249414
ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249414

การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากตะกอนของระบบผลิตน้ำประปาเพื่อใช้
ดูดซับปุ๋ยยูเรียและปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต

นางสาวนงลักษณ์ จงศิริวิทย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2554

b30254083

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249414

การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากตะกอนของระบบผลิตน้ำประปาเพื่อใช้ดูดซับปุ๋ยยูเรียและปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต

นางสาวเจตนา วงศ์วิเชียร วศ.บ. (วิศวกรรมโยธาและเทคโนโลยี)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2554

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(รศ. ดร. ตุลวิทย์ สถาปนจารุ)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รศ. ดร. สุวิมล อัศวพิศิษฐ)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผศ. ดร. ขวัญเนตร สมบัติสมภพ)

..... กรรมการ
(ผศ. ดร. ศศิธร พุทธวงษ์)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากตะกอนของระบบผลิตน้ำประปาเพื่อใช้ดูดซับปุ๋ยยูเรียและปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นางสาวเจตนา วงศ์วิเชียร
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร. สุวิมล อัศวพิศิษฐ
	ผศ. ดร. ขวัญเนตร สมบัติสมภพ
หลักสูตร	วิศกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
สายวิชา	เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
คณะ	พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
พ.ศ.	2554

บทคัดย่อ

249414

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด Na-A จากตะกอนของโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ตะกอนประปาที่ไม่ผ่านการเผาและผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700° C เป็นเวลา 3 h ถูกนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลาย NaOH 3 M ที่อุณหภูมิ 90° C เป็นเวลา 6 9 12 และ 24 h จากการวิเคราะห์ตะกอนประปาด้วยเทคนิค XRF พบว่าสัดส่วนของ SiO_2/Al_2O_3 ของตะกอนที่ไม่ผ่านการเผาและผ่านการเผาเท่ากับ 1.75 และ 1.68 ตามลำดับ สำหรับผลการศึกษาการเกิดซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A ด้วยเทคนิค SEM สังเกตเห็นซีโอไลต์ชนิด Na-A ซึ่งมีรูปร่างของผลึกเป็นทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่ทุกสภาวะการทดลอง โดยพบค่อนข้างมากในตัวอย่างที่สังเคราะห์จากตะกอนประปาที่ผ่านการเผา เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ปรากฏว่าไม่พบพีคของซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A ที่ใช้ตะกอนประปาที่ไม่ผ่านการเผาเป็นวัตถุดิบที่ทุกระยะเวลาของการทำปฏิกิริยา ในขณะที่เมื่อใช้ตะกอนประปาที่ผ่านการเผาเป็นวัตถุดิบ สังเกตเห็นพีคของซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A ที่ทุกระยะเวลาการทำปฏิกิริยายกเว้นที่ 24 h ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณของซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A มีอยู่น้อยทำให้มองไม่เห็นเมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD จากผลการทดลอง พบว่า เวลาที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด Na-A จากตะกอนประปาที่ผ่านการเผา คือ 9 h เนื่องจาก ให้ค่า CEC สูงสุด เท่ากับ 1.07 meq/g สำหรับการศึกษาความสามารถการดูดซับปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต ทำการแปรค่า pH เท่ากับ 4 5 6 7 และ 8 ระยะเวลาการดูดซับเท่ากับ 5 10 15 30 45 และ 60 min จากการศึกษาพบว่า ค่า $pH_{optimum}$ มีค่าเท่ากับ 8 และค่า $T_{equilibruim}$ มีค่าเท่ากับ 5 min เมื่อทำการเปรียบเทียบสมการการดูดซับ พบว่า สมการไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir และ Freundlich มีค่า R^2 เท่ากับ 0.989 และ 0.954 ตามลำดับ ส่วนค่าคงที่ (K) ของสมการ Langmuir และ

249414

สมการ Freundlich มีค่า 0.06 mg/g และ 1.70 L/g ตามลำดับ เมื่อพิจารณาสมการไอโซเทอมการดูดซับของสมการ Langmuir พบว่า ความสามารถในการดูดซับสูงสุดมีค่าเท่ากับ 8.88 mg/g และไอโซเทอมการดูดซับของสมการ Freundlich พบว่า มีปริมาณพื้นที่ผิวในการดูดซับ (q_m) มากและค่า 1/n เท่ากับ 0.35

คำสำคัญ: การดูดซับ/ซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A/ตะกอนประปา/โซเดียมไฮดรอกไซด์/ไฮโดรเทอร์มอล

Thesis Title	Synthesis of Zeolite from Water Treatment Sludge for Urea and Ammonium Sulfate Fertilizer Adsorption
Thesis Credits	12
Candidate	Miss Jeatana Wongwichein
Thesis Advisors	Assoc. Prof. Dr. Suwimol Asavapisit
	Asst. Prof. Dr. Kwannate Sombatsompop
Program	Master of Engineering
Field of Study	Environmental Technology
Department	Environmental Technology
Faculty	School of Energy, Environment and Materials
B.E.	2554

Abstract

249414

This research studied the synthesis of Zeolite type Na-A from water treatment sludge at Bangkhen by hydrothermal process. The sludge with and without calcining at 700° C for 3 hours was reacted with 3 M NaOH solution at 90° C for 6, 9, 12 and 24 h. XRF result showed that the SiO_2/Al_2O_3 ratio of the sludge without and with pretreatment was 1.75 and 1.68, respectively. For the analysis of zeolite type Na-A by SEM revealed that zeolite type Na-A which was observed as cubic shape was found from all experimental conditions. Higher amount of zeolite was observed from samples that were synthesized from pretreatment sludge. The XRD results showed that the peaks for zeolite type Na-A were not appeared when the sludge without pretreatment was used as raw material for the synthesis at all reaction times observed whereas the peaks for zeolite type Na-A were found from samples which were synthesized from sludge with pretreatment at all reaction times except at 24 hours. Experimental results showed that the optimum condition for synthesis of zeolite type Na-A was obtained from the pretreatment sludge at 9 h reaction time due to its CEC was the highest at 1.07 meq/g. For adsorption capacity, the pH was varied at 4, 5, 6, 7 and 8 and the contact, time was 5, 10, 15, 30, 45 and 60 min. Results showed the $pH_{optimum}$ and $t_{optimum}$ were 8 and 5 min, respectively. The K value of Freundlich and Langmuir Isotherm was 0.06 mg/g and 1.70 mg/L (R^2 value = 0.989 and 0.954, respectively). The maximum absorption capacity was 8.88 mg/g by Langmuir absorption Isotherm and Freundlich absorption Isotherm had high adsorption surface (q_m) and the 1/n value = 0.35.

249414

Keywords: Adsorption/Zeolite type Na-A/Water Treatment Sludge /Sodium Hydroxide/ Hydrothermal

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จเรียบร้อยได้ก็ด้วยความเสียสละ ความอนุเคราะห์ และความมีน้ำใจจากหน่วยงานและบุคคลหลายฝ่าย ดังต่อไปนี้ โรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน สำหรับความอนุเคราะห์ตะกอนประปาสำหรับใช้ในงานวิจัย ตลอดจนภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการศึกษาและการทำวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในความกรุณาของทุกท่านมา ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ทุกท่าน คือ รศ. ดร. สุวิมล อัศวพิศิษฐ และ ผศ. ดร. ขวัญเนตร สมบัติสมภพ ที่กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำและแนวคิดในการทำวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสอนหลักในการทำวิจัย และมุมมองความคิดในหลายๆ ด้าน ตลอดจนแก้ไขปัญหาในส่วนที่บกพร่องต่างๆ ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งเขียนวิทยานิพนธ์สำเร็จเป็นรูปเล่ม ขอกราบขอบพระคุณ ผศ. ดร. ศศิธร พุทธวงษ์ และรศ. ดร. ตุลวิทย์ สถาปนจารุ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่สละเวลาอันมีค่าในการเป็นคณะกรรมการสอบ และให้ข้อเสนอแนะเพื่อแก้ไขจุดบกพร่องในการทำวิทยานิพนธ์ ทำให้การทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอมอบความดีของงานวิจัยฉบับนี้แด่ คุณพ่อ คุณแม่และครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ และให้โอกาสทางการศึกษาแก่ผู้เขียนตลอดมา และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าการศึกษาค้นคว้าในครั้งนี้คงเป็นประโยชน์กับผู้ที่สนใจ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
รายการตาราง	ฎ
รายการรูปประกอบ	ฐ
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ฒ

บทที่

1 บทนำ	**1**
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	**4**
2.1 กระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน	4
2.1.1 ระบบการสูบน้ำดิบ	4
2.1.2 ระบบการจ่ายสารเคมี	4
2.1.3 ระบบการตกตะกอน	4
2.1.4 ระบบการกรองน้ำ	5
2.1.5 ระบบการฆ่าเชื้อโรคและระบบถังเก็บน้ำใส	5
2.1.6 ระบบการสูบส่งและสูบจ่ายน้ำ	5
2.1.7 ระบบบ่อกักตะกอน	6
2.2 ตะกอนหรือสลัดจ์	7
2.2.1 ลักษณะตะกอนของระบบผลิตน้ำประปาโดยทั่วไป	7
2.2.2 ปริมาณตะกอนประปาที่เกิดขึ้นจากโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน	7
2.2.3 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตะกอนจากโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน	9

หน้า

2.3 ซีโอไลต์ 10
2.3.1 โครงสร้างของซีโอไลต์ 10
2.3.2 ประเภทของซีโอไลต์ 13
2.3.3 องค์ประกอบหลักของการสังเคราะห์ซีโอไลต์ 15
2.3.4 การแบ่งประเภทของซีโอไลต์ 15
2.3.5 สมบัติภายในโครงสร้างของซีโอไลต์ 19
2.3.6 ประโยชน์ของซีโอไลต์ 21
2.3.7 ซีโอไลต์ชนิด A 23
2.4 การดูดซับ 27
2.4.1 นิยามการดูดซับ 27
2.4.2 กลไกการดูดซับ 27
2.4.3 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ 28
2.4.4 วัสดุดูดซับ 29
2.4.5 พฤติกรรมของการดูดซับ 30
2.4.6 แรงที่เกี่ยวกับการดูดซับ 32
2.4.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ 35
2.4.8 สมดุลของการดูดซับ 36
2.4.9 ไอโซเทอมของการดูดซับ 36
2.4.10 การศึกษาการดูดซับ 41
2.5 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับปุ๋ยยูเรียและปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต 42
2.5.1 สมบัติทั่วไปของปุ๋ยยูเรีย 42
2.5.2 การผลิตปุ๋ยยูเรีย 43
2.5.3 สมบัติทั่วไปของปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต 46
2.5.4 การผลิตปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต 47
2.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 50

3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 56
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย 56
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย 56
3.3 เครื่องมือวิเคราะห์ 58

หน้า

3.4 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย 59
3.4.1 การเตรียมตะกอนประปา 60
3.4.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ 61
3.4.3 การดูดซับปุ๋ยยูเรียและปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ 63
3.4.4 การปลดปล่อยปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ 68

4 ผลการทดลองและวิจารณ์ **70**
4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน 70
4.1.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตะกอนโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน 70
4.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบพื้นฐานทางเคมีของตะกอนโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน 71
4.1.3 การวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกและชนิดของซีโอไลต์สังเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD 72
4.1.4 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตะกอนโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนและซีโอไลต์การสังเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM 73
4.1.5 การวิเคราะห์ค่า CEC 76
4.2 การดูดซับปุ๋ยยูเรียและปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ 77
4.2.1 การดูดซับปุ๋ยยูเรียด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี DMAB 77
4.2.2 การดูดซับปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ 79
4.3 การปลดปล่อยปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตจากซีโอไลต์สังเคราะห์ 85

5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ **87**
5.1 สรุปผลการทดลอง 87
5.2 ข้อเสนอแนะ 88

เอกสารอ้างอิง **89**

ภาคผนวก

ก. ผลการทดลอง 94
ข. การวิเคราะห์หาปริมาณยูเรียด้วยวิธี DMAB 104
ค. การวิเคราะห์แอมโมเนียด้วยวิธี Nesslerization 107
ง. การวิเคราะห์ความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) 110

หน้า

จ. X-ray Diffraction 115

ประวัติผู้วิจัย **118**

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ตะกอนประเภทต่างๆ จากระบบผลิตน้ำประปาโดยทั่วไป	7
2.2	ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตน้ำของโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน	8
2.3	องค์ประกอบทางกายภาพของตะกอนจากโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน	9
2.4	องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนจากโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน	9
2.5	ข้อมูลของซีโอไลต์ชนิด A	23
2.6	สมบัติทั่วไปของซีโอไลต์ชนิด A	26
2.7	ผลของปัจจัยการแยกต่อรูปร่างไอโซเทอมการดูดซับของสมการ	39
2.8	สมบัติของปุ๋ยยูเรียและปุ๋ยแอมโมเนียซัลเฟตบริสุทธิ์	42
2.9	สมบัติด้านความแข็งของปุ๋ย	46
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน	71
4.2	การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET ของวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ	75
4.3	ค่า CEC ของตะกอนประปาที่ใช้วัตถุดิบเริ่มต้น และซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ระยะเวลาต่างๆ	76
4.4	ค่า CEC ของวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ	77
4.5	การเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของสารละลายที่มี NH_4^+ เป็นองค์ประกอบ และค่า CEC ของวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ	83
4.6	การเปรียบเทียบไอโซเทอมการดูดซับจากสมการ Langmuir และสมการ Freundlich	84
ก.1	การดูดซับสารละลายปุ๋ยยูเรียด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ระยะเวลาต่างๆ ที่ความเข้มข้น 50 mg/L	95
ก.2	การดูดซับสารละลายปุ๋ยยูเรียด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ระยะเวลาต่างๆ ที่ความเข้มข้น 500 mg/L	96
ก.3	ค่า $pH_{optimum}$ จากการดูดซับสารละลายปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ระยะเวลา 1 h (ผลการทดลองเฉลี่ย 3 ครั้ง)	96
ก.4	ค่า $pH_{optimum}$ จากการดูดซับสารละลายปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ระยะเวลา 2 h (ผลการทดลองเฉลี่ย 3 ครั้ง)	97
ก.5	ค่า $pH_{optimum}$ จากการดูดซับสารละลายปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ระยะเวลา 4 h (ผลการทดลองเฉลี่ย 3 ครั้ง)	97
ก.6	ค่าการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 60 mg/L	98

ตาราง (ต่อ) **หน้า**

ก.7 ค่าการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 80 mg/L 98

ก.8 ค่าการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 100 mg/L 99

ก.9 ค่าการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 120 mg/L 99

ก.10 ค่าการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 140 mg/L 100

ก.11 ค่าที่ได้จากกราฟไอโซเทอมการดูดซับจากสมการ Langmuir และสมการ Freundlich 100

ก.12 ค่า R_L จากไอโซเทอมการดูดซับของสมการ Langmuir 101

ก.13 ค่าการปลดปล่อยปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตจากซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ระยะเวลาต่างๆ ที่ความเข้มข้น 100 mg/L โดยปรับค่า pH เท่ากับ 3 102

ก.14 ค่าการปลดปล่อยปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตจากซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ระยะเวลาต่างๆ ที่ความเข้มข้น 100 mg/L โดยปรับค่า pH เท่ากับ 5 103

ก.15 ค่าการปลดปล่อยปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตจากซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ระยะเวลาต่างๆ ที่ความเข้มข้น 100 mg/L โดยปรับค่า pH เท่ากับ 7 104

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	แผนผังกระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน	6
2.2	รูปทรงเตตระฮีดรอลของออกซิเจนโคออดิเนตกับซิลิกอนหรืออะลูมิเนียม	11
2.3	โครงสร้าง 2 มิติของอะลูมิโนซิลิเกต	12
2.4	ลักษณะโครงสร้างปฐมภูมิ	15
2.5	ชื่อของหน่วยทุติยภูมิของซีโอไลต์แต่ละหน่วยและสัญลักษณ์ย่อ	16
2.6	ลักษณะหน่วยย่อยของโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าขนาดใหญ่	17
2.7	โครงข่ายอะลูมิโนซิลิเกตของซีโอไลต์	17
2.8	โครงข่ายอะลูมิโนซิลิเกตที่เกิดจากการเรียงตัวกันในรูปแบบต่างๆ กัน	18
2.9	ช่องว่างในโครงสร้างของ Analcime	19
2.10	ลักษณะช่องว่างในระบบ 2 มิติ	20
2.11	ลักษณะช่องว่างในระบบ 3 มิติ ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของช่องว่างเท่ากัน	20
2.12	ลักษณะช่องว่างในระบบ 3 มิติ ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของช่องว่างไม่เท่ากัน	21
2.13	ภาพถ่าย SEM ของซีโอไลต์ชนิด A	25
2.14	กลไกการดูดซับ	28
2.15	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังวัสดุดูดซับ	29
2.16	การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิววัสดุดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้นและสี่ชั้น	30
2.17	ลักษณะการยึดเหนี่ยวด้วยแรงทางกายภาพ	31
2.18	แรงแวนเดอร์วาลล์ระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว	33
2.19	แรงแวนเดอร์วาลล์ระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว	33
2.20	แรงแวนเดอร์วาลล์ระหว่างโมเลกุลมีขั้ว	34
2.21	กลไกการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิววัสดุดูดซับแบบชั้นเดียว	38
2.22	ตัวถูกดูดซับปกคลุมจนเต็มพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับแบบชั้นเดียว ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับสูงสุดบนพื้นผิวเท่ากับ q_m	38
2.23	ลักษณะไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของสมการ Langmuir	39
2.24	ลักษณะไอโซเทอมของการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของสมการ Freundlich	40
2.25	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของตัวดูดซับชนิดต่างๆ	41
2.26	หอพริลลิ่งของโรงงานผลิตปุ๋ยยูเรีย	44
2.27	จานปั่นเม็ดยูเรีย	45

รูป (ต่อ) **หน้า**

2.28	กระบวนการผลิตคาโปรแลกแทมมีปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตเป็นผลพลอยได้	48
3.1	ชุดถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์	57
3.2	แผนผังการดำเนินงานวิจัย	60
3.3	ขั้นตอนการเตรียมตะกอนประปาเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์	61
3.4	ขั้นตอนการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากตะกอนของโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน	62
3.5	ขั้นตอนการดูดซับปุ๋ยยูเรียด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี DMAB	63
3.6	ขั้นตอนการศึกษาการดูดซับปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์	65
3.7	ขั้นตอนการศึกษาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์	66
3.8	ขั้นตอนการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์	67
3.9	ขั้นตอนการศึกษาการปลดปล่อยปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตที่ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์	68
4.1	ลักษณะทางกายภาพของตะกอนจากโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน	70
4.2	การวิเคราะห์ตะกอนประปาเริ่มต้นและซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A ด้วยเทคนิค XRD	72
4.3	ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของตะกอนประปาด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า	74
4.4	ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากตะกอนประปา ที่ไม่ผ่านการเผาและผ่านการเผาที่ระยะเวลาต่างๆ ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า	75
4.5	การดูดซับสารละลายปุ๋ยยูเรียด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ระยะเวลาต่างๆ ที่ความเข้มข้น 50 mg/L	78
4.6	การดูดซับสารละลายปุ๋ยยูเรียด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ระยะเวลาต่างๆ ที่ความเข้มข้น 500 mg/L	78
4.7	ค่า $pH_{optimum}$ ที่ระยเวลา 1 2 และ 4 h	79
4.8	ค่า $t_{equilibrium}$ ของสารละลายปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ	80
4.9	ไอโซเทอมการดูดซับของสมการ Langmuir	82
4.10	ไอโซเทอมการดูดซับของสมการ Freundlich	83
4.11	การปลดปล่อยปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตจากซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ระยะเวลาต่างๆ	85
ข.1	กราฟมาตรฐานของปุ๋ยยูเรีย	106
ค.1	กราฟมาตรฐานของปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต	109
จ.1	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของซีโอไลต์ที่ผ่านการเผาที่ระยะเวลา 6 h ด้วยเทคนิค XRD	116
จ.2	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของซีโอไลต์ที่ผ่านการเผาที่ระยะเวลา 9 h ด้วยเทคนิค XRD	116
จ.3	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของซีโอไลต์ที่ผ่านการเผาที่ระยะเวลา 12 h ด้วยเทคนิค XRD	117

ประมวลคำศัพท์และคำย่อ

^{o} C	=	Degree Celsius
CEC	=	Cation Exchange Capacity
DMAB	=	p-Dimethylaminobenzaldehyde
^{o} F	=	Degree Fahrenheit
g/kg	=	Gram per kilogram
g/mL	=	Gram per milliliter
h	=	Hour
K	=	Kelvin
kPa	=	Kilo Pascal
M	=	Molarity
meq/g	=	Milliequivalent per gram
mg/g	=	Milligram per gram
min	=	Minute
mol/dm^3	=	Mole per cubic decimeter
XRD	=	X-Ray Diffraction Spectroscopy
XRF	=	X-Ray Fluorescence Spectroscopy
SEM	=	Scanning Electron Microscopy
w/w	=	Weight by Weight
%	=	Percentage