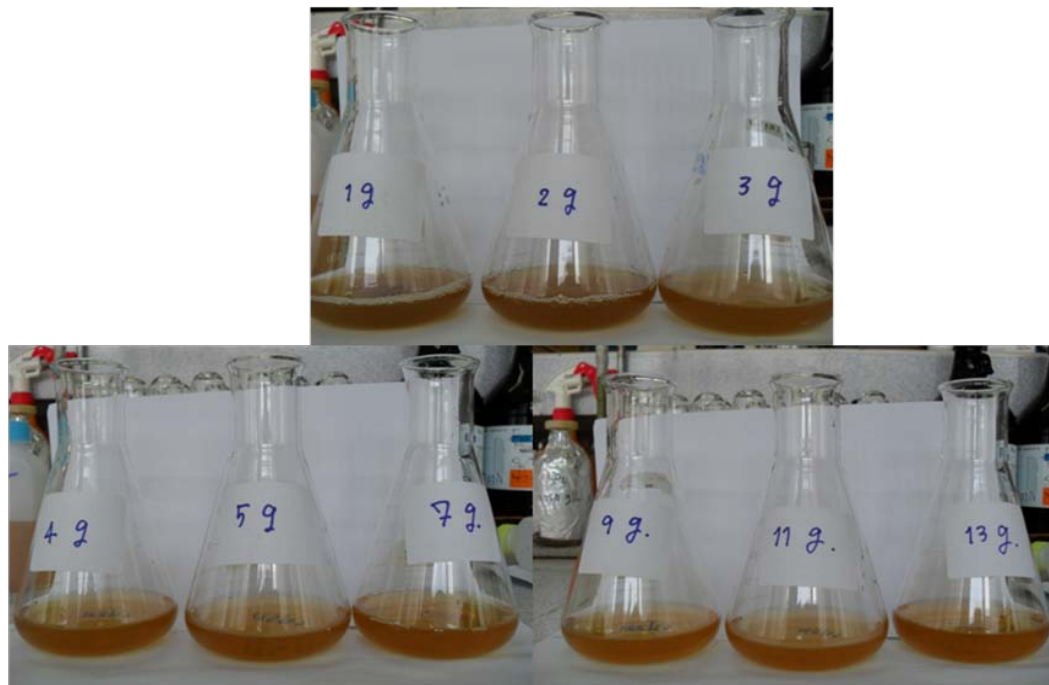
น้ำชะขยะ+เฟอริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ หน่วยเป็น mg/l+ทิ้งให้รวมตะกอนแล้ว 24 ชั่วโมง

ภาพที่ ฅ-1 แสดงผลการหาความเข้มข้นโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมจากเฟอริกคลอไรด์



น้ำชะขยะ+เฟอริกคลอไรด์ความเข้มข้น 700 mg/l+ปรับพีเอช 1-9 +ทิ้งให้รวมตะกอนแล้ว 24 ชั่วโมง

ภาพที่ ฅ-2 แสดงผลการหาค่าพีเอชที่เหมาะสม



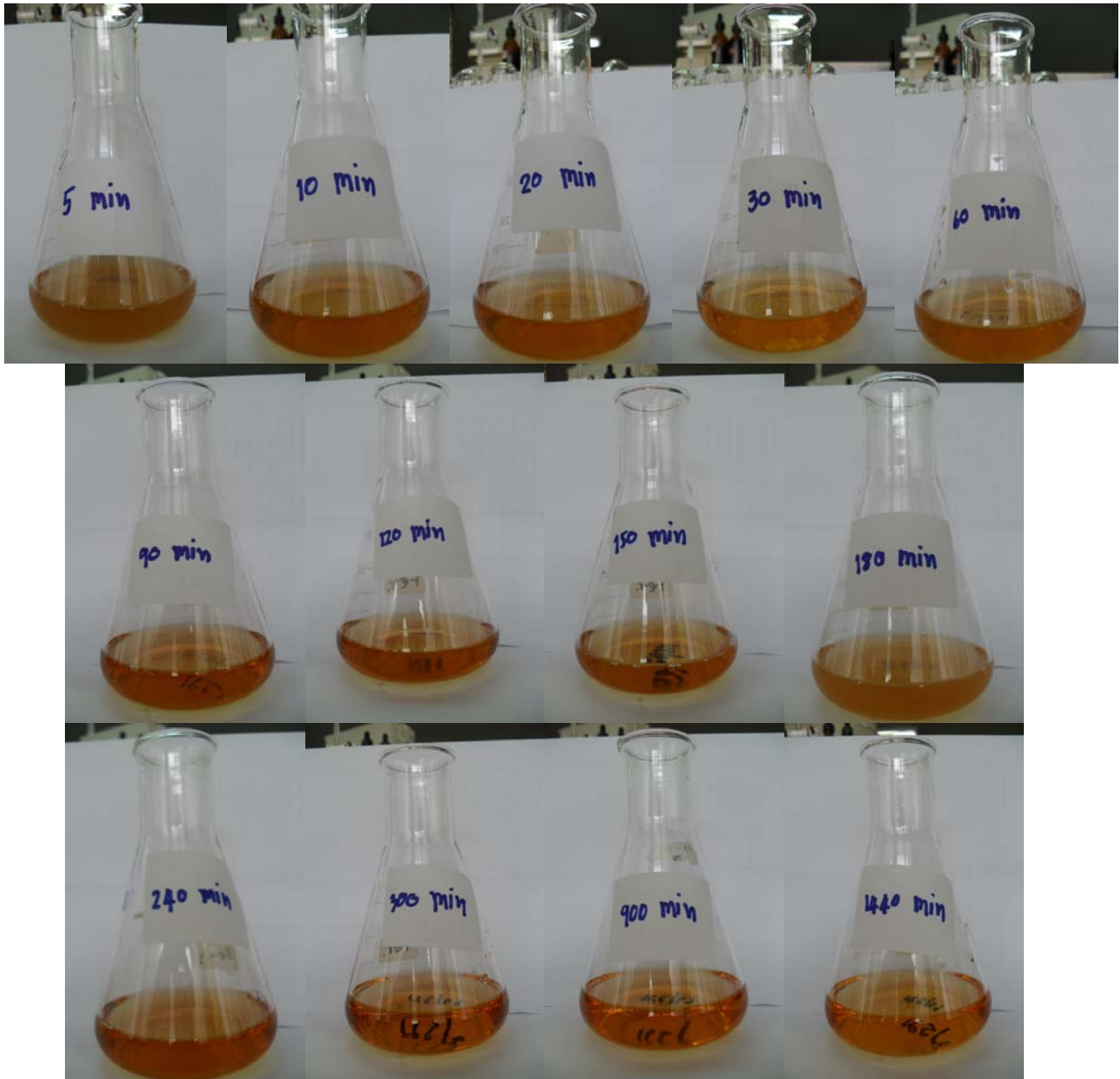
น้ำชะขยะที่ผ่านการรวมตะกอนแล้ว + นำมาเติมซีโอไลต์ปริมาณต่างๆ + เขย่า 200 รอบ/นาที + เวลา 2 ชม. + กรองเอาเฉพาะส่วนใส

ภาพที่ ฅ-3 แสดงผลศึกษาอิทธิพลของปริมาณซีโอไลต์ในการลดซีโอดีของซีโอไลต์



น้ำชะขยะที่ผ่านการรวมตะกอนแล้ว + ซีโอไลต์ 9 กรัม + ปรับพีเอช 4 - 7 + เขย่า 200 รอบ/นาที + เวลา 2 ชม. + กรองเอาเฉพาะส่วนใส

ภาพที่ ฅ-4 แสดงผลศึกษาผลของ pH ในการลดซีโอดีของซีโอไลต์



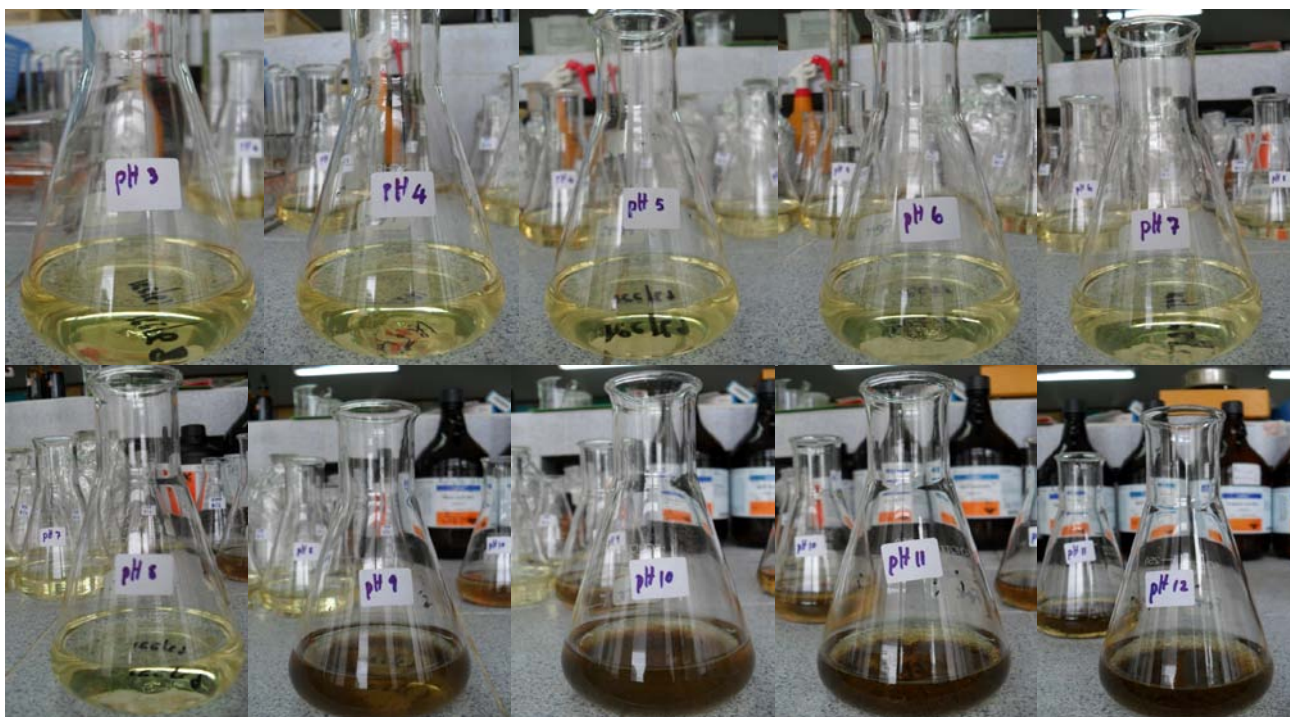
น้ำชะขยะที่ผ่านการรวมตะกอนแล้ว + ซีโอไลต์ 9 กรัม+ ปรับพีเอช 4 +
 เขย่า 200 รอบ/นาที + เวลาต่างๆ 5 - 1440 นาที + กรองเอาเฉพาะส่วนใส

ภาพที่ ฅ-5 แสดงผลศึกษาผลของเวลาในการลดซีโอดีของซีโอไลต์



น้ำชะขยะที่ผ่านการรวมตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์และการดูดซับผิวด้วยซีโอไลต์แล้ว + ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นต่างๆ ทั้งในตกตะกอน 24 ชั่วโมง

ภาพที่ ๓-6 แสดงการหาปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เบื้องต้นในการลดสีของน้ำชะขยะ



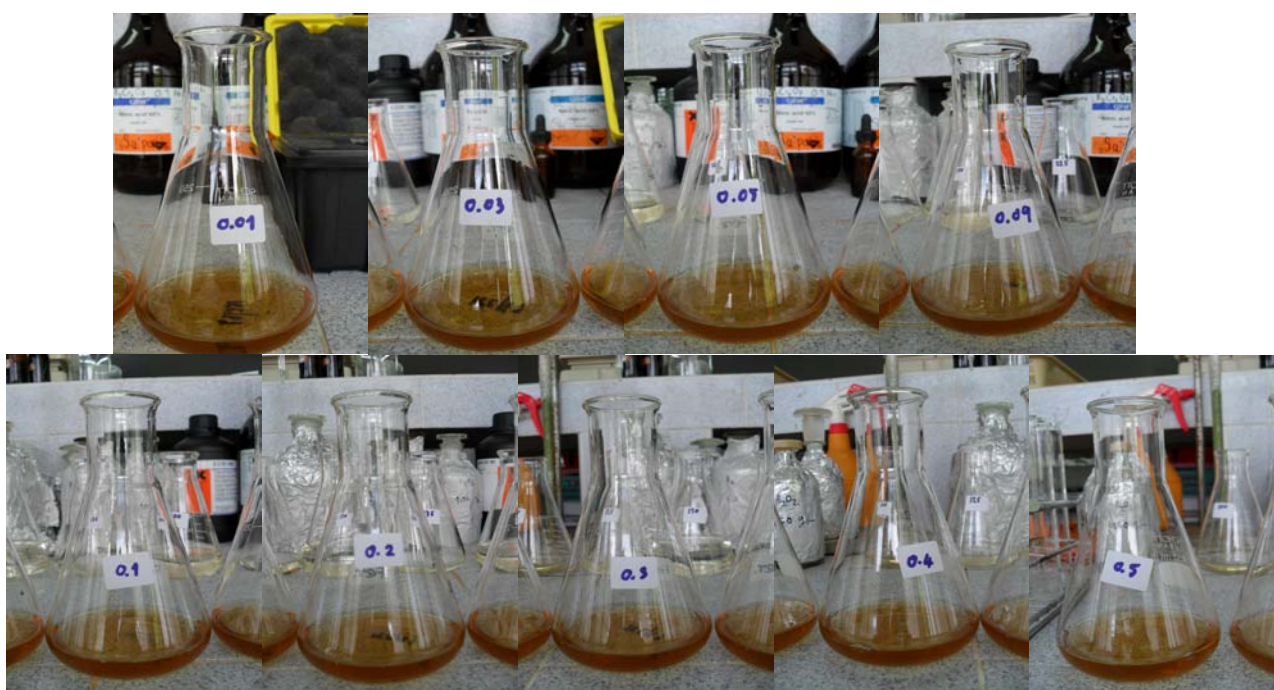
น้ำชะขยะที่ผ่านการรวมตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์และการดูดซับผิวด้วยซีโอไลต์แล้ว + ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นที่เหมาะสมในเบื้องต้น + ปรับพีเอช 3-12 + ทั้งในตกตะกอน 24 ชั่วโมง

ภาพที่ ๓-7 แสดงการหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการลดสีของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำชะขยะ



น้ำชะขยะที่ผ่านการรวมตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์และการตกตะกอนด้วยซีโอไลต์แล้ว + ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นต่าง ๆ + ปรับพีเอช 4+ ทั้งในตกตะกอน 24 ชั่วโมง

ภาพที่ ฅ-8 แสดงการหาปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำชะขยะ



น้ำชะขยะที่ผ่านการรวมตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์และการตกตะกอนด้วยซีโอไลต์แล้ว + ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 150 ก./ล.+ ปรับพีเอช 4+ เฟอรัสซัลเฟตปริมาณต่าง ๆ + ทั้งให้ตกตะกอน24ชั่วโมง

ภาพที่ ฅ9 แสดงผลของเหล็กในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดน้ำชะขยะด้วยวิธีโคแอกกูเลชันร่วมกับการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว วรันธร คำพิลา เกิดเมื่อวันที่ 3 ธันวาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัด ขอนแก่น สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่ โรงเรียน มัญจาคีรี จังหวัด ขอนแก่น และ ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550

ในปีการศึกษา 2551 ได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Conference of ASEAN Federation
of Engineering Organizations 2010



**The Vietnam Union of Science
and Technology Associations**
The CAFEO 28 Organizing Committee
Hanoi, November 08, 2010

Attention: Engr. Warunthorn Kumpila
Department of Environmental Engineering,
Chulalongkorn University

Ref: Acceptance of paper for ORAL presentation
Paper code: ENV08TH
Paper title: Cod and Colour Removal of Secure Landfill Leachate by Ferric Chloride, Zeolite
and Hydrogen Peroxide
Author name(s): Warunthorn Kumpila

Dear Engr. Warunthorn Kumpila,

We have the pleasure to inform you that the Technical Board of the 28th CAFEO Organizing Committee has approved two above mentioned papers to be presented at the Seminar Track 2: *Environmental Engineering and Technology*, 28th CAFEO Technical Seminar program on December 2nd, 2010.

You are kindly requested to prepare your PowerPoint Presentation and send it to us by *November 25th at the latest*. Due to limited time, your PowerPoint presentation should be no longer than 15 minutes. We hope that you will accept our invitation to present your paper at the technical seminar.

For your information, there will be a conference registration fee of US\$100 for AFEO delegates and US\$80 for YEAFEO delegates. All delegates are expected to pay for their own travel, accommodation, visit programs, and meals not included in conference agenda.

Should you need any further information or assistance, please do not hesitate to contact:

The 28th CAFEO Organizing Committee
Add: 53 Nguyen Du, Hanoi, Vietnam
Tel: (+84) 4.3943.9911/ Fax: (+84) 4.3944. 5346
Email: cafeo28@gmail.com / cafeo28@vusta.vn


Yours faithfully,

Pham Van Tan
Head of the 28th CAFEO Organizing Committee
Secretary General, the Vietnam Union of Science and Technology Associations

THE 28TH CONFERENCE OF THE FEDERATION OF ENGINEERING

ORGANIZATIONS

CAFEO 28 HANOI VIETNAM, 30TH NOV. - 2ND DEC., 2010

TITLE:	COD AND COLOUR REMOVAL OF SECURE LANDFILL LEACHATE BY FERRIC CHLORIDE, ZEOLITE AND HYDROGEN PEROXIDE.	
AUTHOR(S)' NAME(S):	Warunthorn Kumpila* Associate Professor, Dr. Thares Srisatit**	
ORGANIZATION & DESIGNATION:	Department of Environmental Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok Thailand	Warunthorn Kumpila
ADDRESS:	487 Kasetwattana Road, Kudkao, Munchakiri* Province Khonkean 40160* Department of Environmental Engineering** Chulalongkorn University, Bangkok Thailand**	
TEL:	087-3833946* 02-2186679**	
FAX:	02-2186666	
EMAIL:	pe_sci@hotmail.com *, thares.S@chula.ac.th **	