

การฟื้นฟูสภาพของเสียซีไอไลท์ซึ่งปนเปื้อนคลอไรด์
ด้วยกระบวนการทางเคมีและกายภาพ

นางสาวกวิศรา หอมชื่น



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

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 University Graduate School.

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Regeneration of Chloride Contaminated Zeolite Waste
by Chemical and Physical Process

Miss Kavidsara Homchuen



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 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอดีซึ่งปนเปื้อนคลอไรด์ด้วย กระบวนการทางเคมีและกายภาพ
โดย	นางสาวกวิศรา หอมชื่น
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถัย ขวาลภาฤทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.เรวดี อนุวัฒนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็น ส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเชียร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถัย ขวาลภาฤทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.เรวดี อนุวัฒนา)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ประภา ไช้ะสลาม)

กวีศรา หอมชื่น : การฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ซึ่งปนเปื้อนคลอไรด์ด้วยกระบวนการทางเคมีและกายภาพ (Regeneration of Chloride Contaminated Zeolite Waste by Chemical and Physical Process) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.เรวดี อนุวัฒนา, 139 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ที่ใช้ในกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ ซึ่งปนเปื้อนอยู่ในก๊าซไฮโดรเจนในโรงกลั่นน้ำมัน โดยทำการศึกษาวิธีการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์โดยใช้สารละลายกรดและด่าง สารละลายกรดและด่างร่วมกับความร้อน และไฟฟ้าเคมี โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการฟื้นฟูได้แก่ความเข้มข้นของสารละลาย ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา อุณหภูมิของสารละลาย ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ที่มีผลต่อการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ดังกล่าวเทียบกับน้ำปราศจากไอออน รวมทั้งการศึกษาองค์ประกอบ โครงสร้าง พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนของซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้วด้วยวิธีการวิเคราะห์ XRD XRF SEM และ BET พบว่าสภาวะการฟื้นฟูของเสียซีโอไลต์ที่เหมาะสมที่สุดคือการใช้สารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.3 โมลาร์ ที่ระยะเวลา 60 นาที มีประสิทธิภาพสูงสุดการคายคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 81.86 โดยมีปริมาณคลอไรด์เหลือในของเสียซีโอไลต์ ต่ำสุดเท่ากับ 3.88 มก.คลอไรด์ต่อกรัมซีโอไลต์ ผลการวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบจากการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ด้วยสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อให้เกิดการสร้างผลึกที่ดีกว่า ซึ่งรูปแบบโครงสร้างใกล้เคียงกับซีโอไลต์บริสุทธิ์ สอดคล้องกับองค์ประกอบหลักของซีโอไลต์โดยเฉพาะปริมาณโซเดียม ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ จึงเป็นสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุดที่มีแนวโน้มการนำกลับมาใช้ใหม่และยังสามารถลดการเกิดของเสียจากการกำจัดของเสียซีโอไลต์ด้วยวิธีการฝังกลบและการเผา

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5570416821 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: ZEOLITE WASTE / THERMAL DESORPTION / ELECTROCHEMICAL PROCESS /
ACID RINSING / BASE RINSING

KAVIDSARA HOMCHUEN: Regeneration of Chloride Contaminated Zeolite Waste by Chemical and Physical Process. ADVISOR: ASSOC. PROF. ORATHAI CHAVALPARIT, Ph.D., CO-ADVISOR: REWADEE ANUWATTANA, Ph.D., 139 pp.

This research studies on the regeneration of chloride contaminated zeolite wastes which were used for remove hydrogen chloride gas from hydrogen stream in gas separation unit of petroleum refinery process. The regeneration of chloride contaminated zeolite wastes by acid and base rinsing, thermal desorption and electrochemical process were investigated. This study, initial solution concentration, contact time, temperature, current density and pH of electrolyte solution were varied to find the optimum condition. In addition, the zeolite wastes were characterized by XRD, XRF, SEM, and Brunauer-Emmett-Teller (BET) surface area techniques. Results from testing showed that optimum condition could be achieved using NaOH 0.3 M and reaction time of 60 minutes. The efficiency of chloride desorption was 81.86% and chloride residual in regenerated zeolite was 3.88 mg chloride/g zeolite. The result of XRD represents the structure and composition of zeolite regenerated by NaOH were most likely pure zeolite which was consistent the case of the zeolite treated with sodium hydroxide solution, the proceeds in a more complete conformation and produces better crystallinity and Na content in zeolite affected the absorption potential. Consequently, it can be concluded that the regeneration of zeolite wastes could be recycle. Moreover, the regeneration process has shown several advantages such as reduction of waste disposal by landfilling.

Department: Environmental
Engineering

Field of Study: Environmental
Engineering

Academic Year: 2014

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดีด้วยความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน จึงขอขอบพระคุณต่อผู้ที่มีส่วนให้ความอนุเคราะห์ ดังต่อไปนี้

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาให้ความรู้ความเข้าใจ คำแนะนำ ประสบการณ์ ความปรารถนาดี รวมทั้งการสนับสนุนและการส่งเสริมในด้านต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณประธาน และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและความรู้ คำชี้แนะและการแก้ไขปัญหา ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอน ถ่ายทอดความรู้ คำแนะนำ รวมทั้งประสบการณ์ต่างๆ ตลอดมา

ขอขอบคุณกลุ่มบริษัท พีทีที โกลบอลเคมิคอล จำกัด ที่สนับสนุนทุนวิจัยการทำวิทยานิพนธ์และอนุเคราะห์วัสดุดิบในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณบุญเชิด สุวรรณทิพย์ คุณพิมพ์ประภา การุณมรรคผล และคุณสุรจิต สถาพรวัลย์รัตน์ ที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงานต่างๆ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย "ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย" กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

ขอขอบคุณเพื่อนและบุคคลที่คอยให้ความช่วยเหลือทุกท่าน รวมทั้งความปรารถนาดีที่มอบให้เสมอมา

สุดท้ายขอขอบคุณ บิดา มารดา และญาติพี่น้องที่คอยช่วยเหลือสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน ให้คำปรึกษา โดยเฉพาะการส่งเสริมและเป็นกำลังใจในการวิทยานิพนธ์ จนทำให้การศึกษาและวิทยานิพนธ์ประสบความสำเร็จ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูป.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กระบวนการผลิตน้ำมันดิบ.....	4
2.1.1 ของเสียจากโรงกลั่น.....	7
2.1.2 กรณีศึกษา: ของเสียที่ถูกกำจัดด้วยวิธีฝังกลบจากโรงกลั่นน้ำมันแห่งหนึ่งในจังหวัด ระยอง.....	10
2.2 การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์.....	13
2.2.1 ประเภทสารประกอบคลอไรด์.....	13
2.2.1.1 ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl).....	13
2.2.1.2 สารประกอบอินทรีย์คลอไรด์.....	14
2.2.2 ผลกระทบของสารประกอบคลอไรด์.....	15
2.2.2.1 การกัดกร่อนจากก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์.....	15
2.2.2.2 ความดันลด (Pressure drop).....	16

2.2.2.3 กรีนออยล์ (Green oil formation).....	17
2.2.3 การกำจัดสารประกอบคลอไรด์ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม	18
2.2.3.1 อะลูมินา (Activated alumina)	18
2.2.3.2 โลหะออกไซด์ (Metal oxides).....	19
2.2.3.3 ซีโอไลต์ (Zeolite-based catalysts).....	20
2.3 การดูดซับ (Adsorption) และการคายสารดูดซับ (Desorption).....	21
2.3.1 วิธีการคายสารดูดซับ	22
2.3.1.1 การคายสารดูดซับด้วยต่าง	23
2.3.1.2 การคายสารดูดซับโดยใช้การย่อยสลายด้วยกรด.....	23
2.3.1.3 การคายสารดูดซับโดยกระบวนการให้ความร้อน (Thermal desorption).26	
2.3.1.4 กระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	26
2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการคายสารดูดซับ.....	31
2.4 ซีโอไลต์.....	32
2.4.1 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์.....	34
2.4.2 คุณสมบัติของซีโอไลต์.....	36
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
2.5.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการฟื้นฟูสภาพโดยวิธีสารละลายต่าง	36
2.5.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการฟื้นฟูสภาพโดยวิธีสารละลายกรด.....	37
2.5.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการฟื้นฟูสภาพโดยวิธีกระบวนการให้ความร้อน	38
2.5.4 งานวิจัยเกี่ยวกับการฟื้นฟูสภาพโดยวิธีไฟฟ้าเคมี.....	39
2.5.4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	41
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย.....	46
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	46

3.2 วัสดุ สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	48
3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	48
3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	48
3.2.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	48
3.3 วิธีการทดลอง.....	50
3.3.1 การศึกษาองค์ประกอบและลักษณะสมบัติทางกายภาพของเสียซีโอไลต์.....	50
3.3.2 ศึกษาอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อปริมาตรสารละลายกรดและต่าง.....	50
3.3.3 การศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์โดยใช้สารละลายกรดและ สารละลายต่าง.....	51
3.3.4 ศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์โดยใช้สารละลายกรดและ สารละลายต่างร่วมกับการให้ความร้อน.....	53
3.3.5 ศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าต่อการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์.....	57
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	62
4.1 ศึกษาองค์ประกอบและลักษณะทางกายภาพของเสียซีโอไลต์.....	62
4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของซีโอไลต์บริสุทธิ์และของเสียซีโอไลต์.....	62
4.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์บริสุทธิ์และของเสียซีโอไลต์.....	63
4.1.3 การทดสอบการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548.....	64
4.1.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงแร่ในรูปผลึกของซีโอไลต์บริสุทธิ์และของเสียซีโอไลต์.....	65
4.2 การศึกษาอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อสารละลายเพื่อฟื้นฟูสภาพ.....	66
4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์โดยใช้สารละลายกรดและต่างที่ อุณหภูมิห้อง.....	68
4.3.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายต่างและสารละลายกรดที่อุณหภูมิห้อง.....	68

4.3.2 การศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่อุณหภูมิห้อง.....	71
4.3.3 การศึกษาองค์ประกอบและลักษณะสมบัติทางกายภาพของเสียซีโอไลต์หลังผ่าน การฟื้นฟูสภาพแล้ว	74
4.3.3.1 ลักษณะทางกายภาพของของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพ.....	75
4.3.3.2 ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด.....	75
4.3.3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (X-Ray Fluorescence: XRF)	76
4.3.3.4 การวัดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุน	77
4.3.3.5 การเลี้ยวเบนของซีโอไลต์ (X-ray Diffractometer; XRD)	78
4.3.4 สรุปผลการศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์โดยใช้สารละลาย กรดและสารละลายต่างที่อุณหภูมิห้อง	79
4.4 การศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์โดยใช้สารละลายกรดและ สารละลายต่างร่วมกับการให้ความร้อน	80
4.4.1 การศึกษาผลการให้ความร้อนร่วมกับสารละลาย 4 ชนิด	80
4.4.2 การศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม	83
4.4.3 การศึกษาองค์ประกอบและลักษณะสมบัติทางกายภาพของเสียซีโอไลต์หลังผ่าน การฟื้นฟูสภาพแล้ว	85
4.4.3.1 ลักษณะทางกายภาพของของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพ.....	85
4.4.3.2 ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด.....	86
4.4.3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (X-Ray Fluorescence: XRF)	87
4.4.3.4 การวัดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุน	88
4.4.3.5 การเลี้ยวเบนของซีโอไลต์ (X-ray Diffractometer; XRD)	89
4.4.4 สรุปผลการศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์โดยใช้สารละลาย กรดและต่างร่วมกับการให้ความร้อน	90
4.5 การศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์โดยใช้เคมีไฟฟ้า	90

4.5.1 การศึกษาค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม	90
4.5.2 การศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม	93
4.5.3 การศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม	94
4.5.4 การศึกษาองค์ประกอบและลักษณะสมบัติทางกายภาพของเสียซีโอไลต์หลังผ่าน การฟื้นฟูสภาพแล้ว	95
4.5.4.1 ลักษณะทางกายภาพของของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพ.....	95
4.5.4.2 ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope ;SEM)	96
4.5.4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (X-Ray Fluorescence: XRF)	97
4.5.4.4 การวัดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุน	98
4.5.4.5 การเลี้ยวเบนของซีโอไลต์ (X-ray Diffractometer; XRD)	99
4.5.5 สรุปผลการศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์โดยใช้ไฟฟ้าเคมี	100
4.6 เปรียบเทียบการทดลองที่สภาวะเหมาะสม.....	100
4.6.1 สภาวะที่เหมาะสมแต่ละการทดลอง	100
4.6.2 อัตราเร็วของปฏิกิริยา.....	101
4.6.3 สมดุลมวลทั่วไป.....	102
4.6.4 คุณสมบัติทางกายภาพ	103
4.6.5 การคำนวณค่าใช้จ่าย.....	105
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา.....	108
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	108
5.2 ข้อเสนอแนะ	110
รายการอ้างอิง	111
ภาคผนวก.....	114
ภาคผนวก ก ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง	115

ภาคผนวก ข วิธีการคำนวณ 135

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 139



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	ของเสียจากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบและการผลิตก๊าซธรรมชาติ	8
ตารางที่ 2.2	ชนิดและปริมาณของเสียที่ถูกกำจัดด้วยวิธีฝังกลบจากโรงกลั่นปี 2555	10
ตารางที่ 2.3	สรุปการจัดการของเสียซีโอล์ดซึ่งอิมตัวไปด้วยคลอไรด์	12
ตารางที่ 2.4	คุณสมบัติก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์	13
ตารางที่ 2.5	ชนิดของสารประกอบอินทรีย์คลอไรด์และปริมาณการดูดซับบนซีโอล์ด	15
ตารางที่ 2.6	การกระจายตัวของสารประกอบคลอไรด์ในน้ำมันดิบ	15
ตารางที่ 2.7	ประสิทธิภาพการกำจัดสารประกอบคลอไรด์ในน้ำมัน	21
ตารางที่ 2.8	คุณสมบัติของกรดชนิดต่างๆ	25
ตารางที่ 2.9	การเปรียบเทียบเซลล์กัลวานิกและเซลล์อิเล็กโทรไลต์	27
ตารางที่ 2.10	ซีโอล์ดชนิดต่างๆ	33
ตารางที่ 2.11	การจำแนกชนิดซีโอล์ดตามขนาดรูพรุน	36
ตารางที่ 2.12	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวกับการฟื้นฟูสภาพโดยวิธีสารละลายต่าง	41
ตารางที่ 2.13	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวกับการฟื้นฟูสภาพโดยวิธีสารละลายกรด	42
ตารางที่ 2.14	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวกับการฟื้นฟูสภาพโดยวิธีกระบวนการให้ความร้อน	43
ตารางที่ 2.15	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวกับการฟื้นฟูสภาพโดยวิธีไฟฟ้าเคมี	44
ตารางที่ 2.16	เหตุผลของการพิจารณาการเลือกวิธีการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับ	45
ตารางที่ 3.1	ตัวแปรที่ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายกรดและสารละลายต่าง ระยะเวลาที่มีต่อการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอล์ด	53
ตารางที่ 3.2	ตัวแปรที่ทำการศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอล์ดโดยใช้สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายกรดไนตริกร่วมกับการให้ความร้อน	56
ตารางที่ 3.3	ตัวแปรที่ทำการศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอล์ดโดยใช้ไฟฟ้า เคมี	60

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์	61
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบในซีโอไลต์บริสุทธิ์และของเสียซีโอไลต์	63
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าการชะละลายซีโอไลต์บริสุทธิ์	64
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าการชะละลายของเสียซีโอไลต์.....	65
ตารางที่ 4.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วย สารละลาย 4 ชนิดที่อุณหภูมิห้อง.....	76
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพที่ อุณหภูมิห้อง.....	77
ตารางที่ 4.6 พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนของซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพที่ อุณหภูมิห้อง.....	78
ตารางที่ 4.7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วย สารละลาย 4 ชนิดร่วมกับความร้อน.....	87
ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์หลังฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายกรดและต่าง ร่วมกับความร้อน 60° ซ	88
ตารางที่ 4.9 พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนของซีโอไลต์หลังฟื้นฟูสภาพด้วย สารละลายกรดและต่างร่วมกับความร้อน 60° ซ.....	89
ตารางที่ 4.10 องค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์หลังฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า.....	98
ตารางที่ 4.11 พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนของซีโอไลต์หลังฟื้นฟูสภาพด้วยวิธี เคมีไฟฟ้า.....	99
ตารางที่ 4.12 สรุปสถานะที่เหมาะสมแต่ละการทดลอง.....	101
ตารางที่ 4.13 สมดุลมวลทั่วไปของแต่ละการทดลอง.....	102
ตารางที่ 4.14 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุน	105
ตารางที่ 4.15 ค่าใช้จ่ายของสารเคมีที่ใช้สำหรับการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์	105
ตารางที่ 4.16 ค่าไฟฟ้าสำหรับการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี.....	106
ตารางที่ 4.17 สรุปค่าใช้จ่ายสำหรับการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์แต่ละการทดลอง	106

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 กระบวนการกลั่นลำดับส่วน (Fractional Distillation Process)	4
รูปที่ 2.2 กระบวนการเปลี่ยนสภาพโมเลกุลของน้ำมัน	5
รูปที่ 2.3 กระบวนการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม	6
รูปที่ 2.4 การกัดกร่อน (Corrosion).....	16
รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์เปรียบเทียบกับโลหะผสม ออกไซด์ (MMO) โลหะออกไซด์ (MO) ซีโอไลต์และอะลูมินา	20
รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์คลอไรด์เปรียบเทียบกับโลหะ ผสมออกไซด์ (MMO) โลหะออกไซด์ (MO) ซีโอไลต์และอะลูมินา	21
รูปที่ 2.7 กระบวนการคายสารดูดซับด้วยความร้อนจนสารปนเปื้อนระเหย	26
รูปที่ 2.8 องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี	27
รูปที่ 2.9 การแยกสารละลายโซเดียมคลอไรด์ด้วยไฟฟ้า.....	29
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่.....	31
รูปที่ 2.11 โครงสร้างอะลูมินอซิลิเกตในซีโอไลต์แต่ละชนิด	34
รูปที่ 2.12 โครงสร้างปฐมภูมิ TO_4 (SiO_4 และ AlO_4) และ T-O-T.....	35
รูปที่ 2.13 หน่วยโครงสร้าง	35
รูปที่ 2.14 หน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้า	35
รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	47
รูปที่ 3.2 เครื่องอ็อนโครมาโทกราฟรุ่น LC25 ยี่ห้อ DIONEX.....	49
รูปที่ 3.3 ผังการทดลองศึกษาการฟื้นฟูของเสียซีโอไลต์โดยใช้สารละลายกรดและต่าง	52
รูปที่ 3.4 ผังการทดลองศึกษาการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์โดยใช้ สารละลายกรดและ สารละลายต่างร่วมกับการให้ความร้อน	55

รูปที่ 3.5 ระบบไฟฟ้าเคมี	57
รูปที่ 3.6 ผังการทดลองศึกษาการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์โดยใช้ไฟฟ้าเคมี.....	59
รูปที่ 4.1 ลักษณะภายนอกของซีโอไลต์บริสุทธิ์และของเสียซีโอไลต์	62
รูปที่ 4.2 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคปแบบส่องกราด กำลังขยาย 5000 เท่า.....	62
รูปที่ 4.3 รูปแบบ (XRD pattern) ของซีโอไลต์บริสุทธิ์	65
รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ด้วยน้ำปราศจากอออน	67
รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก	67
รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ด้วยสารละลายกรดไนตริก	67
รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ด้วยสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์	68
รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกที่อุณหภูมิห้อง	69
รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ด้วยสารละลายกรดไนตริกที่อุณหภูมิห้อง	70
รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ด้วยสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง.....	70
รูปที่ 4.11 ปริมาณคลอไรด์ที่ในของเสียซีโอไลต์หลังชะละลายด้วยกรดและต่างความเข้มข้นต่างกันในอุณหภูมิห้อง	70
รูปที่ 4.12 ปริมาณคลอไรด์ในสารละลายของเสียซีโอไลต์ด้วยกรดและต่างความเข้มข้นต่างกันในอุณหภูมิห้อง.....	71
รูปที่ 4.13 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาของน้ำปราศจากอออนที่อุณหภูมิห้อง	72
รูปที่ 4.14 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายกรดซัลฟูริกที่อุณหภูมิห้อง	72
รูปที่ 4.15 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายกรดไนตริกที่อุณหภูมิห้อง	72
รูปที่ 4.16 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง ...	73
รูปที่ 4.17 ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์ด้วยสารละลาย 4 ชนิดที่เวลาต่างๆที่อุณหภูมิห้อง.....	73

รูปที่ 4.18 ปริมาณคลอไรด์ในสารละลายของเสียซีโอไลต์ด้วยสารละลาย 4 ชนิดที่เวลาต่างๆที่อุณหภูมิห้อง.....	73
รูปที่ 4.19 ลักษณะทางกายภาพของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายกรดและต่างที่อุณหภูมิห้อง.....	75
รูปที่ 4.20 การเลี้ยวเบนของซีโอไลต์หลังฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลาย 4 ชนิดที่อุณหภูมิห้อง.....	79
รูปที่ 4.21 น้ำปราศจากอ็อกซิเจนร่วมกับการให้ความร้อน.....	80
รูปที่ 4.22 สารละลายกรดซัลฟูริกร่วมกับการให้ความร้อน.....	81
รูปที่ 4.23 สารละลายกรดไนตริกร่วมกับการให้ความร้อน.....	81
รูปที่ 4.24 สารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการให้ความร้อน.....	81
รูปที่ 4.25 ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์หลังชะละลายด้วยกรดและต่างร่วมกับความร้อน.....	82
รูปที่ 4.26 ปริมาณคลอไรด์ในสารละลายหลังการชะละลายของเสียซีโอไลต์ด้วยกรดและต่างร่วมกับความร้อน.....	82
รูปที่ 4.27 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาน้ำปราศจากอ็อกซิเจนร่วมกับการให้ความร้อน อุณหภูมิที่ 60° ซ	83
รูปที่ 4.28 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาสารละลายกรดซัลฟูริกร่วมกับการให้ความร้อนที่ 60° ซ.....	84
รูปที่ 4.29 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาสารละลายกรดไนตริกร่วมกับการให้ความร้อนอุณหภูมิที่ 60° ซ	84
รูปที่ 4.30 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการให้ความร้อนอุณหภูมิที่ 60° ซ	84
รูปที่ 4.31 ลักษณะทางกายภาพของของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายกรดและต่างร่วมกับความร้อน 60° ซ.....	86
รูปที่ 4.32 การเลี้ยวเบนของซีโอไลต์หลังฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายกรดและต่างร่วมกับความร้อนอุณหภูมิ 60° ซ.....	90
รูปที่ 4.33 ค่าความต้านทานที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าขนาดต่างๆ.....	91

รูปที่ 4.34 ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในของเสียซีโอไลต์ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าขนาด ต่างๆ.....	91
รูปที่ 4.35 ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายที่เหมาะสม.....	93
รูปที่ 4.36 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่พีเอชของสารละลายต่างๆ.....	94
รูปที่ 4.37 ลักษณะทางกายภาพของของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยไฟฟ้าเคมี.....	96
รูปที่ 4.38 ภาพของของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยไฟฟ้าเคมีจากกล้องจุลทรรศน์ แบบส่องกราด	97
รูปที่ 4.39 การเลี้ยวเบนของซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ด้วยไฟฟ้าเคมี.....	100
รูปที่ 4.40 อัตราเร็วของปฏิกิริยาของวิธีการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์.....	102
รูปที่ 4.41 ภาพของของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีสารละลายกรดและต่างกับ ไฟฟ้าเคมี.....	103
รูปที่ 4.42 การเลี้ยวเบนของซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีสารละลายต่างกับไฟฟ้า เคมี.....	104

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารปนเปื้อนหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้าของสารดูดซับ โดยกระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใด ๆ เช่น ก๊าซกับของเหลว ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของแข็งหรือของเหลวกับของแข็ง สารดูดซับที่นิยมใช้ในการบำบัดก๊าซเสียมี 2 ชนิดได้แก่ อะลูมินาและซีโอไลต์ ซึ่งถูกใช้ในกระบวนการทำให้แห้ง (Dehydration) หรือกระบวนการกำจัดความชื้น การทำให้บริสุทธิ์ (Purification) เพื่อกำจัดสารปนเปื้อนหรือมลพิษเช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ ก๊าซกลุ่มซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x) ก๊าซกลุ่มไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) การใช้ซีโอไลต์และอะลูมินาในการเร่งปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชัน (Isomerization) และปฏิกิริยาการแตกตัว (Cracking) ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange) การใช้สารดูดซับในกระบวนการที่กล่าวข้างต้นก่อให้เกิดของเสียประเภทสารดูดซับจำนวนมาก

ปัจจุบันอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมในประเทศไทยได้เติบโตอย่างต่อเนื่อง โดยใช้ซีโอไลต์เพื่อกำจัดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์และสารประกอบอินทรีย์คลอไรด์ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนที่เป็นสาเหตุหลักของการกัดกร่อนท่อส่งก๊าซ การสะสมแอมโมเนียคลอไรด์ และความเป็นพิษต่อสารดูดซับชนิดอื่น (Erfan Mani, 2011)

การจัดการของเสียซีโอไลต์ที่กำจัดคลอไรด์แล้วนิยมนำกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบ แต่เนื่องจากวิธีการฝังกลบใช้พื้นที่มาก สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง และของเสียซีโอไลต์ที่มีคลอไรด์ปนเปื้อนสูงไม่สามารถกำจัดด้วยวิธีการเผาได้เนื่องจากสารประกอบคลอไรด์ทำให้เกิดการเสียดาย จึงนำแนวคิดการจัดการของเสียโดยการนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ ซึ่งการนำของเสียที่ยังมีศักยภาพนำมาใช้ประโยชน์ได้จะช่วยลดการนำของเสียไปกำจัดโดยวิธีการฝังกลบ ที่เป็นหลักการจัดการของเสีย 3Rs คือลดการใช้หรือการก่อให้เกิดของเสีย (Reduce) การนำของเสียที่ยังไม่เสื่อมสภาพมาใช้ซ้ำ (Reuse) และการนำกลับมาใช้ใหม่โดยผ่านการแปรสภาพ (Recycle) โดยมีงานศึกษาวิจัยการฟื้นฟูสภาพของเสียสารดูดซับหลายวิธีได้แก่ การศึกษาการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ชนิด A ที่ใช้ดูดซับความชื้นในก๊าซธรรมชาติแล้วสามารถนำมาฟื้นฟูสภาพสารดูดซับโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ร่วมกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ ที่ 40 ถึง 110 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษพบว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีประสิทธิภาพการฟื้นฟูซีโอไลต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วมีค่าประมาณร้อยละ 90 ถึง 95 ซึ่งสูงกว่าการใช้สารละลายโพแทสเซียม-

ไฮดรอกไซด์ (cannon, 2002) การศึกษาการฟื้นฟูสภาพที่เตรียมจากไบโพลัมน์้ำมัน ซึ่งอิมตัวไปด้วยคอปเปอร์ และสังกะสี โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก และEDTA ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พบว่าสารละลายกรดไฮโดรคลอริกสามารถฟื้นฟูสังกะสีได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 88 รองลงมาได้แก่การใช้สารละลายกรดไนตริก สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และEDTA (Salamatinia และคณะ, 2010) นอกจากนี้การศึกษาการกำจัดคลอไรด์ออกจากคอนกรีตโดยใช้ซัลโฟเนตคือไทเทเนียม ซัลโฟเนตคือเหล็ก และสารละลายอิเล็กโทรไลต์คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสามารถกำจัดคลอไรด์ได้ร้อยละ 45 ในระยะเวลา 7 สัปดาห์ ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเมตร (Orellan และคณะ, 2004) และการศึกษาการกำจัดเกลือโซเดียมคลอไรด์ในกระเบื้องด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าพบว่าสามารถกำจัดปริมาณคลอไรด์ได้มากถึงร้อยละ 81 (Ottosen และคณะ, 2010)

แนวทางการจัดการของเสียซีโอไลต์มีประสิทธิภาพจะสามารถช่วยลดของเสียซีโอไลต์ไปกำจัดโดยวิธีการฝังกลบ นอกจากนี้ยังสามารถนำของเสียซีโอไลต์กลับมาใช้ใหม่เพื่อให้เกิดประโยชน์ ซึ่งเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและลดต้นทุนการผลิต งานวิจัยนี้จึงศึกษาการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ที่ผ่านการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์จากโรงกลั่นน้ำมันโดยเปรียบเทียบการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายกรดไนตริก และการใช้สารละลายกรดและต่างร่วมกับการให้ความร้อน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ที่ผ่านการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการฟื้นฟูได้แก่ อุณหภูมิ ระยะเวลา ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ที่ผ่านการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ และสารประกอบอินทรีย์คลอไรด์โดยใช้สารละลายกรดและสารละลายต่าง

1.2.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลา ที่มีผลต่อการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ที่ผ่านการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์และสารประกอบอินทรีย์คลอไรด์ด้วยสารละลายกรดและสารละลายต่าง

1.2.3 ศึกษาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ค่าพีเอชเริ่มต้น และระยะเวลาที่มีผลต่อการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ของเสียซีโอไลต์เป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์และสารประกอบอินทรีย์คลอไรด์ในกระบวนการกลั่นปิโตรเลียมและการผลิตก๊าซธรรมชาติของโรงกลั่นน้ำมันแห่งหนึ่งในจังหวัดระยอง

1.3.2 สารละลายต่างสำหรับการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์คือสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยทดลองปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นช่วง 0.1 ถึง 3 โมลาร์

1.3.3 สารละลายกรดสำหรับการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์คือสารละลายกรดไนตริกและสารละลายกรดซัลฟริก โดยทดลองปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นช่วง 0.1 ถึง 3 โมลาร์

1.3.4 ศึกษาการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ด้วยสารละลายกรดและต่างร่วมกับการให้ความร้อนโดยทดลองปรับเปลี่ยนค่าอุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิห้อง ถึง 80 องศาเซลเซียส

1.3.5 ศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของเสียซีโอไลต์และของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพโดยองค์ประกอบต่างในของเสียซีโอไลต์โดยใช้เครื่องมือเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรสโคปี (X-Ray Fluorescence Spectroscopy: XRF) วิเคราะห์การเลี้ยวเบน (X-ray Diffractometer: XRD) การวัดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนด้วยวิธีบีอีที (Brunauer-Emmett-Teller: BET) และลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

1.3.6 วิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ด้วยเครื่องอออนโครมาโทกราฟตามวิธีมาตรฐาน EPA 300.0 (Pfaff 1993)

1.3.7 กระบวนการไฟฟ้าเคมีสำหรับฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์เลือกไทเทเนียม-แพลทินัมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทดและขั้วไฟฟ้าแอโนดขนาด 5x5 เซนติเมตร โดยปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าช่วง 4 ถึง 100 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นทางเลือกสำหรับการการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์เพื่อเพิ่มมูลค่าของเสีย

1.4.2 ช่วยลดปริมาณของเสียซีโอไลต์ที่ถูกกำจัดด้วยวิธีฝังกลบและการเผา

บทที่ 2

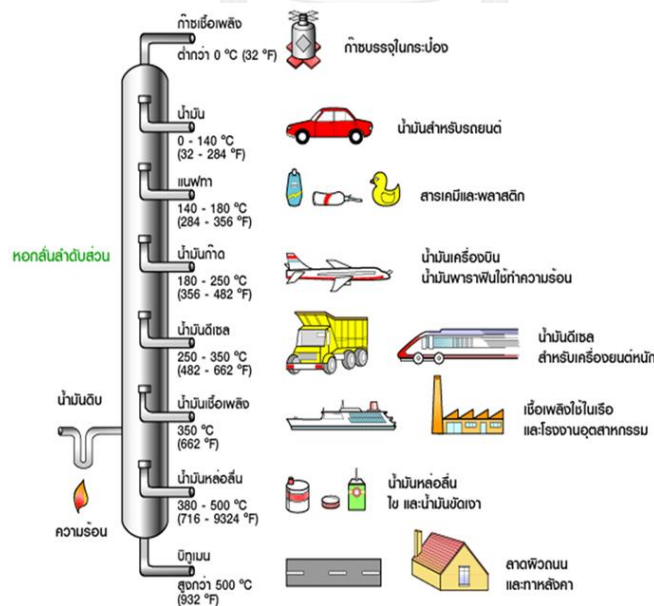
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการผลิตน้ำมันดิบ

กระบวนการกลั่นน้ำมันดิบในขั้นตอนต่างๆ โดยวิธีการกลั่นน้ำมันดิบในโรงกลั่นแบ่งเป็น 4 ส่วนได้แก่ กระบวนการกลั่นลำดับส่วน (Fraction Distillation) กระบวนการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมี (Conversion Process) กระบวนการกำจัดสารปนเปื้อน (Treating Process) และกระบวนการผสม (Blending Process) (ฐิติพรรณ ฉิมสุขุม, 2551)

1) กระบวนการกลั่นลำดับส่วน (Fractional Distillation Process) คือการกลั่นลำดับส่วนเพื่อกลั่นแยกของเหลวที่มีจุดเดือดแตกต่างกันเล็กน้อยหรือแยกสารละลายที่ตัวทำละลายหรือตัวถูกละลายเป็นสารที่ระเหยง่าย โดยการกลั่นลำดับส่วนเกิดขึ้นในคอลัมน์ลำดับส่วนหรือในหอกลั่นมีหน้าที่กลั่นซ้ำหลายๆ ครั้ง เนื่องจากการกลั่นแบบธรรมดาเพียงครั้งเดียวจะได้สารที่ไม่บริสุทธิ์ โดยไอน้ำมันดิบที่มีอุณหภูมิสูงเคลื่อนตัวขึ้นไปตามความสูงของหอกลั่น ขณะที่การเคลื่อนตัวของไอน้ำมันจะเย็นตัวลงและควบแน่นเป็นของเหลวที่ระดับต่างๆ ดังนี้

- น้ำมันส่วนที่เบากว่า (Lighter fractions) เช่น น้ำมันเบนซิน และพาราฟิน
- น้ำมันส่วนกลาง (Medium fractions) เช่น ดีเซล น้ำมันก๊าด และน้ำมันเตา
- น้ำมันหนัก (Heavy fractions) เช่น น้ำมันเตาและสารตกค้างดังรูปที่ 2.1

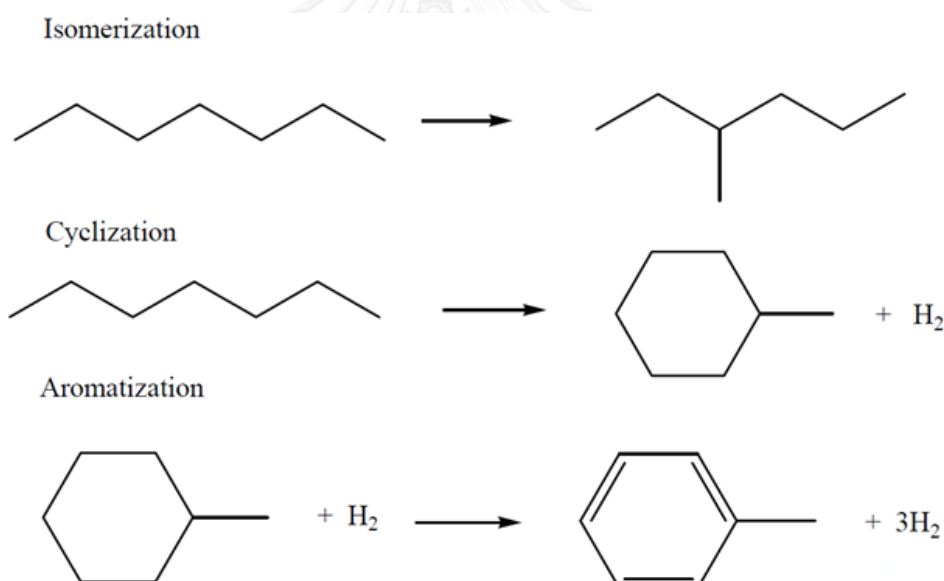


รูปที่ 2.1 กระบวนการกลั่นลำดับส่วน (Fractional Distillation Process)

ที่มา : บรรจง ปุทธิรัฐ, 2556

2) กระบวนการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมี (Conversion Process) คือการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลหรือโครงสร้างเคมีเพื่อน้ำมันมีคุณภาพสูงขึ้นและเหมาะสมกับการใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆให้มากขึ้นโดยกรรมวิธีต่างๆได้แก่

- กระบวนการแตกสลายโมเลกุลน้ำมัน (Cracking) เป็นการแตกสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งใช้ความร้อน (Thermal cracking) หรือใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking) หรือใช้ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocracking)
- กระบวนการเปลี่ยนสภาพ (Reforming) เป็นการจัดรูปโมเลกุลน้ำมันใหม่เช่นจากไซโตรงเป็นไซกิงและวงแหวนเพื่อเพิ่มค่าออกเทนสำหรับน้ำมันเบนซิน
- กระบวนการรวมโมเลกุล (Alkylation และ Polymerization) เป็นการรวมโมเลกุลส่วนเบาเพื่อให้ได้โมเลกุลที่ใหญ่ขึ้นพร้อมทั้งมีคุณสมบัติที่ดีกว่าดังรูปที่ 2.2

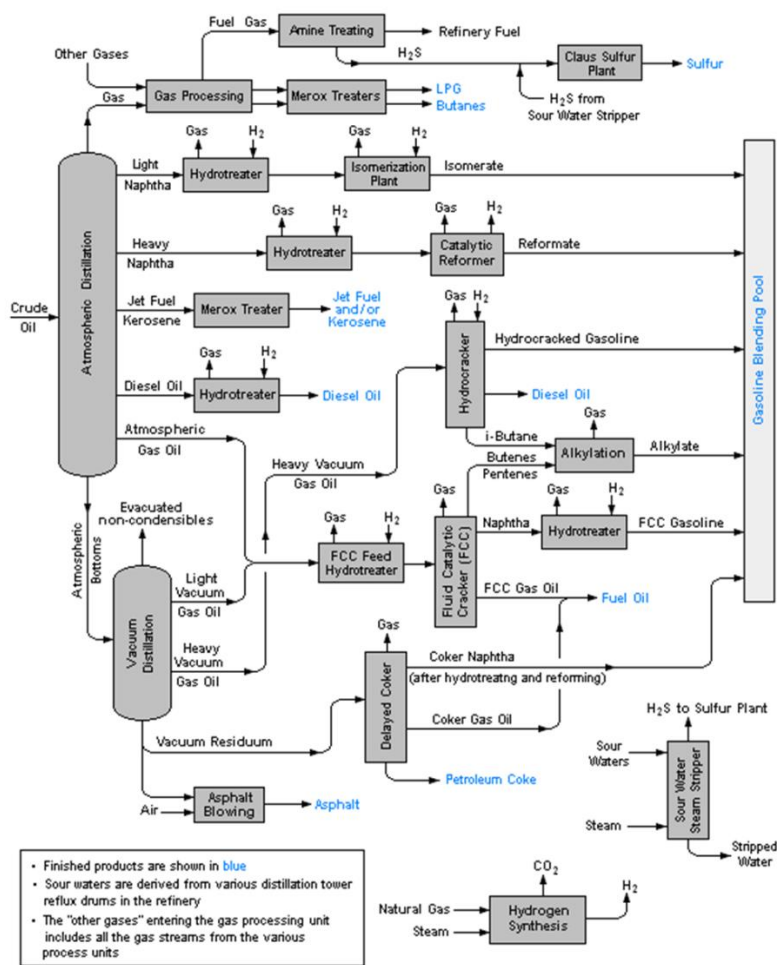


รูปที่ 2.2 กระบวนการเปลี่ยนสภาพโมเลกุลของน้ำมัน

ที่มา : ฐิติพรรณ ฉิมสุข, 2551

3) กระบวนการกำจัดสารปนเปื้อน (Treating Process) คือการขจัดสารที่ไม่ต้องการออกจากน้ำมันเช่น กำมะถัน เกลือ เป็นต้น เพื่อกระบวนการกลั่นน้ำมันดำเนินการตามปกติและน้ำมันมีความคงตัวและมีคุณภาพดีขึ้น เช่น การกำจัดกำมะถันโดยใช้ก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง (Hydrotreating) คือกระบวนการกำจัด Heteroatom และ Hydrogenation พันธะคู่และวงแหวนอะโรมาติก

4) กระบวนการผสม (Blending Process) คือการนำเอาผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการต่างๆที่กล่าวมาข้างต้นผสมกันให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่หรือมีคุณภาพดีขึ้นโดยการเติมสารเคมีบางชนิด เช่นน้ำมันเบนซินจะผสมสารเคมีเพื่อเพิ่มคุณภาพโดยมีค่าออกเทนสูงขึ้น เนื่องจากน้ำมันเบนซินมีปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นโซ่ตรง (ค่าออกเทนต่ำ) เมื่อเกิดการเผาไหม้จะเกิดการระเบิดเร็วเกินไป ทำให้เครื่องยนต์เดินไม่เรียบ มีผลเสียต่อชิ้นส่วนและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ด้วย โดยแสดงกระบวนการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมดังรูป 2.3



รูปที่ 2.3 กระบวนการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม

ที่มา : LLC UOP, 2011

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนคือ สารที่ประกอบด้วยคาร์บอนเพียง 1 อะตอมหรือมีจำนวนอะตอมของคาร์บอนมากกว่า 50 อะตอม ซึ่งจำนวนคาร์บอนที่แตกต่างกัน จะเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีสมบัติแตกต่างกัน ซึ่งมีการนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆในชีวิตประจำวัน ดังนี้

- แก๊สปิโตรเลียม (คาร์บอน 1 ถึง 4 อะตอม) ใช้สำหรับทำสารเคมี วัสดุสังเคราะห์และก๊าซหุงต้ม
- แนฟทา (คาร์บอน 5 ถึง 6 อะตอม) ใช้ในการทำสารเคมี
- แก๊สโซลีนหรือน้ำมันเบนซิน (คาร์บอน 6 ถึง 10 อะตอม) ใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในรถยนต์
- น้ำมันก๊าด (คาร์บอน 10 ถึง 14 อะตอม) ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินไอพ่นและตะเกียง
- น้ำมันดีเซล (คาร์บอน 14 ถึง 19 อะตอม) ใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล
- น้ำมันหล่อลื่นและไข (คาร์บอนมากกว่า 35 อะตอม) ใช้ทำน้ำมันเครื่องเกียร์และแบริ่ง
- น้ำมันเชื้อเพลิง (คาร์บอนมากกว่า 35 อะตอม) ใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องจักรและเรือ
- บิทูเมน (คาร์บอนมากกว่า 35 อะตอม) ใช้ทำวัสดุกันรั่วซึมและยางมะตอย

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นสามารถทราบได้ว่ากระบวนการกลั่นน้ำมันนอกจากจะได้ผลิตภัณฑ์ที่นำไปใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวัน ยังก่อให้เกิดของเสียที่เกิดจากกระบวนการกลั่นน้ำมันมากมายเช่น กากตะกอนจากกระบวนการกำจัดเกลือ น้ำมันดินที่มีสภาพความเป็นกรด สารกรองที่ใช้แล้ว เป็นต้น ซึ่งถูกใช้ขจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำมันหรือมลพิษในกระแสไอน้ำในหอกลั่น หรือสารเคมีที่ถูกใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์จำนวนมาก การจัดการของเสียยึดหลักการ 3Rs คือลดการใช้หรือการก่อให้เกิดของเสีย (Reduce) การนำของเสียที่ยังไม่เสื่อมสภาพมาใช้ซ้ำ (Reuse) และการนำกลับมาใช้ใหม่ผ่านการแปรสภาพ (Recycle) จึงมีความจำเป็นในการจัดการของเสียเพื่อให้ของเสียที่เกิดจากโรงกลั่นมีปริมาณที่เกิดขึ้นน้อยที่สุดหรือการลดของเสียไปฝังกลบจนเป็นศูนย์ (Zero waste to Landfill)

2.1.1 ของเสียจากโรงกลั่น

ของเสียถูกกำหนดโดย EU Waste Directive ปี ค.ศ. 2006 คือ "สาร หรือ วัตถุ ในประเภทที่กำหนดไว้ในรายการของ EU Waste ซึ่งเหลือใช้ หรือ ตั้งใจ หรือ ต้องทิ้ง" แต่จะมีบางประเภทที่ถูกแยกออกจากขอบเขตคำว่า "ของเสีย"

- สิ่งปฏิกูลที่เป็นก๊าซปล่อยออกสู่บรรยากาศ ซึ่งได้รับการดูแลอยู่แล้วตามกฎหมายอื่นๆ
- น้ำเสีย ยกเว้นของเสียในรูปของเหลว
- กากกัมมันตรังสี
- ซากสัตว์และของเสียทางการเกษตรที่ไม่เป็นอันตราย

โดยของเสียจากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบและการผลิตก๊าซธรรมชาติแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ ของเสียไม่อันตราย ของเสียอันตรายและขยะมูลฝอยดังตารางที่ 2.1

- 1) ของเสียไม่อันตราย เช่น เศษโลหะที่ใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาจากขั้นตอนต่างๆ ซึ่งมีปริมาณสูง
- 2) ของเสียอันตราย เช่น ใยหิน Tars กรด กากตะกอนที่มีปริมาณตะกั่วสูงหรือน้ำมันจำนวนมากที่ปนเปื้อนวัสดุแร่ใยหิน
- 3) ขยะมูลฝอย เช่น กระดาษ ภาชนะบรรจุ ฯลฯ

ตารางที่ 2.1 ของเสียจากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบและการผลิตก๊าซธรรมชาติ

ประเภทของเสีย	ชนิดของเสีย
วัสดุปนเปื้อนน้ำมัน (Oiled materials)	<ol style="list-style-type: none"> 1. ตะกอนปนเปื้อนน้ำมัน (Oily sludge) <ul style="list-style-type: none"> - ตะกอนที่ก้นถัง (Tank bottoms) - ตะกอนจากการบำบัดทางชีวภาพ (Bio treatment sludge) - ตะกอนน้ำเสีย (Waste water treatment sludge) - ดินที่ปนเปื้อน (Contaminated soils) - ตะกอนจากกระบวนการกำจัดเกลือ (Desalted sludge)
	<ol style="list-style-type: none"> 2. ของแข็ง (Solid materials) <ul style="list-style-type: none"> - ดินที่ปนเปื้อน (Contaminated soils) - วัสดุที่มีการรั่วของน้ำมัน (Oil spill debris) - น้ำมันดิน (Tar rags) - วัสดุการกรอง (Filter materials) - บรรจุภัณฑ์ (Packing) - ฉนวนห่อหุ้ม (Lagging) - ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)
ภาชนะที่ปนเปื้อน (Drums and containers)	<ul style="list-style-type: none"> - ภาชนะที่ทำจากโลหะ (Metal) - ภาชนะที่ทำจากแก้ว (Glass) - ภาชนะที่ทำจากพลาสติก (Plastic)
ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้ว (Spent Catalysts excluding precious metals)	<p>ตัวเร่งปฏิกิริยาจากกระบวนการต่างๆ ได้แก่</p> <ul style="list-style-type: none"> - FCCU: fluid bed catalytic cracking unit - HDS/HT hydrodesulphurization/hydro-treatment - Polymerization unit - Residue conversion

ตารางที่ 2.1 ของเสียจากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบและการผลิตก๊าซธรรมชาติ (ต่อ)

ประเภทของเสีย	ชนิดของเสีย
ของเสียไม่ปนเปื้อนน้ำมัน (Non-oiled materials)	<ul style="list-style-type: none"> - เรซิน (Resins) - ตะกอนของน้ำที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำ (Boiler feed water sludge) - สารดูดความชื้นและสารดูดซับ (Desiccants and A) - Neutral sludge from alkylation plants - FGD wastes :flue gas desulphurization
ของเสียสารกัมมันตรังสี (Radioactive wastes)	<ul style="list-style-type: none"> - สารเร่งปฏิกิริยา (Catalysts) - ของเสียจากห้องปฏิบัติการ (Laboratory waste)
เครื่องชั่ง (Scales)	<ul style="list-style-type: none"> - เครื่องชั่งที่ปนเปื้อนตะกั่วและสนิม (Leaded scales rust) - เครื่องชั่งที่ปนเปื้อนสนิม (Unleaded scales rust)
ของเสียจากการก่อสร้าง (Construction/ scrap metal demolition debris)	<ul style="list-style-type: none"> - เศษโลหะ (Scrap metal) - คอนกรีต (Concrete) - ยางมะตอย (Asphalt) - ดิน (Soil) - แร่ใยหิน (Asbestos) - เส้นใยแร่ (Mineral fibers) - พลาสติกหรือไม้ (Plastic/Wood)
สารเคมีที่ใช้แล้ว (Spent chemicals)	<ul style="list-style-type: none"> - ปฏิบัติการ (Laboratory) - สารกัดกร่อน (Caustic) - กรด (Acid) - สารเติมแต่ง (Additives) - โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate) - ตัวทำละลาย (Solvents) - MEA/DEA: mono/di-ethanol amine - TML/TEL: tetra methyl/ethyl lead

ตารางที่ 2.1 ของเสียจากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบและการผลิตก๊าซธรรมชาติ (ต่อ)

ประเภทของเสีย	ชนิดของเสีย
Pyrophoric wastes	มาจากกระบวนการ - Scale from tanks - Process units
ของเสียที่ผสมกัน	ขยะชุมชน (Domestic refuse)
น้ำมันที่ไม่สามารถใช้งานได้ (Waste oils)	- น้ำมันหล่อลื่น (Lubricating oils) - น้ำมันหล่อเย็น (Cut oils) - น้ำมันจากหม้อแปลง (Transformer oils) - Recovered oils - น้ำมันเครื่องยนต์ (Engine oils)

ที่มา: Dando และคณะ, 2003

2.1.2 กรณีศึกษา: ของเสียที่ถูกกำจัดด้วยวิธีฝังกลบจากโรงกลั่นน้ำมันแห่งหนึ่งในจังหวัดระยอง

กระบวนการกลั่นน้ำมันมีของเสียที่เกิดขึ้นหลายชนิด ซึ่งเกิดขึ้นจากหลายขั้นตอนในกระบวนการกลั่นได้แก่ กระบวนการกลั่นลำดับส่วน (Fractional Distillation Process) กระบวนการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมี (Conversion Process) กระบวนการปรับปรุงคุณภาพและการกำจัดสารปนเปื้อน (Treating Process) และกระบวนการผสม (Blending Process) เป็นต้น

กรณีศึกษาของเสียจากกระบวนการกลั่นปิโตรเลียมและการผลิตก๊าซธรรมชาติของโรงกลั่นน้ำมันแห่งหนึ่งในจังหวัดระยอง ปี 2555 แสดงชนิดของเสียและปริมาณของเสียที่ถูกกำจัดด้วยวิธีฝังกลบจากโรงกลั่นดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ชนิดและปริมาณของเสียที่ถูกกำจัดด้วยวิธีฝังกลบจากโรงกลั่นปี 2555

ชนิดของเสีย	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์)
ไส้กรองอากาศ	0.26
ภาชนะปนเปื้อน	30.11
ฉนวน	10.8
อิฐทนไฟ	16.98
ของเสียซีโอไลต์ซึ่งอิมมัลชันไปด้วยคลอไรด์	33.06
ซัลเฟอร์	8.76
รวม	100

ชนิดของเสียที่ถูกกำจัดด้วยวิธีฝังกลบจากโรงกลั่นน้ำมันแห่งหนึ่งในจังหวัดระยอง

- ไส้กรองอากาศ (Air filter) มีหน้าที่ดักจับฝุ่นละออง รวมทั้งสิ่งปนเปื้อนต่างๆที่ปะปนในอากาศออกก่อนที่จะเข้าสู่ระบบ
- ภาชนะปนเปื้อน (Contaminate container) คือภาชนะที่บรรจุสารเคมีหรือของเสีย เช่น แกลลอนใส่น้ำมัน ภาชนะบรรจุตัวดูดซับ ภาชนะปนเปื้อนโลหะ เป็นต้น
- ฉนวน (Insulation) คือวัสดุที่นำมาใช้หุ้มท่อหรือภาชนะเพื่อป้องกันความร้อนสูญเสีย ส่งผลให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประหยัดพลังงานและความปลอดภัย ฉนวนกันความร้อนมีความสามารถลดความร้อนและคงความเย็น ทำให้สามารถลดขนาดของเครื่องทำความเย็นลงได้ จึงลดค่าใช้จ่ายโดยรวมได้ และสามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะไม่ให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปมาก
- อิฐทนไฟ (Refractory Brick) ลักษณะเป็นก้อน โดยนำไปใช้งานก่อสร้างเตาเผา อิฐทนไฟเป็นวัสดุทนไฟประเภทที่สามารถรักษาขนาดสัญญาณเดิมเมื่อผ่านการใช้ และมีคุณสมบัติต่างๆ ดีกว่าวัสดุทนไฟประเภทอื่น ๆ โดยรูปร่างของอิฐทนไฟได้แก่ อิฐตรง (Straight: ST) อิฐสี่เหลี่ยมบาง (Split: SP) อิฐกليبส้ม (Side Arch: SA) อิฐหัวขวาน (End Arch: EA) และ อิฐหน้าวัว (Key: Ke)
- ซัลเฟอร์ (Sulfur) คือซัลเฟอร์ที่กำจัดออกจากน้ำมันดิบจากกระบวนการกำจัดซัลเฟอร์ซึ่งคือปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอร์ไรเซชัน (Hydrodesulfurization , HDS) ซึ่งเป็นกระบวนการกำจัดซัลเฟอร์ออกมาจากกระบวนการกลั่นน้ำมันในขั้นตอนไฮโดรทรีตติ้ง ซึ่งซัลเฟอร์ที่กำจัดออกมาจะมีความบริสุทธิ์สูง
- ของเสียซีโอไลต์ซึ่งอิ่มตัวไปด้วยคลอไรด์ (Spent chloride absorbent) คือ ซีโอไลต์ที่ทำหน้าที่ดูดซับก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์และสารประกอบอินทรีย์คลอไรด์ในก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG)

ของเสียส่วนใหญ่ในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบและการผลิตก๊าซธรรมชาติเป็นคะตะลิสต์หรือตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งถูกนำไปขายที่ต่างประเทศแต่มีของเสียบางประเภทที่ถูกกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบ ดังตารางที่ 2.2 พบว่าของเสียประเภทสารดูดซับได้แก่ ของเสียซีโอไลต์ซึ่งอิ่มตัวไปด้วยคลอไรด์มีปริมาณมากที่สุด จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาเพื่อหาวิธีการนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อให้เกิดประโยชน์ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งใช้แนวคิดการจัดการทรัพยากรธรรมชาติซึ่งยึดหลักการ 3Rs โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อลดของเสียไปฝังกลบจนเป็นศูนย์ (Zero waste to Landfill) โดยการจัดการทรัพยากรธรรมชาติให้มีประโยชน์สูงสุดเนื่องจากทรัพยากรธรรมชาติเป็นปัจจัยสำคัญของการผลิตสินค้าและบริการ ซึ่งใน

ปัจจุบันธุรกิจมีการแข่งขันและแย่งชิงทรัพยากรธรรมชาติเพื่อให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าที่มากขึ้น จึงเกิดแนวคิดที่จะรักษาทรัพยากรที่มีให้ใช้ได้อย่างยั่งยืนหรือมีประโยชน์มากที่สุด โดยส่งเสริมการหมุนเวียนทรัพยากรกลับมาใช้ใหม่ เพื่อเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และเป็นการลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นให้น้อยที่สุด จึงเสนอแนวคิด 3Rs คือ Reduce (การลดการใช้) Reuse (การใช้ซ้ำ) และRecycle (การนำกลับมาใช้ใหม่) เพื่อจัดการทรัพยากรธรรมชาติและของเสียที่เกิดขึ้น

- ลดการใช้ (Reduce) คือ การลดเพื่อส่งผลให้ลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติในกระบวนการผลิต ซึ่งลดการใช้พลังงานและวัตถุดิบลดขั้นตอนหรือกระบวนการที่ไม่มีประโยชน์ ขยายอายุการใช้งานหรือซ่อมแซมสายผลิต ปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต
- ใช้ซ้ำ (Reuse) คือการใช้ผลิตภัณฑ์ที่ใช้แล้วนำมาใช้ซ้ำในหน้าที่เดิม ซึ่งเป็นหนึ่งในแนวทางการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรที่มีอยู่อย่างรู้คุณค่าการใช้ซ้ำเป็นการที่เรานำสิ่งต่างๆ ที่ใช้งานไปแล้วและยังสามารถใช้งานได้กลับมาใช้อีก ซึ่งสามารถช่วยลดการใช้ทรัพยากรใหม่และลดของเสียที่จะเกิดขึ้นอีกด้วย
- รีไซเคิล (Recycle) คือการนำผลิตภัณฑ์ที่ใช้แล้วนำมาแยกออกเป็นวัสดุต่างๆและคัดแยกชนิดของวัสดุเช่นกระดาษแก้วพลาสติกเหล็กอะลูมิเนียม ฯลฯ แล้วนำมาแปรรูปโดยกรรมวิธีต่างๆเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถช่วยลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น รวมทั้งช่วยลดพลังงานและมลพิษที่เกิดขึ้นอีกด้วย

ตารางที่ 2.3 สรุปการจัดการของเสียซีโอไลต์ซึ่งอิมตัวไปด้วยคลอไรด์

ประเภทของเสีย	การจัดการก่อน ดำเนินการมาตรการ	การจัดการหลังดำเนินการมาตรการ
ซีโอไลต์ปนเปื้อนคลอไรด์ (Spent chloride absorbent)	นำไปกำจัด โดยการฝังกลบ	หาแนวทางการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ หรือยืดอายุการใช้งานสารดูดซับ (ไม่สามารถเผาได้เนื่องจากปนเปื้อนคลอไรด์ ซึ่งก่อให้เกิดการกัดกร่อนทำให้เตาเผาเสียหายได้)

2.2 การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์

(Seidel และคณะ, 1996) ในปัจจุบันโรงกลั่นได้ตระหนักถึงความจำเป็นอย่างมีนัยสำคัญในการพัฒนาการกำจัดสารประกอบคลอไรด์ชนิดต่างๆที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากสารประกอบอินทรีย์คลอไรด์ที่ปนเปื้อนในน้ำมันดิบก่อให้เกิดสารประกอบไฮโดรเจนคลอไรด์ ซึ่งปนเปื้อนอยู่ในก๊าซไฮโดรเจนอาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการปลายทางที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารป้อนเข้าไปในระบบการกลั่น ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการปรับปรุงคุณภาพและการกำจัดสารปนเปื้อน (Hydrotreating Process) ที่กล่าวมาข้างต้นคือกระบวนการกำจัดกำมะถัน ไนโตรเจนและสารแปลกปลอมอื่นๆที่ปนเปื้อนมาในน้ำมันทำให้น้ำมันมีคุณภาพไม่เหมาะแก่การใช้งานเช่นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ก๊าซแอมโมเนีย เป็นต้น

ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมมีสารประกอบคลอไรด์ 2 ประเภท คือ สารประกอบอินทรีย์คลอไรด์ และก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ ซึ่งสารประกอบคลอไรด์ในกระบวนการกลั่นน้ำมันแม้มีเพียงปริมาณเล็กน้อยก็ส่งผลกระทบต่อกระบวนการกลั่นลำดับส่วน (Fractional Distillation Process) กระบวนการเปลี่ยนสภาพ (Reforming) และกระบวนการกำจัดสารปนเปื้อน (Hydrotreating Process) ซึ่งสารประกอบคลอไรด์เป็นสาเหตุหลักของปัญหาได้แก่ การกัดกร่อนจากก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ ความดันลด (Pressure drop) และการเกิดกรีนออยล์ (Green oil formation)

2.2.1 ประเภทสารประกอบคลอไรด์

2.2.1.1 ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl)

ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์เป็นก๊าซมีพิษ ไม่มีสีและมีฤทธิ์กัดกร่อนเมื่อสัมผัสกับความชื้นจะเกิดควันสีขาว โดนครวสีขาวจะประกอบด้วยกรดไฮโดรคลอริก โดยปฏิกิริยาเกิดขึ้นเมื่อมีความชื้น ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์มีคุณสมบัติต่างๆดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์

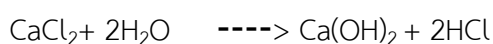
คุณสมบัติ	ลักษณะ
ชื่อทางเคมี	ไฮโดรเจนคลอไรด์
สูตรโมเลกุล	HCl
น้ำหนักโมเลกุล	36.46 กรัมต่อโมล
ลักษณะทั่วไป	ก๊าซไม่มีสีและเกิดควันเมื่อมีอากาศชื้น
กลิ่น	ฉุนมาก

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) คุณสมบัติก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์

คุณสมบัติ	ลักษณะ
เลขทะเบียน CAS	7647-01-0
ความหนาแน่นและเฟส	1.64 กรัม/ลิตร, แก๊ส (0 °C)
การละลายในน้ำ	72 ก./100 มก. ในน้ำ (20 °C)
จุดหลอมเหลว	-114.2 °C (158.8 K)
จุดเดือด	-85.1 °C (187.9 K)
NIOSH IDLH	50 ppm
OSHA PEL	5 ppm
อันตราย	หายใจเข้า : เจ็บคอ ไอ ผิวหนัง : ไหม้ แผลเปื่อย ตา : ไหม้

ที่มา: webbook, 2011

แหล่งกำเนิดสารประกอบคลอไรด์ในน้ำมันดิบมาจากการกระจายของเกลือที่แตกต่างกันได้แก่ไฮเดียมคลอไรด์ร้อยละ 75 แคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 10 และแมกนีเซียมคลอไรด์ร้อยละ 15 โดยก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์เกิดจากการสลายพันธะด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) คือ ปฏิกิริยาที่มีน้ำเข้าไปสลายพันธะของเกลือคลอไรด์ ทำให้สารโมเลกุลใหญ่แตกตัวเป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลงดังสมการ



2.2.1.2 สารประกอบอินทรีย์คลอไรด์

สารประกอบอินทรีย์คลอไรด์ไม่ได้เป็นปัญหาที่พบบ่อยในการปนเปื้อนในโรงกลั่นมากนักเนื่องจากการปนเปื้อนสารประกอบคลอไรด์อินทรีย์ปริมาณเพียงเล็กน้อยแต่ก็เป็นแหล่งที่ทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ ซึ่งแหล่งที่มาของสารประกอบอินทรีย์คลอไรด์ได้แก่ ตัวทำละลายอินทรีย์คลอไรด์จากการผลิตน้ำมัน ตัวทำละลายอินทรีย์คลอไรด์ใช้ละลายแวกและไซ เป็นต้น ซึ่งสารประกอบอินทรีย์คลอไรด์ที่ปนเปื้อนมีหลายประเภทดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ชนิดของสารประกอบอินทรีย์คลอไรด์และปริมาณการดูดซับบนซีโอไลต์

ชนิดสารประกอบอินทรีย์คลอไรด์	ปริมาณการดูดซับอินทรีย์คลอไรด์ Wt%
Methyl chloride	5-8
Chloroform	3-5
Ethyl-methyl chloride	2-3
Butyl chloride	2-3
Benzo-chloride	1
Di-Benzochloride	< 1

ที่มา : Eurochlor, 2011

สารประกอบอินทรีย์คลอไรด์ในน้ำมันดิบพบน้อยมาก ซึ่งโซเดียมคลอไรด์เป็นตัวควบคุมปริมาณคลอไรด์ในน้ำมันดิบของกระบวนการกลั่นดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 การกระจายตัวของสารประกอบคลอไรด์ในน้ำมันดิบ

ช่วงของอุณหภูมิ	ปริมาณคลอไรด์ (ppm)
<80 °C	8350
800-100 °C	2010
100-120 °C	230
120-140 °C	340
140-160 °C	150
160-180 °C	34
180-200 °C	35
>200 °C	0.32

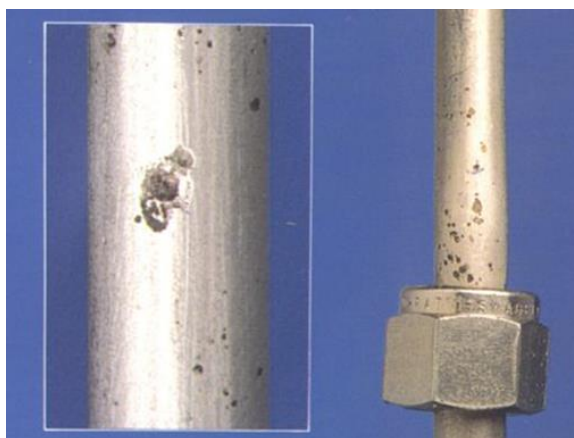
ที่มา: Erfan Manl, 2011

2.2.2 ผลกระทบของสารประกอบคลอไรด์

2.2.2.1 การกัดกร่อนจากก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์

ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์มีฤทธิ์กัดกร่อนซึ่งก่อให้เกิดการกัดกร่อนตามท่อหรือท่อกลั่นโดยการเสื่อมสภาพของโลหะที่ทำให้สมบัติของโลหะเปลี่ยนไป โดยโลหะเปลี่ยนเป็น

สารประกอบของโลหะหรือที่เรียกว่าสนิม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของการกัดกร่อนดังรูปที่ 2.4 เป็นเหตุให้โลหะเกิดความเสียหายซึ่งเป็นปัญหาหลักของสารประกอบคลอไรด์ที่อาจทำให้ระบบการกลั่นล้มเหลว



รูปที่ 2.4 การกัดกร่อน (Corrosion)

ที่มา: Tungum, 2011

2.2.2.2 ความดันลด (Pressure drop)

ความดันลด เกิดขึ้นในกระบวนการกำจัดสารประกอบคลอไรด์ เนื่องจากเกิดการสะสมของตะกอนแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) ในส่วนด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งทำให้เกิดความดันสูญเสียในระหว่างเข้าและออกจากอุปกรณ์ดักเก็บ (Collectors) โดยตะกอนแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) เกิดขึ้นจากแอมโมเนีย ไฮโดรเจนคลอไรด์ และน้ำ การเกิดผลึกเกลือในบริเวณส่วนหัวด้านบนของระบบเลยทำให้เกิดพื้นที่ว่างในบริเวณทางเข้าท่อก๊าซจึงก่อให้เกิดความดันลด (Pressure drop) สูงเกินระดับปกติ

ในปัจจุบันการแก้ปัญหาความดันลดมีวิธีแตกต่างกันในแต่ละโรงงาน โดยส่วนใหญ่ใช้ในโตรเจนที่มีอุณหภูมิสูงฉีดเข้าระบบเพื่อไหลเวียนไปยังบริเวณที่มีคราบหรือผลึกเกลือทำให้ผลึกหรือคราบถูกทำลายมากขึ้นโดยการละลาย และเทคนิคการจัดวางเป็นชั้นๆ (Graded bed) ในระบบกำจัดกำมะถันโดยใช้ก๊าซไฮโดรเจน (Hydrotreating) เพื่อหลีกเลี่ยงและป้องกันการเกิดความดันลด (Pressure drop) เนื่องจากการสะสมตัวของตะกอนแอมโมเนียมคลอไรด์ ซึ่งวิธีการเดียวกันได้ถูกพิสูจน์ว่ามีประโยชน์ในการป้องกันหรือชะลอการเกิดตะกอนแอมโมเนียมคลอไรด์ในระบบการกำจัดสารประกอบคลอไรด์ เทคนิคการจัดวางเป็นชั้นๆ (Graded bed) ประกอบไปด้วยอนุภาคขนาดต่างๆ โดยมีรูปทรงที่มีพื้นที่ช่องว่างสูง เช่นการกระจายตัวของเซรามิกและแหวนกลวงโดยมีพื้นที่ช่องว่างรวมทั้งหมดประมาณร้อยละ 40 ถึง 65

2.2.2.3 กรีนออยล์ (Green oil formation)

การเกิดกระบวนการทางเคมีในการสร้างพันธะระหว่างสองโมเลกุลขึ้นไป เพื่อเกิดสารที่มีโมเลกุลที่ใหญ่และยาวของสายไฮโดรคาร์บอนเรียกว่า Green oil formation เป็นหนึ่งในปัญหาที่พบมากที่สุดที่เกี่ยวข้องกับระบบการกำจัดสารประกอบคลอไรด์ (Hawkins , 2013)

กรีนออยล์ (Green oil formation) คือผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ไม่พึงประสงค์ของปฏิกิริยาการสร้างพอลิเมอร์โดยการใส่สารเร่งปฏิกิริยาบนพื้นผิว โดยปกติในการบำบัดสารประกอบคลอไรด์ มีโมโนเมอร์ขนาดเล็กมากมายตั้งแต่ C_2 ถึง C_4 สามารถรวมเป็นรูปแบบซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งก็คือไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว โดยโมเลกุลของพอลิเมอร์กรีนออยล์ (Green oil) ที่เกิดขึ้นมีความซับซ้อนหลายห่วงโซ่ในทางเคมี จุดเดือดสูง ความหนืดต่ำมากและโดยทั่วไปมีลักษณะคล้ายซีฟิ่งในธรรมชาติ อัตราของกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการเตรียมพอลิเมอร์จากมอนอเมอร์ตั้งแต่ 2 มอนอเมอร์ขึ้นไป อัตราของกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันได้รับผลกระทบจากความเป็นกรดของพื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและปริมาณความชื้นที่อยู่ในก๊าซที่ป้อนเข้าระบบและเวลาที่พักนำ (Residence time)

ความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างอัตราการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันกับความเป็นกรดของพื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณความชื้น โดยการเกิดกรีนออยล์ (Green oil) เกิดขึ้นหลังจากที่โมเลกุลไฮโดรเจนคลอไรด์ถูกกำจัดออกจากระบบโดยอะลูมินา ในขณะที่กลไกการเกิดกรีนออยล์ (Green oil formation) ไม่สามารถระบุได้ชัดเจน แต่ก็ปรากฏว่าการดูดซับสารประกอบคลอไรด์บนอะลูมินาที่มีสภาพเป็นกรดมีปริมาณเพียงเล็กน้อยประมาณส่วนในล้านส่วน 2 ถึง 10 ของน้ำที่มีสภาพความเป็นกรด ซึ่งเป็นสภาวะที่สนับสนุนการรวมกันของโมเลกุล C_3 ต่อ C_4 ในระบบ เมื่อระบบมีสารประกอบคลอไรด์เกิดขึ้นจะก่อให้เกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายยาวที่ซับซ้อน วิธีการหลีกเลี่ยงที่ดีที่สุดไม่ให้เกิดการสร้างกรีนออยล์สามารถแก้ไขได้โดยการใช้สารดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งปฏิกิริยาป้องกันการเกิดกรีนออยล์ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์คือเกลือของคลอไรด์ เช่น



หรือ



ผลิตภัณฑ์เกลือจากปฏิกิริยาข้างต้นมีความเสถียรและไม่สามารถละลายได้ ปฏิกิริยาข้างต้นจึงเป็นระบบหนึ่งที่สามารถกำจัดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ นอกจากนี้การใช้สารดูดซับหรือตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโครงสร้างโลหะเป็นพื้นฐานซึ่งไม่มีความเป็นกรดตามธรรมชาติ และการเลือกใช้ตัวยัดประสานหรืออลูมิเนียมซิลิเกตในปริมาณที่ลดลงสามารถลดการเกิดกรีนออยล์

โลหะผสมออกไซด์คือการรวมกันของโลหะออกไซด์สองชนิดที่มีเพียงร้อยละ 20 ถึง 25 ที่มีแนวโน้มการสร้างกรีนออยล์ (Green oil formation) น้อยกว่าอะลูมินา ซึ่งผลิตภัณฑ์ดังกล่าวเป็นเกลือที่มีความเสถียรและใช้ในปริมาณสารที่เป็นกรดน้อย การใช้ซีเมนต์เป็นสารยึดเกาะช่วยลดการก่อเกิดกรีนออยล์ (Green oil formation) และลดผลข้างเคียงของการสูญเสียของพื้นผิวอะลูมินาที่ใช้งาน การเกิดกรีนออยล์ (Green oil formation) เกิดมากกว่าการดูดซับสารประกอบคลอไรด์ด้วยซีโอไลต์ เพราะการดูดซับสารประกอบคลอไรด์มีความซับซ้อนมากกว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์หรือโมเลกุลลาร์ซีฟ (Molecular Sieve) คือโมเลกุลที่มีรูพรุนขนาดเล็กและเป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต โดยมีโลหะไอออนบวกอยู่ในโครงสร้างผลึกของโมเลกุลตัวดูดซับเพื่อสร้างสมดุลกับประจุลบรอบๆ โลหะไอออนบวกเหล่านี้สร้างสนามไฟฟ้าที่แข็งแกร่งสำหรับโมเลกุล ที่มีขั้วโมเลกุลแต่ละประเภทใช้แตกต่างกันตามรูปแบบของออลูมิเนียมซิลิเกตเช่นชนิดโครงสร้าง 4A และ 13X เป็นชนิดซีโอไลต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมกำจัดสารประกอบคลอไรด์ ซึ่งโลหะไอออนบวกคือโซเดียม (Na)

ซีโอไลต์มีพื้นผิวที่มีความเป็นกรดสูงโดยไม่สามารถทำให้เป็นกลางได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งบริเวณที่มีสภาพความเป็นกรดสูงบนโมเลกุลลาร์ซีฟสามารถการเกิดปฏิกิริยา พอลิเมอไรเซชันในกระบวนการกลั่นน้ำมันและส่งเสริมการดูดซับสำหรับโมเลกุลลาร์ซีฟชนิด 13X และ 3A

2.2.3 การกำจัดสารประกอบคลอไรด์ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม

ในปัจจุบันเทคโนโลยีของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกนำมาใช้ในการกำจัดคลอไรด์เป็นจำนวนมาก ซึ่งการพัฒนาเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่ได้นำมาใช้ในการกำจัดสารประกอบคลอไรด์ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ได้แก่ อะลูมินา (Activated alumina) โลหะออกไซด์ (Metal oxides) และซีโอไลต์ (Zeolite-based catalysts)

2.2.3.1 อะลูมินา (Activated alumina)

อะลูมินา (Alumina) มีชื่อทางเคมีคือ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide: Al_2O_3) มีรูปร่างโมเลกุลเป็นแบบทรงเหลี่ยมแปดหน้า (Octahedral) จะใช้อะลูมินาที่มีพื้นที่ผิวสูงและทำให้ผิวมีความเป็นกรด (Na_2O) โดยวิธีการหลักในการกำจัดสารประกอบคลอไรด์เป็นวิธีการดูดซับทางเคมีและการดูดติดผิว ซึ่งใช้พื้นที่ผิวของอะลูมินาสูงในการดูดซับสารประกอบไฮโดรเจนคลอไรด์ แต่ก็ยังใช้โซเดียมออกไซด์ช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ได้ยิ่งขึ้น ซึ่งแต่ละโรงกลั่นมีการใช้โซเดียมออกไซด์ระดับความเข้มข้นที่ต่างกัน ซึ่งความเข้มข้นอยู่ในช่วงร้อยละ 6 ถึง 14 โดยปกติในการโฆษณาความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์จะสูงที่สุดเท่าที่ร้อยละ 12 ถึง 14 โดยน้ำหนัก แต่ตามหลักความเป็นจริงมักจะอยู่ในช่วงร้อยละ 6 ถึง 8 โดยน้ำหนัก อะลูมินาไม่

สามารถกำจัดสารประกอบอินทรีย์คลอไรด์ออกจากระบบได้ทั้งหมดแต่สารประกอบอินทรีย์คลอไรด์สามารถดูดซับบนพื้นที่ผิวของอะลูมินาได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งสามารถดูดซับสารประกอบอินทรีย์คลอไรด์ร้อยละ 0.2 ถึง 2 โดยน้ำหนัก ขึ้นอยู่กับชนิดและวิธีการใช้งาน อะลูมินาเป็นสารดูดซับที่ใช้กันมากที่สุดสำหรับกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ การกำจัดสารประกอบคลอไรด์จะใช้ทั้งในระบบของเหลวและระบบไอน้ำ เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ

2.2.3.2 โลหะออกไซด์ (Metal oxides)

ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ถูกใช้งานอย่างกว้างขวางมากเป็นพิเศษเนื่องจากความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมาจากผู้ผลิตที่แตกต่างกัน สำหรับกระบวนการกำจัดสารประกอบคลอไรด์ใช้อนุพันธ์ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และซิงค์ออกไซด์ร่วมกับโลหะต่างๆในตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น Na₂O และ CaO ส่วนใหญ่คือโลหะออกไซด์ที่มีธาตุโลหะเพียงชนิดเดียว (Mono metal oxide) โดยมีซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารยึดประสานเพียงประเภทเดียว ฟังก์ชันการทำงานพื้นฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์เป็นปฏิกิริยาระหว่างก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) และบริเวณพื้นผิวโลหะออกไซด์ โดยมีผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาดังกล่าวอยู่ในรูปแบบของเกลือที่มีความเสถียร โดยเกิดปฏิกิริยาดังนี้



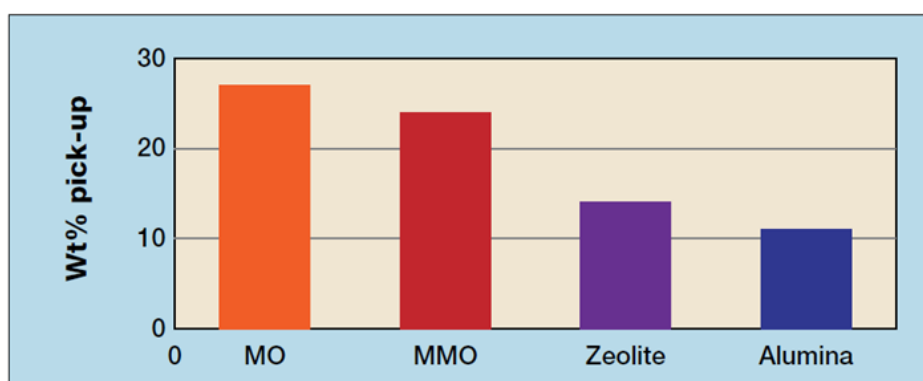
ทางทฤษฎีโลหะออกไซด์มีระดับความเข้มข้นอิมัตว์ของสารประกอบคลอไรด์ค่อนข้างสูงสามารถมีค่าความอิมัตว์ของคลอไรด์ถึงร้อยละ 30 โดยค่าการดูดซับสารประกอบคลอไรด์ดังกล่าวถูกควบคุมสภาพแวดล้อมและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งยังไม่ได้ทำการทดลองในการปฏิบัติที่สภาวะที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งสภาวะที่เกิดขึ้นจริงพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นสัมพันธ์กับอุณหภูมิของระบบ โดยโลหะออกไซด์มีค่าความอิมัตว์ของสารประกอบคลอไรด์ค่อนข้างสูงที่อุณหภูมิต่ำ มักมีความเข้าใจผิดกล่าวว่าโลหะผสมออกไซด์ (MMO) หรือโลหะออกไซด์ (MO) มีสภาวะการดำเนินการที่ดีที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากผลิตภัณฑ์บางประเภทประกอบด้วย โครงสร้างคาร์บอนเนต พื้นที่ผิวและค่าความอิมัตว์ของก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ค่อนข้างมีความสำคัญ โดยโครงสร้างคาร์บอนเนตมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นมากกว่าพื้นที่ผิวและค่าความอิมัตว์ของก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ แต่ก็มีแนวโน้มที่จะทำลายในสภาวะที่ความชื้นสูงหรือระดับของเหลวสูง ในขณะที่โครงสร้างออกไซด์มีเสถียรภาพมากขึ้นและสามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงมากขึ้น แต่มีแนวโน้มมีพื้นที่ผิวที่เกิดปฏิกิริยาต่ำ โดยทั่วไปโลหะออกไซด์ที่มีหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มีพื้นที่ผิวที่เกิดปฏิกิริยาต่ำกว่าอะลูมินาและซีโอไลต์

2.2.3.3 ซีโอไลต์ (Zeolite-based catalysts)

ซีโอไลต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่อิมมัลชันด้วยกรดหรือเกลือโลหะเช่น ซีโอไลต์ที่อิมมัลชันด้วยโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ซึ่งอยู่ในช่วงตั้งแต่ร้อยละ 3 ถึง 10 และจำแนกชนิดของซีโอไลต์ตามขนาดรูพรุนตั้งแต่ช่วง 4 อังสตรอม (A) ถึง ซีโอไลต์ชนิด 13X ขนาด 10 อังสตรอม (10A) ซึ่งซีโอไลต์ชนิดนี้ไม่ได้วางขายในตลาดทั่วไปเหมือนกับโลหะออกไซด์ (Metal Oxide) และอะลูมินา (Alumina) แต่เป็นสารดูดซับที่ถูกพัฒนาจากหลายบริษัทเช่น Unicat และ UOP

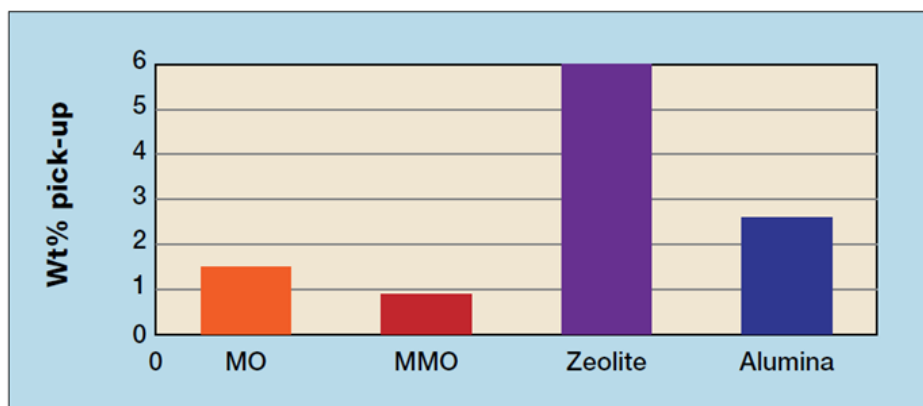
หลักการทำงานของซีโอไลต์อยู่บนหลักการดูดซับทางเคมีซึ่งเกิดบนพื้นผิวและภายในโครงสร้างรูพรุนของซีโอไลต์ หลักการดูดซับของซีโอไลต์เกิดปฏิกิริยากับโลหะออกไซด์ (Metal Oxide) ที่เคลือบไว้บนพื้นผิวของซีโอไลต์ ซีโอไลต์มีแนวโน้มที่จะดูดซับและมีความจุคลอไรด์ได้สูงกว่าอะลูมินาแต่ไม่สูงเท่าในตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ (Metal Oxide) และซีโอไลต์มีความสามารถในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์คลอไรด์สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งซีโอไลต์ประเภท 13X ซึ่งมีขนาดรูพรุน 10 อังสตรอม ซึ่งเป็นที่ทราบว่ามีความสามารถในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์คลอไรด์เช่น คลอโรฟอร์ม (CHCl_3) และคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl_4) เป็นต้น ซึ่งสารประกอบอินทรีย์คลอไรด์ทั้งสองชนิดไม่สามารถกำจัดได้โดยตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ (Metal Oxide) และอะลูมินา

สารดูดซับที่ได้กล่าวข้างต้นได้แก่ อะลูมินา โลหะออกไซด์ และซีโอไลต์มีความสามารถในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ ดังรูปที่ 2.5 และความสามารถในการกำจัดสารประกอบคลอไรด์อินทรีย์ดังรูปที่ 2.6 โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสารประกอบคลอไรด์ต่างกันดังตารางที่ 2.7



รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์เปรียบเทียบโลหะผสมออกไซด์ (MMO) โลหะออกไซด์ (MO) ซีโอไลต์และอะลูมินา

ที่มา : Erfan Manl, 2011



รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์คลอไรด์เปรียบเทียบกับโลหะผสม ออกไซด์ (MMO) โลหะออกไซด์ (MO) ซีโอไลต์และอะลูมินา

ที่มา : Erfan Mani, 2011

ตารางที่ 2.7 ประสิทธิภาพการกำจัดสารประกอบคลอไรด์ในน้ำมัน

ลักษณะ	อะลูมินา	โลหะออกไซด์	ซีโอไลต์
การดูดซับก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์	ปานกลาง	สูง	สูง
การดูดซับสารประกอบอินทรีย์คลอไรด์	ต่ำ	ต่ำ	สูง
เกิดกรีนออยล์ (Green Oil)	สูง	ต่ำ	สูง
ต้นทุน	ต่ำ	สูง	สูง
ขนาดและรูปทรง	ทรงกลม	หลากหลาย	หลากหลาย
วงจรชีวิต	ต่ำ	ต่ำ	สูง

2.3 การดูดซับ (Adsorption) และการคายสารดูดซับ (Desorption)

การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่โมเลกุลของก๊าซมลพิษหรือสารแขวนลอยถูกดูดออกจากกระแสดอากาศ ให้เกาะติดอยู่บนผิวสารดูดซับและเกาะติดผิวด้านในของสารดูดซับ โดยที่โมเลกุลของก๊าซหรือสารแขวนลอยที่ถูกดูดซับเรียกว่า Adsorbate ส่วนสารดูดซับที่เป็นของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า Adsorbent กระบวนการดูดซับเป็นการดูดซับแบบระหว่างสถานะ (Phase) ต่างๆ ได้แก่ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และของแข็ง (Solid) ซึ่งจับตัวระหว่างสถานะได้แก่ ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็งและของเหลวกับของแข็ง โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงเฉพาะแบบก๊าซกับของแข็ง (Gas-Solid Interface) โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะ

เกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของสารดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายโมเลกุลก๊าซพิษไปหาสารดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลหรือจุดอิ่มตัว ซึ่งหลักการดูดซับอยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

การคายสารดูดซับ (Desorption) คือเมื่อผิวของสารดูดซับอิ่มตัวไปด้วยสารที่ถูกดูดซับ ก็จะต้องทำการไล่สารที่ถูกดูดซับไว้ออกจากสารดูดซับ เพื่อให้ผิวและภายในรูพรุนของสารดูดซับมีพื้นที่ว่างสำหรับการดูดซับใหม่ก๊าซพิษใหม่อีกครั้ง ซึ่งเรียกกระบวนการไล่สารที่ถูกดูดซับว่าการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับ (Regeneration)

2.3.1 วิธีการคายสารดูดซับ

ในปัจจุบันวิธีการคายสารดูดซับได้ถูกพัฒนามากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของสารดูดซับและลดปริมาณของเสียสารดูดซับที่เกิดขึ้น ซึ่งหลังจากสารดูดซับถูกใช้งานแล้วจะทำการคายสารดูดซับ ซึ่งมีหลายวิธีได้แก่

- การคายสารดูดซับด้วยสารละลายต่าง คือการล้างสารดูดซับด้วยสารละลายต่างเช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนต ฯลฯ เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุของสารละลายต่างกับสารที่ถูกดูดซับ
- การคายสารดูดซับด้วยสารละลายกรด คือการล้างด้วยสารละลายกรดเนื่องจากกรดมีหน้าที่เป็นสารออกซิไดส์ที่ดี จึงสามารถชะละลาย หรือสกัดโลหะปริมาณน้อยได้
- การคายสารดูดซับด้วยการให้ความร้อน คือการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ เนื่องจากความร้อนสามารถทำลายโครงสร้างหรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารที่ถูกดูดซับกับสารดูดซับได้ เมื่อสารดูดซับร้อนขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง โมเลกุลของก๊าซซึ่งถูกดูดซับไว้จะออกจากผิวของสารดูดซับ
- การคายสารดูดซับด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี คือการใช้กระแสไฟฟ้าเข้ามาช่วยในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งกระบวนการไฟฟ้าเคมีกระตุ้นให้มีการคายสารดูดซับ ซึ่งเป็นกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอ็อกซิเจนที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าและสารที่ถูกดูดซับหลุดออกไป หลังจากปฏิกิริยาออกซิเดชันทำลายสารอินทรีย์บนพื้นผิวสารดูดซับ
- การคายสารดูดซับด้วยวิธีการไล่ด้วยก๊าซเฉื่อย คือ การไล่โมเลกุลของก๊าซที่ถูกดูดซับไว้ออกจากสารดูดซับ เนื่องจากก๊าซเฉื่อยมีหน้าที่ไปลดความดันย่อยของสารที่ถูกดูดซับ

ซึ่งเป็นเพลิงก๊าซ ทำให้เกิดการกลับค่าเกรเดียนต์ความเข้มข้นของโมเลกุลของก๊าซที่ถูกดูดซับจึงหลุดออกจากผิวเข้าไปในกระแสก๊าซ

- การคายสารดูดซับด้วยระบบอุตราโซนิก คือ ใช้คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 KHz ซึ่งเป็นคลื่นที่มีทิศทางจึงสามารถเจาะจงคลื่นเสียงไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้ เมื่อคลื่นเดินทางผ่านตัวกลาง ทำให้ของเหลวเกิดการแตกตัวและเกิดฟองอากาศได้ โดยระบบอุตราโซนิกมีประโยชน์ต่อการแตกพันธะของสารดูดซับกับสารถูกดูดซับ
- การเปลี่ยนแปลงของความดัน คือความดันถูกลดลงที่อุณหภูมิคงที่เพื่อลดความสามารถของสารดูดซับทำให้สารถูกดูดซับสามารถหลุดออกมาจากสารดูดซับได้ง่าย

2.3.1.1 การคายสารดูดซับด้วยต่าง

Cannan (2002) ได้ทำการศึกษาการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ชนิด A ที่ผ่านใช้งานในกระบวนการดูดซับความชื้นในก๊าซธรรมชาติ ซึ่งขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับด้วยสารละลายต่างคือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ร่วมกับการทำงานด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิที่ 20 ถึง 110 องศาเซลเซียส ก่อนจะนำไปทำให้แห้งและเผาให้เป็นเถ้าที่อุณหภูมิ 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูมีค่าประมาณร้อยละ 90 ถึง 95 เมื่อเปรียบเทียบกับซีโอไลต์ที่ยังไม่ได้ใช้งาน และยังพบว่าสารละลายต่างที่ใช้คือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ช่วยให้โลหะอัลคาไลน์ที่อยู่ในสารละลายต่างเกิดการแทรกกลับเข้าไปยังอะตอมอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นการรักษาผลึกของซีโอไลต์ไม่ให้เสียหาย และการฟื้นฟูด้วยสารละลายต่างยังช่วยให้คาร์บอนที่เกาะติดกับ ซีโอไลต์เกิดการเผาไหม้ในกระบวนการเผาไหม้อีกด้วย

2.3.1.2 การคายสารดูดซับโดยใช้การย่อยสลายด้วยกรด

การย่อยแบบเปียก (Wet digestion) โดยใช้กรดเป็นการย่อยสลาย เกิดได้ในระบบเปิดและระบบปิด โดยสามารถใช้กรดได้หลายชนิดเช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กรดไนตริก (HNO_3) กรดไฮโดรเจนคลอริก (HCl) เป็นต้น ความจำเพาะเจาะจงในการเลือกใช้กรดขึ้นกับตัวอย่างที่ต้องการย่อยสลาย สำหรับตัวอย่างสารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แต่สำหรับการย่อยสารอนินทรีย์เช่น เซรามิก มักเลือกใช้กรดอนินทรีย์หรือกรดแร่เป็นรีเอเจนต์โดยอาจใช้กรดเพียงชนิดเดียวหรือมีการผสมกรด 2 ชนิด ซึ่งในการย่อยสลายโดยตัวอย่างกรดที่ใช้ (ISO DINEN, 1972)ได้แก่

1) กรดไนตริก (HNO_3)

กรดไนตริกมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรง สามารถละลายโลหะได้เกือบทุกชนิดยกเว้นอะลูมิเนียมและโครเมียมโดยพื้นผิวเปลี่ยนเป็นออกไซด์ แต่ในบางกรณีถ้าโลหะผสมดีบุก ทั้งสแตนหรือพลวง เมื่อย่อยสลายด้วยกรดไนตริกจะเปลี่ยนเป็นไฮเดรตออกไซด์ที่มีความสามารถละลายได้น้อย ($\text{SnO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) เมื่อตกตะกอนก็สามารถแยกออกจากตัวอย่างด้วยการกรอง

2) กรดไฮโดรคลอริก (HCl)

กรดไฮโดรคลอริกเป็นกรดที่ย่อยสลายตัวอย่างอนินทรีย์ที่ดีที่สุดแต่มีข้อจำกัดสำหรับตัวอย่างสารอินทรีย์เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 12 โมลาร์จนอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส กรดสามารถระเหยจนความเข้มข้นลดลงเหลือ 6 โมลาร์

3) กรดไฮโดรฟลูออริก (HF)

กรดไฮโดรฟลูออริกใช้ในการย่อยสลายหินซิลิเกตและแร่ เพื่อวิเคราะห์ธาตุต่างๆ แต่ในบางกรณีอาจผสมกรดไฮโดรฟลูออริกกับกรดชนิดอื่น เพื่อย่อยสลายเหล็ก แต่เนื่องจากกรดไฮโดรฟลูออริกมีความเป็นพิษที่สูง จึงต้องทำการทดลองแบบระมัดระวังโดยทำการทดลองในตู้ดูดควัน

4) กรดซัลฟูริก (H_2SO_4)

กรดซัลฟูริกเป็นกรดที่มีจุดเดือดสูงถึง 340 องศาเซลเซียส สารตัวอย่างส่วนใหญ่ทั้งในรูปสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ย่อยสลายได้หมด

5) กรดเปอร์คลอริก (HClO_4)

กรดเปอร์คลอริกเป็นสารออกซิไดส์ที่รุนแรง จึงมีความสามารถย่อยสลายโลหะหรือโลหะผสมได้ดีกว่ากรดชนิดอื่นๆ เนื่องจากกรดเป็นสารออกซิไดส์ที่รุนแรงจึงอาจเกิดระเบิดได้เมื่อสัมผัสกับตัวอย่างที่เป็นสารอินทรีย์จึงต้องทำการทดลองอย่างระมัดระวังโดยทำการเพิ่มความเข้มข้นที่ละน้อยในการย่อยสลายตัวอย่าง

6) สารออกซิไดส์ผสม

ตัวอย่างบางชนิดไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกรดเพียงชนิดเดียวจึงต้องทำการผสมกรดสองชนิดเพื่อช่วยในการย่อยสลายตัวอย่างและช่วยย่อยสลายตัวอย่างให้เร็วขึ้น เช่นใช้กรดย่อยสลายทองโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกต่อกรดไนตริก อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร

- กรดไนตริกและกรดไฮโดรคลอริก

บางครั้งการย่อยสลายด้วยกรดไนตริกเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอสำหรับการทำลายสารบางตัว จึงต้องมีการเติมกรดไฮโดรคลอริกช่วย เช่นการวิเคราะห์พลวง (Sb) รูทีเนียม (Ru) และดีบุก (Sn) โดยข้อจำกัดของกรดไฮโดรคลอริกคือไม่เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ทอเรียม (Th) และตะกั่ว (Pb)

- กรดไนตริกและกรดซัลฟูริก

เพื่อเพิ่มจุดเดือดของกรดไนตริก จึงใช้งานร่วมกับกรดซัลฟูริก เพื่อให้เป็นสารออกซิไดส์ได้ดียิ่งขึ้น ถ้าใช้กรดซัลฟูริกเพียงตัวเดียวจะทำให้ตัวอย่างสารอินทรีย์ไหม้และกรดซัลฟูริกทำให้เกิดการระเหยของสารหนู (As) และซีลีเนียม (Se)

- กรดไนตริกและกรดเปอร์คลอริก

กรดเปอร์คลอริกเป็นสารออกซิไดส์ที่รุนแรงมากเหมาะสำหรับตัวอย่างที่มีสารอินทรีย์สูงมาก เช่นพวกไขมัน ดังนั้นต้องใช้ร่วมกับกรดอื่นๆและต้องระวังไม่ให้แห้ง มิฉะนั้นอาจเกิดการระเบิดได้ จึงต้องทำงานร่วมกับกรด ไนตริก เพื่อป้องกันการระเบิด

กรดอนินทรีย์ที่กล่าวมาข้างต้นมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันดังตารางที่ 2.8 จึงต้องเลือกรีเอเจนต์กรดให้เหมาะสมกับตัวอย่างตามคุณสมบัติของกรดและคุณสมบัติของตัวอย่างที่ต้องย่อยสลาย ควรคำนึงถึงข้อจำกัดในกรดแต่ละชนิดและต้องทราบองค์ประกอบในตัวอย่างเพื่อป้องกันการระเบิดจากปฏิกิริยาย่อยสลาย

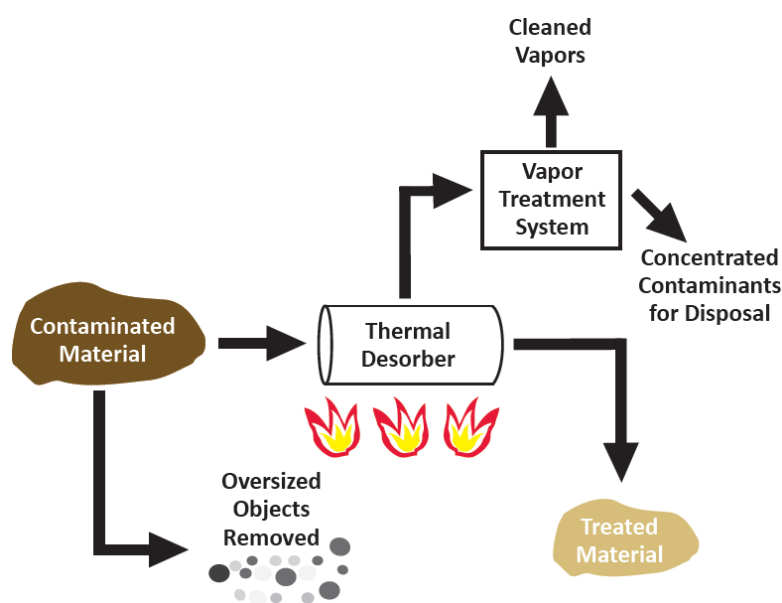
ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติของกรดชนิดต่างๆ

สูตร	มวลโมเลกุล	ความเข้มข้น		ความหนาแน่น Kgl ⁻¹	จุดเดือด °C
		w/w	%		
HNO ₃	63.01	68	16	1.42	122
HCl	36.46	36	12	1.19	110
HF	20.01	48	29	1.16	112
HClO ₄	100.46	70	12	1.67	203
H ₂ SO ₄	98.08	98	18	1.84	338
H ₃ PO ₄	98	85	15	1.71	213
H ₂ O ₂	34.01	30	10	1.12	106

ที่มา: Matusiewicz, 2003

2.3.1.3 การคายสารดูดซับโดยกระบวนการความร้อน (Thermal desorption)

ระบบให้ความร้อนให้โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆกับสารดูดซับที่ปนเปื้อนดังรูปที่ 2.7 ซึ่งจะทำให้สารปนเปื้อนเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและหลุดจากการยึดเหนี่ยวกับสารดูดซับได้ง่ายมากขึ้น สำหรับเทคโนโลยีการใช้ความร้อนเป็นเทคโนโลยีที่ทำลายโครงสร้างและแรงยึดเหนี่ยวของสารปนเปื้อนในสารดูดซับ ซึ่งในงานวิจัยได้นำกระบวนการให้ความร้อนเข้ามาช่วยในการคายสารดูดซับร่วมกับการคายสารดูดซับวิธีอื่นเช่นการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ด้วยต่าง เป็นต้น



รูปที่ 2.7 กระบวนการคายสารดูดซับด้วยความร้อนจนสารปนเปื้อนระเหย

ที่มา : (EPA, 2012)

2.3.1.4 กระบวนการไฟฟ้าเคมี

เซลล์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical cell) คือ เครื่องมือหรืออุปกรณ์ทางเคมีที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเคมี โดยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

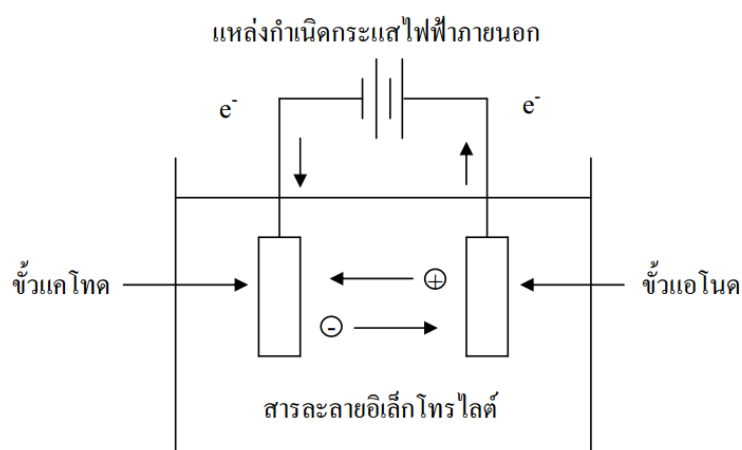
o เซลล์กัลวานิกหรือเซลล์โวลตาอิก เป็นเซลล์ที่ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเกิดได้เองโดยไม่ต้องจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยเกิดจากสารเคมีทำปฏิกิริยากันในเซลล์แล้วก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น และยังมีพลังงานปลดปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้น เซลล์กัลวานิกจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนดโดยมีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นลบและจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดมีค่า

ศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดผ่านตัวนำไฟฟ้าภายนอก เซลล์อิเล็กโทรไลต์ เซลล์กัลวานิกได้แก่ ถ่านไฟฉาย แบตเตอรี่ตะกั่ว เซลล์แอลคาไลน์ แบตเตอรี่แคดเมียม เซลล์ปรอท เซลล์เงิน

o เซลล์อิเล็กโทรไลติก คือ เป็นเซลล์ที่ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้นไม่ได้เอง ซึ่งเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดหนึ่งที่ใช้พลังงานไฟฟ้าทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ต้องให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปในเซลล์ จะทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้นในเซลล์นั้น โดยขั้วแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกส่วนขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันและมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ

ตารางที่ 2.9 การเปรียบเทียบเซลล์กัลวานิกและเซลล์อิเล็กโทรไลต์

เซลล์กัลวานิก	เซลล์อิเล็กโทรไลต์
1. เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เปลี่ยนพลังงานเคมีให้เป็นพลังงานไฟฟ้า	1. เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานเคมี
2. ขั้วแอโนด เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน	2. ขั้วแอโนด เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน
3. ขั้วแคโทด เกิดปฏิกิริยารีดักชัน	3. ขั้วแคโทด เกิดปฏิกิริยารีดักชัน
4. ขั้วลบ เป็นขั้วที่อิเล็กตรอนไหลออก	4. ขั้วลบ เป็นขั้วที่ต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า
5. ขั้วบวก เป็นขั้วที่อิเล็กตรอนไหลเข้า	5. ขั้วบวก เป็นขั้วที่ต่อกับขั้วบวกของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า
6. ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เป็นบวก	6. ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เป็นลบ
7. ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เอง	7. ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นได้ต้องใช้กระแสไฟฟ้า (ไฟฟ้ากระแสตรง)



รูปที่ 2.8 องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี

ที่มา วรณรัตน์ วัฒนชัย, 2547

1. ส่วนประกอบของเซลล์อิเล็กโทรไลต์

การแยกไอออนในสารละลายด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีสามารถทำได้โดยให้กระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าภายนอกไปยังขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วที่จมอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งไอออนในการละลายสามารถแยกตัวออกจากสารละลาย ส่วนประกอบที่สำคัญของกระบวนการนี้ ได้แก่ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากภายนอก สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และขั้วไฟฟ้าสองขั้ว ดังรูปที่ 2.8 โดยแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าภายนอกเป็นส่วนที่ใช้เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าซึ่งควบคุมปริมาณของกระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าที่ผ่านเซลล์ตามที่กำหนด (Bard และคณะ, 1980)

- **ขั้วไฟฟ้า (Electrode)** คือส่วนประกอบของครึ่งเซลล์ไฟฟ้า มีหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้า โดยทั่วไปมักจะใช้ขั้วเฉื่อยในเซลล์หนึ่ง ๆ จำแนกขั้วตามเกณฑ์ต่าง ๆ ดังนี้

การจำขั้วตามสมการการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ก. ขั้วแอโนด (Anode) เป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งวัสดุที่นำมาใช้เป็นขั้วแอโนดจะต้องไม่แตกตัวให้โลหะไอออน (M^+)

ข. ขั้วแคโทด (Cathode) เป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน

การจำแนกขั้วตามการต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า

ก. ขั้วบวกเป็นขั้วที่ต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งขั้วนี้จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน คือไอออนลบในสารละลายจะให้ อิเล็กตรอนแก่ขั้วไฟฟ้าบวก

ข. ขั้วลบเป็นขั้วที่ต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งขั้วนี้จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้น คือไอออนบวกในสารละลายจะมารับอิเล็กตรอนที่ขั้วนี้

- **สารอิเล็กโทรไลต์** คือ สมบัติของสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยาและกระบวนการ เช่น องค์ประกอบ ความเข้มข้น ค่าความเป็นกรด-เบสหรืออุณหภูมิเช่น สารประกอบไอออนิกที่หลอมเหลวหรือสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สารละลายกรด สารละลายเบสและเกลือ

2. กระบวนการอิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis)

คือ กระบวนการแยกสารอิเล็กโทรไลต์โดยการผ่านไฟฟ้ากระแสตรงลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นที่ขั้วบวก และขั้วลบของเซลล์อิเล็กโทรไลต์นั้นโดยมีประโยชน์การใช้งานหลายอย่าง

ก. การแยกสารประกอบไอออนิกหลอมเหลวด้วยไฟฟ้าเช่น เกลือโซเดียมคลอไรด์ เมื่อถูกทำให้หลอมเหลวจะเกิดเป็นไอออนบวกและไอออนลบ ซึ่งเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปทำให้ไอออน

นบวกละลายที่เข้าหาขั้วลบ เพื่อเข้าไปรับอิเล็กตรอนหรือเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ส่วนไอออนลบเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวกเพื่อจ่ายอิเล็กตรอน หรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

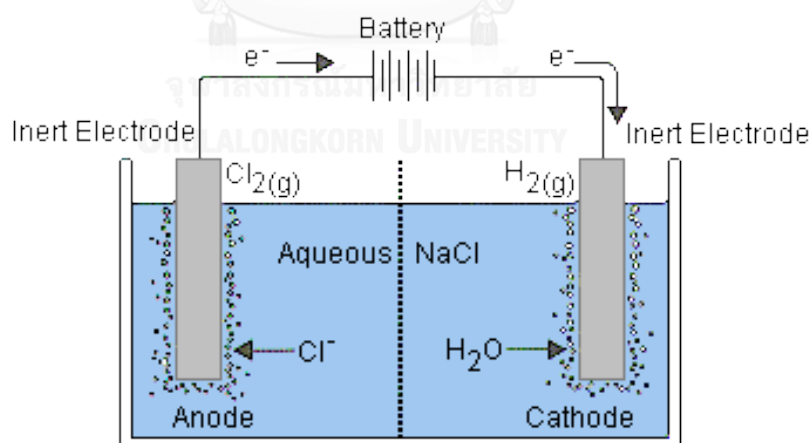
ข. การแยกสารละลายอิเล็กโทรไลต์ด้วยไฟฟ้า

สารละลายอิเล็กโทรไลต์จะประกอบด้วยตัวถูกละลายชนิดต่าง ๆ ที่เป็นสารอิเล็กโทรไลต์และน้ำ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายเช่น สารละลายของ NaCl (aq) มีไอออนบวกคือ $\text{Na}^+ \text{(aq)}$ และไอออนลบ คือ $\text{Cl}^- \text{(aq)}$ ซึ่งไอออนทั้งสองถูกน้ำล้อมรอบอยู่ (aq=aqueous มีน้ำล้อมรอบ) ดังนั้นในสารละลายนี้จึงมีองค์ประกอบ 3 ชนิด ได้แก่ น้ำ (ตัวทำละลาย), $\text{Na}^+ \text{(aq)}$ และ $\text{Cl}^- \text{(aq)}$ (ตัวถูกละลาย)

การแยกสารละลายอิเล็กโทรไลต์ด้วยไฟฟ้าที่เกิดขึ้นคือน้ำและไอออนลบของตัวถูกละลายจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวกเพื่อไปให้อิเล็กตรอนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งสารใดจะเป็นตัวให้อิเล็กตรอนหรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน พิจารณาจากค่า E^0 ถ้ามีค่า E^0 ต่ำ สารนั้นจะเป็นตัวเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน คือ เกิดการให้อิเล็กตรอนที่ขั้วบวกนั้นได้ดีกว่าที่เหลือก็ไม่เกิดปฏิกิริยาใด ๆ

ส่วนน้ำและไอออนบวกของตัวถูกละลาย จะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวกไปรับอิเล็กตรอนเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ในทำนองเดียวกันสารใดจะสามารถรับอิเล็กตรอนได้ดีก็ให้พิจารณาจากค่า E^0 โดยถ้ามีค่า E^0 สูงกว่าสารนั้นก็จะสามารถรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าสารที่เหลือก็จะไม่เกิดปฏิกิริยา

3. การแยกสารละลายโซเดียมคลอไรด์ด้วยไฟฟ้า

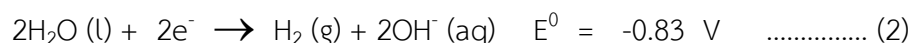


รูปที่ 2.9 การแยกสารละลายโซเดียมคลอไรด์ด้วยไฟฟ้า

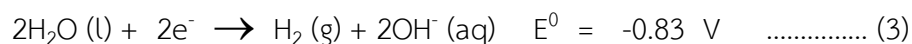
ที่ขั้วแคโทด (ขั้วลบ)

โมเลกุลของน้ำและ $\text{Na}^+ \text{(aq)}$ เคลื่อนที่เข้าหาขั้วลบเพื่อรับอิเล็กตรอน ซึ่งสารใดจะสามารถรับอิเล็กตรอนได้ดีพิจารณาจากค่า E^0 ดังนี้

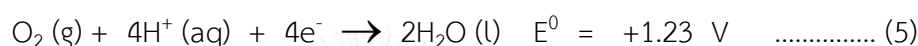




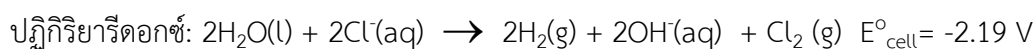
จากการพิจารณาค่า E^0 พบว่า E^0 ของปฏิกิริยาในสมการที่ 2 สูงกว่าปฏิกิริยาในสมการที่ 1 แสดงว่าเกิดปฏิกิริยาสารตามสมการที่ 2 ได้ง่ายกว่าเกิดสารในสมการที่ 1 ดังนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวก หรือขั้วแอโนดคือ



ที่ขั้วแอโนด (ขั้วบวก) โมเลกุลของน้ำและคลอไรด์ไอออนเคลื่อนที่เข้าไปให้อิเล็กตรอนซึ่งสารใดจะสามารถให้อิเล็กตรอนได้พิจารณาจากค่า E^0 ดังนี้



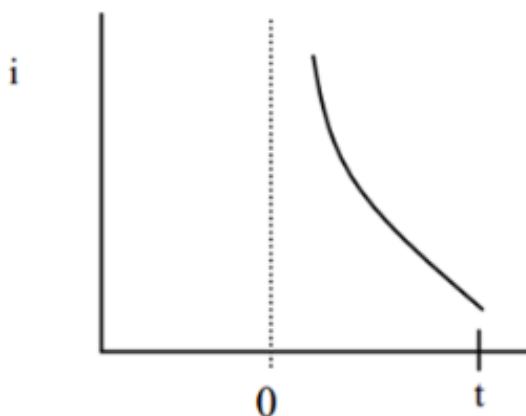
ค่า E^0 ของปฏิกิริยาในสมการทั้งสองใกล้เคียงกัน แสดงว่าคลอไรด์ไอออนแล่นนำถูกออกซิไดส์ได้เกือบเท่ากัน ดังนั้นความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดสารผลิตภัณฑ์ โดยถ้าความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนมากจะเกิดก๊าซคลอรีนและถ้าความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนน้อยมากก็จะเกิดแก๊สออกซิเจนจากน้ำในปฏิกิริยาที่ 5 แต่ถ้าความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนปานกลางจะพบว่าคลอไรด์ไอออนถูกออกซิไดส์เกิดแก๊สคลอรีนเพราะคลอไรด์ไอออนมีความว่องไวในการถูกออกซิไดส์ได้ดีกว่าน้ำและค่าศักย์เกิน (Overpotential) ค่าศักย์เกินของออกซิเจน (Oxygen overpotential) มักจะมีค่ามากกว่าค่าศักย์เกินของคลอรีนมาก โดยค่าศักย์เกินคือความแตกต่างระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่คำนวณจากค่าศักย์มาตรฐานครึ่งเซลล์ของปฏิกิริยารีดักชันในทางเทอร์โมไดนามิกส์เทียบกับค่าศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นจริงจากการทดลอง สำหรับเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์พบว่าค่าศักย์เกินมีความต้องการพลังงานในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าค่าที่คำนวณได้จากค่าศักย์มาตรฐานครึ่งเซลล์ของปฏิกิริยา



4. การควบคุมการทำงานของกระบวนไฟฟ้าเคมีแบ่งเป็น 2 ประเภท

1. การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ (controlled-Potential Method)

เป็นการทำงานโดยควบคุมค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าให้มีค่าคงที่ ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าในระบบเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา ศักย์ไฟฟ้าของขั้วทำงานจะถูกควบคุมให้คงที่ตลอดเวลาเทียบกับขั้วอ้างอิง เมื่อทำการแยกสลายด้วยไฟฟ้าจะพบว่ากระแสไฟฟ้าจะลดลงแบบเอ็กโปเนนเชียลเทียบกับเวลา (ตามความเข้มข้นที่ลดลง) ดังรูป 2.10 ปริมาณไฟฟ้าหาได้จากการอินทิเกรตพื้นที่ใต้กราฟ (Helfferich, 1962)



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่

2. การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ (Controlled-Current Method)

เป็นการควบคุมให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งสองคงที่ทำให้สารออกซิไดซ์ ซึ่งเกิดปฏิกิริยารีดักชันจนกลายเป็นสารรีดิวซ์ ด้วยอัตราเร็วที่คงที่ โดยค่าความต่างศักย์จะแปรตามความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลง ที่ผิวขั้วไฟฟ้ากับเวลา ซึ่งพบว่าเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นค่าความต่างศักย์ที่ผิวของขั้วไฟฟ้าก็จะลดลงเช่นกันตามสมการเนินสต์ (Nerns' equation)

$$E_{\text{cell}} = E^0 - \left(\frac{RT}{nF}\right) \ln \frac{[\text{Product}]}{[\text{Reactant}]}$$

เมื่อ E_{cell} = ศักย์ไฟฟ้าของครึ่งเซลล์ที่สภาวะใดๆ (v)

E^0_{cell} = ศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานของปฏิกิริยา (v)

R = ค่าคงที่ของแก๊ส = 0.0821 (L atm K⁻¹ mol⁻¹)

T = อุณหภูมิ (K)

n = จำนวนโมลของอิเล็กตรอนที่ถูกถ่ายเทในปฏิกิริยา (mol)

F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ = 96500 (C/mol)

2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการคายสารดูดซับ

1) ลักษณะของสารที่ถูกดูดซับ

สารถูกดูดซับเป็นปัจจัยสำคัญในการคายสารดูดซับเนื่องจากความสามารถในการละลายของสารเป็นปัจจัยสำคัญในการคายสารดูดซับ เนื่องจากการคายสารถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้นในน้ำ กรด หรือด่าง เพราะสารที่เกาะติดกับสารดูดซับ ถ้ามีความสามารถในการละลายสูงจะทำให้คายสารดูดซับออกมาได้สูง

2) ค่าความเป็นกรดและด่าง

ค่าความเป็นกรดและด่างมีความสำคัญต่อการคายสารดูดซับ เนื่องจากค่าความเป็นกรดและด่างมีอิทธิพลต่อความสามารถในการละลายและการแตกตัวเป็นไอออน ค่าความเป็นกรดและด่างจึงมีผลต่อการคายสารดูดซับ

3) อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่ออัตราเร็วและความสามารถในการคายสารดูดซับ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราเร็วเพิ่มขึ้นและส่งผลให้การคายสารดูดซับเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิสามารถทำลายโครงสร้างหรือแรงยึดเหนี่ยวที่สารถูกดูดซับยึดติดกับซีโอไลต์ (พีระ ชนะชัย, 2548)

4) เวลาสัมผัส

เวลาในการสัมผัสระหว่างสารดูดซับกับสารละลายจากวิธีการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับ ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการคายสารดูดซับแต่สัมพันธ์กันในช่วงเวลาหนึ่ง เนื่องจากถ้าเลยช่วงที่คายสารดูดซับจนมากที่สุดแล้วก็จะเข้าสู่การคายสารดูดซับในอัตราคงที่ หลังจากช่วงนี้จึงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการคายสารดูดซับ

2.4 ซีโอไลต์

ซีโอไลต์ (Zeolite) เป็นผลึกของสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminosilicates) ของโลหะอัลคาไลน์หรือโลหะอัลคาไลน์เอิร์ท ซีโอไลต์พบได้ทั้งในธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ ซึ่งซีโอไลต์ที่ได้จากสังเคราะห์จะสามารถควบคุมและกำหนดขนาด โครงสร้างและขนาดรูพรุนที่ต้องการได้ โดยอาศัยการควบคุมกระบวนการสังเคราะห์ นอกจากนี้จะพบซีโอไลต์ในรูปของโครงสร้างผลึกอะลูมิเนียมซิลิเกตแล้วยังพบได้ในรูปอื่นๆ เช่น โครงสร้างอะลูมิเนียมฟอสเฟต (Aluminophosphates) หรือ เมทัลโลซิลิเกต (Metallosilicates) เป็นต้น ซึ่งซีโอไลต์แต่ละชนิดจะมีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกันตามลักษณะทางโครงสร้าง ส่งผลให้ซีโอไลต์ได้รับความสนใจและนำมาใช้ประโยชน์อย่างหลากหลาย เช่น ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน ตัวเร่งปฏิกิริยา และสารดูดซับสารปนเปื้อนดังตารางที่ 2.10 ซึ่งจำเป็นจะต้องพิจารณาขนาดผลึกของซีโอไลต์ให้เหมาะสมกับการใช้ประโยชน์ในแต่ละกระบวนการนั้น ๆ เช่น ซีโอไลต์ที่มีขนาดผลึกประมาณ 1 ไมโครเมตรเหมาะสมในกระบวนการดูดซับและการเร่งปฏิกิริยา ขนาด 3 ถึง 4 ไมโครเมตร เหมาะสมกับกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนและเป็นสารชักล้าง นอกจากนี้ขนาดผลึกที่เหมาะสมแล้ว ยังพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีและความเป็นขั้วของซีโอไลต์ยังเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อความเหมาะสมในการนำซีโอไลต์มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ดังนั้นซีโอไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ จึงมีความสำคัญต่อการนำมาประยุกต์ได้หลากหลายกว่าซีโอไลต์จากธรรมชาติ เนื่องจากสามารถควบคุมคุณสมบัติที่จำเป็นของซีโอไลต์ดังกล่าวได้ เช่น ขนาด โครงสร้าง องค์ประกอบ เป็นต้น เพื่อสังเคราะห์ซีโอไลต์ให้มีคุณสมบัติจำเพาะเจาะจงมากยิ่งขึ้น ตัวอย่างการประยุกต์ซีโอไลต์เป็น

ตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้แก่ การกลั่นน้ำมัน ปิโตรเคมี การผลิตสารเคมีพิเศษ (Fine chemicals) ระบบควบคุมไอเสีย (Emission control) สารเติมในสารซักล้าง (Detergent builder) และกระบวนการดูดซับและการแยก (Adsorption and Separation processes) เป็นต้น (Guisnet และคณะ, 2002)

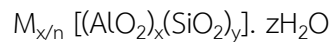
ตารางที่ 2.10 ซีโอไลต์ชนิดต่างๆ

ชนิด	เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน (อังสตรอม)	ความหนาแน่นรวม (กรัมต่อมล.)	การใช้ประโยชน์
3Å	3	0.60-0.68	กระบวนการทำให้แห้งในกระบวนการแตกสลายของโครงสร้างก๊าซและแอลคีน
4Å	4	0.60-0.65	การดูดซับน้ำในอะลูมิเนียมซิลิเกตโซเดียม ซึ่งองค์การอาหารและยาได้รับการอนุมัติใช้เป็นโมเลกุลาร์ซีฟในภาชนะบรรจุทางการแพทย์เพื่อดูดซับความชื้นและกำจัดสารปนเปื้อนในก๊าซเช่น SO ₂ , CO ₂ , H ₂ S, C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆ และ C ₃ H ₆
5Å	5	0.60-0.65	กระบวนการกำจัดความชื้นและสารปนเปื้อนเช่นกำจัดความชื้นและ ซัลเฟอร์ในก๊าซธรรมชาติ
10X	8	0.50-0.60	มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงใช้สำหรับกระบวนการทำให้แห้งและกระบวนการสูญเสียคาร์บอนของเหล็กและการกำจัดซัลเฟอร์
13X	10	0.55-0.65	กระบวนการทำให้แห้ง กระบวนการกำจัดซัลเฟอร์และกำจัดสารปนเปื้อนในปิโตรเลียม ก๊าซและก๊าซธรรมชาติ
13X-AS	10	0.55-0.65	กระบวนการสูญเสียคาร์บอนของเหล็ก กระบวนการทำให้แห้งในอากาศ การแยกไนโตรเจนออกจากออกซิเจน

ที่มา: Sigma Aldrich, 2014

2.4.1 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์

โครงสร้างของซีโอไลต์มีลักษณะเป็นโครงร่าง 3 มิติ เป็นรูปทรงสี่หน้าของอะลูมิเนียมออกซิเจน (AlO_4 Tetrahedral) และรูปทรงสี่หน้าของซิลิกอน-ออกซิเจน (SiO_4 Tetrahedral) ซึ่งทำปฏิกิริยากัน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นอะลูมิเนียมซิลิเกตดังรูปที่ 2.11 โดยเชื่อมต่อกับออกซิเจนไม่มีที่สิ้นสุด ทำให้ซีโอไลต์มีสูตรโมเลกุลดังนี้

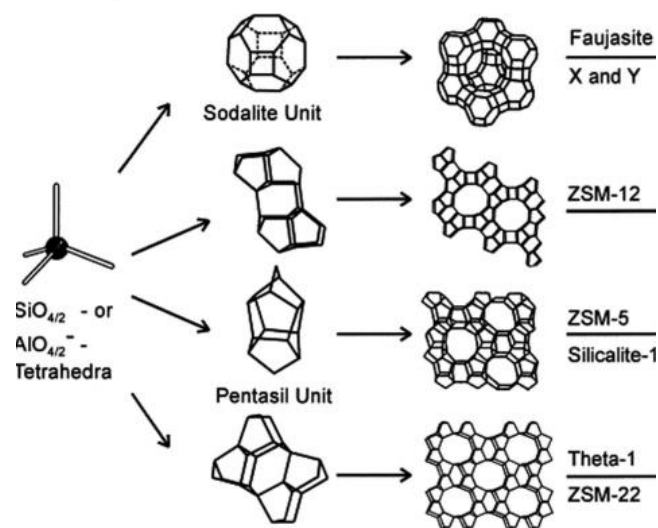


โดยที่ x, y = เลขจำนวนเต็ม (ค่า x/y มากกว่าหรือเท่ากับ 1 ซึ่งมักใช้เป็นตัวชี้หนึ่งสำหรับแบ่งชนิดของซีโอไลต์) ประจุของไอออนบวก

Z = จำนวนโมเลกุลของน้ำที่มีอยู่ในผลึกของซีโอไลต์

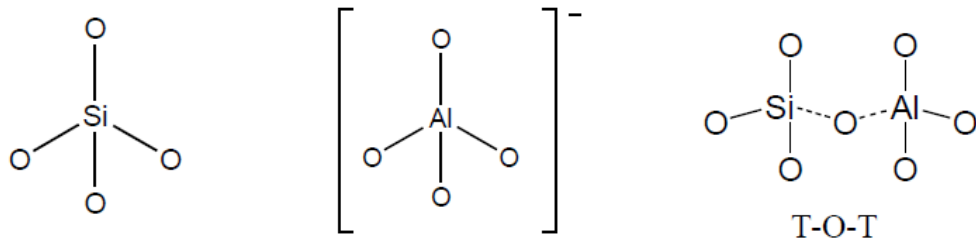
M = โลหะหมู่ I หรือ II ซึ่งมีประจุบวกเท่ากับ n เพื่อดุลประจุลบ ณ ตำแหน่งของอะตอมอะลูมิเนียม

โครงสร้างหน่วยปฐมภูมิ (Primary Units) เททระฮีดรอล (Tetrahedral structure) ของ TO_4 เมื่อ TO_4 แทน SiO_4 หรือ AlO_4 เชื่อมกันด้วยอะตอมออกซิเจนเขียนแทนด้วย T-O-T เมื่อหน่วย TO_4 หลายหน่วยจัดเรียงตัวกันซ้ำๆเกิดก่อตัวเป็นผลึกพอลิเมอร์ (Polymeric crystalline) ดังรูปที่ 2.12 กระบวนการก่อตัวของโครงสร้างจะเริ่มจาก TO_4 ก่อตัวเป็นหน่วยย่อย (Subunit) และขยายโครงสร้างใหญ่ขึ้นเป็นแลตทิซ (Lattice) ที่เป็นหน่วยที่เล็กที่สุด หรือเรียกว่า หน่วยเซลล์ (Unit cell) ได้เป็นผลึกที่สมบูรณ์ ที่มีโครงสร้างเป็นสองมิติหรือสามมิติ เมื่อโครงสร้างทุติยภูมิต่อกันเป็นรูปเหลี่ยมต่างๆเป็นวงเดียว เรียกว่าหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary Building Units: SBU) ดังรูปที่ 2.13 เช่น S_4R S_6R D_4R เป็นต้น



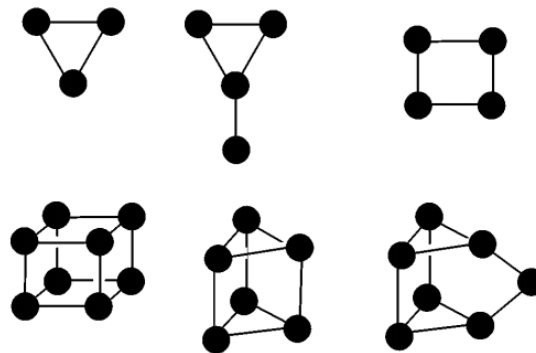
รูปที่ 2.11 โครงสร้างอะลูมิเนียมซิลิเกตในซีโอไลต์แต่ละชนิด

ที่มา : Lopes และคณะ, 2014



รูปที่ 2.12 โครงสร้างปฐมภูมิ TO_4 (SiO_4 และ AlO_4) และ T-O-T

ที่มา: จตุพร วิทยาคุณ และคณะ, 2547

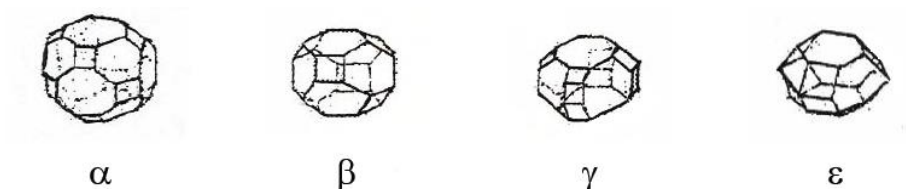


รูปที่ 2.13 หน่วยโครงสร้าง

ที่มา : Sol-Gel, 2005

หน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้า (Polyhedral Unit) ดังรูปที่ 2.14 เป็นรูปทรงสมมาตรขนาดใหญ่ เกิดจากโครงสร้างปฐมภูมิต่อกันแบบซับซ้อนมาก

- รูปทรงเหลี่ยมแปดหน้ามุมตัด หรือ β (Truncated octahedral type)
- รูปทรงสิบแปดหน้า หรือ γ (18-hedron)
- รูปทรงยี่สิบหกหน้า หรือ α (Truncate cubooctahedron)



รูปที่ 2.14 หน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้า

ที่มา: จตุพร วิทยาคุณ และคณะ, 2547

2.4.2 คุณสมบัติของซีโอไลต์

- มีโครงสร้างผลึกและสามารถกำหนดขนาดผลึกได้
- สามารถกำหนดขนาดของรูพรุนและรูปร่างทางเรขาคณิตได้
- มีสมบัติจำเพาะต่อรูปร่างโมเลกุล (Shape selectivity)
- มีสมบัติความเป็นกรดที่แรงและสามารถปรับค่าความแรงของกรดได้
- มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง
- โครงสร้างของซีโอไลต์สามารถปรับปรุงได้

การคัดขนาดและรูปร่างของโมเลกุลที่ผ่านเข้าออกจากโพรงของซีโอไลต์ ภายในโครงสร้างของซีโอไลต์ประกอบด้วยโพรงขนาดต่างๆกัน ซึ่งโมเลกุลสารที่ผ่านรูพรุนซีโอไลต์ต้องมีขนาดพอเหมาะกับการรูพรุนทำให้ซีโอไลต์มีคุณสมบัติเป็นโมเลกุลาร์ซีฟได้ ซึ่งขนาดรูพรุนของซีโอไลต์จะหาได้จากการพิจารณา โพรงเปิด (Aperture) ที่เกิดจากการเชื่อมต่อของโครงสร้างเทตระฮีดรอล TO_4 โดยขนาดโพรงเปิดที่เล็กที่สุด ซึ่งสารสามารถแพร่ผ่านได้ ต้องประกอบด้วย T 8 หน่วย (8T) หรือเรียกว่า 8-membered ring (8MR) โดยโครงสร้างซีโอไลต์สามารถจำแนกตามขนาดรูพรุน ได้เป็น 3 ชนิดดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 การจำแนกชนิดซีโอไลต์ตามขนาดรูพรุน

Small pore zeolite	Middle pore zeolite	Large pore zeolite
8-membered ring	10-membered ring	12-membered ring
3.0-4.5 Å	4.5-6.0 Å	6.0-8.0 Å
Zeolite A	Zeolite ZSM-5	Zeolite L
Erionite	ZSM-11	Faujasite (X,Y)
Chabazite	Ferriete	Mordenite
Gismonite	Stibite	ZSM-12
Phillipsite	ZSM-23	Zeolite Beta

ที่มา: Guisnet และคณะ, 2002

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการฟื้นฟูสภาพโดยวิธีสารละลายต่าง

เลิศ รักสันติชาติ (2545) ศึกษาวิธีการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ชนิดเอกซ์ที่ผ่านการดูดซับเอทีลินไกลคอล โดยวิธีการฟื้นฟูสภาพที่ศึกษาได้แก่ การให้ความร้อนในสภาพบรรยากาศที่มีแต่

ไนโตรเจน การเผาภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจน การล้างด้วยน้ำกลั่น เเผาและล้างด้วยโซเดียม ไฮดรอกไซด์ โดยมีการควบคุมสภาวะได้แก่ปริมาณออกซิเจน อุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อน พบว่าการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์โดยการเผาภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนสามารถกำจัดโมเลกุลของคาร์บอนที่เหลืออยู่บนซีโอไลต์ได้สมบูรณ์ขึ้น โดยสภาวะที่เหมาะสมในการเผาคือ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 6 ชั่วโมง ซึ่งการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ด้วยการล้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัลให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส แต่สำหรับการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ด้วยวิธีการให้ความร้อนในสภาพบรรยากาศที่มีออกซิเจน การล้างด้วยน้ำกลั่น และเผาไม่สามารถกำจัดโมเลกุลของตัวดูดซับให้ออกจากซีโอไลต์ได้อย่างสมบูรณ์

Cannan (2002) ได้ทำการศึกษาการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ชนิด A ที่ผ่านใช้งานในกระบวนการดูดซับความชื้นในก๊าซธรรมชาติ ซึ่งขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับด้วยสารละลายต่างคือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล ถึง 4 นอร์มัล ร่วมกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิที่ 20 ถึง 110 องศาเซลเซียส ก่อนจะนำไปทำให้แห้งและเผาให้เป็นเถ้าที่อุณหภูมิ 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูมีค่าประมาณร้อยละ 90 ถึง 95 สารละลายต่างที่ใช้คือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ 1 นอร์มัล ช่วยให้โลหะอัลคาไลน์ที่อยู่ในสารละลายต่างเกิดการแทรกกลับเข้าไปยังอะตอมอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นการรักษาผลึกของซีโอไลต์ไม่ให้เกิดเสียหาย และการฟื้นฟูด้วยสารละลายต่างยังช่วยให้คาร์บอนที่เกาะติดกับซีโอไลต์เกิดการเผาไหม้ในกระบวนการเผาไหม้อีกด้วย

Gorimbo J.และคณะ (2010) ศึกษาตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด Clinoptilolite ซึ่งเป็นสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสีย โดยทำการศึกษาวิธีการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับ clinoptilolite หลังจากหมดความสามารถในการดูดซับ ทำโดยการตรวจสอบผลกระทบของชนิดของรีเอเจนต์กับโครงสร้างของซีโอไลต์ในชุดการทดลองแบบที่ละเท ซึ่งสกัดนิกเกิลจากสารละลายลักษณะของซีโอไลต์ clinoptilolite จาก Kwa-Zulu Natal (จังหวัดหนึ่งในแอฟริกาใต้) ศึกษาการฟื้นฟูสภาพกับสารละลายชนิดต่างๆที่ความเข้มข้น 2000 ppm โดยมีสารละลายที่ใช้คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ CH_3COONa NH_4Cl $\text{Ca}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$ กรดไฮโดรคลอริก และกรดอะซิติก พบว่าการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับในสารละลายที่เป็นกรด (pH น้อยกว่า 4) ไม่ได้มีประสิทธิผลฟื้นฟูแต่ในสภาพที่เป็นด่าง (pH มากกว่า 9) สามารถฟื้นฟูสภาพสารดูดซับได้ดี

2.5.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการฟื้นฟูสภาพโดยวิธีสารละลายกรด

Giudici และคณะ (2000) ศึกษาการกระบวนการกำจัดอะลูมิเนียมจากโครงสร้างซีโอไลต์ชนิด mordenite ได้ดำเนินการอุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียสร่วมกับกรดไนตริกและกรดออก

ซาลิก 1 โมลาร์ พบว่าการดัดทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพในการกำจัดอะลูมิเนียมจากซีโอไลต์ได้สูงแต่เมื่อวิเคราะห์ด้วยการสแกนจากกล้องอิเล็กตรอนเพื่อดูโครงสร้างรูพรุนเป็นรูปทรงเหลี่ยมแปดหน้าพบว่ากรดไนตริกมีอัตราส่วน Si ต่อ Al เท่ากับซีโอไลต์ชนิด mordenite ส่วนกรดออกซาลิกทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายแบบแลตทิซ

Salamatinia B. และคณะ (2010) ศึกษาการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับไบโอพอลิเมอร์น้ำมัน ซึ่งอิมมัลชันด้วยคอปเปอร์ และสังกะสี ด้วยวิธีการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายต่างๆ โดยใช้วิธีคายสารโลหะออกมาที่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก และ EDTA ที่ความเข้มข้นสารละลาย 0.1 โมลาร์ โดยสภาวะควบคุมได้แก่ ปริมาณทองแดงและสังกะสี 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าพีเอชที่ 4.5 และ 5.5 ตามลำดับ พบว่าการฟื้นฟูประสิทธิภาพโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกสามารถฟื้นฟูสังกะสีได้ร้อยละ 88

Somer และคณะ (2006) ศึกษาวิธีการย่อยสลายด้วยกรดแบบเปิดเพื่อนำโลหะปริมาณน้อยกลับคืนมาใช้ประโยชน์ การศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายตัวอย่างด้วยกรดเพื่อนำโลหะหนักกลับคืนมาได้มากที่สุด โดยพิจารณาองค์ประกอบของกรด เวลาในการย่อยสลายและความเข้มข้นของกรด สำหรับขั้นตอนการย่อยสลายขั้นตอนแรกใช้สารออกซิไดส์ผสมคือ กรดไนตริก ร้อยละ 65 โดยปริมาตร กับกรดเปอร์คลอริก ร้อยละ 75 โดยปริมาตร เป็นเวลา 60 นาที และทำการระเหย ขั้นตอนที่สองใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นเวลา 60 นาที เนื่องจากในบางกรณีโลหะบางชนิดไม่ละลายออกมาเช่น สังกะสี ไทเทเนียม (IV) แคลเซียม เหล็กแมงกานีส (II) โคบอลต์ (II) วาเนเดียม (III) และโมลิบดีนัม (VI) ซึ่งพบว่าขั้นตอนสารออกซิไดส์ผสมกรดไนตริกกับกรดเปอร์คลอริกมีผลต่อการย่อยสลายแต่ขั้นตอนการเติมกรดไฮโดรคลอริกไม่มีผล อย่างไรก็ตามกรดไฮโดรคลอริกมีผลจากการนำโลหะกลับคืนได้แก่ ตะกั่วและโครเมียม (III) แต่บางกรณีก็สามารถใช้กรดไนตริกเพียงอย่างเดียวก็สามารถนำโลหะกลับคืนมาได้มีประสิทธิภาพ

2.5.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการฟื้นฟูสภาพโดยวิธีกระบวนการให้ความร้อน

พีระ ชนะชัย (2548) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับแก๊สที่อุณหภูมิคงที่และอัตราการคายตัวของแก๊สบนถ่านกัมมันต์ โดยพิจารณาระบบการดูดซับแก๊สมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนบนถ่านกัมมันต์ เมื่อเพิ่มความดันในการดูดซับ ถ่านกัมมันต์ดูดซับแก๊สได้มากขึ้นและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับถ่านกัมมันต์จะดูดซับแก๊สได้น้อยลง ซึ่งแก๊สไฮโดรเจนถูกดูดซับน้อยที่สุดโดยการทดลองการดูดซับที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและความดัน 5.9 psig โดยแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์สามารถอธิบายการดูดซับแก๊สทั้ง 3 ชนิดได้เป็นอย่างดี ส่วนการคายตัวของแก๊สจากถ่านกัมมันต์ได้ทำการทดลองโดยปรับเปลี่ยนชนิดแก๊สและอุณหภูมิ พบว่าอัตราการคายตัวของแก๊สไฮโดรเจนมีค่าสูงสุด ส่วนค่าคงที่ของอัตราของอัตราการคายตัวของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าน้อย

ที่สุดและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการคายตัวจะทำให้ค่าคงที่อัตราการคายตัวของแก๊สทั้ง 3 ชนิดมีค่าสูงขึ้นที่ อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส

Lee D. และคณะ (2011) ศึกษาการดูดซับและการฟื้นฟูสภาพด้วยความร้อนซีโอไลต์ชนิดวายที่อิมตัวไปด้วยอะซิโตนและโทลูอิน สำหรับการศึกษากการดูดซับพบว่าการดูดซับอะซิโตนสูงกว่าการดูดซับโทลูอินที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งจุด breakthrough point ของอะซิโตนเร็วกว่าโทลูอินเนื่องจากอะซิโตนและโทลูอินมีไอโซเทอมที่แตกต่างกัน ส่วนการฟื้นฟูสภาพด้วยการไล่ด้วยก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิต่างๆกันพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการคายสารดูดซับก็มากขึ้นโดยที่การคายสาร ดูดซับอะซิโตนมีมากกว่าโทลูอิน และอะซิโตนเป็นไปตามไอโซเทอมแลงเมียร์ ส่วนโทลูอินเป็นไปตามไอโซเทอม Aranovich–Donohuemodel

Rodriguez และคณะ (1997) ศึกษาการดูดซับซีเซียม (Cs) เงิน และสังกะสี ลงบนพื้นผิวของอะลูมินาที่มีรูพรุน 15 ถึง 20 อังสตรอม พบว่าในกรณีของ Cs ต่อ Al_2O_3 เกิดการสร้างพันธะเคมีที่แข็งแรงเมื่อเกิดการดูดซับ ส่วนการฟื้นฟูสภาพอะลูมินาที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า Cs ต่อ Al_2O_3 คายสารดูดซับซีเซียมได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 350 เคลวิน

2.5.4 งานวิจัยเกี่ยวกับการฟื้นฟูสภาพโดยวิธีไฟฟ้าเคมี

วิศิษ และคณะ (2553) ทำการศึกษาการฟื้นฟูสมรรถภาพโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการกำจัดคลอไรด์ โดยใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีพบว่าความสามารถในการดึงคลอไรด์อออนแปรผันตรงกันกับขนาดความต่างศักย์ที่ใช้ โดยค่าความต่างศักย์แปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้าตามกฎของโอมท์ ทำให้ความสามารถในการดึงคลอไรด์อออนก็แปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้าเช่นเดียวกัน โดยผลการทดลองที่ระยะเวลา 28 วัน พบว่าวิธีการนี้สามารถดึงคลอไรด์อออนจากคอนกรีตได้ถึงร้อยละ 76

Elsener และ Angst (2007) ทำการทดลองการกำจัดคลอไรด์ออกจากคอนกรีตด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มความสามารถในการกำจัดคลอไรด์ได้เกินร้อยละ 95 และพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์อออนมีอัตราเร็วสูงกว่าคลอไรด์ที่มีพันธะในคอนกรีต

Liu และคณะ (2008) ได้ทำการทดลองไฟฟ้าเคมีเพื่อกำจัดคลอไรด์ออกจากเหล็ก พบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้นทำให้ปริมาณคลอไรด์ถูกกำจัดได้มากขึ้น ซึ่งพบว่าคลอไรด์ได้ถูกกำจัดได้ในเวลารวดเร็วจนถึงระยะเวลาหนึ่งหลังจากนั้นคลอไรด์จะถูกกำจัดได้ในปริมาณที่น้อย

Ottosen และคณะ (2010) ทำการทดลองการกำจัดคลอไรด์ออกจากกระเบื้องด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี โดยดูจากการวิเคราะห์ SEM และการวิเคราะห์ EDS โดยมีค่าคลอไรด์อออนเริ่มต้น

ประมาณ 280 มิลลิโม่ลาร์ ซึ่งวิธีทางไฟฟ้าเคมีสามารถกำจัดคลอไรด์อออนได้เหลือน้อยกว่า 6 มิลลิโม่ลาร์ พบว่าวิธีทางไฟฟ้าเคมีก็เป็นวิธีการหนึ่งในการกำจัดคลอไรด์อออนได้



2.5.4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 2.12 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการฟื้นฟูสภาพโดยวิธีสารละลายต่าง

การฟื้นฟูสภาพ	ผลการทดลอง	ผู้วิจัย
<ul style="list-style-type: none"> - การให้ความร้อนในสภาพบรรยากาศที่มีแต่ไนโตรเจน - การเผาภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจน - ล้างด้วยน้ำกลั่นและเผา - ล้างด้วยNaOH 0.1 N - ตัวดูดซับคือซีโอไลต์ชนิดเอกซ์ - สารถูกดูดซับคือ เอทีลิน ไกลคอล 	<ul style="list-style-type: none"> - การฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ด้วยการล้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ประสิทธิภาพสูงสุด - การเผาภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจน อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพเท่ากับการล้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์แต่การเผาทำลายโครงสร้างสารดูดซับ - การฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ด้วยวิธีการให้ความร้อนในสภาพบรรยากาศที่มีออกซิเจน และการล้างด้วยน้ำกลั่นไม่สามารถกำจัดโมเลกุลของตัวดูดซับให้ออกจากซีโอไลต์ได้อย่างสมบูรณ์ 	<p>เลิศ รักสันติชาติ (พ.ศ.2545)</p>
<p>ฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ด้วยสารละลายต่างๆ ที่ 2000 ppm คือ NaOH, CH₃COONa, NH₄Cl, Ca (C₂H₃O₂)₂, กรดไฮโดรคลอริก, กรดอะซิติก,</p> <ul style="list-style-type: none"> - ตัวดูดซับ คือ ซีโอไลต์ชนิด Clinoptilolite - สารถูกดูดซับคือโลหะหนัก 	<ul style="list-style-type: none"> - สารละลายที่เป็นกรด (pH<4) มีประสิทธิภาพฟื้นฟูต่ำ - สารละลายที่เป็นด่าง (pH>9) สามารถฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับได้ดี 	<p>Gorimbo และคณะ (ค.ศ. 2010)</p>

ตารางที่ 2.12 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวกับการฟื้นฟูสภาพโดยวิธีสารละลายต่าง (ต่อ)

การฟื้นฟูสภาพ	ผลการทดลอง	ผู้วิจัย
<p>ศึกษาการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายต่างคือโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.1 N ถึง 4.0 N ร่วมกับการให้ความร้อน</p> <p>- ตัวดูดซับคือซีโอไลต์ชนิด A</p> <p>- สารถูกดูดซับคือความชื้น</p>	<p>- ฟื้นฟูซีโอไลต์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ 1 นอร์มัล ร่วมกับความร้อนมีประสิทธิภาพการฟื้นฟูประมาณร้อยละ 90 ถึง 95</p> <p>- สารละลายต่างช่วยให้โลหะอัลคาไลที่อยู่ในสารละลายต่างเกิดการแทรกกลับเข้าไปยังอะตอมอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นการรักษาผลึกของซีโอไลต์ไม่ให้เสียหาย</p>	<p>Cannan (ค.ศ.2002)</p>

ตารางที่ 2.13 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวกับการฟื้นฟูสภาพโดยวิธีสารละลายกรด

การฟื้นฟูสภาพ	สรุปผลการทดลอง	ผู้วิจัย
<p>วิธีการคายสารดูดซับสารโลหะออกมาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก และ EDTA 0.1 โมลาร์</p> <p>- ตัวดูดซับคือสารดูดซับไบโพลีเมอร์น้ำมัน</p> <p>- สารถูกดูดซับคือทองแดงและสังกะสี</p>	<p>กรดไฮโดรคลอริก ซึ่งสามารถฟื้นฟูสังกะสีได้ร้อยละ 88 รองลงมาคือ กรด ไนตริก ซึ่งเป็นสารออกซิไดส์ที่รุนแรง</p>	<p>Salamatina และคณะ (ค.ศ. 2010)</p>
<p>ศึกษาการกระบวนการกำจัดอะลูมิเนียมจากโครงสร้างซีโอไลต์</p> <p>- ตัวดูดซับคือmordenite</p> <p>- สารถูกดูดซับคืออะลูมิเนียม</p>	<p>อุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส ร่วมกับกรดไนตริกและกรดออกซาลิก 1 โมลาร์พบว่ากรดทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพในการกำจัดอะลูมิเนียมจากซีโอไลต์ได้สูง แต่กรดไนตริกมีอัตราส่วน Si ต่อ Al เท่ากับซีโอไลต์ชนิด mordenite ส่วนกรดออกซาลิกทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายแบบแลตทิซ</p>	<p>Giudici และคณะ (2000)</p>

ตารางที่ 2.13 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวกับการฟื้นฟูสภาพโดยวิธีสารละลายกรด (ต่อ)

การฟื้นฟูสภาพ	สรุปผลการทดลอง	ผู้วิจัย
วิธีการย่อยสลายด้วยกรดแบบเปิด - ขั้นตอนแรกใช้ตัวออกซิไดส์ผสมของ $\text{HNO}_3 - \text{HClO}_4$ - ขั้นตอนที่สองใช้กรดไฮโดรคลอริก	การใช้สารออกซิไดส์ผสม $\text{HNO}_3 - \text{HClO}_4$ มีผลต่อการย่อยสลาย แต่ขั้นตอนการเติมกรดไฮโดรคลอริกไม่มีผล แต่บางกรณีก็สามารถใช้กรดไนตริก เพียงชนิดเดียวก็สามารถนำโลหะกลับคืนมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ	Somer และคณะ (ค.ศ.2006)

ตารางที่ 2.14 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวกับการฟื้นฟูสภาพโดยวิธีกระบวนการให้ความร้อน

การฟื้นฟูสภาพ	สรุปผลการทดลอง	ผู้วิจัย
- ตัวดูดซับคือถ่านกัมมันต์ - สารถูกดูดซับคือแก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน - อุณหภูมิ คือ 29°C	อัตราการคายตัวของแก๊สทั้ง 3 ชนิดมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น	พีระ ชนะชัย (พ.ศ.2548)
- ตัวดูดซับคือซีโอไลต์ชนิดวาย - สารถูกดูดซับคืออะซิโตนและโทลูอิน - อุณหภูมิ คือ 126 ถึง 226°C	เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การคายสารดูดซับก็มากขึ้น โดยการคายสารดูดซับอะซิโตนมีมากกว่าโทลูอิน	Lee และคณะ (ค.ศ.2011)
- ตัวดูดซับคืออะลูมินา - สารถูกดูดซับคือซีเซียม (Cs) เงิน และสังกะสี - อุณหภูมิ คือ 76°C	การคายสารดูดซับซีเซียมได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 76 องศาเซลเซียส ส่วนเงินและสังกะสีดูดซับได้ไม่ดีที่พื้นผิวของอะลูมินา	Rodriguez และคณะ (ค.ศ.1997)

ตารางที่ 2.15 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวกับการฟื้นฟูสภาพโดยวิธีไฟฟ้าเคมี

การฟื้นฟูสภาพ	สรุปผลการทดลอง	ผู้วิจัย
ฟื้นฟูสมรรถภาพโครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็ก -ตัวดูดซับคือคอนกรีต -สารดูดซับคือคลอไรด์	ความสามารถในการดึงคลอไรด์ไอออนก็แปรผัน ตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 28 วัน พบว่า วิธีการนี้สามารถดึงคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีต ได้ถึงร้อยละ 76	วิศิษ และคณะ (2553)
กำจัดคลอไรด์ออกจาก คอนกรีต -ตัวดูดซับคือคอนกรีต -สารดูดซับคือคลอไรด์	กำจัดคลอไรด์ได้เกินร้อยละ 95	Elsener และ Angst (2007)
กำจัดคลอไรด์ออกจาก เหล็ก -ตัวดูดซับคือเหล็ก -สารดูดซับคือคลอไรด์	การเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้นทำ ให้ปริมาณคลอไรด์ถูกกำจัดได้มากขึ้น ซึ่งพบว่า คลอไรด์ได้ถูกกำจัดได้ในเวลารวดเร็วจนถึง ระยะเวลาหนึ่งหลังจากนั้นคลอไรด์จะถูกกำจัดได้ ในปริมาณที่น้อย	Liu และคณะ (2008)
กำจัดคลอไรด์ออกจาก กระเบื้อง -ตัวดูดซับคือกระเบื้อง -สารดูดซับคือคลอไรด์	ค่าคลอไรด์ไอออนเริ่มต้นประมาณ 280 mmol/L ซึ่งวิธีทางไฟฟ้าเคมีสามารถกำจัดคลอไรด์ไอออนได้ เหลือน้อยกว่า 6 mmol/L	Ottosen และคณะ (2010)

ตารางที่ 2.16 เหตุผลของการพิจารณาการเลือกวิธีการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับ

การฟื้นฟูสภาพ	เหตุผล
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	<ul style="list-style-type: none"> - ของแข็งสีขาว ดูดความชื้นดีมาก ละลายน้ำได้ดี - ทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับน้ำ - ฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์สูงสุดเมื่อเทียบกับสารต่างชนิดอื่นๆ (เลิศ รักสันติชาติ, 2545) - ช่วยให้โลหะอัลคาไลน์ที่อยู่ในสารละลายต่างเกิดการแทรกกลับเข้าไปยังอะตอมอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นการรักษาผลึกของซีโอไลต์ไม่ให้เสียหาย (Cannan, 2002)
กรดไนตริก (HNO ₃)	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นสารออกซิไดส์ที่รุนแรง - มีความสามารถละลายโลหะได้ดี - มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี - มีประสิทธิภาพในการนำโลหะกลับมาจากตัวดูดซับสูงกว่าสารละลายกรดชนิดอื่นๆ (Salamatinia B.และคณะ, 2010) - สามารถใช้ร่วมกับสารออกซิไดส์ตัวอื่นได้ดี (Sommer และคณะ, 2006)
อุณหภูมิ	<ul style="list-style-type: none"> - เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น (Lee D. และคณะ, 2011) - อุณหภูมิส่งผลให้การคายสารดูดซับเพิ่มขึ้น (พีระ ชนะชัย, 2548) - อุณหภูมิสามารถทำลายแรงยึดเหนี่ยวที่สารที่ถูกดูดซับยึดติดกับซีโอไลต์
ไฟฟ้า	<ul style="list-style-type: none"> - กระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าแปรผันตรงกับปริมาณการกำจัดคลอไรด์ - เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น ปริมาณการกำจัดคลอไรด์ก็เพิ่มขึ้น

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 5 การทดลองดังนี้

การทดลองที่ 1 ศึกษาองค์ประกอบและลักษณะสมบัติทางกายภาพของเสียมซีโอไลต์

- 1) วิเคราะห์หาองค์ประกอบต่างๆด้วยเครื่องมือเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโคปี (X-Ray Fluorescence Spectroscopy: XRF) และการชะละลาย (กระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัด สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548)
- 2) ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของเสียมซีโอไลต์โดยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)
- 3) การวัดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนด้วยวิธีบีอีที (Brunauer-Emmett-Teller: BET)
- 4) ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

การทดลองที่ 2 ศึกษาอัตราส่วนของเสียมซีโอไลต์ต่อปริมาตรสารละลายกรดและด่าง

- 1) ศึกษาผลของอัตราส่วนของเสียมซีโอไลต์ต่อปริมาตรสารละลายกรดและด่างที่เหมาะสม

การทดลองที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเสียมซีโอไลต์โดยใช้สารละลายกรดและสารละลายด่าง

- 1) ศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายกรดและด่างและระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม
- 2) ศึกษาองค์ประกอบและลักษณะสมบัติทางกายภาพของเสียมซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้ว

การทดลองที่ 4 ศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเสียมซีโอไลต์โดยใช้สารละลายกรดและ

สารละลายด่างร่วมกับการให้ความร้อน

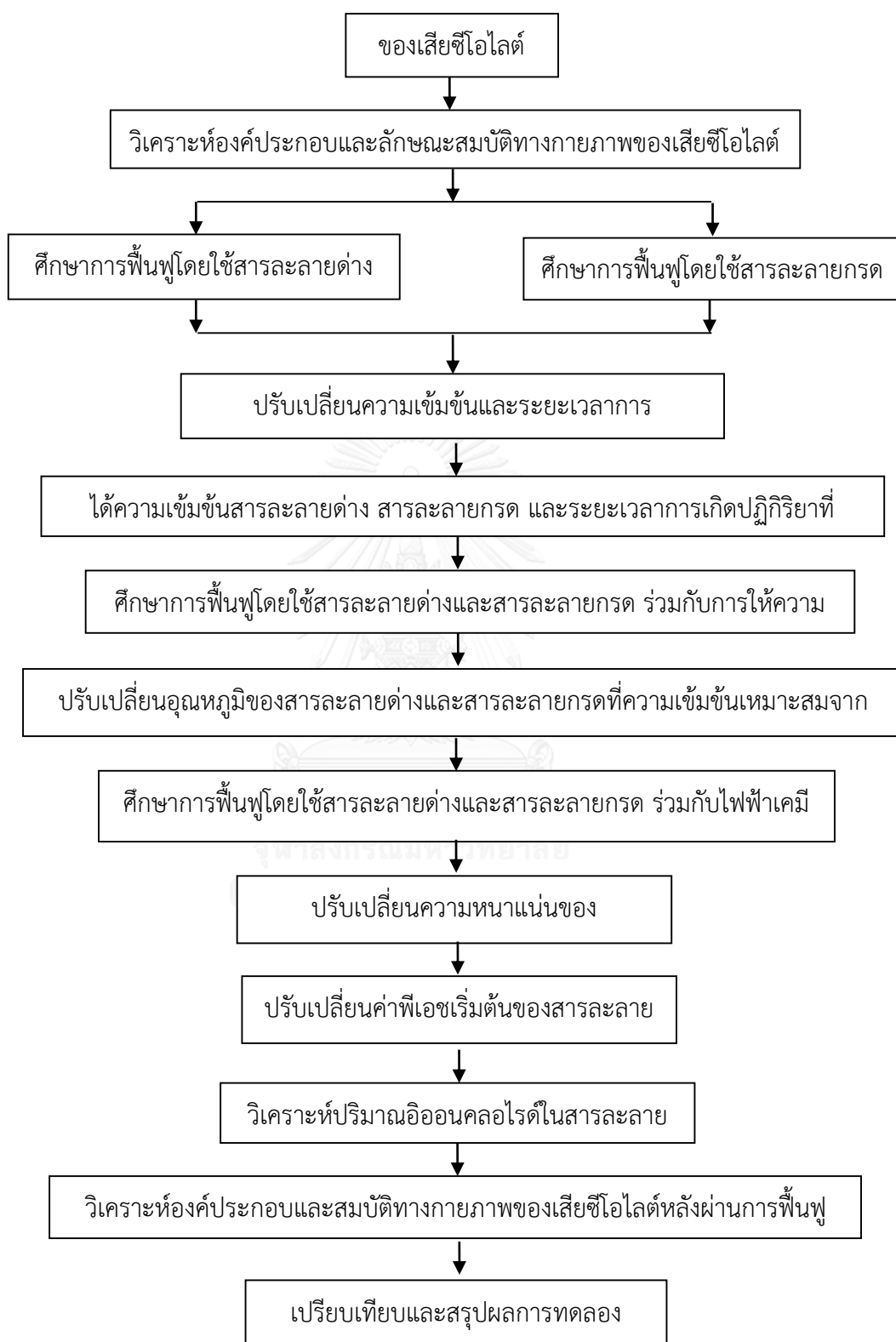
- 1) ศึกษาผลของอุณหภูมิของสารละลายกรดและสารละลายด่างร่วมกับการให้ความร้อน
- 2) ศึกษาองค์ประกอบและลักษณะสมบัติทางกายภาพของเสียมซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้ว

การทดลองที่ 5 ศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเสียมซีโอไลต์โดยวิธีไฟฟ้าเคมี

1) ศึกษาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ค่าพีเอชเริ่มต้นและระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม

- 2) ศึกษาองค์ประกอบและลักษณะสมบัติทางกายภาพของเสียมซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้ว

แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัยสรุปโดยรวมแสดงในแผนผัง รูปที่ 3.1 ได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

3.2 วัสดุ สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

- 1) ซีโอไลต์
 - ซีโอไลต์บริสุทธิ์
 - ของเสียซีโอไลต์จากโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเลียม

3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

- | | |
|--|----------------------|
| 1) Sodiumhydroxide (NaOH) | ยี่ห้อ QREC เกรด AR |
| 2) Nitric acid (HNO ₃) | ยี่ห้อ QREC เกรด AR |
| 3) Sodiumchloride (NaCl) | ยี่ห้อ QREC เกรด AR |
| 4) Sulfuric acid (H ₂ SO ₄) | ยี่ห้อ QREC เกรด AR |
| 5) chloride standard solution | ยี่ห้อ Merck เกรด AR |
| 6) De-ionized water (DI) | ยี่ห้อ QREC เกรด AR |

3.2.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) การศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างของของเสียซีโอไลต์
 - การวิเคราะห์สารประกอบของวัสดุ
(X-Ray Fluorescence Spectroscopy: รุ่น PW2400 ยี่ห้อ Phillip)
 - การวิเคราะห์สารประกอบที่อยู่ในรูปผลึก
(X-Ray Diffraction Spectroscopy: รุ่น D8 –Discover ยี่ห้อ Bruker)
 - กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน
(Scanning Electron Microscopy: ยี่ห้อ JEOLรุ่น JSM-6480LV)
 - การวัดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนด้วยวิธีบีอีที
(Brunauer-Emmett-Teller: BET)
- 2) การหาค่าประกอบต่างๆของของเสียซีโอไลต์
 - ตู้อบ
 - โถดูดความชื้น
 - เครื่องบดตัวอย่าง
- 3) การทดสอบการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่องการทำจัดสิ่ง
ปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548

- เครื่องเขย่า (Shaker)
- โถตุความชื้น
- เครื่องให้ความร้อน (Hot Plate)
- เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง (pH-Meter)
- เครื่องอินดักทีฟพลาสมาเปิดพลาสติกอลูมิเนียมสเปกโตรเมทรี (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer : ICP-OES) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น ICP-Plasma-1000

4) การฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์

- เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance)
- เตาแผ่นให้ความร้อน (Hot Plate)
- เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง (pH-Meter)
- เครื่องกรองน้ำ
- กระดาษกรอง GF/C เส้นผ่าศูนย์กลาง 47 มม.
- ปัมสุญญากาศ (Vacuum Pump)
- เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply)
- ขั้วไฟฟ้าแพลตินัมไทเทเนียม
- ถังปฏิกริยาแบบเปิดขนาด 90 ลบ.ซม.

5) วิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีมาตรฐาน EPA 300.0

- เครื่องอออนโครมาโทกราฟรุ่น LC25 ยี่ห้อ DIONEX



รูปที่ 3.2 เครื่องอออนโครมาโทกราฟรุ่น LC25 ยี่ห้อ DIONEX

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การศึกษาองค์ประกอบและลักษณะสมบัติทางกายภาพของเสียซีโอไลต์

1) การวิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆของเสียซีโอไลต์

นำของเสียซีโอไลต์วิเคราะห์หาองค์ประกอบต่างๆด้วยเครื่องมือเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโคปีและนำน้ำชะละลายวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในของเสียซีโอไลต์โดยใช้เครื่องอินดักทีฟคอปเปิลพลาสมาออปติคอลลิมิสชันสเปกโตรเมทรี (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) เพื่อหาค่าการชะละลาย (กระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548) และศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของเสียซีโอไลต์โดยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractomete, XRD) ศึกษาลักษณะทางกายภาพทั่วไปและภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (X-Ray Fluorescence: XRF) การวัดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนด้วยวิธีบีอีที (Brunauer-Emmett-Teller: BET)

3.3.2 ศึกษาอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อปริมาตรสารละลายกรดและต่าง

การศึกษ้อัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อสารละลายเพื่อฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ โดยทดลองกับสารละลาย 4 ชนิดคือน้ำปราศจากอออน (ชุดควบคุม) สารละลายกรดซัลฟูริก สารละลายกรดไนตริก และสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อปริมาตรสารละลายต่างกัน 7 ค่าคือ 1 กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร 1 กรัมต่อ 15 มิลลิลิตร 1 กรัมต่อ 20 มล. 1 กรัมต่อ 25 มิลลิลิตร 1 กรัมต่อ 30 มิลลิลิตร 1 กรัมต่อ 35 มิลลิลิตร และ 1 กรัมต่อ 40 มิลลิลิตร กวนผสมที่อัตราเร็ว 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นกรองแยกของเสียซีโอไลต์ออก แล้วนำของเสียซีโอไลต์และสารละลายที่ได้หลังจากการทดลองมากรองและวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ด้วยเครื่องอออนโครมาโทกราฟีตามวิธีมาตรฐาน EPA 300.0 (Pfaff 1993)

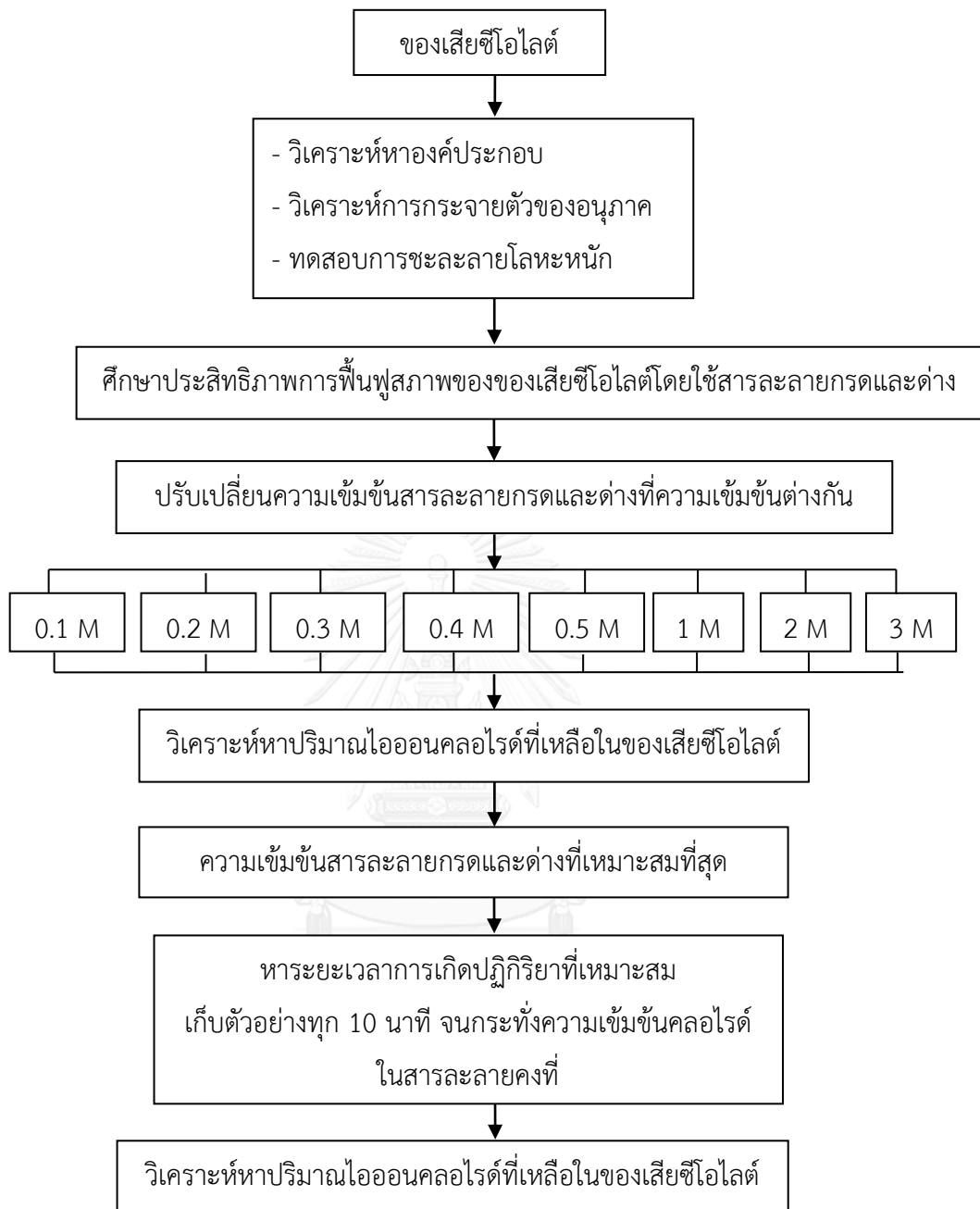
3.3.3 การศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์โดยใช้สารละลายกรดและสารละลายต่าง

1) ศึกษาผลของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน

เมื่อได้อัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อปริมาณสารละลายที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.2 นำของเสียซีโอไลต์ (ซึ่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง) แขน้ำปราศจากไอออน (ชุดควบคุม) สารละลายกรดซัลฟูริก สารละลายกรดไนตริก และสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.1 ถึง 3 โมลาร์ ลงในขวด กวนผสมที่อัตราเร็ว 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นกรองแยกของเสียซีโอไลต์ออก แล้วนำของเสียซีโอไลต์และสารละลายที่ได้หลังจากการทดลองมากรองและวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ด้วยเครื่องอิมมูโนโครมาโทกราฟีตามวิธีมาตรฐาน EPA 300.0 (Pfaff 1993)

2) ศึกษาระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา

เมื่อได้ความเข้มข้นสารละลายกรดและสารละลายต่างแต่ละชนิด และอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อปริมาณสารละลายที่เหมาะสมจากการทดลองแรกนำมาปรับเปลี่ยนเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพื่อหาระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่ดีที่สุด โดยนำของเสียซีโอไลต์ที่เตรียมไว้ (ซึ่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง) นำของเสียซีโอไลต์ที่ซั่งแล้วใส่ลงในขวด เติมสารละลายกรดและสารละลายต่างที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมจากข้อแรกลงในขวด. ทำการเขย่าด้วยอัตราการกวนผสม 180 รอบต่อนาที จนครบ 10 นาที หลังจากนั้นกรองแยกของเสียซีโอไลต์ออก แล้วนำของเสียซีโอไลต์และสารละลายที่ได้หลังจากการทดลองมากรองและวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ด้วยเครื่องอิมมูโนโครมาโทกราฟีตามวิธีมาตรฐาน EPA 300.0 (Pfaff 1993) ทำซ้ำ 3 ครั้งแล้วทำการเพิ่มเวลา 20 30 40 50 60 70 80 90 120 และ 150 นาที จนกระทั่งความเข้มข้นคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์คงที่



รูปที่ 3.3 ผังการทดลองศึกษาการฟื้นฟูของเสียซีโอไลต์โดยใช้สารละลายกรดและต่าง

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ทำการศึกษากลยของควมเข้มข้นสารละลายกรดและสารละลายต่าง ระยะเวลาที่มีต่อการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์

การทดลอง	ตัวแปรอิสระ	ตัวแปรตาม	ตัวแปรควบคุม
1. ผลของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์	ความเข้มข้นสารละลายกรดและต่าง	ปริมาณไอออนคลอไรด์ในของเสียซีโอไลต์	- ระยะเวลา - อุณหภูมิ - อัตราการกวนผสม - อัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อปริมาตรสารละลายกรดและต่าง
2. ศึกษาระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา	ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาโดยเก็บตัวอย่างวิเคราะห์ทุก 10 นาทีจนกระทั่งความเข้มข้นคลอไรด์ในสารละลายคงที่	ปริมาณไอออนคลอไรด์ในของเสียซีโอไลต์	- ความเข้มข้นสารละลายกรดและต่าง - อัตราการกวนผสม - อัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อปริมาตรสารละลายกรดและต่าง

3.3.4 ศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์โดยใช้สารละลายกรดและสารละลายต่างร่วมกับการให้ความร้อน

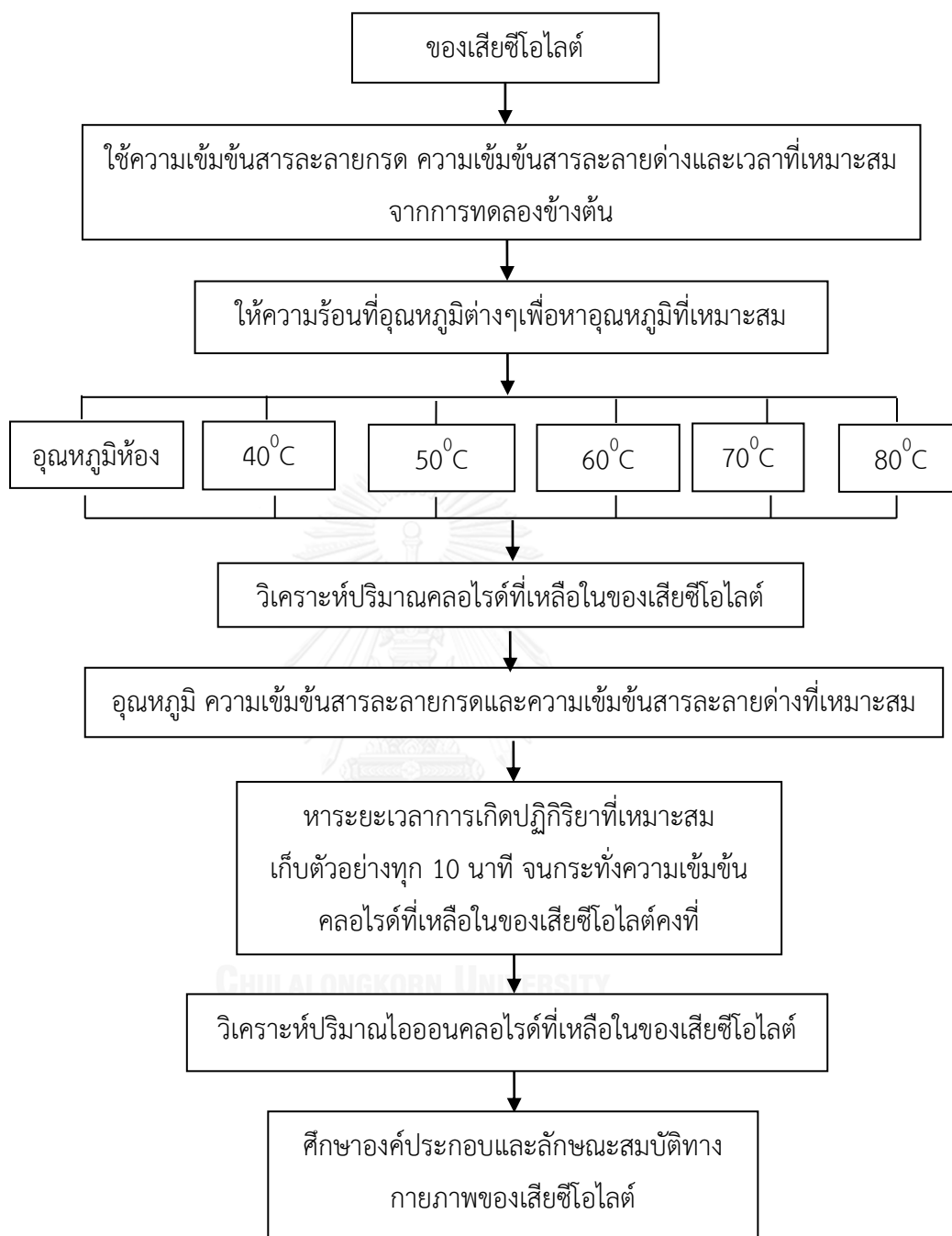
1) ศึกษาผลของอุณหภูมิของสารละลายกรดและสารละลายต่างร่วมกับการให้ความร้อน

นำอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อปริมาตรสารละลายที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.2 และความเข้มข้นสารละลายกรดและสารละลายต่างและระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.3 ทดลองร่วมกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ นำของเสียซีโอไลต์ที่ซั้งแล้วใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ลบ.ซม. เติมสารละลายกรดความเข้มข้นที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.3 ลงในขวดตามอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อปริมาตรสารละลายที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.2

เขย่าด้วยอัตราการกวนผสม 180 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นกรองแยกของเสียซีโอไลต์ออก แล้วนำของเสียซีโอไลต์และสารละลายที่ได้หลังจากการทดลองมากรองและวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ด้วยเครื่องอิมมูโนโครมาโทกราฟีตามวิธีมาตรฐาน EPA 300.0 (Pfaff 1993) ทำซ้ำ 3 ครั้งและทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 40 50 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการฟื้นฟูของเสียซีโอไลต์ และทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนมาใช้ความเข้มข้นสารละลายต่างๆที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.3

2) ศึกษาระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้สารละลายกรดและต่างกับความร้อน

นำอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อปริมาตรสารละลายที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.2 และความเข้มข้นสารละลายกรดและสารละลายต่างๆที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.3 และอุณหภูมิที่เหมาะสมจากการทดลองแรก หาระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่ดีที่สุด โดยนำของเสียซีโอไลต์ที่เตรียมไว้ (ซึ่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง) นำของเสียซีโอไลต์ที่ซั่งแล้วใส่ลงในขวดรูปขนาด 250 ลบ.ซม. เติมสารละลายกรดที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.3 ลงในขวดรูปขนาดตามอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อปริมาตรสารละลายที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.2 ทำการเขย่าด้วยอัตราการกวนผสม 180 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิที่เหมาะสมจากการทดลองแรก จนครบ 10 นาที หลังจากนั้นกรองแยกของเสียซีโอไลต์ออก แล้วนำของเสียซีโอไลต์และสารละลายที่ได้หลังจากการทดลองมากรองและวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ด้วยเครื่องอิมมูโนโครมาโทกราฟีตามวิธีมาตรฐาน EPA 300.0 (Pfaff 1993) ทำซ้ำ 3 ครั้ง แล้วทำการเพิ่มเวลา 20 30 40 50 60 70 80 90 120 และ 150 นาที จนกระทั่งความเข้มข้นคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์คงที่ และทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนมาใช้ความเข้มข้นสารละลายต่างๆที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.3

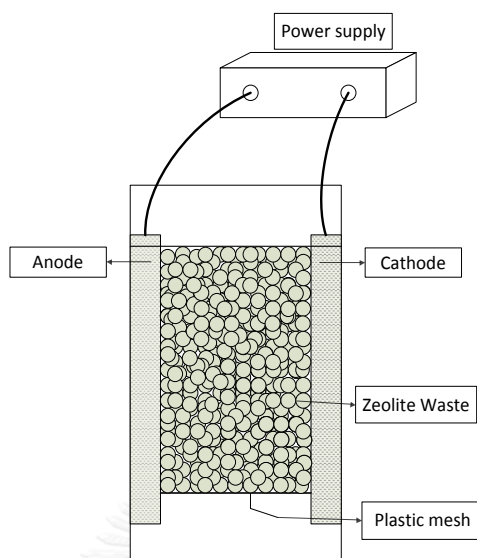


รูปที่ 3.4 ผังการทดลองศึกษาการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์โดยใช้
สารละลายกรดและสารละลายต่างร่วมกับการให้ความร้อน

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายกรดไนตริกร่วมกับการให้ความร้อน

การทดลอง	ตัวแปรอิสระ	ตัวแปรตาม	ตัวแปรควบคุม
1. ผลของอุณหภูมิต่อการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์	อุณหภูมิ 5 ค่า อุณหภูมิห้อง 40 50 60 70 และ 80°C	ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์	<ul style="list-style-type: none"> - ระยะเวลา - ความเข้มข้นสารละลายกรดและด่างที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.3 - อัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อปริมาตรสารละลายกรดและด่าง - อัตราการกวนผสม
2. ศึกษาระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา	ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเก็บตัวอย่างวิเคราะห์ทุก 15 นาที จนกระทั่งความเข้มข้นคลอไรด์ในสารละลายคงที่	ปริมาณไอออนคลอไรด์ในสารละลาย	<ul style="list-style-type: none"> - อุณหภูมิที่เหมาะสมจากการทดลองแรก - ความเข้มข้นสารละลายกรดและด่างที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.3 - อัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อปริมาตรสารละลายกรดและด่าง - อัตราการกวนผสม

3.3.5 ศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าต่อการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์



รูปที่ 3.5 ระบบไฟฟ้าเคมี

1) ศึกษาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

อัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อปริมาตรสารละลายที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.2 และใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์คือน้ำประปา กับวงจรไฟฟ้าเคมีโดยมีไทเทเนียม-แพลทินัมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทดและขั้วไฟฟ้าแอนโนด โดยปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่วง 4 ถึง 100 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นระยะเวลา 30 นาที หลังจากนั้นกรองแยกของเสียซีโอไลต์ออก แล้วนำของเสียซีโอไลต์และสารละลายที่ได้หลังจากการทดลองมากรองและวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ด้วยเครื่องอออนโครมาโทกราฟีตามวิธีมาตรฐาน EPA 300.0 เพื่อหาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์

2) ศึกษาผลค่าพีเอชเริ่มต้น

การศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมของสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีค่าพีเอชแตกต่างกัน 10 ค่า คือ

- 1) น้ำประปาพีเอชเท่ากับ 8.06 ± 0.562 (ชุดควบคุม)
 - 2) น้ำประปาค่าปรับพีเอชเท่ากับ 1.04, 5, 6 และ 7 ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก
 - 3) น้ำประปาค่าปรับพีเอชเท่ากับ 9, 10, 11, 12 และ 13.6 ด้วยสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์
- โดยฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าเป็นระยะเวลา 30 นาที และใช้ขั้วไฟฟ้าแบบไทเทเนียม-แพลตตินัม ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมจากการทดลองข้างต้น หลังจากนั้นกรองแยกของเสียซีโอไลต์ออก แล้วนำของเสียซีโอไลต์

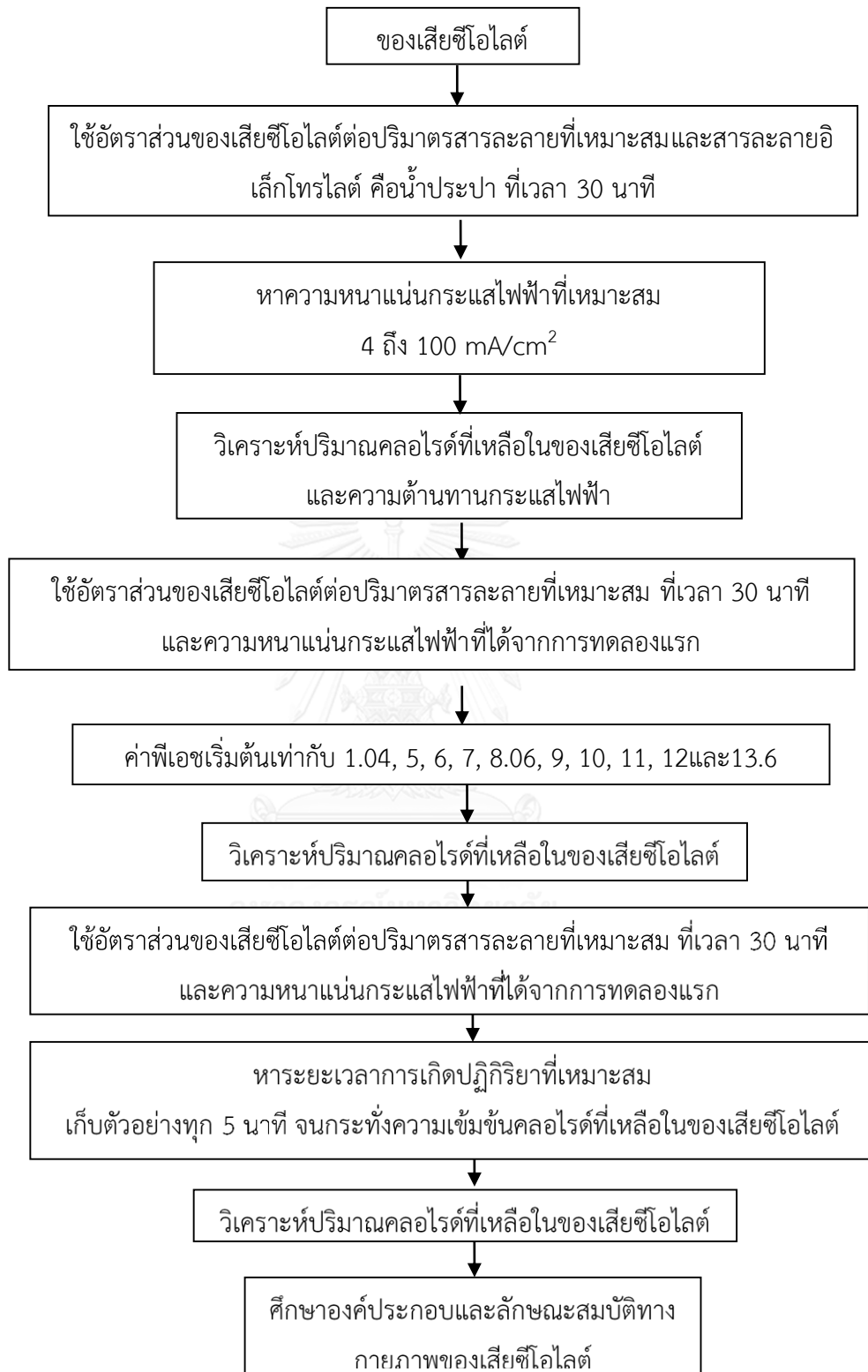
และสารละลายที่ได้หลังจากการทดลองมากรองและวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ด้วยเครื่องอิมมูโนโครมาโทกราฟีตามวิธีมาตรฐาน EPA 300.0

3) ศึกษาผลระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม

การศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมของสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยใช้อัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อปริมาตรสารละลายที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.2 ระยะเวลา 8 ค่า คือ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 นาที ซึ่งขั้วไฟฟ้าที่นำมาใช้ในการทดลองคือ ขั้วไฟฟ้าแบบไทเทเนียม-แพลตตินัม ใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมจากการทดลองข้างต้น โดยศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาของโดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีค่าพีเอชแตกต่างกัน 10 ค่า คือ 1.04, 5, 6, 7, 8.06, 9, 10, 11, 12 และ 13.6 หลังจากนั้นกรองแยกของเสียซีโอไลต์ออก แล้วนำของเสียซีโอไลต์และสารละลายที่ได้หลังจากการทดลองมากรองและวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ด้วยเครื่องอิมมูโนโครมาโทกราฟีตามวิธีมาตรฐาน EPA 300.0

4) ศึกษาองค์ประกอบและลักษณะสมบัติทางกายภาพของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้ว

นำของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพวิเคราะห์หาองค์ประกอบต่างๆด้วยเครื่องมือเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของเสียซีโอไลต์โดยวิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractomete, XRD) ศึกษาลักษณะทางกายภาพทั่วไปและภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (X-Ray Fluorescence: XRF) การวัดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนด้วยวิธีบีอีที (Brunauer-Emmett-Teller: BET)



รูปที่ 3.6 ผังการทดลองศึกษาการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์โดยใช้ไฟฟ้าเคมี

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์โดยใช้ไฟฟ้าเคมี

การทดลอง	ตัวแปรอิสระ	ตัวแปรตาม	ตัวแปรควบคุม
1. หนาแน่นของกระแสไฟฟ้า	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่วง 4 ถึง 100 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร	- ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์ - ความต้านทานของกระแสไฟฟ้า	- ระยะเวลา - น้ำประปา - อัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อปริมาตรสารละลาย
2. ศึกษาผลค่าพีเอชเริ่มต้น	1) น้ำประปาพีเอชเท่ากับ 8.06 ± 0.562 (ชุดควบคุม) 2) น้ำประปาค่าปรับพีเอชเท่ากับ 1.04, 5, 6 และ 7 ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก 3) น้ำประปาค่าปรับพีเอชเท่ากับ 9, 10, 11, 12 และ 13.6 ด้วยสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์	- ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์	- ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมจากการทดลองแรก - อัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อปริมาตรสารละลาย - ระยะเวลา
3. ศึกษาระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา	ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาทุก 5 นาที	- ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์	- ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมจากการทดลองแรก - อัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อปริมาตรสารละลาย

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์

ตัวแปร	วิธีวิเคราะห์
คลอไรด์	เครื่องอิมมูโนโครมาโทกราฟีตามวิธีมาตรฐาน EPA 300.0
วิเคราะห์ทางองค์ประกอบ	X-Ray Fluorescence Spectroscopy รุ่น PW2400 ยี่ห้อ Phillip
วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค	X-Ray Diffraction Spectroscopy รุ่น D8 –Discover ยี่ห้อ Bruker
ทดสอบการชะละลายโลหะหนัก	Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) ยี่ห้อPerkin Elmer รุ่น ICP-Plasma-1000
การวัดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาด ของรูพรุนด้วยวิธีบีอีที	Brunauer-Emmett-Teller: BET

บทที่ 4

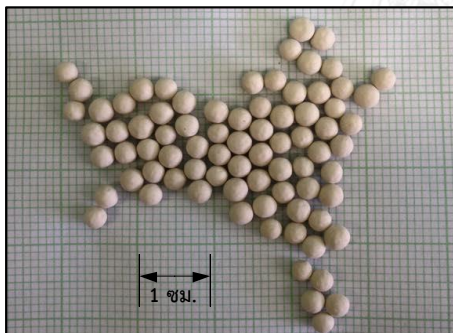
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

ในการวิจัยนี้ได้ศึกษาการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์จากระบบการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์จากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศ โดยใช้สารละลายต่าง สารละลายกรด การใช้สารละลายกรดและต่างร่วมกับการให้ความร้อน และวิธีไฟฟ้าเคมี และการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพการฟื้นฟูได้แก่ อุณหภูมิ ระยะเวลา ค่าความเป็นกรดต่างและกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการฟื้นฟูสภาพ รวมทั้งการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพ

4.1 ศึกษาองค์ประกอบและลักษณะทางกายภาพของเสียซีโอไลต์

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของซีโอไลต์บริสุทธิ์และของเสียซีโอไลต์

การศึกษาลักษณะทางกายภาพซีโอไลต์บริสุทธิ์เปรียบเทียบกับของเสียซีโอไลต์ ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 จากรูปสังเกตได้ว่าซีโอไลต์บริสุทธิ์มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมสีขาว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ถึง 3 มิลลิเมตร แต่ของเสียซีโอไลต์มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมสีเทาดำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ไมโครเมตร

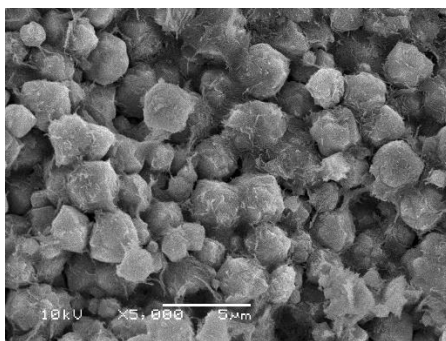


ซีโอไลต์บริสุทธิ์

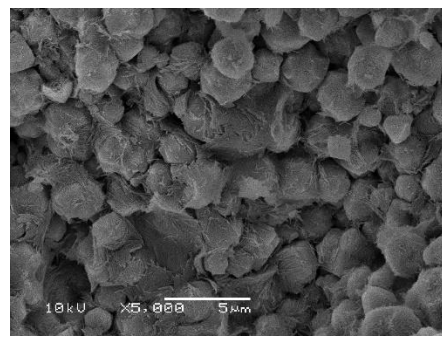


ของเสียซีโอไลต์

รูปที่ 4.1 ลักษณะภายนอกของซีโอไลต์บริสุทธิ์และของเสียซีโอไลต์



ซีโอไลต์บริสุทธิ์



ของเสียซีโอไลต์

รูปที่ 4.2 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคปแบบส่องกราด กำลังขยาย 5000 เท่า

4.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์บริสุทธิ์และของเสียซีโอไลต์

ผลการวิเคราะห์ซีโอไลต์บริสุทธิ์และของเสียซีโอไลต์ทำด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (X-Ray Fluorescence Spectroscopy: XRF) เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมี ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่าซีโอไลต์บริสุทธิ์ มีองค์ประกอบหลัก คือ ซิสิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 46.1 รองลงมาคืออะลูมินา (Al_2O_3) มีค่าร้อยละ 25.7 และโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ร้อยละ 15.2 และองค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) มีค่าร้อยละ 2.3 คลอไรด์ (Cl) มีค่าร้อยละ 0.158 เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) มีค่าร้อยละ 0.853 แคลเซียมออกไซด์ (CaO) มีค่าร้อยละ 0.756 และโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) มีค่าร้อยละ 0.189 ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P_2O_5) มีค่าร้อยละ 0.179 ไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) มีค่าร้อยละ 0.114 และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) มีค่าร้อยละ 0.0302

เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของซีโอไลต์บริสุทธิ์และของเสียซีโอไลต์พบว่าของเสียซีโอไลต์ มีองค์ประกอบหลักและองค์ประกอบอื่นๆเหมือนกับซีโอไลต์บริสุทธิ์แต่มีปริมาณต่างกันเล็กน้อยยกเว้นปริมาณคลอไรด์ของเสียซีโอไลต์มีปริมาณสูงร้อยละ 2.13 โดยน้ำหนัก เห็นได้ชัดว่าปริมาณคลอไรด์ในของเสียซีโอไลต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วมีปริมาณสูงกว่าซีโอไลต์บริสุทธิ์ถึงสิบสามเท่า ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบในซีโอไลต์บริสุทธิ์และของเสียซีโอไลต์

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	ซีโอไลต์บริสุทธิ์	ของเสียซีโอไลต์
Cl	0.158	2.13
SiO_2	46.1	43.8
Al_2O_3	25.7	27.3
Na_2O	15.2	13.6
MgO	2.3	1.99
Fe_2O_3	0.853	0.835
CaO	0.756	0.692
K_2O	0.209	0.189
P_2O_5	0.179	0.160
TiO_2	0.114	0.111
SO_3	0.0302	0.0854
ZnO	0.0104	0.0069
Cr_2O_3	0.0071	0.0058

4.1.3 การทดสอบการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัด สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

นำของเสียซีโอไลต์มาทำการทดสอบชะละลาย ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 เพื่อตรวจสอบลักษณะของของเสียซีโอไลต์ว่าเป็นของอันตรายตามประกาศฯ ของกระทรวงอุตสาหกรรมหรือไม่ โดยตรวจวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอินดักทีฟคอปเปิลพลาสมาออปติคอลลิมิสชันสเปกโตรเมทรี (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer: ICP-OES) หากผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะที่หนักที่ได้มีค่าเท่ากับหรือสูงกว่า ค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLC) จะถือว่าเป็นของเสียอันตราย หากมีค่าน้อยกว่าจะต้องนำไปสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) อีกครั้งหนึ่ง และผลที่ได้จะต้องมีค่าความเข้มข้นของโลหะหนักไม่เกินค่ามาตรฐาน Soluble Threshold Limit Concentration (STLC)

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในซีโอไลต์บริสุทธิ์และของเสียซีโอไลต์ พบว่าค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในซีโอไลต์บริสุทธิ์และของเสียซีโอไลต์ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน TTLC ทุกพารามิเตอร์ ดังนั้นจึงนำของเสียซีโอไลต์ไปสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test และพบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักในซีโอไลต์บริสุทธิ์และของเสียซีโอไลต์ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน STLC ดังตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 ดังนั้นของเสียซีโอไลต์จึงไม่จัดเป็นของเสียอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าการชะละลายซีโอไลต์บริสุทธิ์

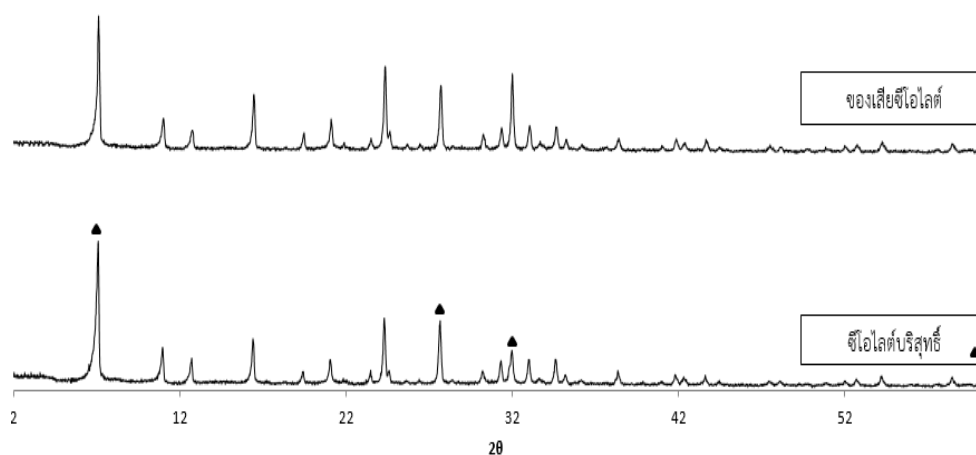
โลหะหนัก	ปริมาณโลหะหนัก (mg/kg)	ค่ามาตรฐาน TTLC (mg/kg)	ความเข้มข้นในน้ำ ชะละลาย (mg/L)	ค่ามาตรฐาน STLC (mg/l)
ทองแดง	3.71	2500	0.067	25
โครเมียม	12.41	2500	0.197	5
ตะกั่ว	20.44	1000	0.44	5
นิกเกิล	6.94	2000	0.126	20
แคดเมียม	7.80	100	0.078	1
โคบอลต์	4.26	8000	0.083	80
สังกะสี	29.76	5000	0.42	250

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าการชะละลายของเสียซีโอไลต์

โลหะหนัก	ปริมาณโลหะหนัก (mg/kg)	ค่ามาตรฐาน TTLc (mg/kg)	ความเข้มข้นในน้ำ ชะละลาย (mg/L)	ค่ามาตรฐาน STLC (mg/l)
ทองแดง	3.66	2500	0.061	25
โครเมียม	11.93	2500	0.187	5
ตะกั่ว	22.49	1000	0.52	5
นิกเกิล	7.28	2000	0.143	20
แคดเมียม	4.18	100	0.075	1
โคบอลต์	4.48	8000	0.079	80
สังกะสี	24.2	5000	0.44	250

4.1.4 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบเชิงแร่ในรูปผลึกของซีโอไลต์บริสุทธิ์และของเสียซีโอไลต์

การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบเชิงแร่ในรูปผลึกของซีโอไลต์บริสุทธิ์และของเสียซีโอไลต์ โดยใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรสโคปี (X-ray Diffractometer: XRD) เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึก (Crystalline Phase) ของสารประกอบซีโอไลต์บริสุทธิ์และของเสียซีโอไลต์ ดังรูปที่ 4.3 พบว่าซีโอไลต์บริสุทธิ์และของเสียซีโอไลต์มีรูปแบบโครงสร้างเป็นผลึก (Crystalline Phase) เนื่องจากกราฟลักษณะมีจุดสูงสุด (Peak) มีการจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบอย่างชัดเจน ขึ้นอยู่กับขนาดของผลึกและประจุของอะตอม โดยสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัว ซึ่งแตกต่างกับรูปแบบบอสนฐาน ที่มีรูปแบบกราฟไม่ชัดเจนจนไม่สามารถสังเกตจุดสูงสุด (Peak) ได้ ซึ่งพบว่าการนำผลึกซีโอไลต์ไปใช้งานดูดซับก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ไม่มีผลต่อโครงสร้างซีโอไลต์



รูปที่ 4.3 รูปแบบ (XRD pattern) ของซีโอไลต์บริสุทธิ์

4.2 การศึกษาอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อสารละลายเพื่อฟื้นฟูสภาพ

การศึกษาอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อสารละลาย (น้ำหนักต่อปริมาตร) เพื่อฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ โดยทดลองกับสารละลาย 4 ชนิด คือ น้ำปราศจากอออน (ชุดควบคุม) สารละลายกรดซัลฟูริก 0.1 โมลาร์ สารละลายกรดไนตริก 0.1 โมลาร์ และสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ โดยใช้ของเสียซีโอไลต์ 1 กรัมต่อปริมาตรสารละลายต่างกัน 7 ค่าคือ 10 15 20 25 30 35 และ 40 มิลลิลิตร กวนผสมที่อัตราเร็ว 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมงหลังจากนั้นกรองแยกของเสียซีโอไลต์ออก แล้วนำของเสียซีโอไลต์และสารละลายที่ได้หลังจากการทดลองมากรองและวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ด้วยเครื่องอออนโครมาโทกราฟีตามวิธีมาตรฐาน EPA 300.0 (Pfaff, 1993) จากผลการทดลอง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาตรสารละลายจะช่วยเพิ่มการชะละลายคลอไรด์ออกจากของเสียซีโอไลต์มากขึ้น ซึ่งอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อปริมาตรสารละลายที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการชะละลายคลอไรด์จะแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของสารละลายกรดและต่างสรุปได้ ดังนี้

(1) น้ำปราศจากอออน

การแช่ของเสียซีโอไลต์ในน้ำปราศจากอออน พบว่ามีประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์จากของเสียซีโอไลต์สูงที่สุดร้อยละ 63.25 ที่อัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อปริมาตรสารละลายเท่ากับ 1 กรัมต่อ 20 มล. โดยมีปริมาณคลอไรด์ในของเสียซีโอไลต์เท่ากับ 7.84 มก.คลอไรด์ต่อกรัมซีโอไลต์ และปริมาณคลอไรด์ที่ชะละลายอยู่ในน้ำเท่ากับ 13.49 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 4.4

(2) สารละลายกรดซัลฟูริก

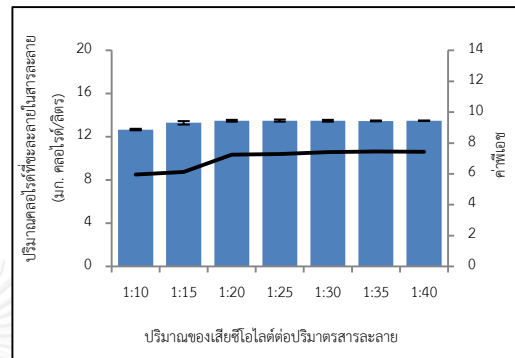
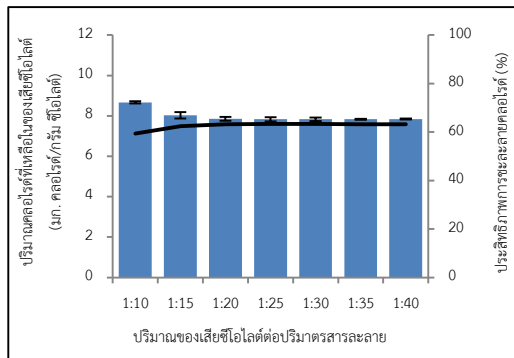
การใช้สารละลายกรดซัลฟูริก 0.1 โมลาร์ พบว่ามีประสิทธิภาพในการชะละลายคลอไรด์จากของเสียซีโอไลต์สูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 75.59 ที่อัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อปริมาตรสารละลายเท่ากับ 1 กรัมต่อ 25 มล. โดยมีปริมาณคลอไรด์ในของเสียซีโอไลต์ต่ำสุดเท่ากับ 5.21 มก.คลอไรด์ต่อกรัมซีโอไลต์ และปริมาณคลอไรด์ที่ชะละลายอยู่ในสารละลายกรดซัลฟูริกเท่ากับ 16.09 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 4.5

(3) สารละลายกรดไนตริก

การใช้สารละลายกรดไนตริก 0.1 โมลาร์ พบว่ามีประสิทธิภาพสูงสุดในการชะละลายคลอไรด์จากของเสียซีโอไลต์เท่ากับร้อยละ 70.42 ที่อัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อปริมาตรสารละลายเท่ากับ 1 กรัมต่อ 30 มล. โดยมีปริมาณคลอไรด์ในของเสียซีโอไลต์ต่ำสุดเท่ากับ 6.31 มก.คลอไรด์ต่อกรัมซีโอไลต์ และปริมาณคลอไรด์ที่ชะละลายอยู่ในสารละลายกรดไนตริกเท่ากับ 15.07 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 4.6

(4) สารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์

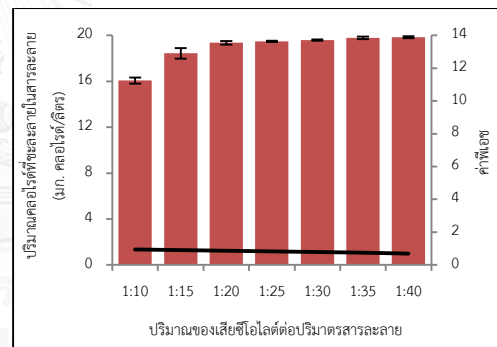
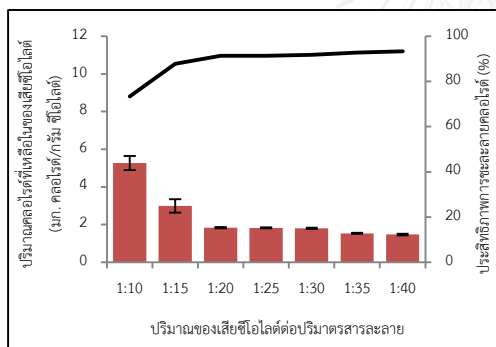
การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ เขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพสูงสุดในการคายคลอไรด์จากของเสียซีโอไลต์เท่ากับร้อยละ 67.58 ที่อัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อปริมาณสารละลายเท่ากับ 1 กรัมต่อ 25 มล. โดยมีปริมาณคลอไรด์เหลือในของเสียซีโอไลต์ ต่ำสุดเท่ากับ 6.92 มก.คลอไรด์ต่อกรัมซีโอไลต์ และปริมาณคลอไรด์ที่ชะละลายอยู่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 14.38 มิลลิกรัมต่อลิตร รายละเอียดดังรูปที่ 4.7



ก) ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์

ข) ปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย

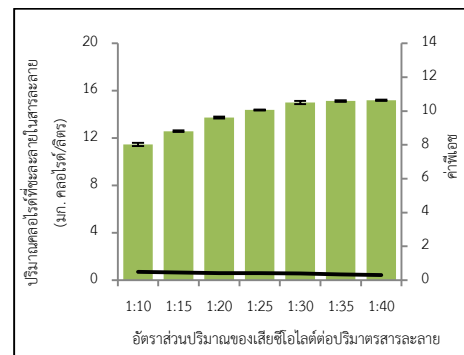
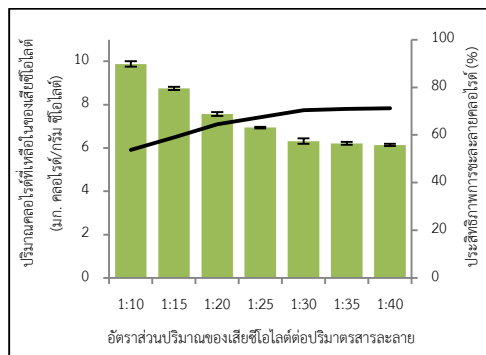
รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ด้วยน้ำปราศจากไอออน



ก) ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์

ข) ปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย

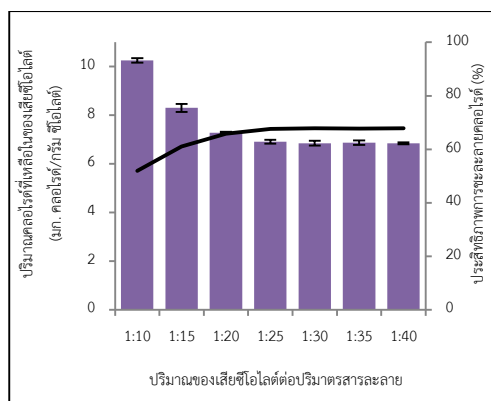
รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก



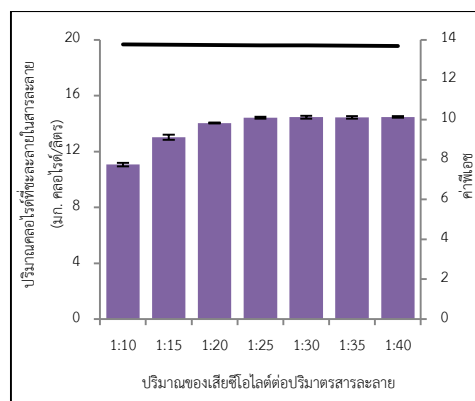
ก) ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์

ข) ปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย

รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ด้วยสารละลายกรดไนตริก



ก) ปริมาณไวรัสที่เหลือในของเสียซีไอโอดี



ข) ปริมาณไวรัสในสารละลาย

รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการชะละลายไวรัสด้วยสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์

4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเสียซีไอโอดีโดยใช้สารละลายกรดและต่างที่อุณหภูมิห้อง

4.3.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายต่างและสารละลายกรดที่อุณหภูมิห้อง

การศึกษาฟื้นฟูสภาพของเสียซีไอโอดีที่มีไวรัสเริ่มต้นเท่ากับ 21.3 มก/กรัมของเสียซีไอโอดี โดยนำของเสียซีไอโอดีโดยแช่ในน้ำปราศจากอออน (ชุดควบคุม) สารละลายกรดซัลฟูริก สารละลายกรดไนตริก และสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.1 ถึง 3 โมลาร์ กวนผสมที่อัตราเร็ว 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดและสารละลายต่างจะช่วยเพิ่มการชะละลายไวรัสออกจากของเสียซีไอโอดี ซึ่งประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการชะละลายไวรัสจะแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของสารละลายกรดและต่างรวมทั้งความเข้มข้นของสารละลาย โดยสรุปได้ ดังนี้

(1) น้ำปราศจากอออน

การแช่ของเสียซีไอโอดีในน้ำปราศจากอออนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่ามีประสิทธิภาพการชะละลายไวรัสจากของเสียซีไอโอดีเท่ากับร้อยละ 63.32 โดยมีปริมาณไวรัสที่เหลือในของเสียซีไอโอดีเท่ากับ 7.82 มก.ไวรัสต่อกรัมซีไอโอดี และปริมาณไวรัสที่ชะละลายอยู่ในสารละลายน้ำปราศจากอออน เท่ากับ 13.47 มิลลิกรัมต่อลิตร

(2) สารละลายกรดซัลฟูริกและกรดไนตริก

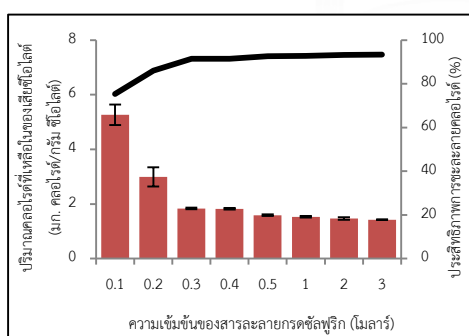
เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดทำให้ปริมาณไวรัสที่ถูกชะละลายจากของเสียซีไอโอดีได้มากขึ้น ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟูริกและกรดไนตริกที่เหมาะสมเท่ากับ 0.3 โมลาร์ ซึ่งมีประสิทธิภาพการชะละลายไวรัสจากของเสียซีไอโอดีสูงเท่ากับร้อยละ 91.39 และ 88.06 ตามลำดับ โดยมีปริมาณไวรัสที่เหลือในของเสียซีไอโอดีต่ำสุดเท่ากับ 1.84 และ 2.55 มก.

คลอไรด์ต่อกรัมซีโอไลต์ตามลำดับ และปริมาณคลอไรด์ที่ชะละลายอยู่ในสารละลายกรดเท่ากับ 19.36 และ 18.81 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความเข้มข้นกรดสูงกว่า 0.5 โมลาร์ จะทำให้ลักษณะทางกายภาพของซีโอไลต์เปลี่ยนแปลงไป

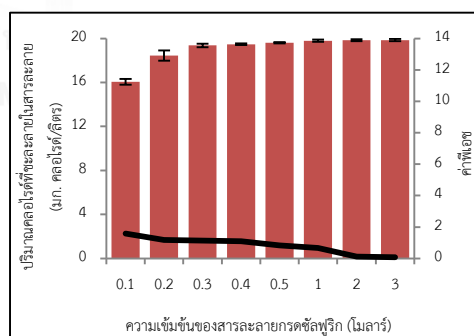
(3) สารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์

การใช้สารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.3 โมลาร์ มีประสิทธิภาพสูงสุดการชะละลายคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 81.91 โดยมีปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสี้ยวซีโอไลต์ ต่ำสุดเท่ากับ 3.86 มก.คลอไรด์ต่อกรัมซีโอไลต์ และปริมาณคลอไรด์ที่ชะละลายอยู่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 17.16 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 4.10

จากกราฟการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ของสารละลายทั้ง 4 ชนิด พบว่าสารละลายกรดซัลฟูริกมีประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์สูงสุดเท่ากับร้อยละ 91.39 และมีค่าปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสี้ยวซีโอไลต์ที่ผ่านการเกิดปฏิกิริยาน้อยที่สุดเท่ากับ 1.84 มก.คลอไรด์ต่อกรัมซีโอไลต์ รองลงมาคือ สารละลายกรดไนตริก สารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ น้ำปราศจากไอออน ตามลำดับ (รูปที่ 4.11 และ รูปที่ 4.12) ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Salamatinia B.และคณะ (2010) ศึกษาการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับไบโพลัม น้ำมัน ซึ่งอ้อมตัวไปด้วยคอปเปอร์ และสังกะสี ด้วยวิธีการฟื้นฟูสภาพสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก และ EDTA ที่ความเข้มข้นสารละลาย 0.1 โมลาร์ พบว่าการฟื้นฟูประสิทธิภาพโดยใช้สารละลายกรดสามารถกำจัดสังกะสีได้ร้อยละ 88

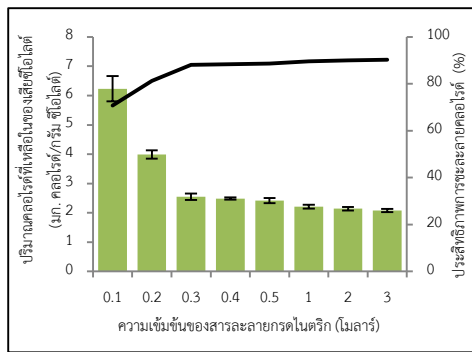


ก) ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสี้ยวซีโอไลต์

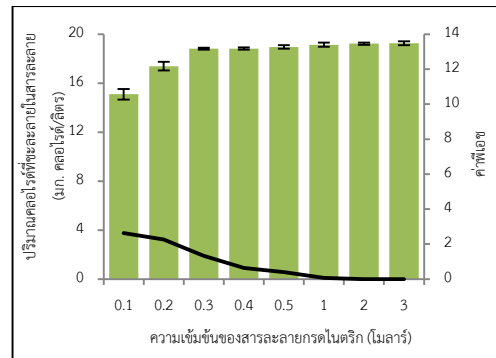


ข) ปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย

รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกที่อุณหภูมิห้อง

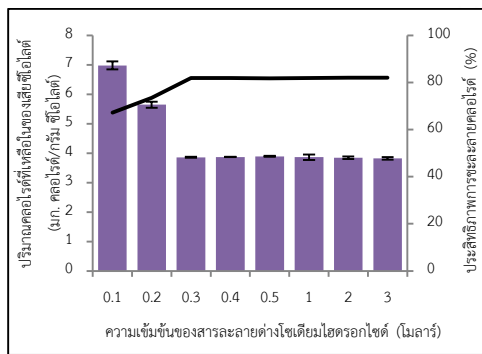


ก) ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์

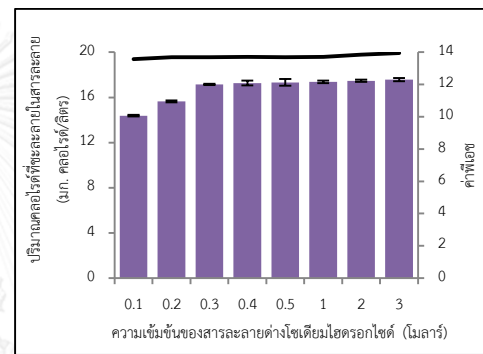


ข) ปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย

รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ด้วยสารละลายกรดไนตริกที่อุณหภูมิห้อง

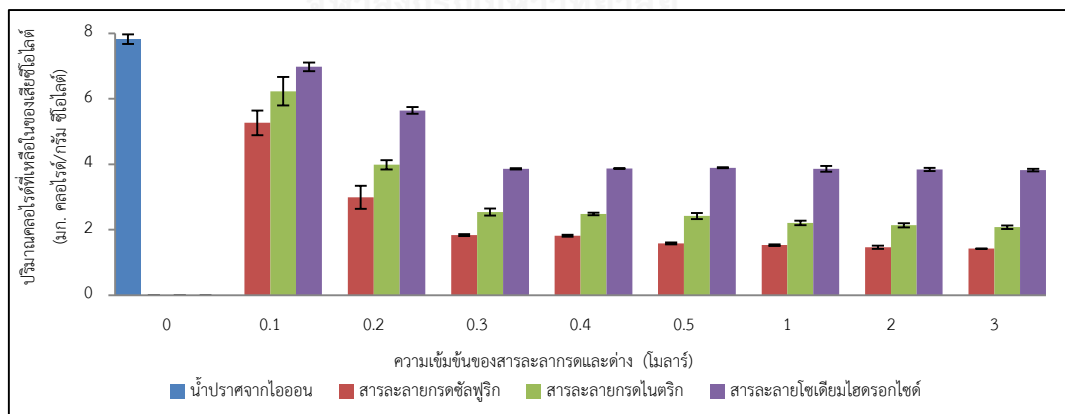


ก) ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์

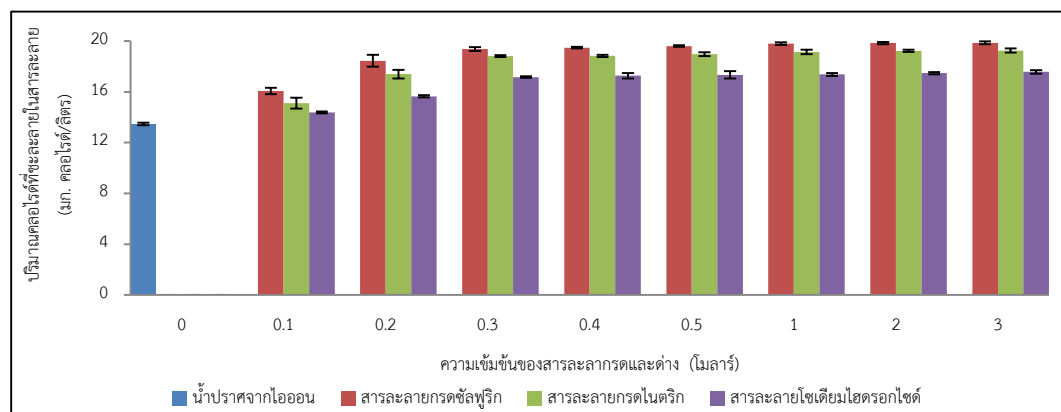


ข) ปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย

รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ด้วยสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.11 ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์หลังชะละลายด้วยกรดและต่างความเข้มข้นต่างกันที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.12 ปริมาณคลอโรฟิลล์ในสารละลายของเสี้ยวอีโวลด์ด้วยกรดและต่างความเข้มข้นต่างกันที่ อุณหภูมิห้อง

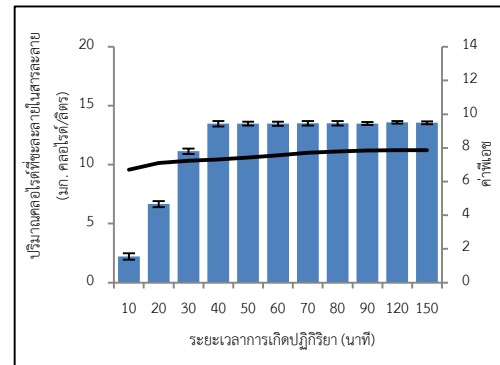
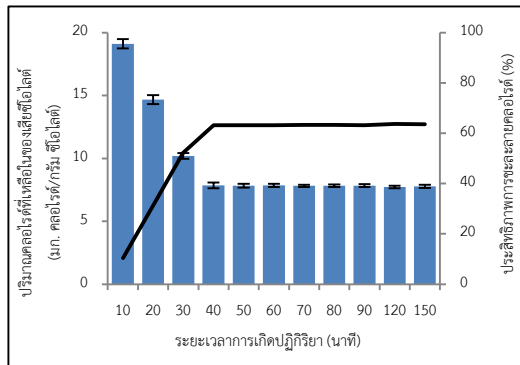
การใช้สารละลายกรดและต่างช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการคายคลอโรฟิลล์จากของเสี้ยวอีโวลด์ แต่เมื่อพิจารณาค่าพีเอชของสารละลายกรดและต่างหลังการทดลอง พบว่ามีค่าพีเอชเป็นต่างสูงขึ้น เนื่องจากปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์ในของเสี้ยวอีโวลด์ถูกชะละลายออกมา (Piwgaew และคณะ, 2012) ดังนั้นสามารถสรุปความเข้มข้นสารละลายกรดและต่างที่เหมาะสมต่อการฟื้นฟูสภาพของเสี้ยวอีโวลด์คือ สารละลายกรดซัลฟูริก 0.3 โมลาร์ สารละลายกรดไนตริก 0.3 โมลาร์ และสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.3 โมลาร์

4.3.2 การศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่อุณหภูมิห้อง

เมื่อได้ความเข้มข้นสารละลายกรดและสารละลายต่างที่เหมาะสมจากการทดลองในขั้นตอนที่แล้วคือสารละลายกรดซัลฟูริก สารละลายกรดไนตริก และสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 0.3 โมลาร์ นำมาทดลองหาระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่ดีที่สุด โดยนำของเสี้ยวอีโวลด์ที่มีคลอโรฟิลล์เริ่มต้นเท่ากับ 21.3 มก./กรัมของเสี้ยวอีโวลด์มาแช่ในสารละลายทั้ง 4 ชนิด และกวนผสม 180 รอบต่อนาที แล้วเก็บตัวอย่างสารละลายและของเสี้ยวอีโวลด์ทุก 10 นาที นำมาวิเคราะห์หาปริมาณคลอโรฟิลล์เป็นเวลา 150 นาที จากผลการทดลองของน้ำปราศจากอออนพบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์ที่เหลือในของเสี้ยวอีโวลด์เริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 40 นาที (รูปที่ 4.13) สารละลายกรดซัลฟูริกที่ 0.3 โมลาร์ กรดไนตริกที่ 0.3 โมลาร์เริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 50 และ 60 นาที ตามลำดับ (รูปที่ 4.14 และ 4.15) และสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 0.3 โมลาร์ เริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที (รูปที่ 4.16)

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเสี้ยวอีโวลด์โดยใช้สารละลายต่างๆที่ระยะเวลาเหมาะสมข้างต้น ดังรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 พบว่าประสิทธิภาพการชะละลายคลอโรฟิลล์โดยใช้สารละลายกรดซัลฟูริก 0.3 โมลาร์ ที่ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา 50 นาที มี

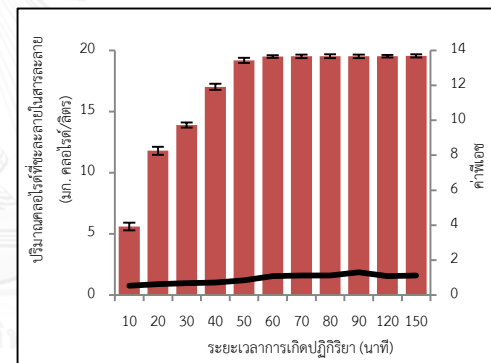
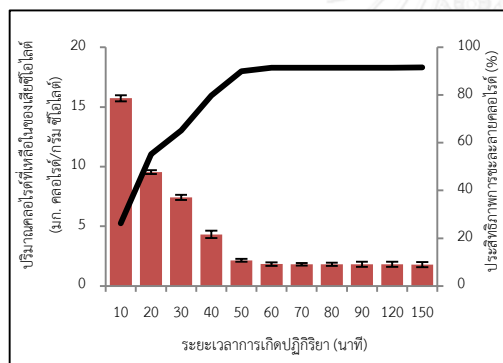
ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์สูงกว่าสารละลายกรดไนตริก สารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ และน้ำปราศจากอ็อกซิเจน ตามลำดับ



ก) ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือนในของเสียซีโอไลต์

ข) ปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย

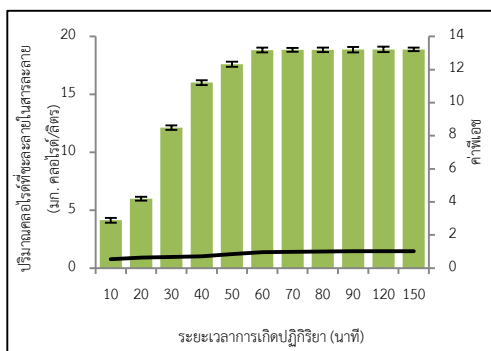
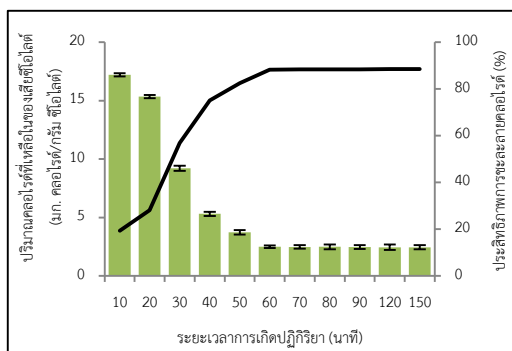
รูปที่ 4.13 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาของน้ำปราศจากอ็อกซิเจนที่อุณหภูมิห้อง



ก) ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือนในของเสียซีโอไลต์

ข) ปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย

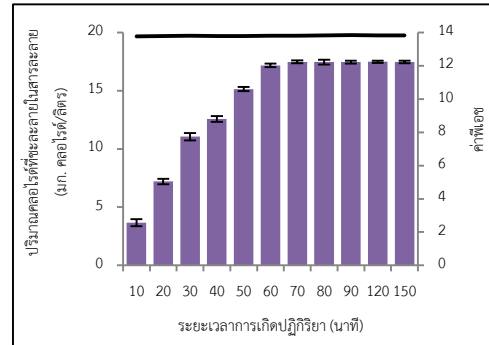
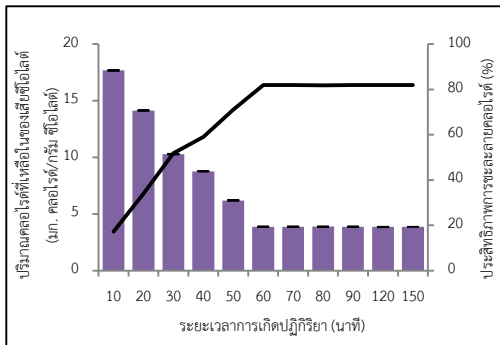
รูปที่ 4.14 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายกรดซัลฟูริกที่อุณหภูมิห้อง



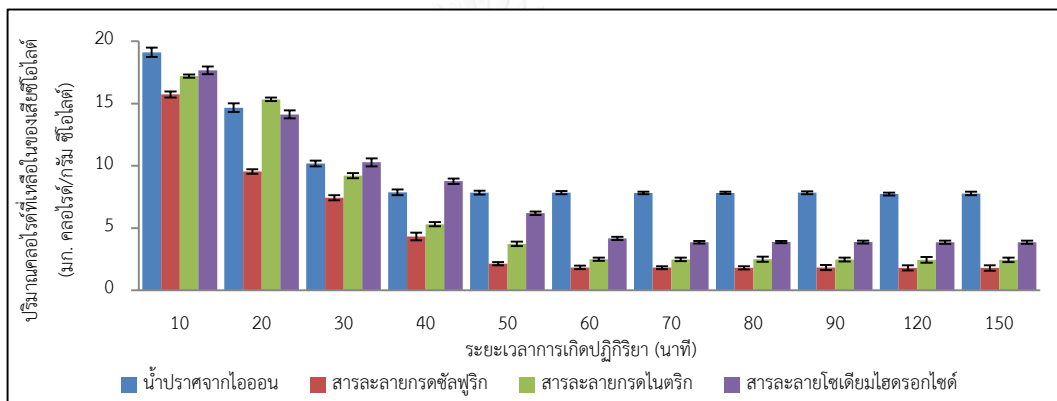
ก) ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือนในของเสียซีโอไลต์

ข) ปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย

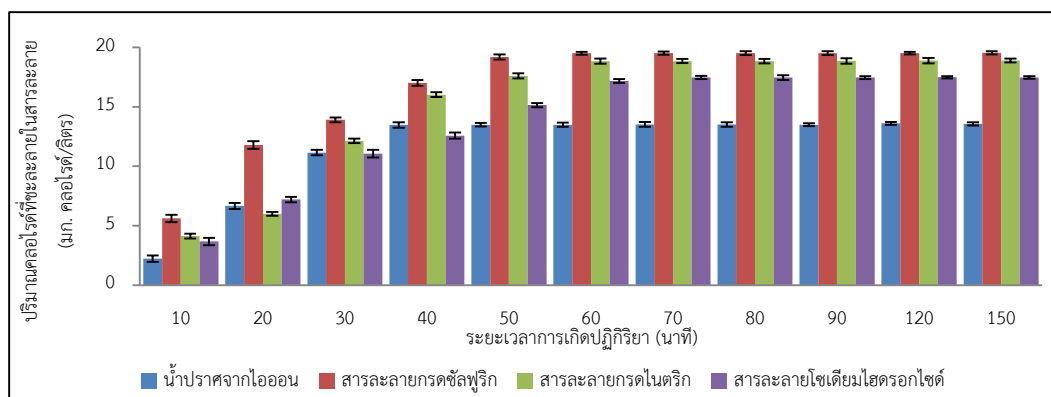
รูปที่ 4.15 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายกรดไนตริกที่อุณหภูมิห้อง



ก) ปริมาณคลอโรฟิลล์ที่เหลือน้ำของเสียซีโอไลต์ ข) ปริมาณคลอโรฟิลล์ในสารละลาย
 รูปที่ 4.16 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.17 ปริมาณคลอโรฟิลล์ที่เหลือน้ำของเสียซีโอไลต์ด้วยสารละลาย 4 ชนิดที่เวลาต่างๆที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.18 ปริมาณคลอโรฟิลล์ในสารละลายของเสียซีโอไลต์ด้วยสารละลาย 4 ชนิดที่เวลาต่างๆที่อุณหภูมิห้อง

จากผลการทดลองสามารถสรุปสภาวะเหมาะสมในการชะละลายคลอไรด์จากของเสียซีโอไลต์ที่มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 21.3 มก./กรัมของเสียซีโอไลต์ด้วยสารละลายกรดและต่าง ดังนี้

- น้ำปราศจากอ็อกซิเจนที่เวลา 40 นาที มีปริมาณคลอไรด์เหลือในของเสียซีโอไลต์เท่ากับ 7.86 มก. คลอไรด์ต่อกรัมซีโอไลต์
- สารละลายกรดซัลฟูริก 0.3 โมลาร์ที่เวลา 50 นาที มีปริมาณคลอไรด์เหลือในของเสียซีโอไลต์เท่ากับ 1.91 มก. คลอไรด์ต่อกรัมซีโอไลต์
- สารละลายกรดไนตริกที่ 0.3 โมลาร์ที่เวลา 60 นาที มีปริมาณคลอไรด์เหลือในของเสียซีโอไลต์เท่ากับ 2.50 มก. คลอไรด์ต่อกรัมซีโอไลต์
- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 0.3 โมลาร์ที่เวลา 60 นาที มีปริมาณคลอไรด์เหลือในของเสียซีโอไลต์เท่ากับ 3.87 มก. คลอไรด์ต่อกรัมซีโอไลต์

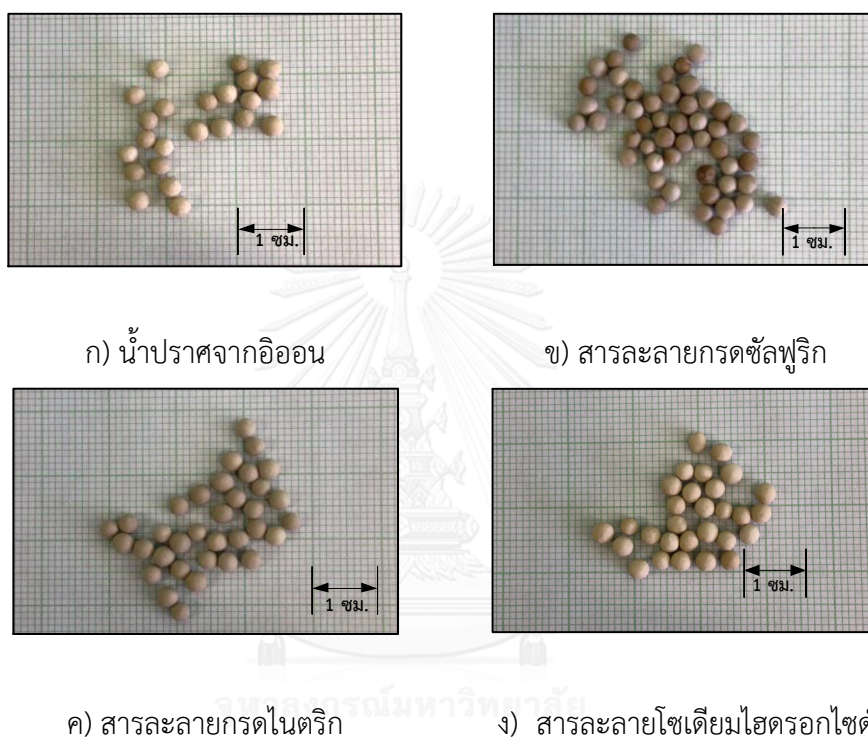
สภาวะเหมาะสมในการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ดังกล่าวข้างต้น พบว่าการใช้สารละลายกรดซัลฟูริก 0.3 โมลาร์ ที่เวลา 50 นาที สามารถคายคลอไรด์ได้เกือบหมด โดยมีคลอไรด์เหลือในของเสียซีโอไลต์เท่ากับ 1.91 มก. คลอไรด์ต่อกรัมซีโอไลต์ใกล้เคียงกับซีโอไลต์บริสุทธิ์ที่มีคลอไรด์เท่ากับ 1.58 มก./กรัมซีโอไลต์ ส่วนการใช้สารละลายกรดไนตริกและสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่ายังมีคลอไรด์เหลือในซีโอไลต์เล็กน้อย

4.3.3 การศึกษาองค์ประกอบและลักษณะสมบัติทางกายภาพของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้ว

ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะนำของเสียซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพในสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวข้างต้นมาศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) และศึกษาการเลี้ยวเบนของซีโอไลต์ (X-ray Diffractometer; XRD) เพื่อหาสมบัติทางกายภาพและเคมีเปรียบเทียบกับซีโอไลต์บริสุทธิ์ ซึ่งหากของเสียซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้วยังมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีใกล้เคียงกับซีโอไลต์บริสุทธิ์ แสดงว่าวิธีการฟื้นฟูสภาพนั้นมีความเหมาะสม และของเสียซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้วมีแนวโน้มสามารถนำกลับไปใช้ประโยชน์ได้อีก

4.3.3.1 ลักษณะทางกายภาพของของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพ

ลักษณะทางกายภาพของของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพพบว่าของเสียซีโอไลต์ที่ฟื้นฟูสภาพด้วยน้ำปราศจากไอออนมีลักษณะและสีเหมือนเดิม แต่ของเสียซีโอไลต์ที่ฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกและกรดไนตริกพบว่ามีขนาดเล็กลงและสีเข้มขึ้น และของเสียซีโอไลต์ที่ฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์มีลักษณะเหมือนเดิมแต่มีสีอ่อนลง ดังรูปที่ 4.19

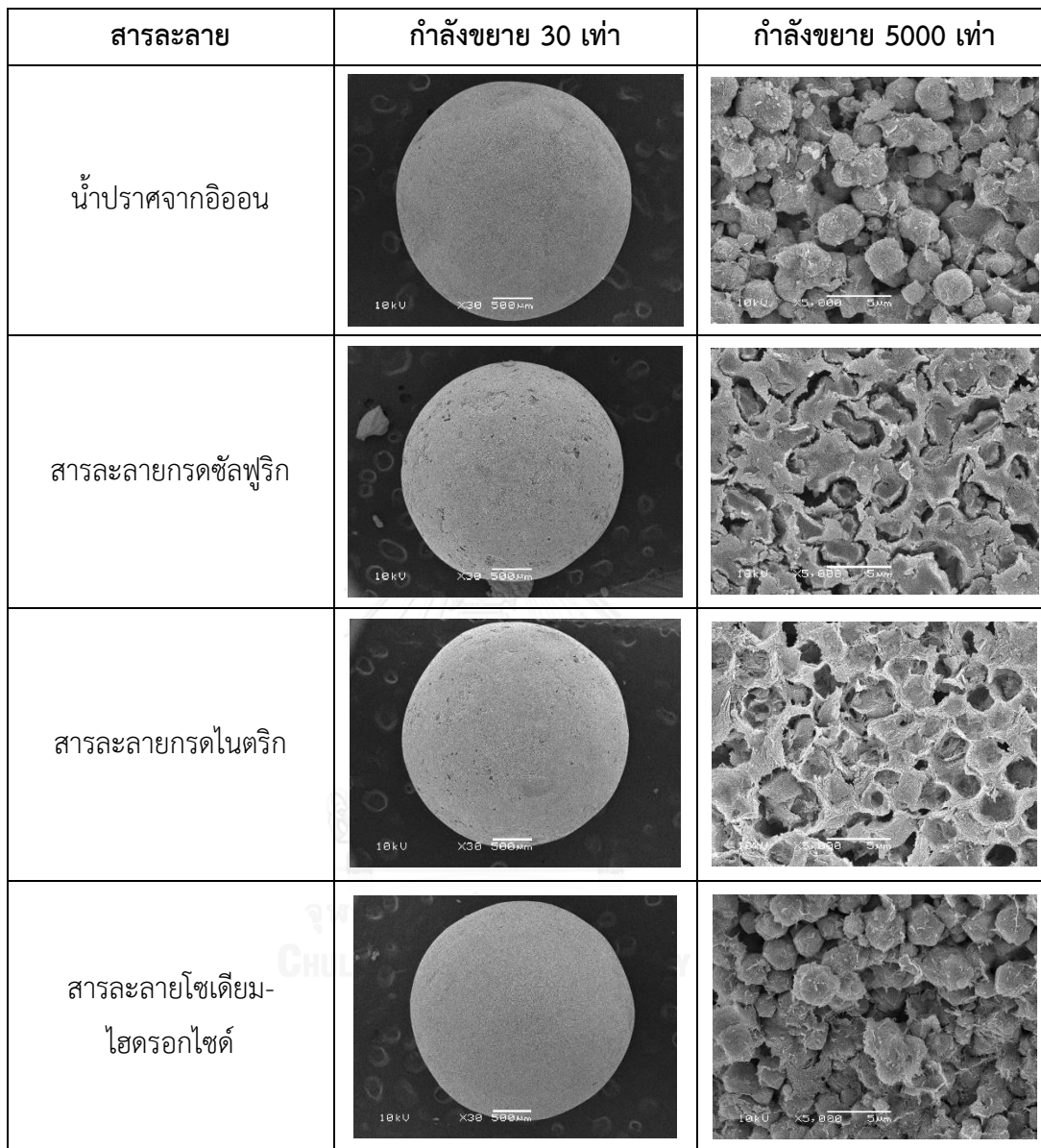


รูปที่ 4.19 ลักษณะทางกายภาพของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายกรดและด่าง ที่อุณหภูมิต่ำ

4.3.3.2 ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่าของเสียซีโอไลต์ที่ฟื้นฟูสภาพด้วยน้ำปราศจากไอออนและสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์มีลักษณะพื้นผิวและรูปร่างผลึกใกล้เคียงกับของเสียซีโอไลต์ที่ยังไม่ได้ผ่านการฟื้นฟูสภาพ แต่ของเสียซีโอไลต์ที่ฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกและสารละลายกรดไนตริกมีลักษณะพื้นผิวขรุขระและรูปร่างผลึกถูกทำลายซึ่งมีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกับของเสียซีโอไลต์ที่ยังไม่ได้ผ่านการฟื้นฟูสภาพ ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลาย 4 ชนิดที่อุณหภูมิห้อง



4.3.3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (X-Ray Fluorescence: XRF)

ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโคปี (X-Ray Fluorescence Spectroscopy: XRF) พบว่ามีองค์ประกอบ ดังตารางที่ 4.4

เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของของเสียซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายทั้ง 4 ชนิด พบว่าของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกมีปริมาณ

คลอไรด์เล็กน้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ 0.181 แต่พบว่ามีองค์ประกอบของอะลูมินา (Al_2O_3) และ โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ลดลงอย่างชัดเจนเท่ากับร้อยละ 38.91 และ 56.38 ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังพบว่ามีซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เท่ากับร้อยละ 1.79 สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับของซีโอไลต์ บริสุทธิ์ ซึ่งทำให้ของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกมีองค์ประกอบ แตกต่างกับของซีโอไลต์บริสุทธิ์อย่างชัดเจน และยังพบว่าของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วย สารละลายกรดไนตริกก็มีองค์ประกอบของอะลูมินา (Al_2O_3) และโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ลดลงอย่าง ชัดเจนคิดเป็นร้อยละ 20.62 และ 37.24 ตามลำดับ

ส่วนของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยน้ำปราศจากอ็อกซิเจนและสารละลาย ต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์มีองค์ประกอบใกล้เคียงกับซีโอไลต์บริสุทธิ์และสูงกว่าของเสียซีโอไลต์เล็กน้อย อาจเนื่องจากสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณโซเดียมสูง ซึ่งทำการแลกเปลี่ยนประจุกับ ของเสียซีโอไลต์ขณะทำปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพโดยสังเกตได้จากปริมาณโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) มี ค่ามากขึ้นเล็กน้อย ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพที่ อุณหภูมิห้อง

ซีโอไลต์	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					
	Cl	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	SO ₃
ซีโอไลต์บริสุทธิ์	0.158	46.1	25.7	15.2	2.3	0.853
ของเสียซีโอไลต์	2.13	43.8	27.3	13.6	1.99	0.835
น้ำปราศจากอ็อกซิเจน	0.784	39.3	24.0	11.2	1.92	-
สารละลายกรดซัลฟูริก	0.181	40.7	15.7	6.63	2.01	1.79
สารละลายกรดไนตริก	0.250	41.5	20.4	9.54	2.67	-
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	0.395	42.9	25.3	14.1	2.05	-

4.3.3.4 การวัดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุน

ผลการวิเคราะห์ของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพเพื่อการวัดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนด้วยวิธีบีอีที(Brauner Emmet Teller : BET) ดังตารางที่ 4.6 จากผลการ วิเคราะห์พบว่าของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกมีปริมาณพื้นที่ผิวของ

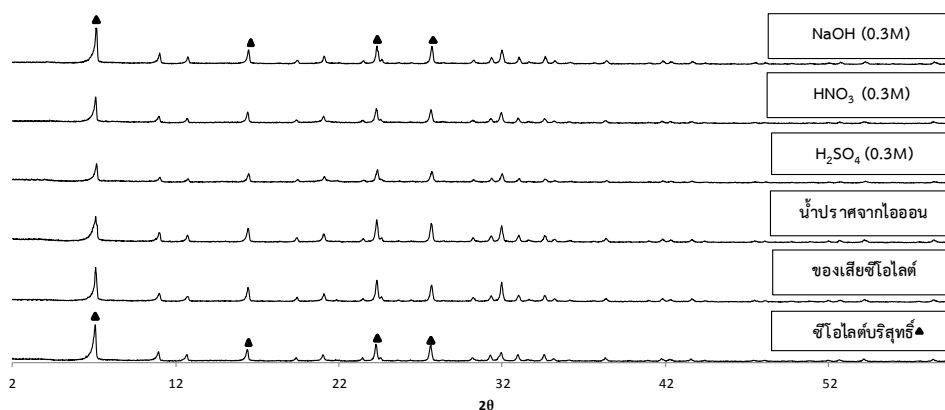
ซีโอไลต์น้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดซึ่งขนาดของเสี้ยวซีโอไลต์มีขนาดเล็กลงหลังการฟื้นฟูด้วยสภาพด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก และปริมาตรรูพรุนของเสี้ยวซีโอไลต์มีปริมาตรน้อยที่สุด เนื่องจากของเสี้ยวซีโอไลต์ดูดซับซัลเฟอริกจากสารละลายกรดซัลฟูริก ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของของเสี้ยวซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพพบว่ามีซัลเฟอริกในปริมาณที่สูง

ตารางที่ 4.6 พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนของซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิห้อง

ซีโอไลต์	พื้นที่ผิว ตร. ม.ต่อกรัม	ปริมาตรรูพรุน ซีซี/กรัม	ขนาดรูพรุน อังสตรอม
ซีโอไลต์บริสุทธิ์	517.0	0.4206	32.54
ของเสี้ยวซีโอไลต์	436.0	0.3794	34.80
น้ำปราศจากอ็อกซิเจน	415.1	0.3956	35.01
สารละลายกรดซัลฟูริก	353.8	0.3037	31.52
สารละลายกรดไนตริก	383.1	0.4251	35.82
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	435.3	0.4184	34.87

4.3.3.5 การเลี้ยวเบนของซีโอไลต์ (X-ray Diffractometer; XRD)

จากผลการศึกษาวิเคราะห์รูปแบบโครงสร้างคือแบบผลึกของของเสี้ยวซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยการเลี้ยวเบนด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer เปรียบเทียบกับซีโอไลต์บริสุทธิ์พบว่าของเสี้ยวซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์มีการเลี้ยวเบนใกล้เคียงกับซีโอไลต์บริสุทธิ์โดยดูจากจุดสูงสุด (Peak) ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 6.14, 15.48, 23.36, 26.72 และ 31 ซึ่งมีความสูงใกล้เคียงกับซีโอไลต์บริสุทธิ์ บ่งชี้ว่าของเสี้ยวซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์มีรูปแบบโครงสร้างคือแบบผลึกใกล้เคียงกับซีโอไลต์บริสุทธิ์มากที่สุดเมื่อเทียบกับการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก สารละลายกรดไนตริก และน้ำปราศจากอ็อกซิเจน ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 การเลี้ยวเบนของซีโอไลต์หลังฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลาย 4 ชนิดที่อุณหภูมิห้อง

4.3.4 สรุปผลการศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์โดยใช้สารละลายกรด และสารละลายต่างที่อุณหภูมิห้อง

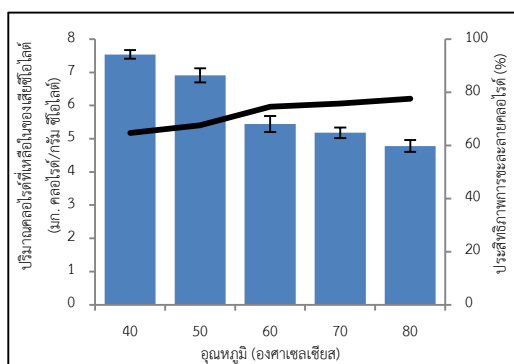
จากการทดลองพบว่าการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ด้วยสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.3 โมลาร์ ที่ระยะเวลา 60 นาที มีประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์จากของเสียซีโอไลต์เท่ากับร้อยละ 81.91 มีปริมาณคลอไรด์เหลือในของเสียซีโอไลต์เท่ากับ 3.86 มก. คลอไรด์ต่อกรัมซีโอไลต์ คือสภาวะที่มีความเหมาะสมที่สุดในการทดลองการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ เนื่องจากผลการศึกษารองรับและลักษณะสมบัติทางกายภาพของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้วพบว่า มีลักษณะทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างผลึกและปริมาตรรูพรุนใกล้เคียงกับซีโอไลต์บริสุทธิ์มากที่สุด โดย Piwgaew, Grisdanurak และคณะ (2012) ได้กล่าวว่าประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ขึ้นกับปริมาณของโซเดียมในซีโอไลต์ เนื่องจากหลังการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ในระบบจะก่อให้เกิดเกลือโซเดียมคลอไรด์ในของเสียซีโอไลต์แทน ดังนั้นเมื่อมีปริมาณโซเดียมสูงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ก็สูงเช่นกัน และผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cannan (2002) ได้ทำการศึกษาการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ชนิด A ที่ผ่านใช้งานในกระบวนการดูดซับความชื้นในก๊าซธรรมชาติ จากผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายต่างที่ใช้คือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ 1 นอร์มัล มีค่าประมารณร้อยละ 90 ถึง 95 ช่วยให้โลหะอัลคาไลน์ที่อยู่ในสารละลายต่างเกิดการแทรกกลับเข้าไปยังอะตอมอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นการรักษาผลึกของซีโอไลต์ไม่ให้เสียหาย

4.4 การศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์โดยใช้สารละลายกรดและสารละลายต่างร่วมกับการให้ความร้อน

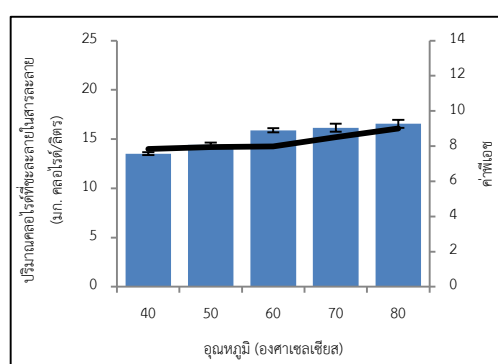
4.4.1 การศึกษาผลการให้ความร้อนร่วมกับสารละลาย 4 ชนิด

นำสารละลายความเข้มข้นที่เหมาะสม และระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองหัวข้อ 4.3 มาทดลองร่วมกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างกัน 5 ค่า คือ 40°ซ 50°ซ 60°ซ 70°ซ และ 80°ซ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำปราศจากอ็อกซิเจนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ออกจากของเสียซีโอไลต์โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ได้สูงสุดเท่ากับร้อยละ 77.58 โดยมีคลอไรด์เหลือในซีโอไลต์เท่ากับ 4.78 มิลลิกรัมต่อกรัมของซีโอไลต์ แต่พบว่าประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์จากของเสียซีโอไลต์โดยใช้สารละลายกรดและต่างร่วมกับการให้ความร้อนจะมีค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังรูปที่ 4.21 ถึง 4.24

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์จากของเสียซีโอไลต์ระหว่างน้ำปราศจากอ็อกซิเจน สารละลายกรดซัลฟูริก สารละลายกรดไนตริก และสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.3 โมลาร์ ที่อุณหภูมิทั้ง 5 ค่า พบว่าการใช้สารละลายกรดซัลฟูริกและสารละลายกรดไนตริกที่อุณหภูมิ 80°ซ มีประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์สูงสุดเท่ากับร้อยละ 92.83 และ 90.58 ตามลำดับ โดยมีคลอไรด์เหลือในซีโอไลต์เท่ากับ 1.53 และ 2.01 มิลลิกรัมต่อกรัมของซีโอไลต์ตามลำดับ ส่วนสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 80°ซ มีประสิทธิภาพการคายคลอไรด์ต่ำกว่าเท่ากับร้อยละ 84.94 พบคลอไรด์เหลือในซีโอไลต์เท่ากับ 3.21 มิลลิกรัมต่อกรัมของซีโอไลต์

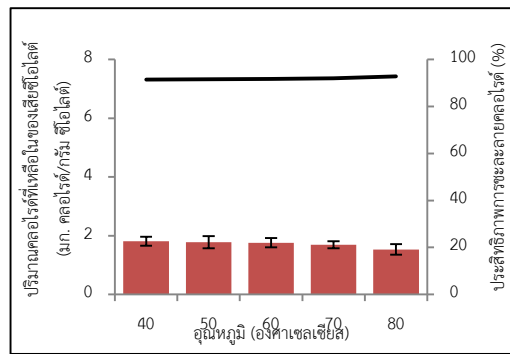


ก) ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์

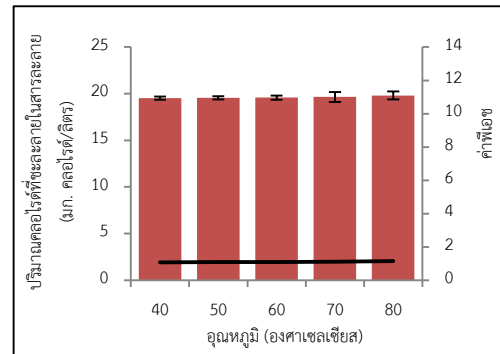


ข) ปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย

รูปที่ 4.21 น้ำปราศจากอ็อกซิเจนร่วมกับการให้ความร้อน

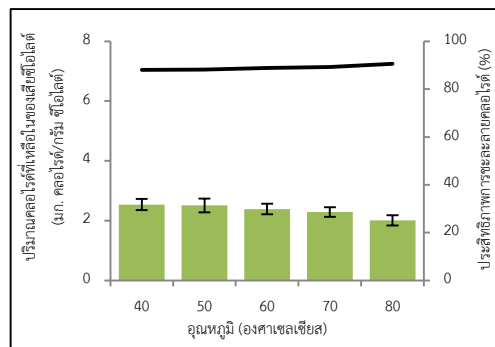


ก) ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์

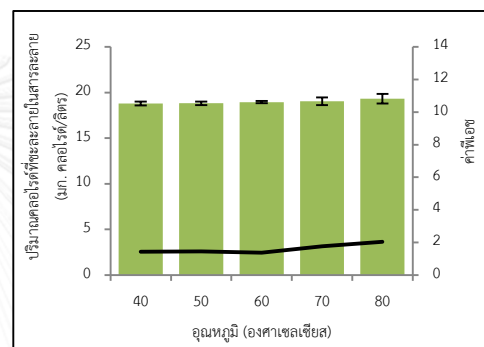


ข) ปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย

รูปที่ 4.22 สารละลายกรดซัลฟูริกร่วมกับการให้ความร้อน

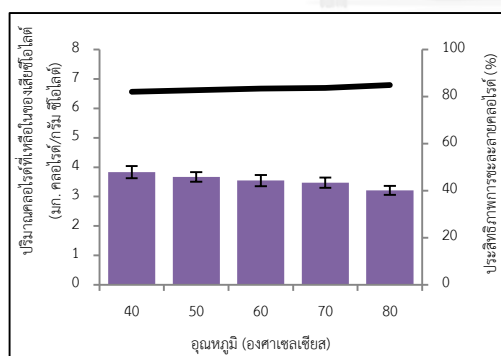


ก) ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์

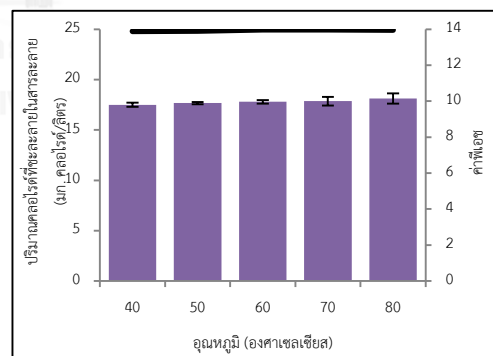


ข) ปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย

รูปที่ 4.23 สารละลายกรดไนตริกร่วมกับการให้ความร้อน



ก) ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์

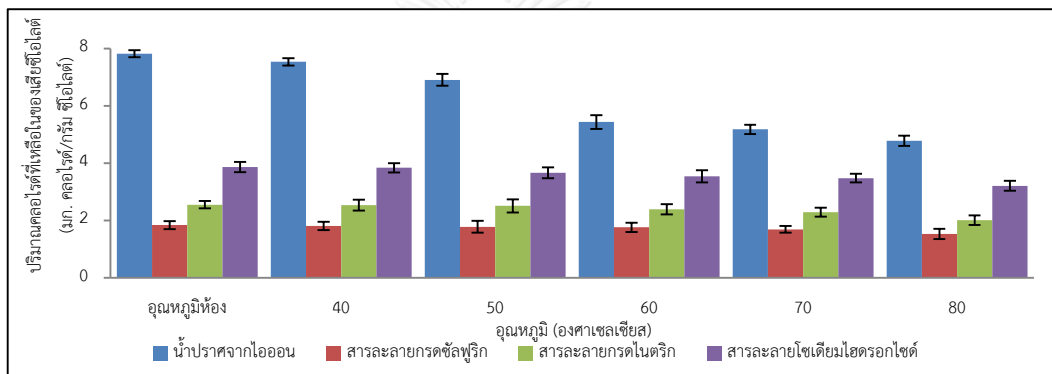


ข) ปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย

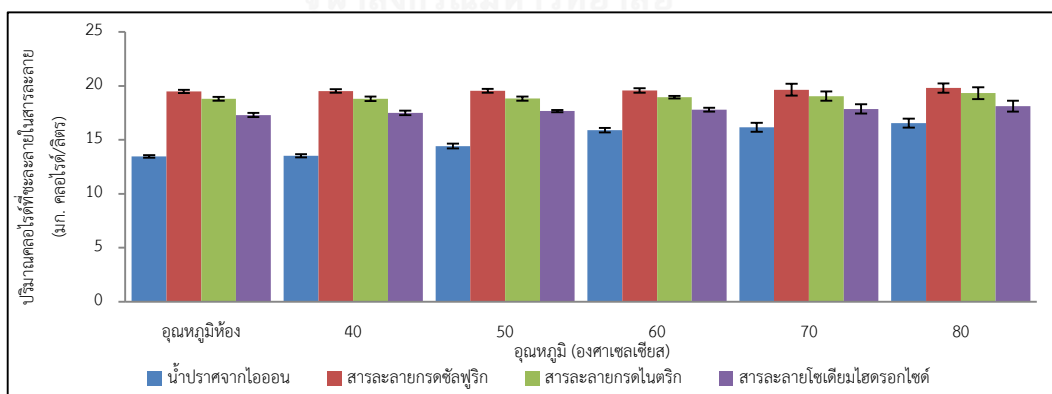
รูปที่ 4.24 สารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการให้ความร้อน

เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิของสารละลายทั้ง 4 ชนิดต่อประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์จากของเสียซีโอไลต์ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำปราศจากอ็อกซิเจนสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการชะละลายคลอไรด์ ดังรูปที่ 4.21 เนื่องจากสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของซี-

ไอไลต์เป็นแบบกระบวนการคายความร้อน (Exothermic) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้อัตราการดูดซับลดลงแต่การคายสารดูดซับจะเพิ่มมากขึ้น ส่วนการใช้สารละลายกรดและสารละลายต่างร่วมกับความร้อน พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิสารละลายจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังรูปที่ 4.25 และรูปที่ 4.26 ซึ่งสอดคล้องการค่าพีเอชของสารละลายทั้ง 4 ชนิด พบว่าค่าพีเอชของสารละลายหลังทำการฟื้นฟูสภาพของเสียซีไอไลต์มีค่าสูงขึ้นกว่าการทดลองด้วยสารละลายกรดและต่างที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์ในของเสียซีไอไลต์ถูกชะละลายออกมาเพิ่มขึ้น Piwgaew และคณะ (2012) รายงานว่าประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากช่วยให้โลหะอัลคาไลน์ที่อยู่ในสารละลายต่างเกิดการแทรกกลับเข้าไปยังอะตอมอะลูมิเนียม และการฟื้นฟูด้วยสารละลายต่างยังช่วยให้คาร์บอนที่เกาะติดกับซีไอไลต์เกิดการเผาไหม้ในกระบวนการเผาไหม้อีกด้วย (cannon, 2002)



รูปที่ 4.25 ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือนในของเสียซีไอไลต์หลังชะละลายด้วยกรดและต่างร่วมกับความร้อน

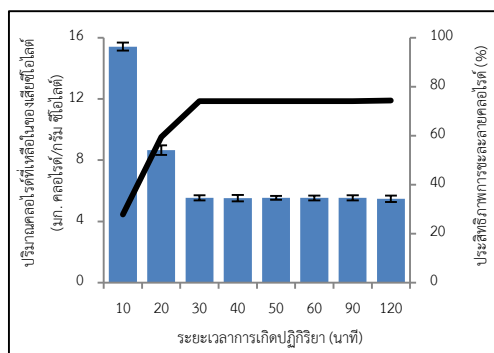


รูปที่ 4.26 ปริมาณคลอไรด์ในสารละลายหลังการชะละลายของเสียซีไอไลต์ด้วยกรดและต่างร่วมกับความร้อน

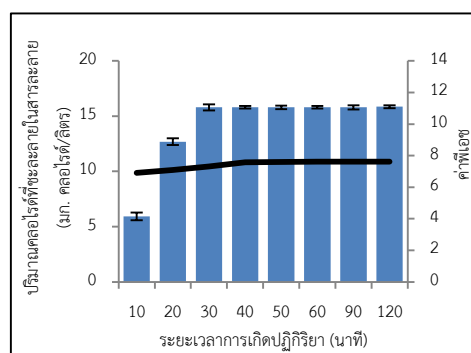
4.4.2 การศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม

แต่จากผลการพิจารณาลักษณะทางกายภาพของซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 60 องศาเซลเซียสจะส่งผลให้ลักษณะทางกายภาพของซีโอไลต์เสียสภาพไม่คงรูปเดิมแตกและกระจายเป็นผงละเอียดทำให้อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ไม่สูงกว่า 60 องศาเซลเซียส ดังนั้นการทดลองการหาระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่ดีที่สุดของชะละลายคลอไรด์ด้วยสารละลายทั้ง 4 ชนิดจะกำหนดให้ใช้ที่อุณหภูมิ 60°ซ เท่ากัน

จากการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายช่วยทำให้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการชะละลายคลอไรด์ได้เร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่อุณหภูมิห้อง โดยระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการชะละลายคลอไรด์ของน้ำปราศจากอ็อกซิเจน สารละลายกรดซัลฟูริก 0.3 โมลาร์ และสารละลายกรดไนตริก 0.3 โมลาร์ เริ่มคั่งที่เมื่อเวลาเท่ากับ 30 นาทีเท่ากัน ดังรูปที่ 4.27 ถึง 4.29 และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการชะละลายคลอไรด์ของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.3 โมลาร์ ดังรูปที่ 4.30 เริ่มคั่งที่ตั้งแต่เวลาที่ 50 และพบว่ามีค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และค่าพีเอชของสารละลายเริ่มคั่งที่เมื่อปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์เริ่มคั่งที่เช่นกัน ซึ่งอุณหภูมิช่วยทำให้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น โดยสอดคล้องกับงานวิจัยการคายสารดูดซับของ Lu และคณะ (2009) รายงานประสิทธิภาพการคายสารดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยทำการทดลองด้วยวิธีการให้ความร้อนกับวิธีใช้เครื่องดูดสุญญากาศพบว่าวิธีให้ความร้อนใช้เวลาการเกิดปฏิกิริยาการคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าวิธีใช้เครื่องดูดสุญญากาศ (Lu และคณะ, 2009) และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Brown และคณะ (1998) การกำจัดคลอไรด์ออกจากน้ำเสียจากกระบวนการกราฟหรือเรียกว่าการผลิตเยื่อกระดาษโดยใช้การแลกเปลี่ยนอ็อกซิเจนกับโซดาไฟพบว่าเมื่อใช้ความร้อนเข้าร่วมปฏิกิริยาช่วยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดคลอไรด์สูงถึงร้อยละ 90 ถึง 99 และความร้อนยังช่วยลดระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาได้อีกด้วย (Brown และคณะ, 1998)

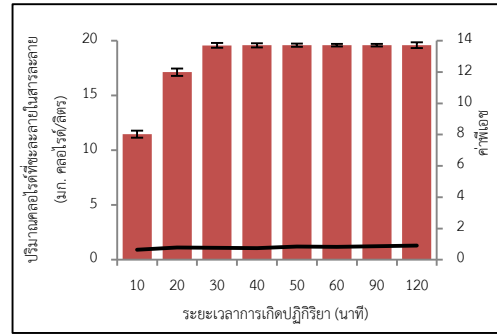
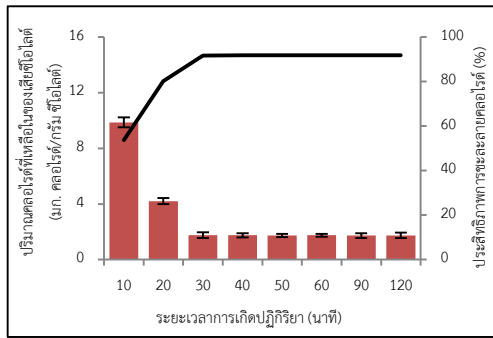


ก) ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์

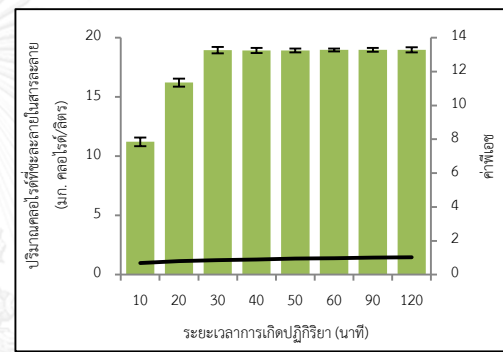
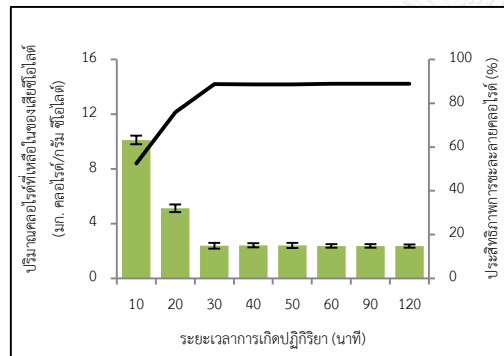


ข) ปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย

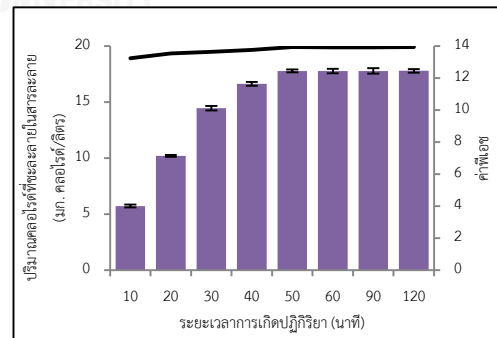
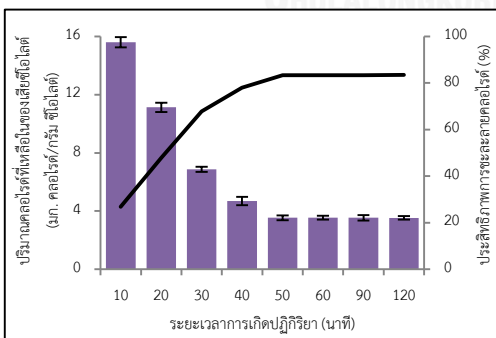
รูปที่ 4.27 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาน้ำปราศจากอ็อกซิเจนร่วมกับการให้ความร้อน อุณหภูมิที่ 60°ซ



ก) ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลด์ ข) ปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย
รูปที่ 4.28 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาสารละลายกรดซัลฟูริกพร้อมกับการให้ความร้อนที่ 60° ซ



ก) ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์ ข) ปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย
รูปที่ 4.29 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาสารละลายกรดไนตริกพร้อมกับการให้ความร้อนอุณหภูมิที่ 60° ซ



ก) ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์ ข) ปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย
รูปที่ 4.30 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์พร้อมกับการให้ความร้อนอุณหภูมิที่ 60° ซ

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการคายคลอไรด์จากของเสียซีโอไลต์ของน้ำปราศจากอออน สารละลายกรดซัลฟูริก สารละลายกรดไนตริก และสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะช่วยลดระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรทดลองที่ใช้สารละลายกรด และต่างที่อุณหภูมิห้อง จึงสรุปได้ว่าความร้อนช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาการชะละลายคลอไรด์กับ สารละลายทั้ง 4 ชนิด ได้เร็วขึ้น และสามารถสรุปสภาวะเหมาะสมในการคายคลอไรด์จากของเสียซีโอไลต์ ดังนี้

- น้ำปราศจากอออนที่อุณหภูมิ 60°ซ เวลา 30 นาที มีปริมาณคลอไรด์เหลือในของเสียซีโอไลต์เท่ากับ 5.74 มก/กรัมซีโอไลต์ ประสิทธิภาพในการคายคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 73.11
- สารละลายกรดซัลฟูริก และกรดไนตริก 0.3 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 60°ซ เวลา 30 นาที มีปริมาณคลอไรด์เหลือในของเสียซีโอไลต์เท่ากับ 1.77 และ 2.39 มก/กรัมซีโอไลต์ ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการคายคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 91.72 และ 88.80 ตามลำดับ
- สารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 0.3 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 60°ซ เวลา 50 นาที มีปริมาณคลอไรด์เหลือในของเสียซีโอไลต์เท่ากับ 3.54 มก/กรัมซีโอไลต์ ประสิทธิภาพในการคายคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 83.39

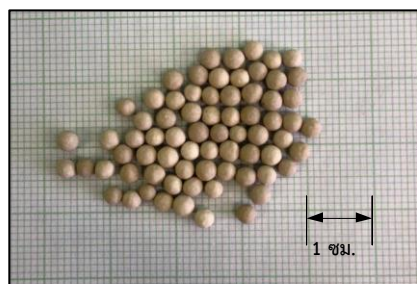
4.4.3 การศึกษาองค์ประกอบและลักษณะสมบัติทางกายภาพของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้ว

นำของเสียซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพในสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวข้างต้นมาศึกษา ลักษณะทางกายภาพทั่วไปและภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (X-Ray Fluorescence: XRF) การวัดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนด้วยวิธีบีอีทีและศึกษาการเลี้ยวเบนของซีโอไลต์ (X-ray Diffractometer; XRD) เพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีเปรียบเทียบกับซีโอไลต์บริสุทธิ์ ซึ่งหากของเสียซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้วยังมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีใกล้เคียงกับซีโอไลต์บริสุทธิ์ แสดงว่าวิธีการฟื้นฟูสภาพนั้นมีความเหมาะสม และของเสียซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้ว มีแนวโน้มสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อีกครั้ง

4.4.3.1 ลักษณะทางกายภาพของของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพ

ลักษณะทางกายภาพของของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพพบว่าของเสียซีโอไลต์ที่ฟื้นฟูสภาพด้วยน้ำปราศจากอออนที่อุณหภูมิ 60°ซ มีลักษณะและสีอ่อนลงจากเดิมเพียง

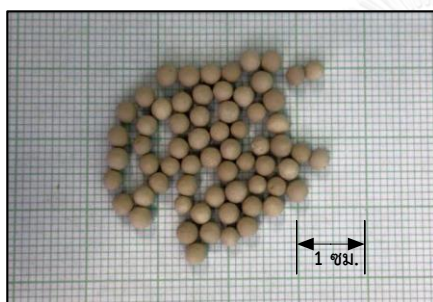
เล็กน้อย แต่ของเสียซีโอดีที่ฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกและกรดไนตริกที่อุณหภูมิ 60°C มีขนาดเล็กและสีเทาเข้มขึ้นมาก และของเสียซีโอดีที่ฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 60°C มีลักษณะเหมือนเดิมแต่มีสีอ่อนลงค่อนข้างเหลือง เมื่อเปรียบเทียบกับของเสียซีโอดีที่ยังไม่ได้ฟื้นฟูสภาพ ดังรูปที่ 4.31



ก) น้ำปราศจากอ็อกซิเจน 60°C



ข) สารละลายกรดซัลฟูริก 60°C



ค) สารละลายกรดไนตริก 60°C



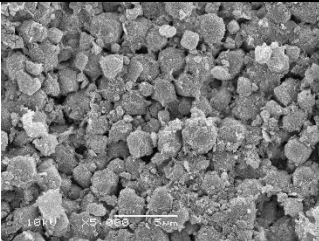
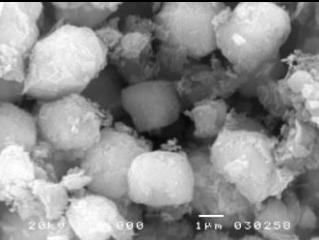
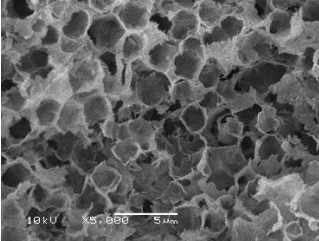
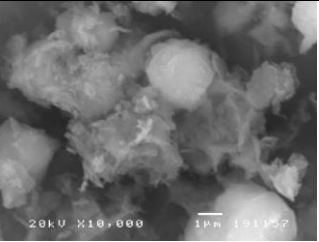
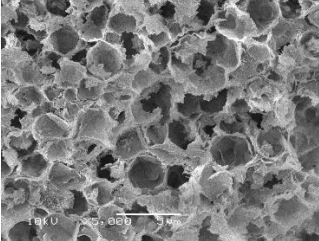
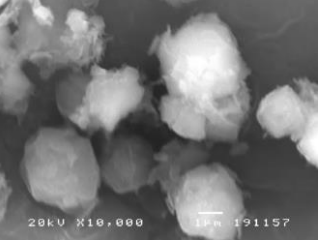
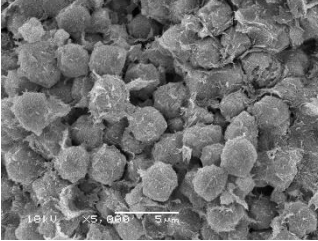
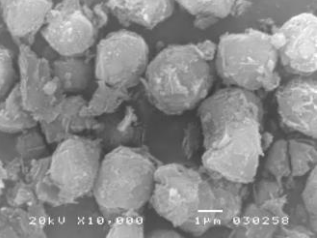
ง) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 60°C

รูปที่ 4.31 ลักษณะทางกายภาพของของเสียซีโอดีหลังผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายกรดและด่างร่วมกับความร้อน 60°C

4.4.3.2 ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของของเสียซีโอดีหลังผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่าของเสียซีโอดีที่ฟื้นฟูสภาพด้วยน้ำปราศจากอ็อกซิเจนและสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 60°C มีลักษณะพื้นผิวและรูปร่างผลึกคล้ายกับของเสียซีโอดีที่ยังไม่ได้ผ่านการฟื้นฟูสภาพ แต่ของเสียซีโอดีที่ฟื้นฟูสภาพด้วยน้ำปราศจากอ็อกซิเจนที่อุณหภูมิ 60°C มีรูปร่างของผลึกชัดเจนน้อยกว่า แต่ของเสียซีโอดีที่ฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกและสารละลายกรดไนตริกที่อุณหภูมิ 60°C มีลักษณะพื้นผิวขรุขระและรูปร่างผลึกถูกทำลายมากกว่าวิธีฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอดีด้วยสารละลายกรดและด่างที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีความแตกต่างกับของเสียซีโอดีที่ยังไม่ได้ผ่านการฟื้นฟูสภาพอย่างชัดเจนอีกด้วย ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลาย 4 ชนิดร่วมกับความร้อน

สารละลาย	กำลังขยาย 5000 เท่า	กำลังขยาย 10000 เท่า
น้ำปราศจากไอออน อุณหภูมิ 60° ซ		
สารละลายกรดซัลฟูริก อุณหภูมิ 60° ซ		
สารละลายกรดไนตริก อุณหภูมิ 60° ซ		
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิ 60° ซ		

4.4.3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (X-Ray Fluorescence: XRF)

เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของของเสียซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายทั้ง 4 ชนิดร่วมกับความร้อน 60° ซ พบว่าองค์ประกอบต่างๆ ของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพที่วิเคราะห์ด้วย เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโคปี (X-Ray Fluorescence Spectroscopy: XRF) มีปริมาณลดลงเมื่อเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิห้อง โดยเฉพาะปริมาณคลอไรด์มีค่าลดลงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองก่อนหน้าคือความร้อนช่วยให้ประสิทธิภาพในการคายคลอไรด์ออกจากของเสียซีโอไลต์เพิ่มขึ้น แต่การให้ความร้อนมีผลต่อองค์ประกอบหลักของซีโอไลต์โดยทำให้องค์ประกอบ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ลดลงมาก ซึ่งทำให้ของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายกรดและสารละลาย

ต่างร่วมกับความร้อนมีองค์ประกอบแตกต่างกันกับซีโอไลต์บริสุทธิ์อย่างชัดเจน ดังตารางที่ 4.8 โดยการใช้สารละลายกรดซัลฟูริกและกรดไนตริกมีผลต่อการลดลงขององค์ประกอบทางเคมีมากที่สุด แม้แต่การใช้น้ำปราศจากอ็อกซิเจนก็มีการลดลงขององค์ประกอบทางเคมีเช่นกัน

ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์หลังฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายกรดและต่างร่วมกับความร้อน 60° ซ

ซีโอไลต์	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					
	Cl	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	SO ₃
ซีโอไลต์บริสุทธิ์	0.158	46.1	25.7	15.2	2.3	0.853
ของเสียซีโอไลต์	2.13	43.8	27.3	13.6	1.99	0.835
น้ำปราศจากอ็อกซิเจนที่ 60° ซ.	0.549	36.3	22.1	10.07	1.82	-
สารละลายกรดซัลฟูริกที่ 60°ซ.	0.172	31.7	13.7	4.94	1.79	1.34
สารละลายกรดไนตริกที่ 60°ซ.	0.231	32.1	17.4	7.86	1.73	-
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 60° ซ.	0.352	35.1	20.1	13.9	1.88	-

4.4.3.4 การวัดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุน

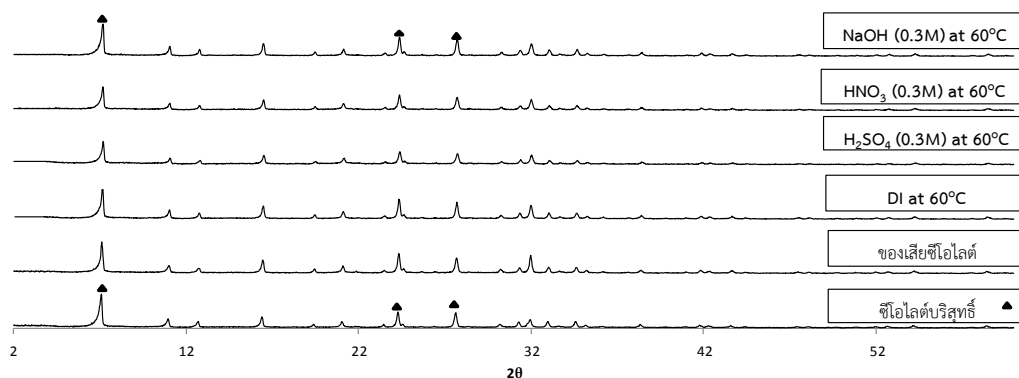
ของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยน้ำปราศจากอ็อกซิเจน สารละลายกรดซัลฟูริก สารละลายกรดไนตริกและสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับความร้อน 60° ซ นำไปวิเคราะห์หาการวัดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนด้วยวิธีบีอีที (Brauner Emmet Teller : BET) ดังตารางที่ 4.9 จากผลการวิเคราะห์พบว่าของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายกรดและต่างมีปริมาณพื้นที่ผิวน้อยกว่าการทดลองที่อุณหภูมิห้องทุกสารละลาย ซึ่งสอดคล้องกับภาพลักษณะภายนอกของของเสียซีโอไลต์ โดยขนาดของเสียซีโอไลต์มีขนาดเล็กและผลยังสอดคล้องกับการทดลองวิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆ ซึ่งปริมาณขององค์ประกอบหลักและองค์ประกอบอื่น ๆ มีปริมาณน้อยลง โดยเฉพาะการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายซัลฟูริกร่วมกับความร้อน 60° ซ มีปริมาณพื้นที่ผิวของซีโอไลต์น้อยที่สุด และมีค่าปริมาณพื้นที่ผิวน้อยกว่าการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ปริมาตรรูพรุนของเสียซีโอไลต์มีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากของเสียซีโอไลต์ดูดซับซัลเฟตโดยมีผลสอดคล้องกับผลวิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆ ในของของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพพบว่าในซีโอไลต์มีปริมาณซัลเฟตสูงขึ้น

ตารางที่ 4.9 พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนของซีโอไลต์หลังฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายกรดและต่างร่วมกับความร้อน 60° ซ

ซีโอไลต์	พื้นที่ผิว ตร. ม.ต่อกรัม	ปริมาตรรูพรุน ซีซี/กรัม	ขนาดรูพรุน อังสตรอม
ซีโอไลต์บริสุทธิ์	517.0	0.4206	32.54
ของเสียซีโอไลต์	436.0	0.3794	34.80
น้ำปราศจากอ็อกซิเจนที่ 60° ซ.	409.1	0.4015	34.81
สารละลายกรดซัลฟูริกที่ 60° ซ.	319.7	0.3121	31.91
สารละลายกรดไนตริกที่ 60° ซ.	361.6	0.4311	35.13
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 60° ซ.	417.4	0.423	34.91

4.4.3.5 การเลี้ยวเบนของซีโอไลต์ (X-ray Diffractometer; XRD)

ของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยน้ำปราศจากอ็อกซิเจน สารละลายกรดซัลฟูริก สารละลายกรดไนตริกและสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับความร้อน 60° ซ ยังคงมีการเลี้ยวเบนรูปแบบโครงสร้างเป็นผลึก (Crystalline Phase) เช่นเดียวกับซีโอไลต์บริสุทธิ์ แต่จุดสูง (Peak) มีความสูงแตกต่างกับการเลี้ยวเบนของซีโอไลต์บริสุทธิ์ แต่ของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับความร้อนอุณหภูมิ 60° ซ มีการเลี้ยวเบนใกล้เคียงกับซีโอไลต์บริสุทธิ์มากที่สุดเมื่อเทียบกับสารละลายทั้ง 4 ชนิด ซึ่งมีการเลี้ยวเบนใกล้เคียงกับซีโอไลต์บริสุทธิ์โดยดูจากจุดสูงสุด (Peak) ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 6.14, 15.48, 23.36, 26.72 และ 31 แต่ก็ยังมีจุดสูง (Peak) ของกราฟสูงไม่เท่ากับซีโอไลต์บริสุทธิ์ ดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 การเลี้ยวเบนของซีโอไลต์หลังฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายกรดและต่างร่วมกับความร้อน อุณหภูมิ 60° ซ

4.4.4 สรุปผลการศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์โดยใช้สารละลายกรด และต่างร่วมกับความร้อน

จากผลการศึกษาการฟื้นฟูสภาพโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60° ซ ร่วมกับสารละลาย ทั้ง 4 ชนิดจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการคายคลอไรด์เพียงเล็กน้อยเท่านั้นแต่การเพิ่มอุณหภูมิ สารละลายช่วยทำให้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการชะละลายคลอไรด์ได้เร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพ องค์ประกอบต่างๆทางเคมี และการ เลี้ยวเบนของซีโอไลต์ พบว่าการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60°ซ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทาง กายภาพองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างหลักทั้งสิ้น ดังนั้นการให้ความร้อนจึงไม่เหมาะสม เนื่องจากความร้อนมีผลต่อองค์ประกอบหลักของซีโอไลต์โดยทำให้องค์ประกอบได้แก่ ซิกนิกอนได ออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ลดลงมากอย่างชัดเจน ซึ่ง องค์ประกอบทั้ง 3 ประเภท เป็นองค์ประกอบสำคัญของซีโอไลต์ใช้กำจัดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ใน ระบบก๊าซไฮโดรเจนของโรงกลั่น Pivgaew และคณะ (2012) ได้กล่าวว่าประสิทธิภาพในการกำจัด ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ขึ้นกับปริมาณของโซเดียมในซีโอไลต์

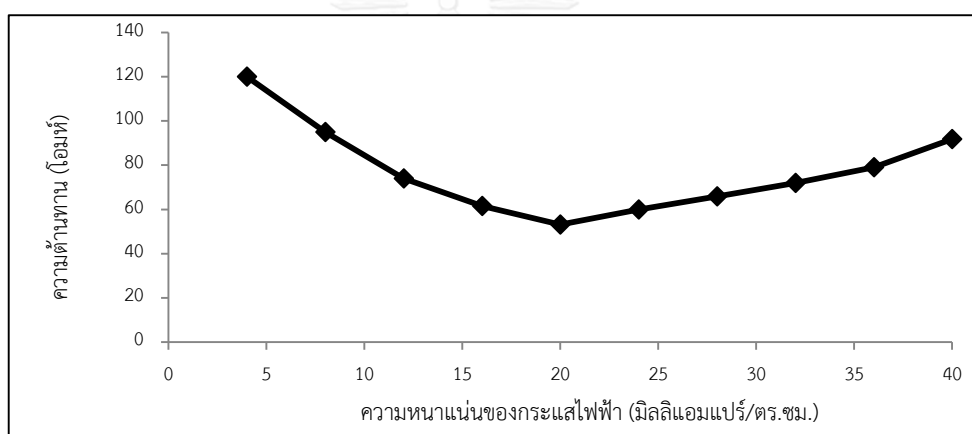
4.5 การศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์โดยใช้เคมีไฟฟ้า

4.5.1 การศึกษาค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม

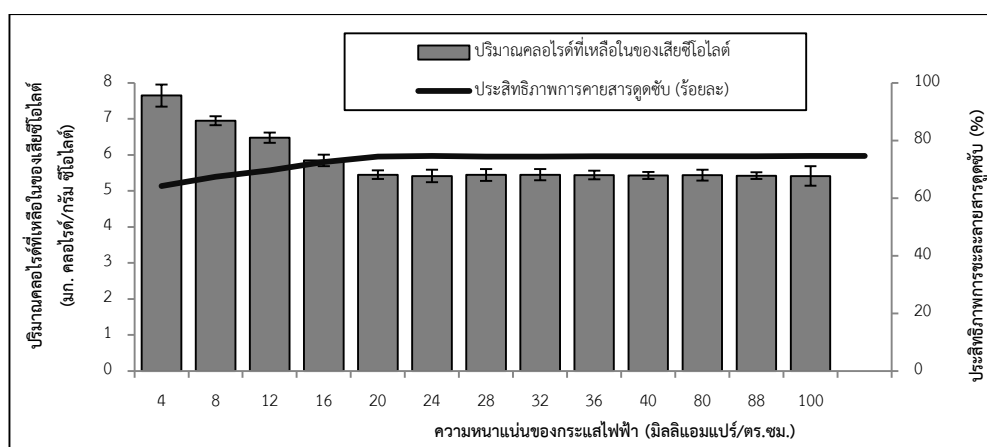
การทดลองชะละลายคลอไรด์จากของเสียซีโอไลต์โดยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยปรับเปลี่ยนค่า ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 4 ถึง 100 มิลลิแอมแปร์ต่อตร.ซม. สารอิเล็กโทรไลต์คือน้ำประปาที่เอชเริ่มต้นเท่ากับ 8.06 และระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที และใช้ขั้วไฟฟ้า แบบไทเทเนียม-แพลตตินัม (ชุดควบคุม) จากผลการทดลองพบว่าค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

มีผลต่อค่าความต้านทานดังรูปที่ 4.33 โดยพบว่าที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตร.ซม ค่าความต้านทานมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 50 โอห์ม นอกจากนี้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ เมื่อเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าทำให้ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์สูงขึ้น ซึ่งพบว่าที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตร.ซม มีปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์ต่ำสุดเท่ากับ 5.45 มก. คลอไรด์/กรัมซีโอไลต์ ดังรูปที่ 4.34

ซึ่งให้ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ วิศิษ และวันชัย (2553) ทำการศึกษาการฟื้นฟูสมรรถภาพโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการกำจัดคลอไรด์ โดยใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีพบว่าความสามารถในการดึงคลอไรด์ออกแปรผันตรงกันกับขนาดความต่างศักย์ที่ใช้ โดยค่าความต่างศักย์แปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้าตามกฎของโอห์ม ทำให้ความสามารถในการดึงคลอไรด์ออกก็แปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้าเช่นเดียวกัน (วิศิษ แซ่ลิ้ม และคณะ, 2553)



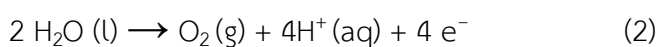
รูปที่ 4.33 ค่าความต้านทานที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าขนาดต่างๆ



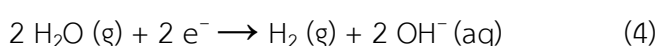
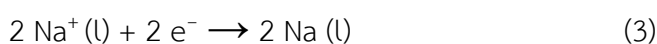
รูปที่ 4.34 ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าขนาดต่างๆ

โดยในระบบมีน้ำนอกเหนือจากโซเดียมอออนและคลอไรด์อออนที่ชะละลายออกมาจากของเสียซีโอไลต์แต่วิธีไฟฟ้าเคมีช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาการชะละลายคลอไรด์จากของเสียซีโอไลต์เนื่องจากเมื่อให้กระแสไฟฟ้าที่สูงพอคลอไรด์อออนที่มีสภาพเป็นขั้วลบจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวกมีผลทำให้ความปนเปื้อนของคลอไรด์อออนในของเสียซีโอไลต์มีค่าลดลง เมื่อให้กระแสไฟฟ้ามากขึ้นเท่าใดความสามารถในการเคลื่อนที่ของคลอไรด์อออนจากของเสียซีโอไลต์ออกสู่สารละลายมากขึ้น (Arya และคณะ, 1996) โดยเมื่อเทียบค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานสมการที่ 1 ถึง 4 พบว่าขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของคลอไรด์อออนได้แก่สคลอริ่งสมการที่ 1 ถึงแม้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานของแก๊สคลอริ่งมีค่าสูงกว่าของออกซิเจนเพียงเล็กน้อย แต่เพราะความเข้มข้นของคลอไรด์อออนมีปริมาณสูงจึงทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำในสมการที่ 2 นอกจากนี้คลอไรด์ที่ถูกชะละลายจากของเสียซีโอไลต์จะกลายเป็นก๊าซคลอริ่งที่ขั้วแอโนดทำให้เกิดการสูญเสียคลอไรด์ออกจากสารละลาย โดยปริมาณคลอไรด์ในสารละลายกลายเป็นก๊าซคลอริ่งดังสมการที่ 1 โดยขั้วแอโนดมีหน้าที่เป็นตัวจ่ายอิเล็กตรอนเมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าทำให้อิเล็กตรอนถูกออกซิไดส์ทำให้คลอไรด์แตกตัวให้ $2 e^-$ ดังสมการที่ 1 ส่วนขั้วไฟฟ้าแคโทดทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน $2 e^-$ ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำได้ไฮดรอกไซด์อออนและแก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทดดังสมการที่ 4 โดยสังเกตจากหลังทำการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์พบว่าค่าพีเอชของสารละลายมีค่าสูงขึ้น โดยค่าพีเอชสุดท้ายเท่ากับ 10.17 ซึ่งเกิดจากปริมาณไฮดรอกไซด์อออนที่ขั้วแคโทดดังสมการที่ 4 แทนที่จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของโซเดียมอออนดังสมการที่ 3 เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานของน้ำเป็นลบน้อยกว่ามากอย่างชัดเจน

ขั้วแอโนด (ปฏิกิริยาออกซิเดชัน):



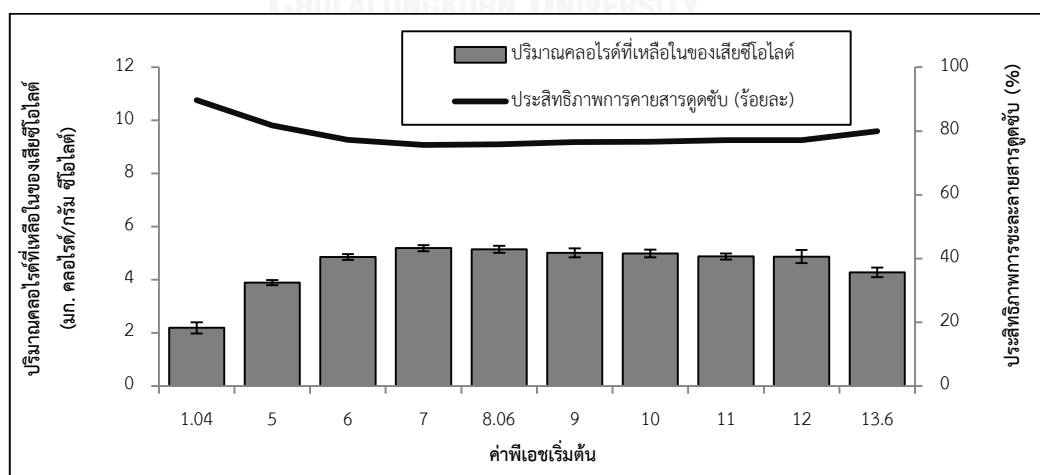
ขั้วแคโทด (ปฏิกิริยารีดักชัน):



4.5.2 การศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม

การศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมของสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีค่าพีเอชแตกต่างกัน 10 ค่า คือ 1) น้ำประปาพีเอชเท่ากับ 8.06 (ชุดควบคุม) 2) น้ำประปาค่าปรับพีเอชเท่ากับ 1.04, 5, 6 และ 7 ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก 3) น้ำประปาค่าปรับพีเอชเท่ากับ 9, 10, 11, 12 และ 13.6 ด้วยสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยทดลองฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าเป็นระยะเวลา 30 นาที และใช้ขั้วไฟฟ้าแบบไทเทเนียม-แพลตตินัม ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตร.ซม. ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมจากการทดลองข้างต้น จากผลการทดลองปรับเปลี่ยนพีเอชเริ่มต้นสารละลาย พบว่าประสิทธิภาพการคายคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชของสารละลายเป็นกรด (ที่ค่าค่าพีเอช = 1.04) มีประสิทธิภาพการคายคลอไรด์สูงสุดเท่ากับร้อยละ 89.73 โดยมีคลอไรด์เหลือในซีโอไลต์เท่ากับ 2.19 มิลลิกรัมต่อกรัมของซีโอไลต์ รองลงมาคือ (ที่ค่าพีเอช = 5) มีประสิทธิภาพการคายคลอไรด์เท่ากับ 81.77 โดยมีคลอไรด์เหลือในซีโอไลต์เท่ากับ 3.89 มิลลิกรัมต่อกรัมของซีโอไลต์ ส่วนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นด่าง (ค่าพีเอช = 13.6) มีประสิทธิภาพการคายคลอไรด์เท่ากับ 79.94 โดยมีคลอไรด์เหลือในซีโอไลต์เท่ากับ 4.28 มิลลิกรัมต่อกรัมของซีโอไลต์ ดังรูปที่ 4.35

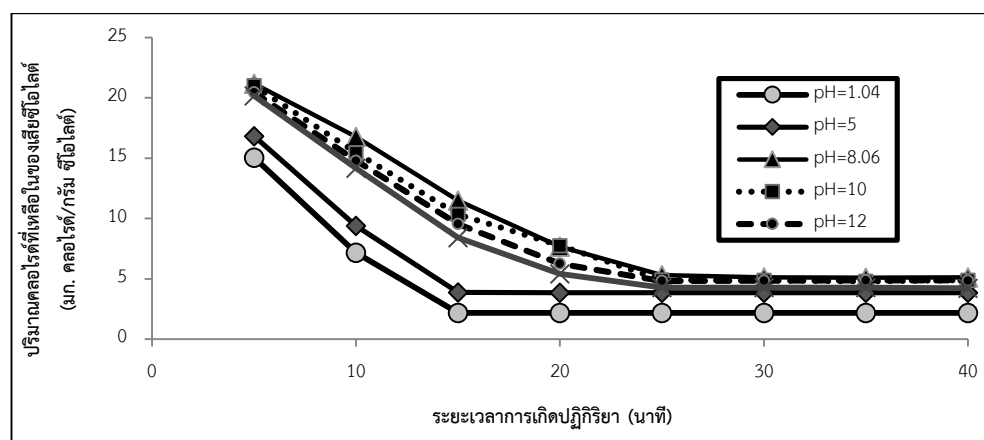
จากกราฟเปรียบเทียบค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทั้ง 10 ค่า พบว่าการใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์มีค่าพีเอชเท่ากับ 1.04 มีประสิทธิภาพการคายคลอไรด์สูงสุดเท่ากับร้อยละ 89.73 รองลงมาคือสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5, 13.6 และ 6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.35 ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายที่เหมาะสม

4.5.3 การศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม

การศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมของสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยใช้ระยะเวลา 8 ค่า คือ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 นาที ซึ่งขั้วไฟฟ้าที่นำมาใช้ในการทดลองคือ ขั้วไฟฟ้าแบบไทเทเนียม-แพลตตินัม ใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตร.ซม. โดยศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมของโดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีค่าพีเอชแตกต่างกัน 10 ค่าข้างต้น จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์เพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งประสิทธิภาพการคายคลอไรด์คงที่ โดยการใช้สารละลายกรดจะให้ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาสั้นกว่าการใช้สารละลายที่เป็นกลางและด่าง โดยพบว่าระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการชะละลายคลอไรด์ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์พีเอช 1.04 ถึง 5 เริ่มคงที่เมื่อเวลาเท่ากับ 15 นาที ส่วนระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการชะละลายคลอไรด์ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์พีเอช 8.06 ถึง 13.06 เริ่มคงที่เมื่อเวลาเท่ากับ 25 นาที ดังรูปที่ 4.36 ซึ่งการเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้นจะทำให้เวลาในการที่จะสัมผัสกันระหว่างของเสียซีโอไลต์และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ก็จะสูงขึ้นด้วย ทำให้ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ออกจากของเสียซีโอไลต์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu และคณะ (2008) ได้ทำการทดลองไฟฟ้าเคมีเพื่อกำจัดคลอไรด์ออกจากเหล็ก พบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้นทำให้ปริมาณคลอไรด์ถูกกำจัดได้มากขึ้น ซึ่งพบว่าคลอไรด์ได้ถูกกำจัดได้ในเวลารวดเร็วจนถึงระยะเวลาหนึ่งหลังจากนั้นคลอไรด์จะถูกกำจัดได้ในปริมาณที่น้อย และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Elsener และ Angst 2007 ทำการทดลองการกำจัดคลอไรด์ออกจากคอนกรีตด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มความสามารถในการกำจัดคลอไรด์ได้เกินร้อยละ 95



รูปที่ 4.36 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่พีเอชของสารละลายต่างๆ

ของเสียซีโอไลต์ก่อนทดลองมีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 21.3 มก./กรัมของเสียซีโอไลต์ หลังจากการทดลองฟื้นฟูสภาพแล้วด้วยสภาพด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าสามารถสรุปสภาวะเหมาะสมในการชะละลายคลอไรด์จากของเสียซีโอไลต์ ดังนี้

- ของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีเคมีไฟฟ้ากับน้ำประปาที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5 ที่เวลา 15 นาที มีปริมาณคลอไรด์เหลือในของเสียซีโอไลต์เท่ากับ 3.88 มก. คลอไรด์ต่อกรัมซีโอไลต์
- ของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีเคมีไฟฟ้ากับน้ำประปาที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8.06 ที่เวลา 25 นาที มีปริมาณคลอไรด์เหลือในของเสียซีโอไลต์เท่ากับ 5.31 มก. คลอไรด์ต่อกรัมซีโอไลต์
- ของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีเคมีไฟฟ้ากับน้ำประปาที่ค่าพีเอชเท่ากับ 10 ที่เวลา 25 นาที มีปริมาณคลอไรด์เหลือในของเสียซีโอไลต์เท่ากับ 4.89 มก.คลอไรด์ต่อกรัมซีโอไลต์
- ของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีเคมีไฟฟ้ากับสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 13.6 ที่เวลา 25 นาที มีปริมาณคลอไรด์เหลือในของเสียซีโอไลต์เท่ากับ 4.28 มก. คลอไรด์ต่อกรัมซีโอไลต์

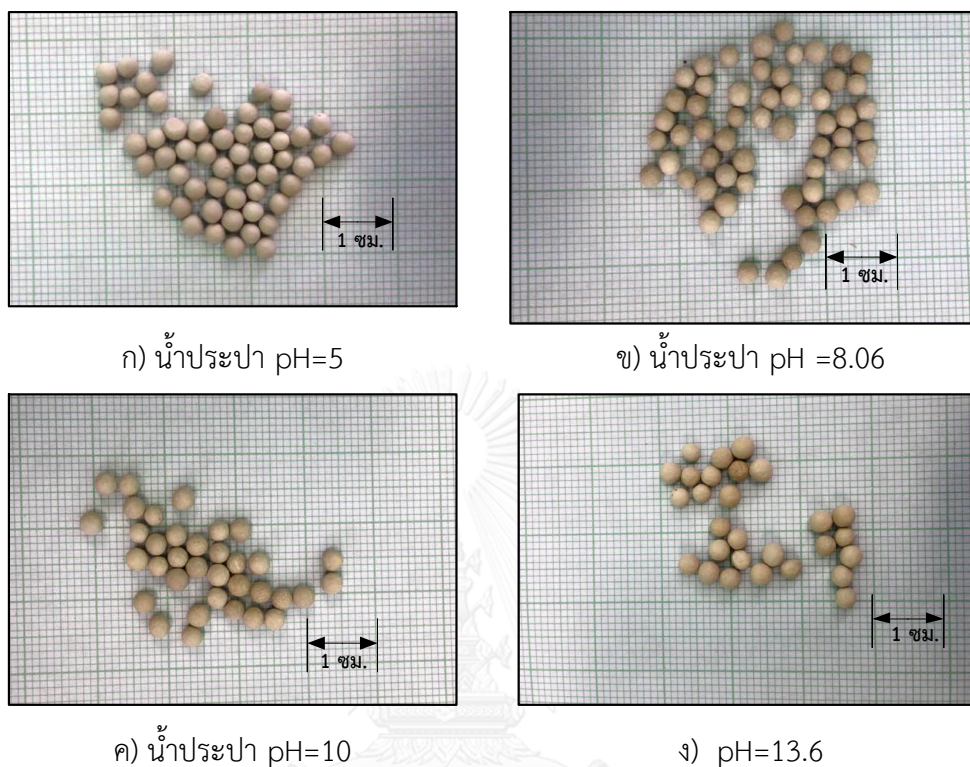
4.5.4 การศึกษาองค์ประกอบและลักษณะสมบัติทางกายภาพของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้ว

ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะนำของเสียซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพในสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวข้างต้นมาศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) การศึกษาองค์ประกอบต่างๆ การศึกษาการเลี้ยวเบนของซีโอไลต์ (X-ray Diffractometer: XRD) การวัดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนด้วยวิธีบีอีที เพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีเปรียบเทียบกับซีโอไลต์บริสุทธิ์ ซึ่งหากของเสียซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้วยังมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีใกล้เคียงกับซีโอไลต์บริสุทธิ์ แสดงว่าวิธีการฟื้นฟูสภาพนั้นมีความเหมาะสม และของเสียซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้วมีแนวโน้มสามารถนำกลับไปใช้ประโยชน์ได้อีกครั้ง

4.5.4.1 ลักษณะทางกายภาพของของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพ

ลักษณะทางกายภาพของของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าโดยมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์คือน้ำประปาที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5, 8.06, 10 และ 13.6 พบว่า

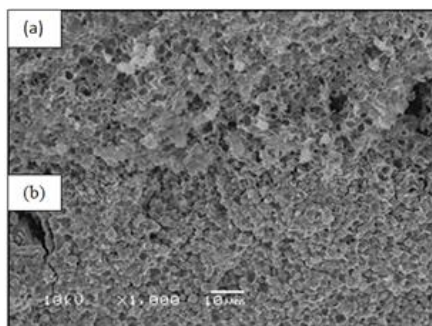
มีลักษณะเหมือนกับของเสียซีโอไลต์แต่สีจะแตกต่างกันเล็กน้อยโดยของเสียซีโอไลต์ที่ผ่านการการฟื้นฟูสภาพโดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีฤทธิ์เป็นกรดจะมีสีเข้มขึ้น ดังรูปที่ 4.37



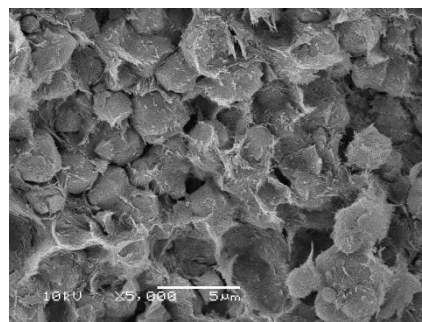
รูปที่ 4.37 ลักษณะทางกายภาพของของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยไฟฟ้าเคมี

4.5.4.2 ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope ;SEM)

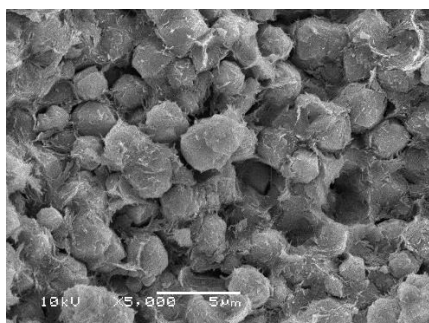
ลักษณะของของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5, 8.06, 10 และ 13.6 มีลักษณะเป็นผลึกเช่นเดียวกับของเสียซีโอไลต์ที่ยังไม่ได้ฟื้นฟูสภาพแต่ของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5 มีลักษณะพื้นผิวและรูปร่างผลึกถูกทำลายมากกว่าการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ที่พีเอชเป็นค่าอื่น และแตกต่างกับของเสียซีโอไลต์ที่ยังไม่ได้ผ่านการฟื้นฟูสภาพอย่างมากอีกด้วย โดยหลังการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีเคมีไฟฟ้ากับน้ำประปาที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5 พบว่าผิวชั้นนอกของของเสียซีโอไลต์ถูกทำลายโดยมีลักษณะแตกต่างกับผิวชั้นในของของเสียซีโอไลต์ที่ยังคงมีรูปผลึกและลักษณะเหมือนกับของเสียซีโอไลต์ที่ยังไม่ได้ฟื้นฟูสภาพ ดังรูปที่ 4.38



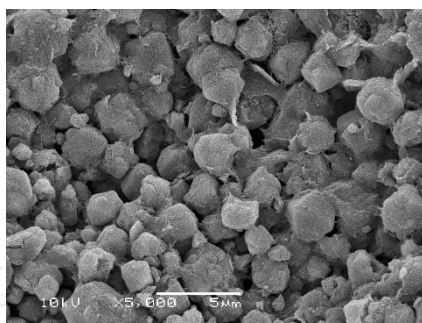
ก) สารละลาย pH = 5 (a) ผิวชั้นนอก (b) ผิวชั้นใน



ข) สารละลาย pH = 8.06



ค) สารละลาย pH = 10



ง) สารละลาย pH = 13.6

รูปที่ 4.38 ภาพของของเสี้ยวไฮดรอกไซด์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยไฟฟ้าเคมีจากล่องจูลทรศน์แบบ
สองกราด

4.5.4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (X-Ray Fluorescence: XRF)

ขั้นตอนนี้ของเสี้ยวไฮดรอกไซด์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าโดยมีกับสารละลายที่ค่าพีเอชต่างกัน ถูกนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบต่างๆด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (X-Ray Fluorescence Spectroscopy: XRF) เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ดังตารางที่ 4.10

เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของของเสี้ยวไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าที่สารละลายพีเอชต่างๆ พบว่าในของเสี้ยวไฮดรอกไซด์หลังการฟื้นฟูสภาพ มีปริมาณลดลง โดยเฉพาะองค์ประกอบหลักของซีโอไลต์โดยทำให้องค์ประกอบ อะลูมินา (Al_2O_3) และโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ลดลง โดยเฉพาะสารละลายพีเอชเท่ากับ 5 ลดลงมากที่สุด แม้แต่สารละลายพีเอชเท่ากับ 8.06 ก็ลดลงเช่นกัน ของเสี้ยวไฮดรอกไซด์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีเคมีไฟฟ้ากับสารละลายพีเอชเท่ากับ 5 มีปริมาณคลอไรด์เหลืออย่างน้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ 0.388 แต่พบว่ามีองค์ประกอบของอะลูมินา (Al_2O_3) และโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ลดลงอย่างชัดเจนคิดเป็นร้อยละ 14.01 และ 39.14 ตามลำดับ ซึ่งทำให้ของเสี้ยวไฮดรอกไซด์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีเคมีไฟฟ้ากับสารละลายพีเอชเท่ากับ 5 มี

องค์ประกอบแตกต่างกับของซีโอไลต์บริสุทธิ์อย่างชัดเจน ส่วนของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีเคมีไฟฟ้ากับน้ำประปา น้ำประปาปรับค่าพีเอชเป็นต่างก็มีองค์ประกอบหลักลดลงเช่นกัน

เมื่อเปรียบเทียบของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีเคมีไฟฟ้ากับสารละลายพีเอชเท่ากับ 10 และสารละลายพีเอชเท่ากับ 13.6 พบว่าการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีเคมีไฟฟ้ากับสารละลายพีเอชเท่ากับ 10 มีองค์ประกอบหลักได้แก่ ซิกนิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) มากกว่าของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีเคมีไฟฟ้ากับสารละลายพีเอชเท่ากับ 13.6 ส่วนปริมาณโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) มีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.10 องค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์หลังฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

ซีโอไลต์	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					
	Cl	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	MgO	SO_3
ซีโอไลต์บริสุทธิ์	0.158	46.1	25.7	15.2	2.3	0.853
ของเสียซีโอไลต์	2.13	43.8	27.3	13.6	1.99	0.835
สารละลาย pH = 5	0.388	40.3	22.1	9.25	1.89	1.67
สารละลาย pH =8.06	0.541	41.9	25.1	11.8	1.96	0.111
สารละลาย pH =10	0.470	41.5	24.9	12.5	1.94	-
สารละลาย pH =13.6	0.428	40.6	24.1	13.2	2.00	-

4.5.4.4 การวัดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุน

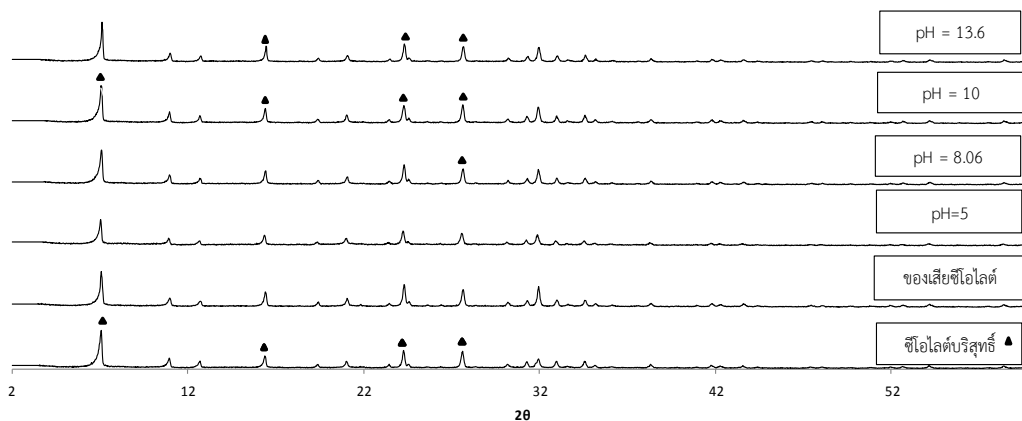
ของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า นำไปวิเคราะห์หาการวัดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนด้วยวิธีบีอีที (Brauner Emmet Teller : BET) ดังตารางที่ 4.11 จากผลการวิเคราะห์พบว่าของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีเคมีไฟฟ้ากับสารละลายพีเอชเท่ากับ 5 มีปริมาณพื้นที่ผิวของซีโอไลต์น้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับปริมาตรรูพรุนของเสียซีโอไลต์มีปริมาตรน้อยที่สุด เนื่องจากของเสียซีโอไลต์ดูดซับซัลเฟตโดยมีผลสอดคล้องกับผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพพบว่ามีซัลเฟตในปริมาณที่สูง ส่วนของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าโดยมีกับสารละลายที่ค่าพีเอชเป็นต่างพบว่ามีขนาดปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับของเสียซีโอไลต์ที่ยังไม่ได้ฟื้นฟูสภาพ

ตารางที่ 4.11 พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนของซีโอไลต์หลังฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

ซีโอไลต์	พื้นที่ผิว ตร. ม.ต่อกรัม	ปริมาตรรูพรุน ซีซี/กรัม	ขนาดรูพรุน อังสตรอม
ซีโอไลต์บริสุทธิ์	517.0	0.4206	32.54
ของเสียซีโอไลต์	436.0	0.3794	34.80
สารละลาย pH = 5	393.60	0.3231	36.52
สารละลาย pH =8.06	415.1	0.3956	35.01
สารละลาย pH =10	429.8	0.4151	34.82
สารละลาย pH =13.6	431.3	0.4184	34.83

4.5.4.5 การเลี้ยวเบนของซีโอไลต์ (X-ray Diffractometer; XRD)

จากผลการศึกษาวิเคราะห์รูปแบบโครงสร้างคือแบบผลึกของของเสียซีโอไลต์ หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยการเลี้ยวเบนด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer เปรียบเทียบกับซีโอไลต์บริสุทธิ์พบว่าของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าโดยมีกับน้ำประปาปรับค่าพีเอช ต่างๆกัน พบว่าของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพมีรูปแบบโครงสร้างคือแบบผลึก (Crystalline Phase) เช่นเดียวกับซีโอไลต์บริสุทธิ์ ดังรูปที่ 4.39 แต่จุดสูง (Peak) ของกราฟแตกต่างกับการเลี้ยวเบนของซีโอไลต์บริสุทธิ์ แต่ของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีเคมีไฟฟ้ากับสารละลายพีเอชเท่ากับ 10 มีการเลี้ยวเบนใกล้เคียงกับซีโอไลต์บริสุทธิ์มากที่สุดเมื่อเทียบกับสารละลายชนิดอื่น เนื่องจากจุดสูงสุด (Peak) ที่ 2θ เท่ากับ 6.14, 15.48, 23.36, 26.72 และ 31 มีจุดสูง (Peak) ของกราฟสูงใกล้เคียงกับซีโอไลต์บริสุทธิ์มากที่สุด ส่วนของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีเคมีไฟฟ้ากับสารละลายพีเอชเท่ากับ 13.6 มีค่าสูงของกราฟที่ 2θ เท่ากับ 6.14 และ 15.48 สูงกว่าซีโอไลต์บริสุทธิ์



รูปที่ 4.39 การเลี้ยวเบนของซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ด้วยไฟฟ้าเคมี

4.5.5 สรุปผลการศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์โดยใช้ไฟฟ้าเคมี

จากการทดลองพบว่าการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าโดยมีกับน้ำประปาปรับค่าพีเอช 10 ที่ระยะเวลา 25 นาที โดยมีปริมาณคลอไรด์เหลือในของเสียซีโอไลต์เท่ากับ 4.89 มก. คลอไรด์ต่อกรัมซีโอไลต์ มีประสิทธิภาพสูงสุดในการชะละลายคลอไรด์จากของเสียซีโอไลต์เท่ากับร้อยละ 77.04 คือสภาวะที่มีความเหมาะสมที่สุดในการทดลองการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า เนื่องจากผลการศึกษารองรับและลักษณะสมบัติทางกายภาพของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้ว พบว่ามีลักษณะทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างผลึกและปริมาตรรูพรุนใกล้เคียงกับซีโอไลต์บริสุทธิ์มากที่สุด และยังมีปริมาณโซเดียมเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ปรับพีเอช ซึ่งปริมาณของโซเดียมในซีโอไลต์ส่งผลกับประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์

4.6 เปรียบเทียบการทดลองที่สภาวะเหมาะสม

4.6.1 สภาวะที่เหมาะสมแต่ละการทดลอง

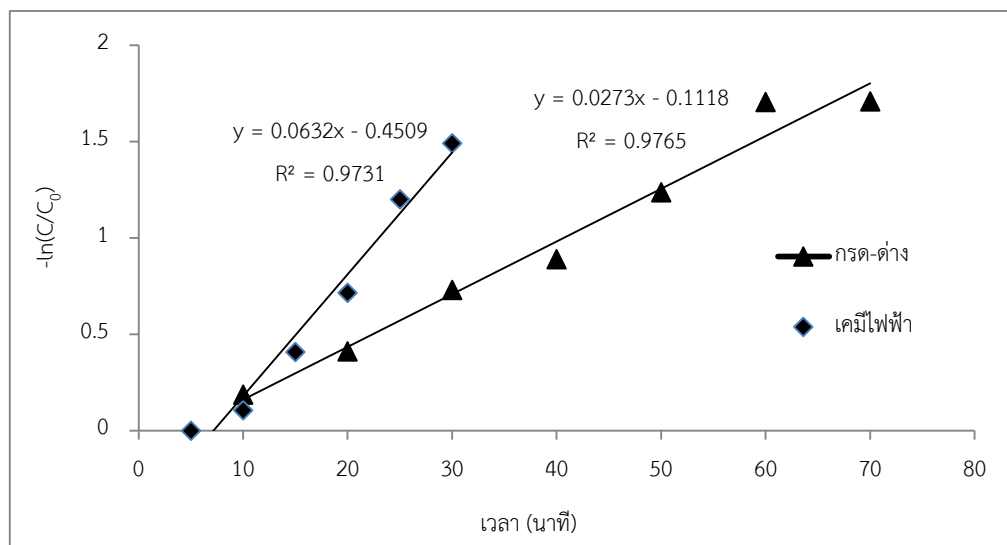
จากการทดลองการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ทั้ง 2 วิธี พบว่าการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ด้วยสารละลายกรดและด่าง และวิธีไฟฟ้าเคมี มีแนวโน้มสามารถฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ได้ ส่วนการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ด้วยสารละลายกรดและด่างร่วมกับความร้อนพบว่าไม่เหมาะสม เนื่องจากความร้อนมีผลต่อสัดส่วนองค์ประกอบหลักของซีโอไลต์ ซึ่งมีปริมาณน้อยลงอย่างชัดเจน ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 สรุปสภาวะที่เหมาะสมแต่ละการทดลอง

วิธีการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์	สภาวะที่เหมาะสม	ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ (ร้อยละ)	ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือ (มก/กรัม ซีโอไลต์)
น้ำปราศจากไอออน	- อัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ 1 กรัม ต่อ น้ำ 25 มิลลิลิตร - ค่าพีเอชเท่ากับ - ระยะเวลา 40 นาที - อุณหภูมิห้อง	63.32	7.86
สารละลาย NaOH 0.3 M	- ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ - อัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ 1 กรัม ต่อ สารละลาย 25 มิลลิลิตร - ระยะเวลา 60 นาที - ค่าพีเอชเท่ากับ 13.6 - อุณหภูมิห้อง	81.91	3.86
เคมีไฟฟ้า	- ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10 - อัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ 1 กรัม ต่อ น้ำ 25 มิลลิลิตร - ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตร.ซม - ระยะเวลา 25 นาที - ค่าพีเอชหลังการทดลองเท่ากับ 10.82	77.04	4.89

4.6.2 อัตราเร็วของปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาการชะละลายคลอไรด์ของวิธีการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.3 โมลาร์ ที่ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที และการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าโดยมีกับน้ำประปาปรับค่าพีเอช 10 ที่ระยะเวลา 25 นาที ยังคงเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และมีค่าคงที่ปฏิกิริยาการชะละลายคลอไรด์เท่ากับ 0.0273 และ 0.0632 ต่อนาที ซึ่งการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าโดยปรับค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10 เกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่าวิธีการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.3 โมลาร์ ดังรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.40 อัตราเร็วของปฏิกิริยาของวิธีการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์

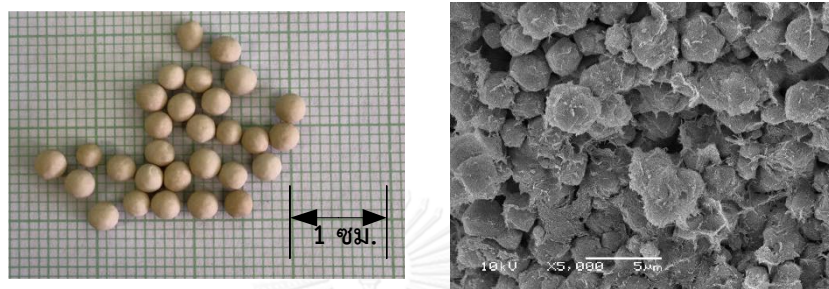
4.6.3 สมดุลมวลทั่วไป

ตารางที่ 4.13 สมดุลมวลทั่วไปของแต่ละการทดลอง

วิธีการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์	สมดุลมวลทั่วไป
สารละลาย NaOH 0.3 โมลาร์	<ul style="list-style-type: none"> ◆ ปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นของเสียซีโอไลต์เท่ากับ 21.3 มก./กรัม ซีโอไลต์ 1) ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์เท่ากับ 3.86 มก. คลอไรด์ 2) ปริมาณคลอไรด์ที่ชะละลายในสารละลายเท่ากับ 17.45 มก. คลอไรด์ 3) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเท่ากับ 3.86+17.45=21.31 มก. คลอไรด์
เคมีไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า=10 mA/cm ² น้ำประปา pH =10	<ul style="list-style-type: none"> ◆ ปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นของเสียซีโอไลต์เท่ากับ 21.3 มก./กรัม ซีโอไลต์ 1) ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์เท่ากับ 4.89 มก. คลอไรด์ 2) ปริมาณคลอไรด์ที่ชะละลายในสารละลายเท่ากับ 8.02 มก. คลอไรด์ 3) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเท่ากับ 4.89+8.02=12.91 มก. คลอไรด์ 4) ปริมาณคลอไรด์ที่สูญเสียเท่ากับ 21.3-12.4 = 8.39 มก. คลอไรด์ ซึ่งถูกเปลี่ยนสถานะเป็นก๊าซคลอรีนระเหยไประหว่างการทดลอง

4.6.4 คุณสมบัติทางกายภาพ

ของเสียซีโอไลต์ที่ฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์มีลักษณะเหมือนเดิม แต่มีสีอ่อนลงเมื่อเปรียบเทียบกับของเสียซีโอไลต์ที่ยังไม่ได้ฟื้นฟูสภาพ ส่วนของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าโดยมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์คือน้ำประปาที่ค่าพีเอชเท่ากับ 10 มีลักษณะสีเทาแต่สีจางกว่าของเสียซีโอไลต์ที่ยังไม่ได้ฟื้นฟูสภาพ ดังรูปที่ 4.41



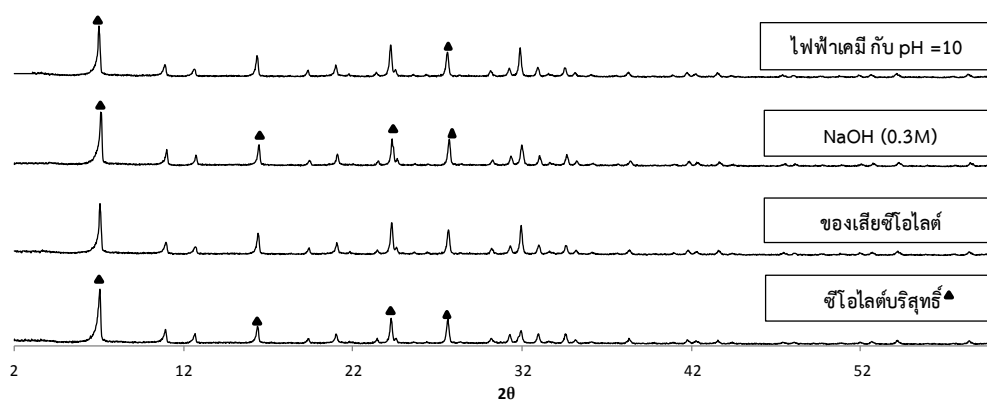
NaOH 0.3 โมลาร์



เคมีไฟฟ้า $I=20 \text{ mA/cm}^2$ พีเอช 10

รูปที่ 4.41 ภาพของของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีสารละลายกรดและต่างกับไฟฟ้าเคมี

เปรียบเทียบของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์และวิธีไฟฟ้าเคมีกับน้ำประปาปรับค่าพีเอชเท่ากับ 10 พบว่าทั้งสองวิธีมีรูปแบบโครงสร้างคือแบบผลึก (Crystalline Phase) เช่นเดียวกับซีโอไลต์บริสุทธิ์ และมีการเลี้ยวเบนใกล้เคียงกับซีโอไลต์บริสุทธิ์โดยดูจากจุดที่ 2θ เท่ากับ 6.14, 15.48, 23.36, 26.72 และ 31 ซึ่งการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ด้วยสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความสูง (Peak) ใกล้เคียงกับซีโอไลต์บริสุทธิ์ แต่วิธีไฟฟ้าเคมีซึ่งใช้น้ำประปาปรับค่าพีเอชเท่ากับ 10 กลับมีบางจุดที่มีค่าความสูง (Peak) แตกต่างกับซีโอไลต์บริสุทธิ์โดยเฉพาะที่จุด 2θ เท่ากับ 23.36 ดังรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.42 การเลี้ยวเบนของซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีการละลายต่างกับไฟฟ้าเคมี

องค์ประกอบต่างๆด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโคปี (X-Ray Fluorescence Spectroscopy: XRF) ของของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์และวิธีไฟฟ้าเคมี ดังตารางที่ 4.14

เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของของเสียซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์และวิธีไฟฟ้าเคมี พบว่าของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณคลอไรด์เหลือเท่ากับร้อยละ 0.39 ซึ่งน้อยกว่าของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี แต่พบว่ามีองค์ประกอบหลักของซีโอไลต์ได้แก่ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) สูงกว่าของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี และองค์ประกอบหลักของซีโอไลต์ยังมีค่าใกล้เคียงกับของซีโอไลต์บริสุทธิ์ โดยเฉพาะปริมาณโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับการใช้งานด้านการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ ซึ่งพบว่าปริมาณโซเดียมออกไซด์ในของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าสูงกว่าซีโอไลต์บริสุทธิ์ อาจเนื่องจากสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณโซเดียมสูง ซึ่งทำการแลกเปลี่ยนประจุกับของเสียซีโอไลต์ขณะทำปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพโดยสังเกตได้จากปริมาณโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) มีค่ามากขึ้นกว่าของเสียซีโอไลต์ที่ยังไม่ได้ฟื้นฟูสภาพ

ตารางที่ 4.14 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุน

ซีโอไลต์	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					พื้นที่ผิว (ตร. ม.ต่อ กรัม)	ปริมาตรรู พรุน (ซีซี/กรัม)	ขนาดรูพรุน (อังสตรอม)
	Cl	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO			
ซีโอไลต์ บริสุทธิ์	0.158	46.1	25.7	15.2	2.3	517.0	0.4206	32.54
NaOH (0.3M)	0.395	42.9	25.3	14.1	2.05	435.3	0.4184	34.87
เคมีไฟฟ้า I=20 mA/cm ² ; pH =10	0.470	41.5	24.9	12.5	1.94	429.8	0.4151	34.82

4.6.5 การคำนวณค่าใช้จ่าย

การคำนวณค่าใช้จ่ายสำหรับการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์เพื่อลดต้นทุนในการผลิตจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ราคาสารเคมีและค่าไฟฟ้าในกระบวนการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ในแต่ละการทดลอง ดังตารางที่ 4.15 ถึง 4.17

ตารางที่ 4.15 ค่าใช้จ่ายของสารเคมีที่ใช้สำหรับการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์

วิธีการฟื้นฟู	วัตถุดิบ	ราคา	ที่มา	ปริมาณที่ใช้	ราคา (บาท)
NaOH (0.3โมลาร์)	ของเสีย ซีโอไลต์	-	นำมาจากโรงงาน กรณีศึกษา	1000 กรัม	-
	โซดาไฟ	25 บ./กก.	WATER SPECIALIST SUPPLY CO.,LTD.	สารละลาย 25 ลิตรปรับพีเอช =13.5 ใช้ NaOH=400 กรัม	10
เคมีไฟฟ้า I=20 mA/cm ² ; pH =10	ของเสีย ซีโอไลต์	-	นำมาจากโรงงาน กรณีศึกษา	1000 กรัม	-
	โซดาไฟ	ปรับ pH =10	WATER SPECIALIST SUPPLY CO.,LTD.	สารละลาย 25 ลิตรปรับพีเอช =10 ใช้ NaOH=10 กรัม	0.25

หมายเหตุ คิดเฉพาะราคาเฉพาะสารเคมี

ตารางที่ 4.16 ค่าไฟฟ้าสำหรับการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี

วิธีการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์	อุปกรณ์	ค่าพลังงานที่ใช้ในการบำบัด (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร)	ค่าไฟฟ้า (บาทต่อ 1 กิโลกรัม)
เคมีไฟฟ้า $I=20 \text{ mA/cm}^2$; $\text{pH} = 10$	แหล่งจ่ายไฟแบบควบคุมได้	58.33	161.16

หมายเหตุ ค่าไฟฟ้าราคาเฉลี่ย 2.7628 ต่อหน่วย สำหรับการใช้ไฟฟ้าเพื่อประกอบธุรกิจ ธุรกิจรวมกับที่อยู่อาศัย อุตสาหกรรม หน่วยราชการ สำนักงาน หรือหน่วยงานอื่นใดของรัฐ องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น และหน่วยงานรัฐวิสาหกิจ ณ วันที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2558 (การไฟฟ้านครหลวง)

ตารางที่ 4.17 สรุปค่าใช้จ่ายสำหรับการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์แต่ละการทดลอง

วิธีการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์	ค่าใช้จ่ายทั้งหมด (บาทต่อ 1 กิโลกรัม)
NaOH (0.3โมลาร์)	10
เคมีไฟฟ้า $I=20 \text{ mA/cm}^2$; $\text{pH} = 10$	$0.25 + 161.16 = 161.66$

หมายเหตุ คิดเฉพาะราคาเฉพาะสารเคมี

ดังนั้นงานวิจัยนี้คำนวณค่าใช้จ่ายสารเคมีและค่าไฟฟ้าในการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ 1 กิโลกรัมด้วยวิธีเขย่ากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 10 บาท โดยค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่คือค่าสารเคมี แต่การฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ในแต่ละรอบสามารถนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์นำกลับมาใช้ซ้ำได้หลายรอบ ส่วนการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ขนาด 1 กิโลกรัมด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า เท่ากับ 161.66 บาท ซึ่งค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่มาจากค่าไฟฟ้า แต่เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟแบบควบคุมได้ในกระบวนการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์มีขนาดเล็กจึงทำให้มีค่าไฟฟ้าสูง แต่ถ้าในกระบวนการผลิตระดับอุตสาหกรรมมีการใช้อุปกรณ์ที่มีขนาดเหมาะสมและฟื้นฟูสภาพของเสียได้จำนวนมากต่อการผลิตหนึ่งครั้งก็จะสามารถลดค่าไฟฟ้าลงได้ ทำให้การฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดปริมาณของเสียซีโอไลต์ได้ โดยการนำไปใช้ผสมกับซีโอไลต์บริสุทธิ์ ซึ่งสามารถลดต้นทุนในการใช้ซีโอไลต์บริสุทธิ์ในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์และลดการนำของเสียไปกำจัดโดยการฝังกลบ

โดยนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตได้และเป็นการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างคุ้มค่า หรืออาจนำไปใช้ประโยชน์เป็นสารดูดซับชนิดอื่นเช่นการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โลหะหนัก ซึ่งนอกจากจะเป็นการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่แล้วยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียซีโอไลต์ด้วยวิธีการฝังกลบและการเผา



บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ที่ผ่านการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์จากโรงกลั่นน้ำมัน ซึ่งจะทำให้การทดลองฟื้นฟูสภาพโดยใช้สารละลายต่าง สารละลายกรด การใช้สารละลายกรดและต่างร่วมและวิธีไฟฟ้าเคมี รวมทั้งศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพ ได้แก่ ความเข้มข้นของกรดและต่าง พีเอชเริ่มต้น อุณหภูมิ และระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการฟื้นฟูสภาพ โดยผลสรุปที่ได้จากงานวิจัยมีดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

1) การฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์โดยใช้สารละลายกรดและต่าง พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการชะละลายคลอไรด์จากของเสียซีโอไลต์คือ ชนิดของกรดและต่าง ความเข้มข้นของสารละลายกรดและสารละลายต่าง ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการใช้น้ำปราศจากไอออนและสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.3 โมลาร์สามารถชะละลายคลอไรด์จากของเสียซีโอไลต์ได้ โดยคลอไรด์ในของเสียซีโอไลต์คือเกลือโซเดียมคลอไรด์จับตัวกันเป็นพันธะไอออนิก มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี (Langer และคณะ, 1982) และมีคลอไรด์บางส่วนที่ยึดกันที่ผิวซีโอไลต์ ซึ่งการล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนไม่สามารถกำจัดคลอไรด์ออกจากซีโอไลต์ได้อย่างสมบูรณ์ (เลิศ รักสันติชาติ, 2545) แต่สารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความสามารถในการกำจัดคลอไรด์ได้มากกว่า โดยซีโอไลต์ที่ผ่านการปรับสภาพยังคงมีลักษณะทางกายภาพและเคมีใกล้เคียงกับซีโอไลต์บริสุทธิ์มีรูปแบบโครงสร้างคือแบบผลึกใกล้เคียงกับซีโอไลต์บริสุทธิ์

2) การใช้สารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.3 โมลาร์ ที่ระยะเวลา 60 นาที มีประสิทธิภาพสูงสุดการคายคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 81.91 โดยมีปริมาณคลอไรด์เหลือในของเสียซีโอไลต์ ต่ำสุดเท่ากับ 3.86 มก.คลอไรด์ต่อกรัมซีโอไลต์ คิดเป็นร้อยละ 18.092 น้ำมีพีเอชสุดท้ายเท่ากับ 13.72 และปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 17.16 มก.คลอไรด์ต่อลิตร ลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพใกล้เคียงกับซีโอไลต์บริสุทธิ์ สอดคล้องกับองค์ประกอบหลักของซีโอไลต์ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ก็มีค่าใกล้เคียงกับของซีโอไลต์บริสุทธิ์เช่นเดียวกัน โดยมีค่าใช้จ่ายในการฟื้นฟูสภาพเท่ากับ 10 บาทต่อของเสียซีโอไลต์ 1 kg

3) การใช้น้ำปราศจากอ็อกซิเจนเริ่มต้น 6.68 ± 0.672 ที่ระยะเวลา 40 นาที มีประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์จากของเสียซีโอไลต์เท่ากับร้อยละ 63.32 โดยมีปริมาณคลอไรด์เหลือในของเสียซีโอไลต์เท่ากับ 7.82 มก.คลอไรด์ต่อกรัมซีโอไลต์ คิดเป็นร้อยละ 36.65 และน้ำมีพีเอชสุดท้ายเท่ากับ 7.43 ± 0.421 และปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 13.47 มก.คลอไรด์ต่อลิตร แม้ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์จากของเสียซีโอไลต์ต่ำกว่าการใช้สารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.3 โมลาร์ แต่การใช้น้ำปราศจากอ็อกซิเจนเป็นวิธีง่ายกว่า ราคาถูกกว่า และซีโอไลต์หลังฟื้นฟูสภาพมีลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของของเสียซีโอไลต์ไม่ต่างกับซีโอไลต์บริสุทธิ์มากนัก จึงเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ได้

4) การศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์โดยใช้เคมีไฟฟ้า สภาวะที่เหมาะสมคือการใช้ขั้วไฟฟ้าแบบไทเทเนียม-แพลตทินัม ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตร.ซม. เป็นเวลา 25 นาที ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10 พบว่ามีประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์จากของเสียซีโอไลต์เท่ากับร้อยละ 76.62 มีปริมาณคลอไรด์เหลือในของเสียซีโอไลต์เท่ากับ 4.89 มก.คลอไรด์ต่อกรัมซีโอไลต์ คิดเป็นร้อยละ 22.92 ซีโอไลต์หลังฟื้นฟูสภาพมีลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างผลึกและปริมาตรรูพรุนใกล้เคียงกับซีโอไลต์ แต่มีปริมาณโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ปรับพีเอช แต่ค่าใช้จ่ายในการฟื้นฟูสภาพกลับมีราคาสูงเมื่อเทียบกับการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ด้วยวิธีอื่นเท่ากับ 161.66 บาทต่อของเสียซีโอไลต์ 1 kg

สรุปสภาวะการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ที่เหมาะสมที่สุดคือการใช้สารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.3 โมลาร์ ที่ระยะเวลา 60 นาที มีประสิทธิภาพสูงสุดการคายคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 81.91 ซึ่งลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของของเสียซีโอไลต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพคล้ายกับซีโอไลต์บริสุทธิ์มากที่สุด และยังพบว่าปริมาณโซเดียมในสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เกิดการแทรกกลับเข้าไปยังของเสียซีโอไลต์ ซึ่งเป็นการรักษาผลึกของซีโอไลต์ไม่ให้เสียหาย (cannon, 2002) ทำให้ปริมาณของเสียซีโอไลต์มีปริมาณโซเดียมสูงกว่าของเสียซีโอไลต์ที่ยังไม่ได้ฟื้นฟูสภาพ โดยปริมาณโซเดียมส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์อีกด้วย สอดคล้องกับองค์ประกอบหลักของซีโอไลต์ได้แก่ ซิกนิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ก็มีค่าใกล้เคียงกับของซีโอไลต์บริสุทธิ์มากกว่าสภาวะอื่นมากที่สุด จึงสรุปได้ว่าการใช้สารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.3 โมลาร์ เป็นสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุดในการการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์และนำกลับมาใช้ใหม่โดยใช้ร่วมกับซีโอไลต์บริสุทธิ์ในกระบวนการกำจัดสารประกอบไฮโดรเจนคลอไรด์ในอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมัน ค่าใช้จ่ายในการ

ฟื้นฟูสภาพเท่ากับ 10 บาทต่อของเสียซีโอไลต์ 1 kg หรืออาจมีราคาในการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ ถูกลงมากกว่าเดิม โดยนำสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์มาใช้ซ้ำได้อีก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ด้วยสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์มี ปริมาณโซเดียมในซีโอไลต์เพิ่มขึ้นสูงกว่าของเสียซีโอไลต์ที่ยังไม่ได้ฟื้นฟูสภาพ โดยประสิทธิภาพในการ กำจัดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ขึ้นกับปริมาณโซเดียม (Piwgaew และคณะ, 2012) จึงควรศึกษาการนำ ของเสียซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้วมาศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ โดย ใช้ของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพอย่างเดียว หรือนำของเสียซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพไปผสม กับซีโอไลต์บริสุทธิ์ โดยศึกษาที่อัตราส่วนต่างๆ เพื่อลดปริมาณการใช้ซีโอไลต์บริสุทธิ์

2) ของเสียซีโอไลต์หลังการฟื้นฟูสภาพของเสียซีโอไลต์ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก พบว่ามี ปริมาณซัลเฟอร์สูงขึ้นอย่างมากในของเสียซีโอไลต์ จึงควรศึกษาการนำของเสียซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟู สภาพแล้วมาศึกษาการดูดซับสารมลพิษอื่นๆ ได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โลหะหนัก เป็นต้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- จตุพร วิทยาคุณ and นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์ (2547). การเร่งปฏิกิริยา. พื้นฐาน และ การประยุกต์, กรุงเทพฯ, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- ฐิติพรรณ ฉิมสุขม. ปีเตอร์เคมี. [ออนไลน์]. 2551, แหล่งที่มา: www.science.mju.ac.th/chemistry/.../ปีเตอร์เคมี%202011-1p-update.pdf.
- บรรจง บุทธิธัญ. โรงกลั่นน้ำมัน. [ออนไลน์]. 2556, แหล่งที่มา: www.exxonmobil.com.
- เลิศ รักสันติชาติ (2545). การฟื้นฟูสภาพซีโอไลท์ชนิดเอ็กซ์ที่ใช้แล้วสำหรับการดูดซับเอทีลินไกลคอล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรรณรัตน์ วัฒนชัย (2547). กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสำหรับน้ำเสียปนเปื้อนโลหะหนักจากโรงงานประกอบรถยนต์ กรุงเทพฯ.
- วิศิษ แซ่ลิ่ม and วันชัย ยอดสุขใจ (2553). การฟื้นฟูสมรรถภาพโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ภาษาอังกฤษ

- Arya, C., Sa'id-Shawqi, Q. , and Vassie, P. (1996). "Factors influencing electrochemical removal of chloride from concrete." Cement and Concrete Research 26(6): 851-860.
- Bard, A. J. and Faulkner, L. R. (1980). Electrochemical methods: fundamentals and applications, Wiley New York.
- Brown, C. J., Paleologou, M., Thompson, R. , and Jemaa, N. (1998). Chloride removal from kraft liquors using ion exchange technology. TAPPI PULPING CONFERENCE, TAPPI PRESS.
- cannon (2002). Regeneration of spent zeolite composition. United States.
- Dando, D. and Martin, D. (2003). A guide for reduction and disposal of waste from oil refineries and marketing installations, CONCAWE.

- Elsener, B. and Angst, U. (2007). "Mechanism of electrochemical chloride removal." Corrosion Science 49(12): 4504-4522.
- EPA. A Citizen's Guide to Thermal Desorption. [ออนไลน์]. 2012, แหล่งที่มา: www.epa.gov/superfund/sites.
- Erfan Manl (2011). "Chloride removal in refineries." CATALYSIS: 1.
- Eurochlor (2011). Natural organic chlorine compounds. <http://www.eurochlor.org/the-chlorine-universe/chlorine-in-nature/natural-organic-chlorine-compounds.aspx>.
- Guisnet, M. and Gilson, J.-P. (2002). Zeolites for cleaner technologies, Imperial College Press London.
- Helfferrich, F. G. (1962). Ion exchange, Courier Corporation.
- ISO DINEN (1972). "Theory of sample preparation using acid digestion, pressure digestion and microwave digestion (microwave decomposition)."
- Langer, H. and Offermann, H. (1982). "On the solubility of sodium chloride in water." Journal of crystal growth 60(2): 389-392.
- Liu, J., Li, Y. , and Wu, M. (2008). "Electrochemical Methods for Chloride Removal from Simulated Cast Iron Artefacts." Studies in Conservation 53(1): 41-48.
- LLC UOP. UOP Adsorbents. [ออนไลน์]. 2011, แหล่งที่มา: www.uop.com.
- Lopes, A., Martins, P. , and Lanceros-Mendez, S. (2014). "Aluminosilicate and aluminosilicate based polymer composites: present status, applications and future trends." Progress in Surface Science 89(3): 239-277.
- Lu, C., Su, F., Hsu, S.-C., Chen, W., Bai, H., Hwang, J. F. , and Lee, H.-H. (2009). "Thermodynamics and regeneration of CO₂ adsorption on mesoporous spherical-silica particles." Fuel Processing Technology 90(12): 1543-1549.
- Matusiewicz, H. (2003). "Wet digestion methods." Comprehensive Analytical Chemistry 41: 193-233.
- Orellan, J., Escadeillas, G. , and Arliguie, G. (2004). "Electrochemical chloride extraction: efficiency and side effects." Cement and concrete research 34(2): 227-234.

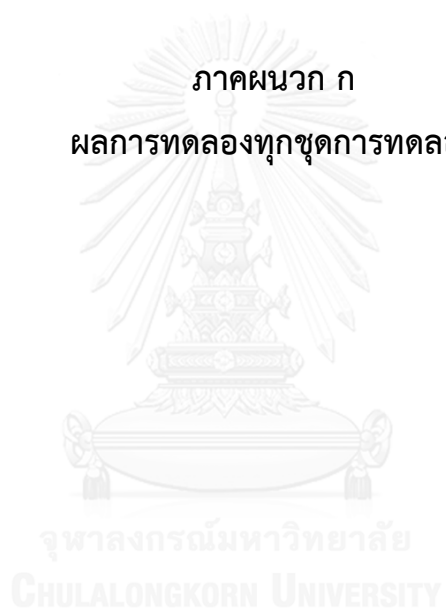
- Ottosen, L. M., Ferreira, C. M. , and Christensen, I. V. (2010). "Electrokinetic desalination of glazed ceramic tiles." Journal of applied electrochemistry 40(6): 1161-1171.
- Pfaff, J. D. (1993). "Method 300.0 Determination of inorganic anions by ion chromatography." USEPA Environ. Monit. Syst. Lab., Cincinnati, OH.
- Piwgaew, W., Grisdanurak, N. , and Kumsaen, T. (2012). Modified zeolite NaY for HCl gas trapping from natural gas feed. The 4th KKU International Engineering Conference. Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Thailand.
- Salamatinia, B., Kamaruddin, A. H. , and Abdullah, A. Z. (2010). "Regeneration and reuse of spent NaOH-treated oil palm frond for copper and zinc removal from wastewater." Chemical Engineering Journal 156(1): 141-145.
- Seidel, A., Tracht, U. , and Boddenberg, B. (1996). "Study of the Dispersion of Sodium Chloride in Zeolite NaY." The Journal of Physical Chemistry 100(39): 15917-15922.
- Sigma Aldrich. MOLECULAR SIEVES. [ออนไลน์]. 2014, แหล่งที่มา: <http://www.sigmaaldrich.com/chemistry/chemical-synthesis/learning-center/technical-bulletins/al-1430/molecular-sieves.html>.
- Sol-Gel, Z. (2005). "Chemistry of silicates and aluminosilicates." Ceramics– Silikáty 49(4): 287-298.
- Somer, G. and ÜNLÜ, A. N. (2007). "The effect of acid digestion on the recoveries of trace elements: recommended policies for the elimination of losses." Turkish Journal of Chemistry 30(6): 745-753.
- Tungum. Corrosion resistance. [ออนไลน์]. 2011, แหล่งที่มา: http://www.tungum.com/technical_zone/corrosion_resistance.html.
- webbook, N. Properties of hydrogen chloride gas. [ออนไลน์]. 2011, แหล่งที่มา: <http://webbook.nist.gov/chemistry/>.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง



ผนวก ก-1 ปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นของเสียซีโอไลต์

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองหาปริมาณคลอไรด์เริ่มต้น

ของเสียซีโอไลต์	ปริมาณคลอไรด์ในของเสียซีโอไลต์ (มก. คลอไรด์/กรัม ซีโอไลต์)						
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ซีโอไลด์บริสุทธิ์	1.58	1.55	1.59	1.57	1.63	1.5840	0.0297
ของเสียซีโอไลต์	21.34	21.32	21.35	21.37	21.31	21.3370	0.0239

ผนวก ก-2 ผลการทดลองหาอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อสารละลาย

ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองหาอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อน้ำปราศจากไอออน

น้ำปราศจากไอออน	ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์ (มก. คลอไรด์/กรัม ซีโอไลต์)					ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ (ร้อยละ)				
	อัตราส่วน	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย
1:10	8.61	8.67	8.72	8.67	0.06	59.64	59.36	59.13	59.38	0.26
1:15	7.91	8.21	7.96	8.03	0.16	62.93	61.51	62.69	62.38	0.76
1:20	7.92	7.74	7.89	7.85	0.10	62.88	63.72	63.02	63.21	0.45
1:25	7.72	7.92	7.86	7.83	0.10	63.82	62.88	63.16	63.28	0.48
1:30	7.93	7.76	7.81	7.83	0.09	62.83	63.63	63.39	63.28	0.41
1:35	7.81	7.86	7.84	7.84	0.03	63.39	63.16	63.25	63.27	0.12
1:40	7.82	7.87	7.85	7.85	0.03	63.35	63.11	63.21	63.22	0.12

ผนวก ก-2 ผลการทดลองหาอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อสารละลาย

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองหาอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อน้ำปราศจากไอออน

น้ำปราศจากไอออน	ปริมาณคลอไรด์ที่ชะละลายในสารละลาย (มก. คลอไรด์/ลิตร)					ค่าพีเอช				
	อัตราส่วน	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย
1:10	12.75	12.66	12.63	12.68	0.06	5.97	5.98	5.95	5.97	0.02
1:15	13.44	13.12	13.36	13.30	0.16	6.14	6.13	6.12	6.13	0.01
1:20	13.41	13.58	13.46	13.48	0.08	7.25	7.24	7.26	7.25	0.01
1:25	13.61	13.41	13.49	13.50	0.10	7.29	7.32	7.28	7.30	0.02
1:30	13.40	13.54	13.54	13.49	0.08	7.38	7.43	7.42	7.41	0.03
1:35	13.51	13.42	13.49	13.47	0.05	7.42	7.45	7.47	7.45	0.03
1:40	13.51	13.45	13.48	13.48	0.03	7.46	7.42	7.41	7.43	0.03

ผนวก ก-2 ผลการทดลองหาอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อสารละลาย

ตารางที่ ก-4 ผลการทดลองหาอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อสารละลายกรดซัลฟูริก

สารละลายกรดซัลฟูริก	ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์ (มก. คลอไรด์/กรัม ซีโอไลต์)					ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ (ร้อยละ)				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
อัตราส่วน 1:10	5.69	5.12	4.99	9.28	0.17	73.33	76.00	76.61	56.50	0.17
1:15	2.58	3.18	3.21	8.42	0.17	87.90	85.10	84.95	60.53	0.17
1:20	1.83	1.81	1.87	6.02	0.13	91.42	91.52	91.25	71.78	0.13
1:25	1.83	1.79	1.85	5.21	0.03	91.43	91.61	91.34	75.59	0.14
1:30	1.76	1.83	1.82	5.18	0.13	91.74	91.42	91.47	75.73	0.21
1:35	1.52	1.51	1.56	5.18	0.15	92.86	92.92	92.69	75.74	0.20
1:40	1.41	1.48	1.51	5.17	0.14	93.37	93.06	92.92	75.75	0.18

ผนวก ก-2 ผลการทดลองหาอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อสารละลาย

ตารางที่ ก-5 ผลการทดลองหาอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อสารละลายกรดซัลฟูริก

สารละลายกรดซัลฟูริก	ปริมาณคลอไรด์ที่ชะละลายในสารละลาย (มก. คลอไรด์/ลิตร)					ค่าพีเอช				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
อัตราส่วน 1:10	15.78	16.14	16.27	12.06	0.14	0.94	0.93	0.95	0.94	0.01
1:15	18.98	18.16	18.20	12.92	0.17	0.91	0.89	0.92	0.91	0.02
1:20	19.31	19.24	19.54	15.32	0.16	0.87	0.86	0.85	0.86	0.01
1:25	19.54	19.47	19.42	16.13	0.06	0.83	0.82	0.84	0.83	0.01
1:30	19.54	19.62	19.65	16.16	0.06	0.79	0.78	0.81	0.79	0.02
1:35	19.74	19.91	19.72	16.16	0.10	0.75	0.74	0.76	0.75	0.01
1:40	19.87	19.74	19.90	16.16	0.09	0.68	0.69	0.7	0.69	0.01

ผนวก ก-2 ผลการทดลองหาอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อสารละลาย

ตารางที่ ก-6 ผลการทดลองหาอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อสารละลายกรดไนตริก

สารละลายกรดไนตริก	ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์ (มก. คลอไรด์/กรัม ซีโอไลต์)					ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ (ร้อยละ)				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
อัตราส่วน 1:10	9.73	9.93	9.97	9.88	0.13	54.39	53.46	53.27	53.71	0.60
1:15	8.70	8.72	8.84	8.75	0.08	59.22	59.13	58.57	58.97	0.36
1:20	7.50	7.67	7.55	7.57	0.09	64.85	64.05	64.63	64.51	0.41
1:25	6.90	6.95	6.97	6.94	0.04	67.67	67.41	67.31	67.46	0.19
1:30	6.35	6.42	6.17	6.31	0.13	70.24	69.91	71.07	70.41	0.60
1:35	6.13	6.24	6.25	6.21	0.07	71.27	70.75	70.71	70.91	0.31
1:40	6.12	6.09	6.19	6.13	0.05	71.32	71.46	70.99	71.25	0.24

ผนวก ก-2 ผลการทดลองหาอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อสารละลาย

ตารางที่ ก-6 ผลการทดลองหาอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อสารละลายกรดไนตริก

สารละลายกรดไนตริก	ปริมาณคลอไรด์ที่ชะละลายในสารละลาย (มก. คลอไรด์/ลิตร)					ค่าพีเอช				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
อัตราส่วน										
1:10	11.61	11.42	11.35	11.46	0.14	0.47	0.49	0.48	0.48	0.01
1:15	12.63	12.63	12.50	12.58	0.08	0.45	0.46	0.45	0.45	0.01
1:20	13.80	13.66	13.77	13.74	0.07	0.43	0.42	0.41	0.42	0.01
1:25	14.43	14.37	14.35	14.38	0.04	0.41	0.40	0.41	0.41	0.01
1:30	14.98	14.91	15.17	15.02	0.14	0.39	0.39	0.38	0.39	0.01
1:35	15.22	15.11	15.08	15.13	0.07	0.33	0.32	0.34	0.33	0.01
1:40	15.23	15.24	15.14	15.20	0.06	0.31	0.29	0.32	0.31	0.02

ผนวก ก-2 ผลการทดลองหาอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อสารละลาย

ตารางที่ ก-7 ผลการทดลองหาอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

สารละลายโซเดียม-ไฮดรอกไซด์	ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์ (มก. คลอไรด์/กรัม ซีโอไลต์)					ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ (ร้อยละ)				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
อัตราส่วน										
1:10	10.16	10.34	10.27	10.26	0.09	52.40	51.54	51.86	51.93	0.44
1:15	8.12	8.42	8.38	8.31	0.16	61.95	60.55	60.71	61.07	0.77
1:20	7.27	7.24	7.32	7.28	0.04	65.92	66.07	65.69	65.89	0.19
1:25	6.92	6.84	7.00	6.92	0.08	67.57	67.95	67.20	67.57	0.37
1:30	6.81	6.96	6.79	6.85	0.09	68.08	67.38	68.17	67.88	0.44
1:35	6.83	6.82	6.98	6.87	0.09	68.01	68.05	67.30	67.79	0.42
1:40	6.82	6.83	6.90	6.85	0.04	68.05	68.01	67.67	67.91	0.21

ผนวก ก-2 ผลการทดลองหาอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อสารละลาย

ตารางที่ ก-8 ผลการทดลองหาอัตราส่วนของเสียซีโอไลต์ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

สารละลายโซเดียม-ไฮดรอกไซด์	ปริมาณคลอไรด์ที่ชะละลายในสารละลาย (มก. คลอไรด์/ลิตร)					ค่าพีเอช				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
อัตราส่วน										
1:10	11.17	10.93	11.12	11.07	0.13	13.77	13.78	13.76	13.77	0.01
1:15	13.23	12.90	12.93	13.02	0.18	13.76	13.77	13.75	13.76	0.01
1:20	14.05	14.08	14.02	14.05	0.03	13.74	13.75	13.74	13.74	0.01
1:25	14.44	14.48	14.36	14.42	0.06	13.73	13.74	13.73	13.73	0.01
1:30	14.51	14.35	14.55	14.47	0.11	13.72	13.72	13.73	13.72	0.01
1:35	14.49	14.51	14.35	14.45	0.09	13.72	13.71	13.72	13.72	0.01
1:40	14.51	14.51	14.42	14.48	0.05	13.68	13.69	13.70	13.69	0.01

ผนวก ก-3 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและต่าง
 ตารางที่ ก-8 ผลการทดลองหาปริมาณคลอไรด์ด้วยน้ำปราศจากไอออน

น้ำปราศจาก ไอออน	ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์ (มก. คลอไรด์/กรัม ซีโอไลต์)					ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ (ร้อยละ)				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
	7.83	7.79	7.85	7.82	0.0309	63.288	63.488	63.206	63.327	0.145

ผนวก ก-3 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและต่าง
 ตารางที่ ก-9 ผลการทดลองหาผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟูริก

สารละลาย กรดซัลฟูริก	ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์ (มก. คลอไรด์/กรัม ซีโอไลต์)					ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ (ร้อยละ)				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
ความเข้มข้น										
0.1	5.69	5.12	4.99	5.27	0.37	73	76	77	75.313	1.75
0.2	2.58	3.18	3.21	2.99	0.35	88	85	85	85.984	1.66
0.3	1.83	1.81	1.87	1.84	0.03	91	92	91	91.394	0.14
0.4	1.83	1.79	1.85	1.82	0.03	91	92	91	91.460	0.14
0.5	1.57	1.62	1.57	1.59	0.03	93	92	93	92.563	0.14
1	1.52	1.51	1.56	1.53	0.03	93	93	93	92.823	0.12
2	1.41	1.48	1.51	1.47	0.05	93	93	93	93.119	0.23
3	1.43	1.42	1.43	1.43	0.01	93	93	93	93.318	0.02

ผนวก ก-3 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและต่าง
 ตารางที่ ก-10 ผลการทดลองหาผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟูริก

สารละลาย กรดซัลฟูริก	ปริมาณคลอไรด์ที่ชะละลายในสารละลาย (มก. คลอไรด์/ลิตร)					ค่าพีเอช				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
ความเข้มข้น										
0.1	15.8	16.1	16.3	16.06	0.26	1.58	1.57	1.6	1.58	0.02
0.2	19.0	18.2	18.2	18.45	0.46	1.15	1.17	1.21	1.18	0.03
0.3	19.3	19.2	19.5	19.36	0.16	1.12	1.15	1.14	1.14	0.02
0.4	19.5	19.5	19.4	19.48	0.06	1.07	1.11	1.09	1.09	0.02
0.5	19.5	19.6	19.7	19.60	0.06	0.83	0.81	0.85	0.83	0.02
1	19.7	19.9	19.7	19.79	0.10	0.61	0.71	0.69	0.67	0.05
2	19.9	19.7	19.9	19.84	0.09	0.1	0.142	0.12	0.12	0.02
3	19.7	20.0	19.9	19.85	0.11	0.06	0.08	0.07	0.07	0.01

ผนวก ก-3 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและด่าง
ตารางที่ ก-11 ผลการทดลองหาผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดไนตริก

สารละลาย กรดไนตริก	ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์ (มก. คลอไรด์/กรัม ซีโอไลต์)					ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ (ร้อยละ)				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
ความเข้มข้น 0.1	6.03	6.73	5.94	6.23	0.43	71.74	68.46	72.16	70.78	2.03
0.2	4.00	4.12	3.84	3.99	0.14	81.25	80.69	82.00	81.31	0.66
0.3	2.50	2.67	2.47	2.55	0.11	88.28	87.49	88.42	88.06	0.51
0.4	2.47	2.53	2.46	2.49	0.04	88.42	88.14	88.47	88.34	0.18
0.5	2.45	2.49	2.32	2.42	0.09	88.52	88.33	89.13	88.66	0.42
1	2.13	2.24	2.25	2.21	0.07	90.02	89.50	89.45	89.66	0.31
2	2.12	2.09	2.21	2.14	0.06	90.06	90.20	89.64	89.97	0.29
3	2.07	2.03	2.14	2.08	0.06	90.30	90.49	89.97	90.25	0.26

ผนวก ก-3 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและด่าง
ตารางที่ ก-12 ผลการทดลองหาผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดไนตริก

สารละลายกรดไน ตริก	ปริมาณคลอไรด์ที่ชะละลายในสารละลาย (มก. คลอไรด์/ลิตร)					ค่าพีเอช				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
ความเข้มข้น 0.1	15.3	14.6	15.4	15.10	0.4	2.62	2.61	2.63	2.62	0.01
0.2	17.1	17.3	17.8	17.39	0.3	2.26	2.25	2.28	2.26	0.02
0.3	18.8	18.7	18.9	18.81	0.1	1.33	1.35	1.32	1.33	0.02
0.4	18.8	18.9	18.8	18.83	0.1	0.62	0.61	0.64	0.62	0.02
0.5	18.9	18.9	19.1	18.96	0.2	0.37	0.38	0.4	0.38	0.02
1	19.3	19.1	19.0	19.14	0.2	0.04	0.07	0.08	0.06	0.02
2	19.3	19.1	19.3	19.23	0.1	0	0	0	0.00	0.00
3	19.3	19.4	19.1	19.25	0.2	0	0	0	0.00	0.00

ผนวก ก-3 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและด่าง

ตารางที่ ก-13 ผลการทดลองหาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

สารละลายโซเดียม-ไฮดรอกไซด์	ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีไอโอไลต์ (มก. คลอไรด์/กรัม ซีไอโอไลต์)					ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ (ร้อยละ)				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
ความเข้มข้น 0.1	7.13	6.88	6.93	6.98	0.13	67	68	68	67.28	0.62
0.2	5.75	5.54	5.65	5.65	0.11	73	74	74	73.53	0.49
0.3	3.88	3.86	3.84	3.86	0.02	82	82	82	81.91	0.09
0.4	3.87	3.86	3.88	3.87	0.01	82	82	82	81.86	0.04
0.5	3.89	3.91	3.88	3.89	0.02	82	82	82	81.75	0.07
1	3.92	3.91	3.76	3.86	0.09	82	82	82	81.89	0.42
2	3.84	3.89	3.80	3.84	0.05	82	82	82	81.99	0.21
3	3.81	3.87	3.79	3.82	0.04	82	82	82	82.08	0.20

ผนวก ก-3 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและด่าง

ตารางที่ ก-14 ผลการทดลองหาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

สารละลายโซเดียม-ไฮดรอกไซด์	ปริมาณคลอไรด์ที่ชะละลายในสารละลาย (มก. คลอไรด์/ลิตร)					ค่าพีเอช				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
ความเข้มข้น 0.1	14.3	14.4	14.4	14.4	0.1	13.57	13.55	13.58	13.57	0.02
0.2	15.5	15.7	15.7	15.6	0.1	13.68	13.65	13.71	13.68	0.03
0.3	17.2	17.2	17.1	17.2	0.1	13.68	13.69	13.67	13.68	0.01
0.4	17.1	17.5	17.2	17.3	0.2	13.71	13.7	13.72	13.71	0.01
0.5	17.0	17.5	17.5	17.3	0.3	13.69	13.7	13.71	13.70	0.01
1	17.3	17.4	17.5	17.4	0.1	13.76	13.77	13.79	13.77	0.02
2	17.6	17.4	17.5	17.5	0.1	13.84	13.86	13.85	13.85	0.01
3	17.6	17.4	17.7	17.6	0.1	13.94	13.97	13.91	13.94	0.03

ผนวก ก-3 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและต่าง

ตารางที่ ก-15 ผลการทดลองหาผลของระยะเวลาของน้ำปราศจากไอออน

น้ำปราศจากไอออน	ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์ (มก. คลอไรด์/กรัม ซีโอไลต์)					ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ (ร้อยละ)				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
เวลา (นาที)										
10	19.13	19.09	19.15	19.12	0.031	10.34	10.34	10.52	10.40	0.108
20	14.64	14.68	14.71	14.68	0.035	31.38	31.38	31.19	31.32	0.108
30	10.15	10.18	10.20	10.18	0.025	52.43	52.43	52.29	52.38	0.081
40	7.81	7.89	7.88	7.86	0.044	63.39	63.39	63.02	63.27	0.216
50	7.81	7.85	7.86	7.84	0.026	63.39	63.39	63.21	63.33	0.108
60	7.83	7.86	7.85	7.85	0.015	63.30	63.30	63.16	63.25	0.081
70	7.82	7.83	7.81	7.82	0.010	63.35	63.35	63.30	63.33	0.027
80	7.85	7.81	7.84	7.83	0.021	63.21	63.21	63.39	63.27	0.108
90	7.84	7.86	7.82	7.84	0.020	63.25	63.25	63.16	63.22	0.054
120	7.72	7.74	7.73	7.73	0.009	63.80	63.80	63.72	63.77	0.047
150	7.77	7.78	7.79	7.78	0.010	63.58	63.58	63.54	63.57	0.021

ผนวก ก-3 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและต่าง

ตารางที่ ก-16 ผลการทดลองหาผลของระยะเวลาของน้ำปราศจากไอออน

น้ำปราศจากไอออน	ปริมาณคลอไรด์ที่ชะละลายในสารละลาย (มก. คลอไรด์/ลิตร)					ค่าพีเอช				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
เวลา (นาที)										
10	2.24	2.27	2.16	2.22	0.057	6.50	6.70	6.80	6.67	0.153
20	6.68	6.67	6.64	6.66	0.021	7.20	7.00	7.11	7.10	0.100
30	11.16	11.17	11.12	11.15	0.028	7.27	7.24	7.24	7.25	0.017
40	13.52	13.47	13.45	13.48	0.034	7.31	7.34	7.31	7.32	0.017
50	13.53	13.47	13.50	13.50	0.030	7.42	7.44	7.43	7.43	0.010
60	13.51	13.46	13.52	13.49	0.034	7.51	7.57	7.58	7.55	0.038
70	13.51	13.51	13.56	13.52	0.027	7.73	7.68	7.72	7.71	0.026
80	13.46	13.57	13.49	13.50	0.056	7.79	7.75	7.81	7.78	0.031
90	13.48	13.49	13.54	13.50	0.032	7.81	7.85	7.82	7.83	0.021
120	13.50	13.53	13.51	13.52	0.016	7.84	7.87	7.86	7.86	0.015
150	13.52	13.52	13.56	13.53	0.023	7.85	7.89	7.87	7.87	0.020

ผนวก ก-3 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและต่าง

ตารางที่ ก-17 ผลการทดลองหาผลของระยะเวลาของสารละลายกรดซัลฟูริก

สารละลาย กรดซัลฟูริก	ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์ (มก. คลอไรด์/กรัม ซีโอไลต์)					ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ (ร้อยละ)				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
เวลา (นาที)										
10	15.63	15.83	15.73	15.73	0.100	26.74	25.80	26.27	26.27	0.469
20	9.52	9.55	9.55	9.54	0.017	55.38	55.24	55.24	55.29	0.081
30	7.48	7.37	7.43	7.43	0.055	64.94	65.46	65.17	65.19	0.258
40	4.31	4.27	4.39	4.32	0.061	79.80	79.99	79.42	79.74	0.286
50	2.11	2.15	2.16	2.14	0.026	90.11	89.92	89.88	89.97	0.124
60	1.79	1.86	1.84	1.83	0.036	91.61	91.28	91.37	91.42	0.169
70	1.87	1.79	1.80	1.82	0.044	91.24	91.61	91.56	91.47	0.204
80	1.76	1.85	1.81	1.81	0.045	91.75	91.33	91.52	91.53	0.211
90	1.83	1.85	1.79	1.82	0.031	91.42	91.33	91.61	91.45	0.143
120	1.86	1.83	1.74	1.81	0.062	91.28	91.42	91.84	91.52	0.293
150	1.75	1.76	1.86	1.79	0.061	91.80	91.75	91.28	91.61	0.285

ผนวก ก-3 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและต่าง

ตารางที่ ก-18 ผลการทดลองหาผลของระยะเวลาของสารละลายกรดซัลฟูริก

สารละลาย กรดซัลฟูริก	ปริมาณคลอไรด์ที่ชะละลายในสารละลาย (มก. คลอไรด์/ลิตร)					ค่าพีเอช				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
เวลา (นาที)										
10	5.74	5.50	5.60	5.61	0.116	0.56	0.51	0.55	0.54	0.026
20	11.84	11.77	11.78	11.79	0.038	0.61	0.62	0.66	0.63	0.026
30	13.84	13.98	13.92	13.91	0.070	0.66	0.68	0.67	0.67	0.010
40	17.04	17.08	16.91	17.01	0.089	0.72	0.7	0.71	0.71	0.010
50	19.21	19.17	19.20	19.19	0.021	0.84	0.86	0.85	0.85	0.010
60	19.51	19.49	19.48	19.50	0.015	1.1	1.08	1.09	1.09	0.010
70	19.49	19.52	19.56	19.52	0.035	1.12	1.11	1.1	1.11	0.010
80	19.56	19.50	19.52	19.52	0.031	1.11	1.14	1.13	1.13	0.015
90	19.54	19.48	19.53	19.51	0.032	1.21	1.22	1.28	1.24	0.038
120	19.50	19.49	19.59	19.52	0.055	1.25	1.24	1.23	1.24	0.010
150	19.56	19.60	19.50	19.55	0.050	1.22	1.22	1.25	1.23	0.017

ผนวก ก-3 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและต่าง

ตารางที่ ก-19 ผลการทดลองหาผลของระยะเวลาของสารละลายกรดไนตริก

สารละลาย กรดไนตริก	ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์ (มก. คลอไรด์/กรัม ซีโอไลต์)					ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ (ร้อยละ)				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
เวลา (นาที)										
10	17.27	17.25	17.11	17.21	0.087	19.05	19.15	19.80	19.34	0.409
20	15.30	15.36	15.37	15.34	0.038	28.29	28.01	27.96	28.08	0.177
30	9.23	9.17	9.22	9.21	0.032	56.74	57.02	56.79	56.85	0.151
40	5.34	5.28	5.32	5.31	0.031	74.97	75.25	75.06	75.10	0.143
50	3.75	3.67	3.76	3.73	0.049	82.41	82.78	82.36	82.52	0.231
60	2.54	2.43	2.52	2.50	0.059	88.09	88.61	88.19	88.30	0.275
70	2.48	2.53	2.45	2.49	0.040	88.38	88.14	88.52	88.34	0.189
80	2.49	2.50	2.51	2.50	0.010	88.33	88.28	88.24	88.28	0.047
90	2.48	2.46	2.49	2.48	0.015	88.38	88.47	88.33	88.39	0.072
120	2.48	2.47	2.46	2.47	0.010	88.38	88.42	88.47	88.42	0.047
150	2.46	2.49	2.48	2.48	0.015	88.47	88.33	88.38	88.39	0.072

ผนวก ก-3 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและต่าง

ตารางที่ ก-20 ผลการทดลองหาผลของระยะเวลาของสารละลายกรดไนตริก

สารละลาย กรดไนตริก	ปริมาณคลอไรด์ที่ชะละลายในสารละลาย (มก. คลอไรด์/ลิตร)					ค่าพีเอช				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
เวลา (นาที)										
10	4.05	4.10	4.25	4.13	0.104	0.54	0.52	0.56	0.54	0.020
20	6.05	5.99	5.95	5.99	0.050	0.61	0.64	0.63	0.63	0.015
30	12.11	12.15	12.13	12.13	0.020	0.65	0.68	0.67	0.67	0.015
40	15.97	16.08	16.04	16.03	0.056	0.73	0.7	0.72	0.72	0.015
50	17.56	17.68	17.56	17.60	0.069	0.85	0.86	0.84	0.85	0.010
60	18.78	18.91	18.84	18.84	0.065	0.95	0.99	0.96	0.97	0.021
70	18.84	18.82	18.90	18.85	0.042	0.98	0.97	0.99	0.98	0.010
80	18.84	18.85	18.86	18.85	0.010	0.99	0.98	0.99	0.99	0.006
90	18.87	18.86	18.88	18.87	0.010	1.03	1.01	1.02	1.02	0.010
120	18.90	18.87	18.89	18.88	0.012	1.03	1.02	1.01	1.02	0.010
150	18.92	18.87	18.90	18.89	0.025	1.02	1.03	1.01	1.02	0.010

ผนวก ก-3 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและด่าง

ตารางที่ ก-21 ผลการทดลองหาผลของระยะเวลาของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

สารละลายโซเดียม-ไฮดรอกไซด์	ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์ (มก. คลอไรด์/กรัม ซีโอไลต์)					ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ (ร้อยละ)				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
เวลา (นาที)										
10	17.67	17.66	17.68	17.67	0.010	17.18	17.23	17.13	17.18	0.047
20	14.11	14.14	14.12	14.12	0.015	33.87	33.72	33.82	33.80	0.072
30	10.26	10.29	10.28	10.28	0.015	51.91	51.77	51.82	51.83	0.072
40	8.76	8.77	8.74	8.76	0.015	58.94	58.89	59.03	58.96	0.072
50	6.184	6.17	6.22	6.19	0.026	71.02	71.08	70.85	70.98	0.121
60	3.85	3.89	3.87	3.87	0.020	81.94	81.75	81.84	81.84	0.094
70	3.87	3.85	3.88	3.87	0.015	81.86	81.95	81.81	81.9	0.072
80	3.86	3.88	3.90	3.88	0.020	81.92	81.82	81.73	81.8	0.094
90	3.86	3.87	3.89	3.87	0.015	81.91	81.86	81.77	81.85	0.072
120	3.84	3.86	3.85	3.85	0.010	82.00	81.91	81.95	81.95	0.047
150	3.86	3.85	3.87	3.86	0.010	81.91	81.95	81.86	81.91	0.047

ผนวก ก-3 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและด่าง

ตารางที่ ก-22 ผลการทดลองหาผลของระยะเวลาของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

สารละลายโซเดียม-ไฮดรอกไซด์	ปริมาณคลอไรด์ที่ชะละลายในสารละลาย (มก. คลอไรด์/ลิตร)					ค่าพีเอช				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
เวลา (นาที)										
10	3.65	3.69	3.65	3.66	0.023	13.67	13.68	13.69	13.68	0.010
20	7.21	7.22	7.24	7.22	0.015	13.71	13.73	13.72	13.72	0.010
30	11.06	11.07	11.05	11.06	0.006	13.78	13.80	13.79	13.79	0.010
40	12.56	12.58	12.60	12.58	0.020	13.81	13.79	13.82	13.81	0.015
50	15.14	15.16	15.14	15.14	0.010	13.83	13.79	13.81	13.81	0.020
60	17.46	17.45	17.49	17.46	0.020	13.79	13.81	13.82	13.81	0.015
70	17.49	17.47	17.49	17.48	0.012	13.82	13.80	13.83	13.82	0.015
80	17.46	17.48	17.43	17.45	0.025	13.81	13.83	13.80	13.81	0.015
90	17.50	17.46	17.44	17.46	0.031	13.81	13.84	13.82	13.82	0.015
120	17.48	17.49	17.50	17.49	0.013	13.81	13.80	13.85	13.82	0.026
150	17.46	17.50	17.48	17.48	0.020	13.81	13.83	13.82	13.82	0.010

ผนวก ก-4 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและต่างร่วมกับความร้อน
ตารางที่ ก-23 ผลการทดลองหาผลของอุณหภูมิของน้ำปราศจากไอออน

น้ำปราศจาก ไอออน	ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีไอไลต์ (มก. คลอไรด์/กรัม ซีไอไลต์)					ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ (ร้อยละ)				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)										
40	7.57	7.44	7.64	7.55	0.101	64.52	65.13	64.19	64.61	0.476
50	7.11	6.82	6.81	6.91	0.170	66.67	68.03	68.08	67.60	0.799
60	5.49	5.39	5.44	5.44	0.050	74.27	74.74	74.50	74.50	0.234
70	5.21	5.16	5.18	5.18	0.025	75.58	75.81	75.72	75.71	0.118
80	4.79	4.81	4.75	4.78	0.031	77.55	77.46	77.74	77.58	0.143

ผนวก ก-4 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและต่างร่วมกับความร้อน
ตารางที่ ก-24 ผลการทดลองหาผลของอุณหภูมิของน้ำปราศจากไอออน

น้ำปราศจาก ไอออน	ปริมาณคลอไรด์ที่ชะละลายในสารละลาย (มก. คลอไรด์/ลิตร)					ค่าพีเอช				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)										
40	13.77	13.87	13.73	13.79	0.072	7.83	7.85	7.82	7.83	0.015
50	14.25	14.53	14.53	14.43	0.162	7.95	7.96	7.94	7.95	0.010
60	15.86	15.94	15.90	15.90	0.040	7.99	7.99	7.98	7.98	0.008
70	16.14	16.17	16.17	16.16	0.017	8.51	8.53	8.5	8.51	0.015
80	16.56	16.54	16.59	16.56	0.025	9.01	9.03	8.9	8.97	0.056

ผนวก ก-4 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและต่างร่วมกับความร้อน
ตารางที่ ก-25 ผลการทดลองหาผลของอุณหภูมิของสารละลายกรดซัลฟูริก

สารละลาย กรดซัลฟูริก	ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีไอไลต์ (มก. คลอไรด์/กรัม ซีไอไลต์)					ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ (ร้อยละ)				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)										
40	1.81	1.79	1.83	1.81	0.020	91.52	91.61	91.42	91.52	0.094
50	1.78	1.75	1.82	1.78	0.035	91.66	91.80	91.47	91.64	0.165
60	1.74	1.79	1.76	1.76	0.025	91.84	91.61	91.75	91.74	0.118
70	1.65	1.71	1.72	1.69	0.038	92.27	91.99	91.94	92.06	0.177
80	1.51	1.55	1.53	1.53	0.020	92.92	92.74	92.83	92.83	0.094

ผนวก ก-4 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและต่างร่วมกับความร้อน
ตารางที่ ก-26 ผลการทดลองหาผลของอุณหภูมิของสารละลายกรดซัลฟูริก

สารละลาย กรดซัลฟูริก	ปริมาณคลอไรด์ที่ชะละลายในสารละลาย (มก. คลอไรด์/ลิตร)					ค่าพีเอช				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)										
40	19.52	19.54	19.54	19.53	0.012	1.08	1.06	1.05	1.06	0.015
50	19.53	19.58	19.56	19.55	0.025	1.09	1.08	1.08	1.08	0.006
60	19.59	19.54	19.60	19.57	0.032	1.10	1.08	1.09	1.09	0.010
70	19.68	19.65	19.62	19.65	0.030	1.11	1.10	1.11	1.11	0.006
80	19.85	19.76	19.80	19.80	0.045	1.14	1.15	1.16	1.15	0.010

ผนวก ก-4 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและต่างร่วมกับความร้อน
ตารางที่ ก-27 ผลการทดลองหาผลของอุณหภูมิของสารละลายกรดไนตริก

สารละลาย กรดไนตริก	ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีไอโอดี (มก. คลอไรด์/กรัม ซีไอโอดี)					ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ (ร้อยละ)				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)										
40	2.54	2.52	2.56	2.54	0.020	88.09	88.19	88.00	88.09	0.094
50	2.49	2.54	2.51	2.51	0.025	88.33	88.09	88.24	88.22	0.118
60	2.37	2.41	2.39	2.39	0.020	88.89	88.70	88.80	88.80	0.094
70	2.24	2.34	2.29	2.29	0.050	89.50	89.03	89.27	89.27	0.234
80	2.03	1.99	2.01	2.01	0.020	90.49	90.67	90.58	90.58	0.094

ผนวก ก-4 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและต่างร่วมกับความร้อน
ตารางที่ ก-28 ผลการทดลองหาผลของอุณหภูมิของสารละลายกรดไนตริก

สารละลาย กรดไนตริก	ปริมาณคลอไรด์ที่ชะละลายในสารละลาย (มก. คลอไรด์/ลิตร)					ค่าพีเอช				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)										
40	18.76	18.81	18.76	18.77	0.029	1.44	1.41	1.42	1.42	0.015
50	18.84	18.78	18.82	18.81	0.031	1.45	1.42	1.45	1.44	0.017
60	18.95	18.91	18.97	18.94	0.031	1.40	1.51	1.53	1.48	0.070
70	19.10	18.98	19.07	19.05	0.065	1.75	1.77	1.75	1.76	0.012
80	19.33	19.32	19.31	19.32	0.007	2.03	2.05	2.06	2.05	0.015

ผนวก ก-4 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและต่างร่วมกับความร้อน ตารางที่ ก-29 ผลการทดลองหาผลของอุณหภูมิของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์	ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์ (มก. คลอไรด์/กรัม ซีโอไลต์)					ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ (ร้อยละ)				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)										
40	3.85	3.83	3.82	3.83	0.015	81.95	82.05	82.10	82.03	0.072
50	3.69	3.65	3.67	3.67	0.020	82.70	82.89	82.80	82.80	0.094
60	3.56	3.55	3.52	3.54	0.021	83.31	83.36	83.50	83.39	0.098
70	3.47	3.49	3.46	3.47	0.015	83.74	83.64	83.78	83.72	0.072
80	3.23	3.2	3.21	3.21	0.015	84.86	85.00	84.95	84.94	0.072

ผนวก ก-4 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและต่างร่วมกับความร้อน ตารางที่ ก-29 ผลการทดลองหาผลของอุณหภูมิของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์	ปริมาณคลอไรด์ที่ชะละลายในสารละลาย (มก. คลอไรด์/ลิตร)					ค่าพีเอช				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)										
40	17.48	17.51	17.52	17.50	0.022	13.89	13.87	13.88	13.88	0.010
50	17.65	17.69	17.67	17.67	0.020	13.90	13.91	13.92	13.91	0.010
60	17.74	17.78	17.86	17.79	0.061	13.95	13.94	13.95	13.95	0.006
70	17.86	17.81	17.88	17.85	0.036	13.97	13.96	13.97	13.97	0.006
80	18.05	18.16	18.15	18.12	0.059	13.99	13.98	13.99	13.99	0.006

ผนวก ก-4 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและต่างร่วมกับความร้อน ตารางที่ ก-30 ผลการทดลองหาผลของระยะเวลาของน้ำปราศจากไอออนที่อุณหภูมิ 60°C

น้ำปราศจาก ไอออน	ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์ (มก. คลอไรด์/กรัม ซีโอไลต์)					ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ (ร้อยละ)				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
เวลา (นาที)										
10	15.38	15.42	15.43	15.41	0.03	27.91	27.73	27.68	27.77	0.12
20	8.65	8.64	8.67	8.65	0.02	59.46	59.50	59.36	59.44	0.07
30	5.72	5.75	5.74	5.74	0.02	73.19	73.05	73.10	73.11	0.07
40	5.53	5.53	5.50	5.52	0.02	74.08	74.08	74.22	74.13	0.08
50	5.52	5.51	5.50	5.51	0.01	74.13	74.17	74.22	74.17	0.05
60	5.52	5.50	5.51	5.51	0.01	74.13	74.22	74.17	74.17	0.05
90	5.52	5.49	5.50	5.50	0.02	74.13	74.27	74.22	74.21	0.07
120	5.48	5.49	5.47	5.48	0.01	74.31	74.27	74.36	74.31	0.05

ผนวก ก-4 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและต่างร่วมกับความร้อน
ตารางที่ ก-31 ผลการทดลองหาผลของระยะเวลาของน้ำปราศจากไอออนที่อุณหภูมิ 60°C

น้ำปราศจากไอออน	ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในสารละลาย (มก. คลอไรด์/ลิตร)					ค่าพีเอช				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
เวลา (นาที)										
10	5.95	5.93	5.91	5.93	0.02	6.91	6.87	6.94	6.91	0.04
20	12.67	12.72	12.68	12.69	0.03	7.12	7.08	7.10	7.10	0.02
30	15.62	15.56	15.57	15.58	0.03	7.31	7.29	7.32	7.31	0.02
40	15.79	15.81	15.86	15.82	0.04	7.55	7.58	7.57	7.57	0.02
50	15.84	15.79	15.81	15.81	0.03	7.59	7.61	7.57	7.59	0.02
60	15.81	15.82	15.82	15.81	0.01	7.62	7.60	7.61	7.61	0.01
90	15.82	15.82	15.81	15.81	0.01	7.64	7.62	7.60	7.62	0.02
120	15.86	15.87	15.85	15.86	0.01	7.63	7.64	7.61	7.63	0.02

ผนวก ก-4 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและต่างร่วมกับความร้อน
ตารางที่ ก-32 ผลการทดลองหาผลของระยะเวลาของสารละลายกรดซัลฟูริกที่อุณหภูมิ 60°C

สารละลาย กรดซัลฟูริก	ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์ (มก. คลอไรด์/กรัม ซีโอไลต์)					ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ (ร้อยละ)				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
เวลา (นาที)										
10	9.85	9.87	9.88	9.87	0.02	53.83	53.74	53.69	53.75	0.07
20	4.23	4.19	4.21	4.21	0.02	80.17	80.36	80.27	80.27	0.09
30	1.75	1.77	1.78	1.77	0.02	91.80	91.70	91.66	91.72	0.07
40	1.74	1.76	1.75	1.75	0.01	91.84	91.75	91.80	91.80	0.05
50	1.74	1.75	1.73	1.74	0.01	91.84	91.80	91.89	91.84	0.05
60	1.76	1.75	1.74	1.75	0.01	91.75	91.80	91.84	91.80	0.05
90	1.73	1.74	1.72	1.73	0.01	91.89	91.84	91.94	91.89	0.05
120	1.74	1.75	1.73	1.74	0.01	91.84	91.80	91.89	91.84	0.05

ผนวก ก-4 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและต่างร่วมกับความร้อน
ตารางที่ ก-33 ผลการทดลองหาผลของระยะเวลาของสารละลายกรดซัลฟูริกที่อุณหภูมิ 60°C

สารละลาย กรดซัลฟูริก	ปริมาณคลอไรด์ที่ชะละลายในสารละลาย (มก. คลอไรด์/ลิตร)					ค่าพีเอช				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
เวลา (นาที)										
10	11.48	11.45	11.47	11.46	0.015	0.65	0.63	0.65	0.64	0.012
20	17.10	17.14	17.14	17.13	0.022	0.78	0.79	0.77	0.78	0.010
30	19.59	19.59	19.57	19.58	0.012	0.77	0.78	0.76	0.77	0.010
40	19.60	19.58	19.59	19.59	0.010	0.79	0.81	0.82	0.81	0.015
50	19.60	19.59	19.61	19.60	0.010	0.84	0.85	0.87	0.85	0.015
60	19.57	19.59	19.61	19.59	0.023	0.86	0.84	0.86	0.85	0.012
90	19.62	19.59	19.61	19.61	0.013	0.85	0.87	0.86	0.86	0.010
120	19.60	19.59	19.62	19.60	0.015	0.89	0.87	0.86	0.87	0.015

ผนวก ก-4 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและต่างร่วมกับความร้อน
ตารางที่ ก-34 ผลการทดลองหาผลของระยะเวลาของสารละลายกรดไนตริกที่อุณหภูมิ 60°C

สารละลาย กรดไนตริก	ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์ (มก. คลอไรด์/กรัม ซีโอไลต์)					ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ (ร้อยละ)				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
เวลา (นาที)										
10	10.14	10.12	10.10	10.12	0.020	52.47	52.57	52.66	52.57	0.094
20	5.15	5.11	5.12	5.13	0.021	75.86	76.05	76.00	75.97	0.098
30	2.41	2.40	2.36	2.39	0.026	88.70	88.75	88.94	88.80	0.124
40	2.42	2.43	2.40	2.42	0.014	88.66	88.61	88.74	88.67	0.064
50	2.41	2.43	2.40	2.41	0.018	88.69	88.59	88.76	88.68	0.085
60	2.37	2.36	2.38	2.37	0.010	88.89	88.93	88.84	88.89	0.047
90	2.37	2.38	2.35	2.37	0.015	88.88	88.83	88.97	88.89	0.072
120	2.36	2.38	2.35	2.36	0.015	88.95	88.85	89.00	88.93	0.072

ผนวก ก-4 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและต่างร่วมกับความร้อน
ตารางที่ ก-35 ผลการทดลองหาผลของระยะเวลาของสารละลายกรดไนตริกที่อุณหภูมิ 60°ซ

สารละลาย กรดไนตริก	ปริมาณคลอไรด์ที่ชะละลายในสารละลาย (มก. คลอไรด์/ลิตร)					ค่าพีเอช				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
เวลา (นาที)										
10	11.20	11.24	11.25	11.23	0.026	0.69	0.67	0.68	0.68	0.010
20	16.18	16.22	16.21	16.20	0.022	0.81	0.79	0.80	0.80	0.010
30	18.95	18.96	18.95	18.95	0.006	0.85	0.83	0.84	0.84	0.010
40	18.94	18.92	18.91	18.92	0.013	0.87	0.89	0.88	0.88	0.010
50	18.92	18.91	18.93	18.92	0.009	0.99	0.96	0.97	0.97	0.015
60	18.97	18.98	18.94	18.97	0.021	0.98	0.99	0.97	0.98	0.010
90	18.95	18.96	18.98	18.97	0.015	1.03	1.00	1.03	1.02	0.017
120	18.97	18.96	18.98	18.97	0.010	1.02	1.01	1.03	1.02	0.010

ผนวก ก-4 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและต่างร่วมกับความร้อน
ตารางที่ ก-36 ผลการทดลองหาผลของระยะเวลาของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 60°ซ

สารละลาย โซเดียม- ไฮดรอกไซด์	ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีไอไลต์ (มก. คลอไรด์/กรัม ซีไอไลต์)					ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์ (ร้อยละ)				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
เวลา (นาที)										
10	15.57	15.58	15.63	15.59	0.03	27.02	26.98	26.74	26.91	0.15
20	11.13	11.14	11.12	11.13	0.01	47.83	47.79	47.88	47.83	0.05
30	6.88	6.87	6.86	6.87	0.01	67.75	67.80	67.85	67.80	0.05
40	4.67	4.69	4.70	4.69	0.02	78.11	78.02	77.97	78.03	0.07
50	3.54	3.56	3.53	3.54	0.02	83.41	83.31	83.45	83.39	0.07
60	3.53	3.54	3.57	3.55	0.02	83.45	83.41	83.27	83.38	0.10
90	3.56	3.53	3.55	3.55	0.02	83.31	83.45	83.36	83.38	0.07
120	3.53	3.51	3.55	3.53	0.02	83.45	83.55	83.36	83.45	0.09

ผนวก ก-4 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดและด่างร่วมกับความร้อน
ตารางที่ ก-37 ผลการทดลองหาผลของระยะเวลาของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 60°C

สารละลายโซเดียม- ไฮดรอกไซด์	ปริมาณคลอไรด์ที่ชะละลายในสารละลาย (มก. คลอไรด์/ลิตร)					ค่าพีเอช				
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
เวลา (นาที)										
10	5.74	5.75	5.72	5.74	0.02	13.23	13.24	13.25	13.24	0.01
20	10.22	10.19	10.23	10.21	0.02	13.55	13.53	13.56	13.55	0.02
30	14.45	14.48	14.48	14.47	0.02	13.61	13.65	13.66	13.64	0.03
40	16.67	16.64	16.65	16.65	0.01	13.79	13.78	13.75	13.77	0.02
50	17.79	17.78	17.83	17.80	0.03	13.95	13.93	13.96	13.95	0.02
60	17.81	17.79	17.78	17.79	0.02	13.95	13.96	13.96	13.96	0.01
90	17.74	17.83	17.84	17.80	0.06	13.93	13.94	13.97	13.95	0.02
120	17.81	17.84	17.79	17.81	0.02	13.94	13.97	13.95	13.95	0.02



ผนวก ก-5 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้ไฟฟ้าเคมี

ตารางที่ ก-38 ผลการทดลองหาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่อความต้านทาน

ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์ต่อตร.ซม.)	ความต้านทาน
4	120.21±0.93
8	95.23±0.87
12	74.05±0.95
16	61.5±0.82
20	53.2±0.84
24	60.01±0.64
28	65.89±0.67
32	72.17±0.54
36	79.42±0.73
40	91.8±0.62
80	109.23±0.54
88	117.3±0.83
100	119.34±0.57

ผนวก ก-5 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้ไฟฟ้าเคมี

ตารางที่ ก-39 ผลการทดลองหาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่อปริมาณคลอไรด์

ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์ต่อตร.ซม.)	ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีไอไลต์	ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์
4	7.648±0.23	64.16±0.13
8	6.951±0.15	67.42±0.43
12	6.478±0.21	69.64±0.54
16	5.850±0.31	72.58±0.23
20	5.451±0.41	74.45±0.16
24	5.415±0.41	74.62±0.27
28	5.447±0.16	74.47±0.35
32	5.451±0.09	74.45±0.19
36	5.443±0.14	74.49±0.12
40	5.433±0.17	74.53±0.07
80	5.437±0.19	74.51±0.21
88	5.423±0.21	74.58±0.11
100	5.413±0.24	74.63±0.07

ผนวก ก-5 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้ไฟฟ้าเคมี

ตารางที่ ก-40 ผลการทดลองหาผลของค่าพีเอชของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อปริมาณคลอไรด์

ค่าพีเอชของ สารละลายอิเล็กโทรไลต์	ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซี โอไลต์(มก. คลอไรด์/กรัม ซีโอไลต์)	ประสิทธิภาพการชะละลายคลอไรด์
1.04	2.191±0.15	89.729±0.14
5	3.889±0.18	81.771±0.17
6	4.859±0.13	77.225±0.16
7	5.192±0.52	75.662±0.02
8.06	5.145±0.23	75.884±0.31
9	5.015±0.16	76.492±0.21
10	4.989±0.17	76.616±0.26
11	4.879±0.14	77.132±0.07
12	4.874±0.15	77.155±0.13
13.6	4.280±0.23	79.939±0.15

ผนวก ก-5 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูโดยใช้ไฟฟ้าเคมี

ตารางที่ ก-41 ผลการทดลองหาผลของระยะเวลาที่ค่าพีเอชของสารละลาย

เวลา (นาที)	ปริมาณคลอไรด์ที่เหลือในของเสียซีโอไลต์ (มก. คลอไรด์/กรัม ซีโอไลต์)					
	pH=1.04	pH=5	pH=8.06	pH=10	pH=12	pH=13.6
5	15.049	16.837	21.179	21.012	20.453	20.179
10	7.171	9.408	16.786	15.456	14.786	14.172
15	2.182	3.882	11.492	10.346	9.543	8.419
20	2.171	3.860	7.679	7.754	6.251	5.416
25	2.178	3.853	5.310	4.897	4.820	4.280
30	2.171	3.856	5.112	4.873	4.850	4.279
35	2.181	3.855	5.106	4.792	4.875	4.263
40	2.179	3.845	5.114	4.892	4.864	4.217



ผนวก ข-1 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในกากของเสียด้วยวิธีการย่อยด้วยกรด

ตามมาตรฐาน U.S.EAP.3050

1. ตัวอย่างของเสียปริมาณ 1 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 125 มิลลิลิตร
2. เตรียมกรดไนตริกต่อน้ำกลั่นที่อัตราส่วน 1 ต่อ 1 ลงไปในบีกเกอร์ที่มีตัวอย่างของเสียปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วนำบีกเกอร์ไปตั้งบนเตาให้ความร้อนเป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส
3. เมื่อครบ 10 นาที ยกบีกเกอร์ลงทิ้งให้เย็นแล้วเติมกรดไนตริกเข้มข้นปริมาตร 5 มิลลิลิตร
4. นำไปตั้งบนเตาความร้อนอีกครั้งเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นยกบีกเกอร์ลงทิ้งให้เย็นเติมน้ำกลั่น 2 มิลลิเมตร
5. เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 30 ปริมาตร 3 มิลลิลิตร จนกระทั่งฟองอากาศหายไป แล้วจึงค่อยๆเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 30 จนกระทั่งไม่มีฟองอากาศ แล้วนำไปตั้งบนเตาอีกครั้ง ต้มไปเรื่อยๆจนกระทั่งมีปริมาตรกรดเหลือ 2 มิลลิลิตร
6. ยกบีกเกอร์ลงและเติมน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร เขย่าแล้วรอจนเย็น
7. นำไปกรองด้วยกระดาษกรอง เบอร์ 42 แล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร เก็บใส่ขวดพลาสติก
8. นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคอปเปิลพลาสมาออปติคอลลิมิสชันสเปกโตรเมทรี (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer (ICP-OES))

ผนวก ข-2 การทดสอบสิ่งปนื้อกหรือวัสดุไม้ใช้แล้ว โดยการทดสอบการชะละลาย ด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปนื้อกหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

1. ตัวอย่างบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร ชั่งมา 50 กรัมใส่ลงในภาชนะที่ทำจากแก้วเช่นขวดรูปชมพู่ (โดยภาชนะที่ใช้ผ่านการล้างอย่างต่อเนืองด้วยสารละลายกรดไนตริกที่เตรียมมาจากกรดไนตริกเข้มข้นกับน้ำปราศจากอออน 1 ต่อ 1)
2. เตรียมสารสกัดใช้สารละลาย 0.2 โมลาร์ โซเดียมซีเตรท ที่พีเอช 5.0 ± 0.1 โดยเตรียมได้จากสารละลายกรดซิตริกในปริมาณที่เหมาะสม นำมาปรับพีเอชให้เป็น 5.0 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4.0 นอร์มัล
3. นำน้ำสกัด 500 มิลลิตรเทใส่ในตัวอย่างที่เตรียมไว้
4. นำตัวอย่างที่ได้ไปเขย่าโดยใช้ table shaker ให้ของผสมอยู่ในสภาพถูกกวนผสมเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง
5. จากนั้นนำของผสมระหว่างของเสียกับสารสกัดไปกรองหรืออาจปั่นด้วยแรงเหวี่ยง (centrifuged) แล้วมากรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน
6. ควรปรับอุณหภูมิของสารละลายในช่วงระหว่างสกัดอยู่ระหว่าง 20-40 องศาเซลเซียส
7. สำหรับกรณีการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะเท่านั้น นำสารละลายที่กรองได้ ลงในขวดประเภทโพลีเอทิลีนและปรับสภาพความเป็นกรดและด่างด้วยกรดไนตริก เป็นร้อยละ 5 โดยปริมาตร (ปรับสภาพเป็นกรดทันทีหลังจากผ่านการกรอง)
8. วิเคราะห์ด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคอปเปิลพลาสมาออปติคอลลิมิสชันสเปกโตรเมทรี (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer (ICP-OES))



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกวีศรา หอมชื่น เกิดเมื่อวันที่ 30 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2533 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร ปัจจุบันอายุ 25 ปี จบการศึกษามัธยมปลายจากโรงเรียนหนองเสือวิทยาคม จังหวัดปทุมธานี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิทยาศาสตร์ทางทะเล (สมุทรศาสตร์ฟิสิกส์และสมุทรศาสตร์เคมี) คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2554 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555

การเผยแพร่วิทยานิพนธ์แบบบรรยายในที่ประชุมระดับนานาชาติ

“Electrochemical Regeneration of Chloride Contaminated Zeolite Wastes from Petroleum Refinery” The proceeding of the Seoul International Conference on Applied Science and Engineering (SICASE 2015) June 27th-29th, 2015 in Seoul, South Korea

การเผยแพร่วิทยานิพนธ์แบบบรรยายในที่ประชุมระดับชาติ

“การนำของเสียซีโอไลต์จากกระบวนการกำจัดสารประกอบไฮโดรเจนคลอไรด์ในก๊าซไฮโดรเจนเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่” เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 14 วันที่ 27-29 พฤษภาคม 2558 ณ โรงแรมโลตัส ปางสวนแก้ว จังหวัดเชียงใหม่