

การกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนในนาุ้งโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและปรับ
สภาพด้วยโคโคซาน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

AMMONIUM NITROGEN REMOVAL FROM SHRIMP FARM USING ZEOLITES SYNTHESIZED
FROM COAL FLY ASH AND MODIFIED WITH CHITOSAN



A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy in Environmental Science
Inter-Department of Environmental Science
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 2018
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนในนาุ้งโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและปรับสภาพด้วยไคโตซาน
โดย	นายปธานิน แสงอรุณ
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมนุญ หนูจักร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรรศนีย์ พลภักษาสิทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิมย์ม)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิธร พุทรวงษ์)

ประธานิน แสงอรุณ : การกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำกุ้งโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้า
 ลอยถ่านหินและปรับสภาพด้วยไคโตซาน . (AMMONIUM NITROGEN REMOVAL FROM
 SHRIMP FARM USING ZEOLITES SYNTHESIZED FROM COAL FLY ASH AND
 MODIFIED WITH CHITOSAN) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์

การศึกษานี้ ใช้การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน ที่ 3 ปัจจัย 3 ระดับ ในการหาสภาวะที่
 เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน การปรับสภาพซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยถ่านหิน
 ด้วยการใช้ไคโตซาน และประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นของ
 แอมโมเนียมไนโตรเจนเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยถ่านหินและซีโอไลต์
 ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยไคโตซาน ผลการทดสอบทางสถิติพบว่าสภาวะที่ดีที่สุดที่
 ความเข้มข้น NaOH ที่ 4 โมลต่อลิตร ระยะเวลา 34 ชั่วโมง และ อุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ซีโอไลต์
 สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงสุด ที่ 272.12 มิลลิอควิวา
 เลนต่อ 100 กรัม ในกรณีของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน พบว่ามีค่า
 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงสุด ที่ 301.39 มิลลิอควิวาเลนต่อ 100 กรัม โดยสภาวะที่ดีที่สุด
 คือความเข้มข้นของไคโตซาน 11 กรัมต่อลิตร ระยะเวลา 26 ชั่วโมง และ อุณหภูมิที่ 48 องศาเซลเซียส จากนั้น
 ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จาก
 เถ้าลอยถ่านหินและซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน ผลการศึกษาจากการ
 ออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วย
 ซีโอไลต์สังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยถ่านหินด้วยไคโตซาน (ร้อยละ 83.57) เกิดได้ดีกว่าซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้า
 ลอยถ่านหิน (ร้อยละ 66.68) โดยค่าพีเอชที่ 7.5 และค่าปริมาณตัวดูดซับที่ 4.0 กรัมต่อลิตร เป็นระดับปัจจัยที่ดี
 ที่สุดต่อค่าการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด ในขณะที่ เวลาในการดูดซับที่ 90 และ 80
 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมที่สุดต่อการดูดซับด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน
 และซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน ตามลำดับ และจากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับพบว่า
 ความสอดคล้องกับสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียมและสมการแลงเมียร์

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5587848120 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORD: Coal fly ash; Box- Benkhen design; Zeolite synthesized zeolite from coal fly ash; Zeolite synthesized from coal fly ash modified with chitosan; ammonium adsorption

Pathanin Sangaroon : AMMONIUM NITROGEN REMOVAL FROM SHRIMP FARM USING ZEOLITES SYNTHESIZED FROM COAL FLY ASH AND MODIFIED WITH CHITOSAN.

Advisor: Prof. Thares Srisatit, Ph.D.

In this study, Box- Benkhen design with three factors and three levels was used to find the optimum conditions for synthesis of zeolite from coal fly ash, modifying of chitosan modified zeolite from coal fly ash and the capacity of ammonium-nitrogen removal (%) from synthetic wastewater contained with Ammonium-Nitrogen at 100 mg/L by zeolite from coal fly ash and chitosan modified zeolite from coal fly ash. The statistical results showed that optimum conditions at NaOH concentration (4 mol/L), retention time (34 hr) and temperature (80 °C) provided the highest Cation Exchange Capacity (CEC) of zeolite from coal fly ash at 272.12 meq/100g In the case of chitosan modified zeolite from coal fly ash, the highest Cation Exchange Capacity (CEC) was 301.39 meq/100g with the optimum conditions at chitosan concentration (11 g/L), retention time (26 hr) and temperature (48 °C). The capacity of ammonium-nitrogen removal from the synthetic wastewater by zeolite from coal fly ash and modified zeolite from coal fly ash was studied. The results from Box- Benkhen design showed that the ammonium-nitrogen removal of modified zeolite from coal fly ash (83.57%) was higher than zeolite from coal fly ash (66.68%). The pH at 7.5 and absorbent at 4.0 g/L were the best levels for ammonium-nitrogen removal (%) by both of absorbents while the retention time at 90 and 80 min was the best level for ammonium-nitrogen removal (%) by modified zeolite from coal fly ash and zeolite from coal fly ash, respectively. In addition, the kinetic data and adsorption equilibrium data of ammonium-nitrogen removal (%) by both of absorbents fit satisfactory with pseudo-second-order kinetic model and Langmuir model.

Field of Study: Environmental Science

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาใช้เวลาอันมีค่ายิ่งในการให้ความรู้ แนวคิด คำแนะนำ ความเอาใจใส่ และตรวจแก้ไขข้อผิดพลาด ตลอดจนให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรศนีย์ พฤษชาติ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิธร พุทธวงษ์ ที่สละเวลาอันมีค่าเพื่อเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้ความคิดเห็น รวมถึงคำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ ให้ความรู้และประสบการณ์มากขึ้น และขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้ตลอดหลักสูตรการศึกษา

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่น้องทุกคนที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาและทุนทรัพย์ ให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ และเป็นกำลังใจสำคัญยิ่งในการทำวิจัยในครั้งนี้ จนสำเร็จการศึกษาได้ด้วยดี

ขอขอบคุณหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะสาธารณสุขศาสตร์และเทคโนโลยี สุขภาพ วิทยาลัยนครราชสีมา และ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพมหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราชที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการตลอดระยะเวลาทำการวิจัย



ปธานิน แสงอรุณ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมุติฐานในการวิจัย	3
1.4 ขอบเขตในงานวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 สารประกอบไนโตรเจน	4
2.2 คุณภาพน้ำอื่น ๆ ในการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม.....	8
2.3 ซีโอไลต์ (Zeolite)	11
2.3.1 นิยามของซีโอไลต์	11
2.3.2 การแบ่งประเภทของซีโอไลต์ตามลักษณะโครงสร้าง	13
2.3.3 การสังเคราะห์ซีโอไลต์	15
2.4 ถ้ำลอยถ่านหิน (Fly Ash).....	17
2.4.1 สารที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหิน.....	17

2.4.2	การจัดรูปของถ้ำลอยขณะทำการเผาไหม้	18
2.4.3	อุปกรณ์ที่ใช้ในการตักเก็บถ้ำลอยถ่านหิน.....	19
2.4.4	ชนิดของถ้ำลอยถ่านหินเมื่อแยกตามส่วนประกอบทางธรรมชาติ	19
2.4.5	องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหิน	19
2.4.6	สมบัติเชิงวิศวกรรมของถ้ำลอยถ่านหิน	20
2.4.7	ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมบางประการที่เกิดจากถ้ำลอย	22
2.4.8	ประโยชน์ของถ้ำลอยถ่านหิน	22
2.5	ลักษณะทั่วไปของไคตินและไคโตซาน	25
2.5.1	แหล่งของไคตินและไคโตซาน	27
2.5.2	การละลาย (Solubility).....	27
2.5.3	ความหนืด (Viscosity).....	29
2.5.4	การใช้ประโยชน์จากไคโตซาน.....	29
2.6	การออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design)	32
2.7	หลักการและทฤษฎีการดูดซับ (principle of adsorption).....	34
2.7.1	ประเภทของการดูดซับ	34
2.7.2	กลไกการดูดซับ	35
2.7.3	สมดุลการดูดซับ.....	36
2.7.4	จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ	38
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	46
3.1	รูปแบบการวิจัย	46
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย.....	46
3.3	เคมีภัณฑ์.....	47
3.4	วิธีดำเนินงานวิจัย.....	49

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	53
4.1 การเตรียมถ้ำลอยถ่านหิน.....	54
4.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินและศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์.....	56
4.2.1 สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน.....	56
4.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน.....	61
4.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากถ้ำลอยถ่านหินด้วยการใช้โคโตซาน.....	64
4.3.1 สภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินด้วยการใช้โคโตซาน	64
4.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับสภาพซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินด้วยการใช้โคโตซาน	69
4.4 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของถ้ำลอยถ่านหิน ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน และซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยโคโตซาน	73
4.4.1 ลักษณะรูปร่างของถ้ำลอยถ่านหิน ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน และ ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยโคโตซานที่สังเคราะห์ได้	73
4.4.2 ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุน และพื้นที่ผิว ของถ้ำลอยถ่านหิน ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยโคโตซาน	75
4.4.3 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหิน ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน และซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยโคโตซาน โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)	77
4.4.4 โครงสร้างทางเคมีของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)	78
4.4.5 หมู่ฟังก์ชันในถ้ำลอย (CFA) ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน (ZFA) ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยโคโตซาน (CZFA) ด้วยเทคนิค FT-IR	80
4.5 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน (ZFA).....	81
4.5.1 สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน (ZFA).....	81

4.5.2	ปัจจัยหลักที่มีต่อการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน (ZFA).....	88
4.5.3	จลนพลศาสตร์การดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน (ZFA)	91
4.5.4	ไอโซเทอมการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน (ZFA).....	93
4.5.5	หมู่ฟังก์ชันหลังการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน	95
4.6	ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน (CZFA).....	96
4.6.1	สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยไคโตซาน (CZFA).....	96
4.6.2	ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการปรับสภาพซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ได้จากถ้ำลอยถ่านหินด้วยการใช้ไคโตซาน (CZFA).....	103
4.6.3	จลนพลศาสตร์การดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยไคโตซาน(CZFA).....	106
4.6.4	ไอโซเทอมการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน (CZFA).....	108
4.6.5	ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันหลังการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน (CZFA).....	110
4.7	ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน (ZFA) ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน (CZFA) และซีโอไลต์เกรดการค้า ในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำเสียจากนาุ้ง โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test)	111
4.8	ศึกษาการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ใช้แล้ว.....	112
4.9	การประเมินต้นทุนการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินและปรับสภาพด้วยไคโตซานในระดับห้องปฏิบัติการ.....	113

4.10 การประเมินต้นทุนการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและปรับสภาพด้วยโคโคซานใน ระดับอุตสาหกรรม.....	116
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	118
บรรณานุกรม.....	120
ภาคผนวก.....	128
ประวัติผู้เขียน.....	155



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ผลกระทบของปริมาณออกซิเจนต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง.....	9
ตารางที่ 2.2 ผลกระทบของค่าพีเอชต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง	9
ตารางที่ 2.3 สรุปลสมบัติเชิงวิศวกรรมของถ้ำลอยทั่วไป.....	21
ตารางที่ 2.4 ปริมาณไคตินที่มีอยู่ในสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ.....	28
ตารางที่ 2.5 ความสามารถในการละลายของไคโตซานในสารละลายกรดชนิดต่างๆที่ความเข้มข้นของกรดต่าง ๆ กัน	29
ตารางที่ 2.6 การใช้ประโยชน์จากไคโตซาน.....	30
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ และมาตรฐานที่ใช้วิเคราะห์.....	52
ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์ ค่า TTLC ของถ้ำลอยถ่านหิน.....	55
ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์ ค่า STLC ของถ้ำลอยถ่านหิน.....	55
ตารางที่ 4.3 ปัยจัยและระดับของแต่ละตัวแปรอิสระที่ใช้ในการทดลอง	56
ตารางที่ 4.4 การออกแบบการทดลองและผลที่สภาวะที่เหมาะสมของการเพิ่มค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก	57
ตารางที่ 4.5 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติ.....	60
ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของซีโอไลท์ที่สังเคราะห์ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	63
ตารางที่ 4.7 ปัยจัยและระดับของแต่ละตัวแปรอิสระที่ใช้ในการทดลอง	64
ตารางที่ 4.8 การออกแบบการทดลองและผลที่สภาวะที่เหมาะสมของการเพิ่มค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก	65
ตารางที่ 4.9 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติ.....	69
ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของซีโอไลท์ที่สังเคราะห์ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	72

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ปริมาณรพูนรวม ขนาดรพูนเฉลี่ย และ พื้นที่ผิวของถ้ำลอยถ่านหิน และซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน.....	76
ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบค่าพื้นที่ผิวของสารซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	76
ตารางที่ 4.13 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหิน ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน และซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน	77
ตารางที่ 4.14 แสดงซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากถ้ำลอยถ่านหิน	79
ตารางที่ 4.15 ปัยจัยและระดับของแต่ละตัวแปรอิสระที่ใช้ในการทดลอง	81
ตารางที่ 4.16 การออกแบบการทดลองและผลที่สภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนโดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน	81
ตารางที่ 4.17 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติ	87
ตารางที่ 4.18 ค่าคงที่จลนพลศาสตร์การดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของ ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน (ZFA) ตามสมการ pseudo-first order และ pseudo-second order.....	91
ตารางที่ 4.19 ค่าคงที่ของสมการไอโซเทอมการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนโดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน ตามแบบจำลองของแลงเมียร์และฟรุนดิช	93
ตารางที่ 4.20 ปัยจัยและระดับของแต่ละตัวแปรอิสระที่ใช้ในการทดลอง	96
ตารางที่ 4.21 การออกแบบการทดลองและผลที่สภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน	97
ตารางที่ 4.22 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติ	102
ตารางที่ 4.23 ค่าคงที่จลนพลศาสตร์การดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของ ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน	106
ตารางที่ 4.24 ค่าคงที่ของสมการไอโซเทอมการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนโดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน ตามแบบจำลองของแลงเมียร์และฟรุนดิช	108
ตารางที่ 4.25 ประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้ง	112
ตารางที่ 4.26 ราคาต้นทุนคงที่ในการผลิตซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินต่อ 1 กิโลกรัม	113
ตารางที่ 4.27 ราคาต้นทุนคงที่ในการผลิตซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน....	113

ตารางที่ 4.28 ตารางต้นทุนค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและปรับสภาพด้วยไคโตซาน	114
ตารางที่ 4.29 ต้นทุนในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและซีโอไลต์เถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยต่อ 1 กิโลกรัม.....	114
ตารางที่ 4.30 เปรียบเทียบต้นทุนการสังเคราะห์ซีโอไลต์และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก	115
ตารางที่ 4.31 ราคาต้นทุนคงที่ในการผลิตซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินต่อ 100 กิโลกรัม.....	116
ตารางที่ 4.32 ราคาต้นทุนคงที่ในการผลิตซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน....	116
ตารางที่ 4.33 ตารางต้นทุนค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและปรับสภาพด้วยไคโตซาน	117
ตารางที่ 4.34 ต้นทุนในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและซีโอไลต์เถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยต่อ 100 กิโลกรัม	117

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	วัฏจักรของไนโตรเจน	4
รูปที่ 2.2	ปริมาณไนโตรเจนที่เติมเข้าไปสะสมอยู่ในที่ส่วนต่าง ๆ ของบ่อเลี้ยงกุ้งระบบปิด.....	6
รูปที่ 2.3	รูปทรงเตตระฮีดรอลของออกซิเจนโคออร์ดิเนตกับซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมในหน่วยโครงสร้างปฐมภูมิของซีโอไลต์.....	11
รูปที่ 2.4	หน่วยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์ เตตระฮีดรอลสองหมู่ของ $\text{SiO}_4/\text{AlO}_4$	11
รูปที่ 2.5	หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิของซีโอไลต์	14
รูปที่ 2.6	ลักษณะหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์.....	14
รูปที่ 2.7	ลักษณะหน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าขนาดใหญ่ของซีโอไลต์.....	15
รูปที่ 2.8	โครงสร้างโมเลกุลของไคติน.....	25
รูปที่ 2.9	โครงสร้างโมเลกุลของไคโตซาน (.....	26
รูปที่ 2.10	IR spectra ของไคตินและไคโตซาน (A) ไคติน (B) ไคโตซาน	26
รูปที่ 2.11	การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) สำหรับ $k=2$ และ $k=3$	33
รูปที่ 4.1	ลักษณะของถ้ำลอยถ่านหิน	54
รูปที่ 4.2	กราฟแสดงค่า Normal probability Fits Histogram และ Order.....	58
รูปที่ 4.3	ค่า CEC ที่ได้จากการทำนายและค่า CEC ที่ได้จากการทดลอง.....	59
รูปที่ 4.4	ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน.....	61
รูปที่ 4.5	ปัจจัยร่วมที่มีผลต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน	62
รูปที่ 4.6	กราฟแสดงค่า Normal probability Fits Histogram และ Order.....	67
รูปที่ 4.7	ค่า CEC ที่ได้จากการทำนายและค่า CEC ที่ได้จากการทดลอง.....	68
รูปที่ 4.8	ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน.....	70

รูปที่ 4.9 ปัจจัยร่วมที่มีผลต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยไคโตซาน.....	71
รูปที่ 4.10 โครงสร้างและพื้นที่ผิวของถ้ำลอยถ่านหินเมื่อใช้กำลังขยาย 5,000 เท่า	73
รูปที่ 4.11 โครงสร้างและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ้ำลอยถ่านหิน เมื่อใช้ กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	74
รูปที่ 4.12 โครงสร้างและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยที่ปรับสภาพด้วยไคโตซาน เมื่อใช้ กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	74
รูปที่ 4.13 โครงสร้างทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหิน (CFA) ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน (CZFA) และซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน (CZFA).....	78
รูปที่ 4.14 FT-IR สเปกตรัมของถ้ำลอยถ่านหิน (CFA) ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน (ZFA) และซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน (CZFA)	80
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่า Normal probability Fits Histogram และ Order	85
รูปที่ 4.16 แสดงค่าร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่าน หินที่ได้จากการทดลองและการทำนาย	86
รูปที่ 4.17 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน	88
รูปที่ 4.18 ปัจจัยร่วมที่มีผลต่อร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยถ่านหิน.....	90
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองพลศาสตร์การดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของ: ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน (ZFA)ตามสมการ pseudo first order และ pseudo second order	92
รูปที่ 4.20 ไอโซเทอมของการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช โดยใช้ซีโอไลต์ จากถ้ำลอยถ่านหิน (ZFA).....	94
รูปที่ 4.21 FT-IR ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน (ZFA) และซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอย ถ่านหิน (ZFA) หลังดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน	95
รูปที่ 4.22 ค่า Normal probability Fits Histogram และ Order.....	100
รูปที่ 4.23 ค่าร้อยละการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนที่ได้จากการทดลองและการทำนาย	101

รูปที่ 4.24 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน 103

รูปที่ 4.24 ปัจจัยร่วมที่มีผลต่อร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก
 แก้วลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน (CZFA)..... 105

รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของ
 ซีโอไลต์จากแก้วลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน (CZFA) ตามสมการ pseudo first
 order และ pseudo second order..... 107

รูปที่ 4.27 ไอโซเทอมของการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช โดยใช้ซีโอไลต์
 สังเคราะห์จากแก้วลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน (CZFA)..... 109

รูปที่ 4.28 FT-IR ซีโอไลต์สังเคราะห์จากแก้วลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน(CZFA) และซีโอไลต์
 สังเคราะห์จากแก้วลอยถ่านหินปรับสภาพไคโตซาน (CZFA) หลังดูดซับแอมโมเนียม
 ไนโตรเจน 110

รูปที่ 4.29 ร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนหลังการฟื้นฟูกลับมาใช้ใหม่จำนวน 5 รอบ..... 112

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันกิจการการเลี้ยงกุ้งในประเทศไทยมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว สามารถแข่งขันกับผู้ผลิตต่างประเทศได้ ถือเป็นอาชีพที่ทำรายได้ให้แก่เกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งเป็นอย่างมาก จึงทำให้มีผู้นิยมทำการเพาะเลี้ยงกุ้งเพิ่มขึ้น เพื่อสนองความต้องการของตลาด ปัญหาอย่างหนึ่งที่เกิดตามมาก็คือ ปัญหาความเสื่อมโทรมของคุณภาพสิ่งแวดล้อมและการระบาดของโรคในแหล่งที่ทำการเลี้ยงกุ้งที่รุนแรงขึ้น ซึ่งในเทคนิคการเลี้ยงกุ้งระบบปิดหรือการเลี้ยงกุ้งแบบเติมน้ำหรือถ่ายน้ำน้อยนั้น เป็นการพัฒนาปรับปรุงเทคนิคการเลี้ยงอีกชนิดหนึ่งเพื่อลดความเสี่ยงที่ทำให้กุ้งติดเชื้อและตายในระหว่างการเลี้ยง แต่การเลี้ยงกุ้งในระบบปิด มีข้อเสียอยู่เช่นกัน จากข้อเสียและสิ่งขับถ่ายจากการเลี้ยงกุ้งจะสะสมอยู่ในบ่อเลี้ยง เช่น แอมโมเนีย ไนโตรเจน โดยเฉพาะแอมโมเนียนั้นซึ่งเป็นสารประกอบอนินทรีย์ ไนโตรเจนที่มีบทบาทสำคัญในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพราะเป็นทั้งสารพิษต่อสัตว์น้ำและปุ๋ยสำหรับการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืช (Hargreaves, 1998) แอมโมเนียเป็นสารพิษที่มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำในความเข้มข้นที่ต่ำ ค่าความเป็นพิษเฉียบพลันของแอมโมเนียโดยเฉลี่ยจากสัตว์ทะเล 17 ชนิด อยู่ที่ 1.86 มิลลิกรัมต่อลิตร (Randall & Tsui, 2002) และในน้ำกึ่งนั้นแอมโมเนียส่วนใหญ่ได้มาจากการขับถ่ายของกุ้งและอาหารเหลือตกค้าง เมื่อเลี้ยงกุ้งไปนาน ๆ ความเข้มข้นของแอมโมเนียในบ่อเลี้ยงจึงสูงขึ้น จนอาจถึงระดับที่เป็นอันตรายต่อกุ้งได้ และแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 1.49 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูป NH_3 จะทำให้กุ้งตายได้ถึงร้อยละ 50 ในระยะเวลา 48 ชั่วโมง (Schuler, Boardman, Kuhn, & Flick, 2010) ในการเลี้ยงกุ้งโดยทั่วไปจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำเพื่อควบคุมความเข้มข้นของแอมโมเนียไม่ให้สูงเกินไป แต่การกระทำเช่นนี้อาจไปสร้างผลกระทบต่อแหล่งน้ำธรรมชาติที่รองรับน้ำทิ้งได้ จึงควรมีวิธีการที่กำจัดหรือลดปริมาณแอมโมเนียในบ่อเลี้ยง เพื่อให้กุ้งเจริญเติบโตต่อไปได้ ดัชนีวัดคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงประกอบด้วยค่า BOD ความขุ่นหรือปริมาณสารแขวนลอย และปริมาณของแอมโมเนีย ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของอาหารที่เหลือโดยจุลินทรีย์ในบ่อเลี้ยงและเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายในกระบวนการ protein catabolism ซึ่งกุ้งจะขับถ่ายออกมา แอมโมเนียจะเป็นพิษต่อกุ้ง นอกจากนั้นแอมโมเนียจะถูกออกซิไดซ์ไปเป็นไนไตรท์ และไนเตรทโดยแบคทีเรียที่อยู่ในบ่อ (nitrification) ไนไตรท์ซึ่งเป็นสารตัวกลางในปฏิกิริยานี้มีความเป็นพิษมากที่สุด เนื่องจากไนไตรท์

สามารถเข้าไปจับกับฮีโมโกลบิน ทำให้ความสามารถในการขนส่งออกซิเจนของกึ่งเสียไป (Boyd & Tucker, 1998) ดังนั้นในการเลี้ยงกุ้งจำเป็นต้องมีการถ่ายน้ำเสียทิ้งอยู่เสมอ ทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก เนื่องจากน้ำทิ้งจากบ่อกุ้งมีปริมาณสารอนินทรีย์อยู่สูง (แอมโมเนีย ฟอสเฟต) ทำให้พืชในแหล่งน้ำทิ้งเจริญเติบโตได้ดี แต่น้ำขาดออกซิเจนส่งผลให้สัตว์และพืชน้ำในบริเวณนั้นตายลง และถูกย่อยสลายในเวลาต่อมา เป็นเหตุให้น้ำในแหล่งน้ำนั้นเน่าเสียในที่สุด

เถ้าลอย (Fly ash) เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเผาถ่านหินเพื่อให้ออกพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินทำให้เกิดเถ้าลอยถ่านหิน ซึ่งพบทั่วโลกประมาณ 700 ล้านตันต่อปีและมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ (Toniolo & Boccaccini, 2017) จึงมีนักวิจัยสนใจนำเถ้าลอยถ่านหินไปใช้ประโยชน์ เช่น ทำปุ๋ย โปแทสเซียม นำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้างใช้เป็นคันทาง เป็นวัสดุถม และเป็นวัตถุดิบในการผลิตอิฐ นอกจากนี้ยังนำไปสังเคราะห์ซีโอไลต์เพื่อใช้ในการดูดซับ เนื่องจากเถ้าลอยถ่านหินมีปริมาณซิลิกาและอลูมินาค่อนข้างสูง (He, Lin, Dong, Liu, & Wang, 2016; Liu et al., 2018) การนำเถ้าลอยถ่านหินมาปรับสภาพเป็นวิธีการที่สำคัญวิธีการหนึ่งในการจัดการของเสีย ซึ่งเถ้าลอยถ่านหินมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกกับไอออนบวกของสารอินทรีย์และอนินทรีย์สูง]และยังมีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับที่มีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์และนอกจากซีโอไลต์แล้วไคโตซานซึ่งมีความโดดเด่นในคุณสมบัติทางเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่งประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยากับสารที่มีประจุลบ และสามารถดูดซับไอออนของโลหะหนัก เพื่อแยกสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ ที่ละลายในน้ำเสียได้ (Xie, Li, Chi, & Wu, 2013; Zheng & Wang, 2009)

ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัย จึงมีความสนใจที่จะนำเถ้าลอยถ่านหินมาสังเคราะห์ให้ได้สารซีโอไลต์แล้วนำซีโอไลต์ดังกล่าวไปปรับสภาพด้วยไคโตซานเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมในนาุ้งและนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดแอมโมเนียมในนาุ้งรวมถึงน้ำทิ้งที่เกิดจากการทำเกษตรกรรมนาุ้งด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์

1.2.2 เพื่อปรับสภาพซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยถ่านหินด้วยการใช้ไคโตซาน

1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมในนาุ้งโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน

1.3 สมมุติฐานในการวิจัย

1.3.1 ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่ปรับสภาพด้วยไคโตซานมีสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่ดีกว่าเถ้าลอย

1.3.2 ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่ปรับสภาพด้วยไคโตซานมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนได้

1.4 ขอบเขตในงานวิจัย

1.4.1 เถ้าลอยถ่านหินที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้ ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทไทยเทรทีกซ์ ไทล์มิลลส์จำกัด (มหาชน)

1.4.2 ประเภทของซีโอไลต์ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction Spectrometer (XRD)

1.4.3 การหาปัจจัยที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์และการปรับสภาพซีโอไลต์ด้วยไคโตซานนั้น วางแผนการทดลองแบบ Box –Behnken Design ด้วยเทคนิค Response Surface Methodology (RSM)

1.4.4 วิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยวิธี Direct Nesslerization (ASTM D1426-08)

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1.5.1 เป็นการนำเถ้าลอยถ่านหินที่เป็นวัสดุเหลือทิ้ง กลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ เพื่อลดของเสียอุตสาหกรรมที่จะต้องถูกกำจัด

1.5.2 สามารถนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและปรับสภาพซีโอไลต์ด้วยไคโตซานไปใช้ในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำเสียในนาุ้งได้ รวมถึงสามารถลดอัตราการตายในการเลี้ยงกุ้งและประยุกต์ใช้ในการลดปัญหาการจัดการแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

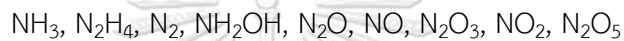
1.5.3 เป็นการเพิ่มมูลค่าเถ้าลอยถ่านหินและสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีคุณภาพดีขึ้น

บทที่ 2

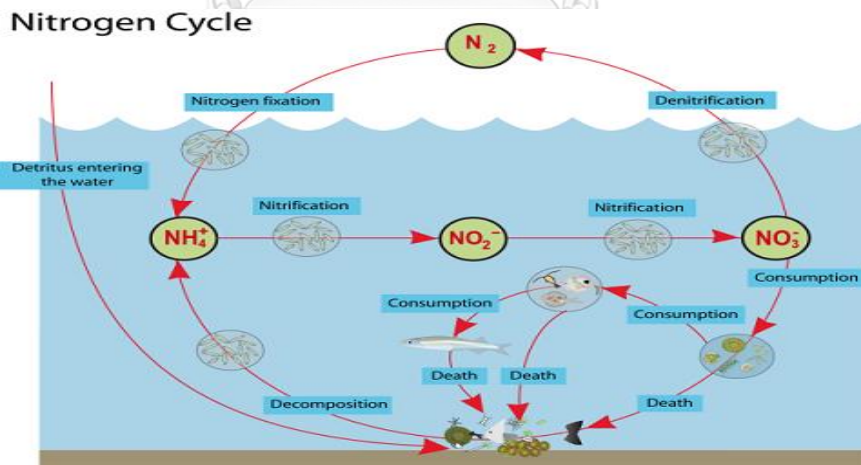
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารประกอบไนโตรเจน

สารประกอบไนโตรเจนที่เกี่ยวข้องในน้ำดื่มและน้ำเสียแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน และสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน ไนโตรเจนมีบทบาทในน้ำ เพราะสามารถที่จะเปลี่ยนรูปจากสารอินทรีย์เป็นสารอนินทรีย์ได้ โดยไนโตรเจนมีหลายวาเลนซ์แตกต่างกัน 9 ค่า (-3 ถึง 5) คือ



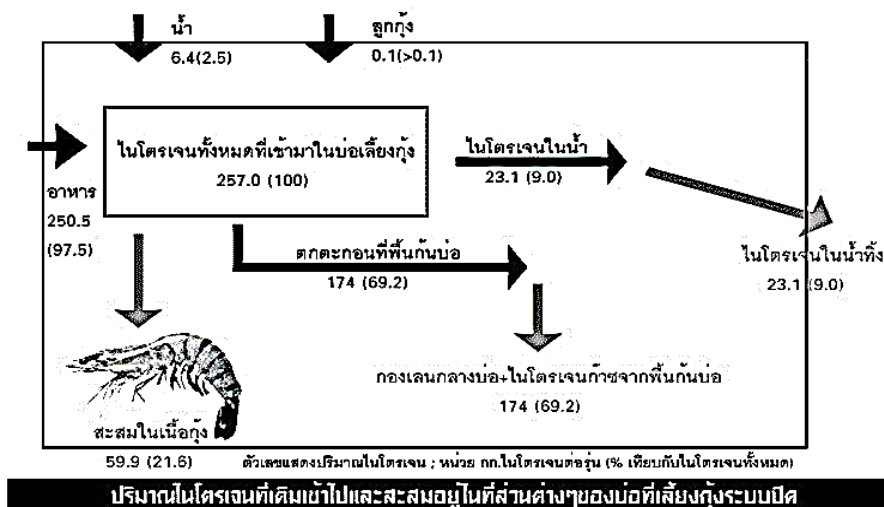
สารประกอบไนโตรเจนวาเลนซ์ +1, +2, และ +4 มีความสำคัญน้อยมากในกระบวนการทางชีววิทยา N_2O_3 และ N_2O_5 เป็น acid anhydrous ของ HNO_2 และ HNO_3 ไนโตรเจนรูปต่างๆ ที่พบทั่วไปในธรรมชาติ ได้แก่ NH_4^+ , N_2 , NO_2^- , NO_3^- ดังวัฏจักรของไนโตรเจนในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วัฏจักรของไนโตรเจน (Queensland, 2018)

สารประกอบไนโตรเจนที่เป็นพิษต่อกุ้ง ได้แก่ แอมโมเนียและไนไตรท์ ซึ่งแหล่งของสารประกอบไนโตรเจนในน้ำส่วนใหญ่มาจากสารอินทรีย์ ซึ่งมาจากกระบวนการย่อยสลายของเศษอาหารที่เหลือ แพลงก์ตอนที่ตาย เศษซากพืชซากสัตว์และสารอินทรีย์อื่น ๆ โดยจุลินทรีย์ แล้วปล่อยแอมโมเนียออกมาสู่แหล่งน้ำ ในสภาวะที่มีออกซิเจนแบบที่เรียวกว่าพวกไนตริไฟอิงแบคทีเรีย (nitrifying bacteria) จะเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนไตรท์และไนเตรท ตามลำดับ (ชโล ลี้มสุวรรณ และ พรเลิศ จันทร์รัชกุล, 2547)

แอมโมเนียเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่เป็นพิษต่อกุ้งและสัตว์น้ำอื่น ๆ ยกเว้น แพลงก์ตอนพืชและแบคทีเรียที่ใช้แอมโมเนียเป็นอาหาร โดยแพลงก์ตอนพืชจะใช้ไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียและไนเตรท แอมโมเนียที่พบอยู่ในน้ำมี 2 รูปแบบ ได้แก่ แอมโมเนีย ที่แตกตัวเป็นอออน (ionize ammonia; NH_4^+) ซึ่งไม่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำและแอมโมเนียที่ไม่แตกตัวเป็นอออน (un-ionize ammonia; NH_3) ซึ่งเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ แอมโมเนียทั้งสองรูปนี้จะเปลี่ยนกลับไปกลับมาขึ้นอยู่กับค่าพีเอชและอุณหภูมิ แต่โดยส่วนมากค่าพีเอชจะส่งผลต่อการแตกตัวเป็นแอมโมเนียที่ไม่แตกตัวเป็นอออนมากกว่าอุณหภูมิ (Boyd, 1989) คือ เมื่อพีเอชสูงอัตราส่วนของแอมโมเนียที่ไม่แตกตัวเป็นอออนจะสูงขึ้น ทำให้ความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำเพิ่มขึ้น การที่แอมโมเนียในน้ำสูงขึ้นจะทำให้กุ้งขับถ่ายแอมโมเนียได้น้อยลง ก่อให้เกิดการสะสมแอมโมเนียในเลือดและเนื้อเยื่อ ทำให้ค่าพีเอชของเลือดเพิ่มขึ้นและมีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ แอมโมเนียจะทำให้การใช้ออกซิเจนของเนื้อเยื่อสูงขึ้น โดยจะเข้าทำลายเหงือกและความสามารถในการขนส่งออกซิเจน กุ้งจะอ่อนแอและติดเชื้อโรคได้ง่าย แต่ถ้ามีพีเอชลดลง แอมโมเนียอออนจะมีอัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความเป็นพิษของแอมโมเนียจะสูงตามไปด้วย (Boyd, 1982) และเมื่อค่าพีเอชลดลง ความเป็นพิษของแอมโมเนียก็จะลดลง ระดับแอมโมเนียที่ทำให้กุ้งเจริญเติบโตช้าอยู่ในช่วง 0.1 - 0.4 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ถ้าอยู่ในช่วง 0.4 - 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้กุ้งตาย โดยทั่วไประดับแอมโมเนียที่ปลอดภัยสำหรับการเลี้ยงกุ้งควรมีค่าน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร (Brock & Main, 1994) จากรายงานของ พรเลิศ จันทร์รัชกุล และ ชะลอ ลี้มสุวรรณ (2549) ได้ประเมินปริมาณไนโตรเจนที่เติมเข้าไปสะสมอยู่ในที่ส่วนต่าง ๆ ของบ่อเลี้ยงกุ้งระบบปิด ดังแสดงในรูป 2.2



รูปที่ 2.2 ปริมาณไนโตรเจนที่เดินเข้าไปสะสมอยู่ในที่ส่วนต่าง ๆ ของบ่อเลี้ยงกุ้งระบบปิด (พรเลิศ จันทร์รัชกุล และ ชะลอ ลิมสุวรรณ, 2549)

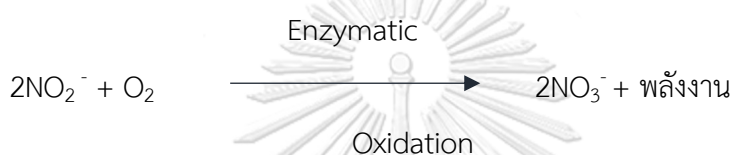
ไนไตรท์ (NO_2^-) เป็นสารประกอบไนโตรเจนรูปแบบหนึ่งเกิดจากการที่สารอินทรีย์จมตัวลงและทับถมที่พื้นบ่อถูกย่อยสลาย โดยแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในระหว่างอนุภาคตะกอนให้เป็นธาตุอาหารพืชต่าง ๆ โดยกระบวนการย่อยสลายจำเป็นต้องอาศัยปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอ สำหรับกระบวนการย่อยสลายก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และทำให้ค่าพีเอชลดลง การย่อยสลายโปรตีนทำให้เกิดแอมโมเนียซึ่งเป็นอันตรายต่อสัตว์และถ้าบริเวณดังกล่าวมีออกซิเจนเพียงพอและมีแบคทีเรียในกลุ่ม nitrifying bacteria ก็อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้ไนไตรท์และไนเตรท(จรรูมาศ เมฆสัมพันธ์, 2548) กระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification) ซึ่งเป็นกระบวนการแปรสภาพแอมโมเนียให้เป็นไนไตรท์ (NO_2^-) และไนเตรท (NO_3^-) ตามลำดับ โดยการทำงานของจุลินทรีย์ ซึ่งกระบวนการนี้จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการ amminization ซึ่งเป็นกระบวนการที่สารประกอบโปรตีนจะสลายตัวคือ ถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายเป็นสารประกอบไนโตรเจนพวก amino compound ต่าง ๆ และในที่สุดจะเป็นเอมีน (amine) และกรดอะมิโน (amino acid) อีกกระบวนการหนึ่งที่เกี่ยวข้องกันคือ กระบวนการ ammonification ซึ่งเกิดต่อเนื่องจาก amminization สารประกอบพวกเอมีนหรือกรดอะมิโนจะเปลี่ยนเป็นแอมโมเนีย แอลกอฮอล์และพลังงาน การแปรสภาพแอมโมเนียจะเกิดขึ้นโดย enzymatic oxidation ซึ่งเป็นกิจกรรมของ nitrifying bacteria ซึ่งเป็นพวกที่ต้องการออกซิเจน กระบวนการแปรสภาพจะมีอยู่ 2 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 NH_3 หรือ NH_4^+ จะถูกออกซิไดซ์เป็นไนไตรท์



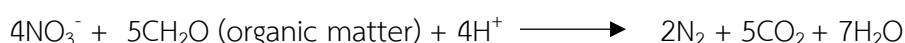
แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการนี้ได้แก่ *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*

ขั้นตอนที่ 2 ไนไตรท์จะถูกออกซิไดซ์เป็นไนเตรท



แบคทีเรียที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ *Nitrobacter*

ไนเตรท ในแหล่งน้ำมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืช ปริมาณไนเตรทจึงสามารถบ่งชี้ถึงกำลังผลิต (productivity) ของแหล่งน้ำได้ แหล่งที่มาของไนเตรทได้มาจากกระบวนการไนตริฟิเคชัน โดยแบคทีเรีย *Nitrobacter* sp. นอกจากนี้ไนเตรทจะเป็นธาตุอาหารที่สำคัญในการควบคุมกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชแล้ว ไนเตรทยังมีบทบาทสำคัญในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์อีกด้วย เนื่องจากไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในลำดับถัดลงมาจากออกซิเจนและมีความสำคัญมากในระดับดินที่การแทรกซึมของออกซิเจนจากน้ำที่อยู่เหนือระดับพื้นบ่อนั้นถูกจำกัด เมื่อปริมาณออกซิเจนลดลงจนเกือบหมด แบคทีเรียในกลุ่ม *Pseudomonas*, *Moraxella*, *Spirillum*, *Thiobacillus* และ *Bacillus* จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (denitrification) โดยกระบวนการนี้จะเกิดเฉพาะในชั้นบาง ๆ ได้ผิวดินซึ่งอยู่ติดกับชั้นที่มีออกซิเจนด้านบน (จารูมาศ เมฆสัมพันธ์, 2548) ดังสมการ



สารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนจากไนเตรทเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและแก๊สไนโตรเจน ซึ่งแก๊สไนโตรเจนที่ถูกสร้างขึ้นจะถูกปล่อยสู่บรรยากาศ

ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ปฏิกิริยานี้จะทำให้ความเป็นกรดของดินลดลง (Boyd, 1995)

ในสถานะที่ไม่มีออกซิเจนแบบที่เรียบางชนิดสามารถใช้ซัลเฟตและสารประกอบซัลเฟอร์ออกไซด์อื่น ๆ เป็นตัวรีดิวซ์ในกระบวนการเมตาบอลิซึมจะได้พวกซัลไฟด์ออกมา ซึ่งซัลไฟด์เป็นไอออนที่แตกตัวอยู่ในสถานะที่สมดุลกับไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งมีค่าพีเอชเป็นตัวกำหนดว่าซัลไฟด์จะอยู่ในรูปไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไฮโดรซัลไฟด์ไอออน (HS^-) หรือไบซัลไฟด์ไอออน (S^{2-}) ซัลไฟด์ที่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำจะอยู่ในรูปของไฮโดรเจนซัลไฟด์หรือแก๊สไข่เน่า โดยมีระดับความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.01-0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความเข้มข้น 1.3 มิลลิกรัมต่อลิตรจะมีผลทำให้กุ้งเกิดอาการช็อกเป็นอัมพาตและจะตายในที่สุด

2.2 คุณภาพน้ำอื่น ๆ ในการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม

คุณภาพน้ำเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในการเพาะเลี้ยงกุ้ง เนื่องจากมีผลต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง ถ้ามีการจัดการคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งไม่ดี จะทำให้กุ้งอ่อนแอ ไม่กินอาหาร และมีอัตราการรอดตายต่ำ (Boyd & Fast, 1992)

ออกซิเจนเป็นปัจจัยที่สำคัญในการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ และเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการทางชีวเคมีต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในน้ำ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำจึงมีผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ โดยปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมีผลต่อการกิน การย่อยอาหาร การเจริญเติบโตและสุขภาพของกุ้ง ดังนั้นหากมีปริมาณออกซิเจนต่ำจะทำให้กุ้งกินอาหารลดลง(กรมประมง, 2547) ถ้าปริมาณออกซิเจนน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตรอาจมีผลทำให้กุ้งตายได้ ปัญหาการขาดออกซิเจนในบ่อเลี้ยงนั้นมักจะพบในบ่อที่ปล่อยกุ้งเลี้ยงในปริมาณมากหรือกุ้งมีอัตราการรอดตายสูงแต่มีเครื่องให้อากาศไม่เพียงพอโดยเฉพาะในช่วงเดือนสุดท้ายของรอบการเลี้ยง ซึ่งมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่ำมาก เนื่องจากมีของเสียและสารอินทรีย์สะสมในบ่อในปริมาณมาก จนทำให้จุลินทรีย์ต่าง ๆ ในบ่อใช้ออกซิเจนละลายน้ำไปเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์และของเสียต่าง ๆ จนมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำไม่เพียงพอต่อการหายใจของกุ้ง ซึ่งปกติแล้วออกซิเจนละลายน้ำที่เหมาะสมในการเลี้ยงกุ้งต้องมีปริมาณมากกว่า 4 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยจะวัดในตอนเช้ามืดซึ่งเป็นช่วงที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำที่สุดในรอบวัน เนื่องจากการใช้ไปในการย่อยสลายของสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ และการหายใจของสิ่งมีชีวิตในบ่อ หลังจากแสงสว่างขึ้นเริ่มมีการสังเคราะห์แสง ปริมาณออกซิเจนจะเพิ่มสูงขึ้นในตอนบ่าย (ชโล ลิมสุวรรณ, 2543; ชโล ลิมสุวรรณ และ พรเลิศ จันทร์รัชชกุล, 2547; Chen,1985) ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลกระทบของปริมาณออกซิเจนต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง (ชลอ ลิมสุวรรณ และ พรเลิศ จันทรรักษ์ชกุล, 2547)

ปริมาณออกซิเจน (มิลลิกรัม / ลิตร)	ผลกระทบต่อกุ้ง
มากกว่า 4	กุ้งเจริญเติบโตดี สารอินทรีย์สลายตัวได้เร็ว
3 - 4	กุ้งเจริญเติบโตช้าลง การสะสมของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น
น้อยกว่า 3	กินอาหารน้อยลง การเจริญเติบโตช้า โอกาสป่วยเพิ่มขึ้น
น้อยกว่า 2	กุ้งจะลอย กุ้งตัวที่อ่อนแอจะลอกคราบแล้วตาย
น้อยกว่า 1	กุ้งจะตาย

กุ้งขาวแวนนาไม่มีความสามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของความเค็มในช่วงกว้างและถ้าความเค็มเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างช้าๆ สามารถปรับตัวอยู่ที่ความเค็มเป็นศูนย์เป็นเวลานานพอสมควรหรือความเค็มที่เพิ่มขึ้นจนถึง 45 ppt แต่ความเค็มที่เหมาะสม คือ 10-30 ppt (ชลอ ลิมสุวรรณ, 2543) (กรมประมง, 2547)

ความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) ของน้ำมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของกุ้งมากเนื่องจากพีเอชของน้ำมีผลต่อคุณสมบัติของน้ำตัวอื่น ๆ อีกเช่น มีผลต่อความเป็นพิษของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น พีเอชของน้ำที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงกุ้งควรอยู่ระหว่าง 7.5 - 8.5 การเปลี่ยนแปลงของพีเอชในบ่อเลี้ยงขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น คุณสมบัติของดิน ค่าอัลคาไลน์นี้ดีการผลิตและการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ พีเอชของน้ำมีผลกระทบต่อกุ้งดังในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบของค่าพีเอชต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง

ระดับพีเอช	ผลกระทบต่อกุ้ง
ต่ำกว่า 5	ความเป็นกรดรุนแรงทำให้กุ้งตายได้
6 - 7	กุ้งเจริญเติบโตช้า บางส่วนตาย
7.5 - 8.5	กุ้งเจริญเติบโตดี
9 - 10	กุ้งเจริญเติบโตช้า บางส่วนตาย
11 - สูงกว่า	ความเป็นด่างรุนแรงทำให้กุ้งตาย

ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำมีอยู่ 2 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยภายนอก เช่น การชะล้างของดินที่เป็นกรดลงสู่บ่อเลี้ยง ฝนตก หรืออาจเกิดจากการไหลของน้ำที่เข้ามาผสมกันระหว่างน้ำที่มีพีเอชสูงหรือต่ำของน้ำในบ่อกับแหล่งน้ำ และปัจจัยภายใน เช่น การผลิตและการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ของสิ่งมีชีวิตในบ่อเลี้ยง จากการหายใจการสังเคราะห์แสง รวมถึงการเน่าสลายของสารอินทรีย์ที่พื้นบ่อ ซึ่งจะส่งผลต่อปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ และมีผลทำให้ค่าพีเอชของน้ำเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ค่าความกระด้างของน้ำ มีผลในการยับยั้งการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอช เพราะในขณะที่มีการสังเคราะห์แสง ค่าความกระด้างในรูปของแคลเซียมจะช่วยตกตะกอนคาร์บอเนตที่เกิดในกระบวนการสังเคราะห์แสงด้วย (ชลอ ลัมสุวรรณ, 2543)

พีเอชของน้ำที่เหมาะสมแก่การเลี้ยงกุ้งควรอยู่ระหว่าง 7.5 - 8.5 โดยในช่วงเช้าควรมีค่าพีเอชต่ำสุดไม่ต่ำกว่า 7.5 และในช่วงบ่ายควรมีค่าพีเอชสูงสุดไม่เกิน 8.5 แต่ค่าความแตกต่างของพีเอชในรอบวันไม่ควรมากกว่า 0.5 การเปลี่ยนแปลงของพีเอชในบ่อเลี้ยงกุ้งขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น คุณสมบัติของดิน ค่าความเป็นด่าง การผลิตและการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ ซึ่งส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับปริมาณแพลงก์ตอนพืช (ชลอ ลัมสุวรรณ และ พรเลิศ จันทร์รัชกุล, 2547) โดยค่าพีเอชต่ำกว่า 4 มีความเป็นกรดสูง ในขณะที่ค่าพีเอชมากกว่า 11 มีความเป็นด่างสูง ซึ่งจะส่งผลให้สัตว์น้ำตาย พีเอชที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำควรอยู่ระหว่าง 6 - 9 จะส่งผลต่อการเจริญเติบโตที่ดีที่สุด (Boyd & Tucker, 1998)

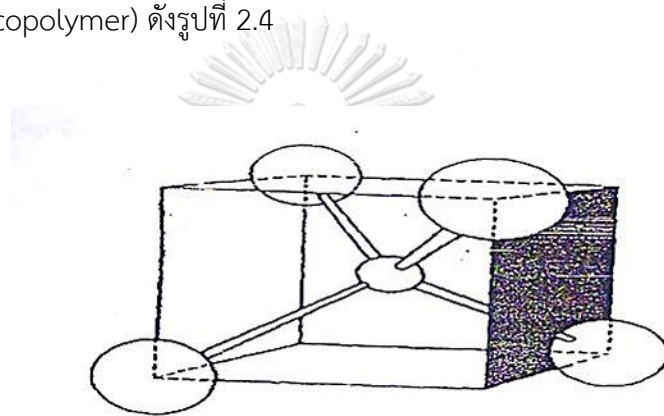
ความแตกต่างมีความสำคัญมากในการเพาะเลี้ยงกุ้ง ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการรอดตายและการเจริญเติบโตของกุ้งทะเลทุกชนิด ความแตกต่างของน้ำที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำควรอยู่ในช่วง 100 - 120 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทั่วไปการรักษาระดับความแตกต่างให้คงที่นั้นจะใช้วัสดุปูนในกลุ่มคาร์บอเนต ส่วนการเพิ่มความแตกต่างอาจใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตหรือโซเดียมคาร์บอเนตขึ้นอยู่กับระดับพีเอชของน้ำ

อุณหภูมิจะส่งผลต่อพฤติกรรมการกินอาหารของกุ้ง โดยกุ้งที่ถูกเลี้ยงที่อุณหภูมิของน้ำต่ำ ๆ (24 ± 1 และ 26 ± 1 องศาเซลเซียส) จะกินอาหารในแต่ละมื้อในปริมาณที่น้อยกว่ากุ้งที่ถูกเลี้ยงที่อุณหภูมิ 30 ± 1 , 32 ± 1 และ 34 ± 1 องศาเซลเซียส (ชลอ ลัมสุวรรณ, นิตี ชูเชิด, สุธี วงศ์มณีประทีป, สาธิต ประเสริฐศรี, เกศินี หลายสุทธิสาร, ปัทมา วิริยพัฒนทรัพย์, จริยาวดี สุริยพนธ์, และ แก้วดา ลัมแสง, 2552) นอกจากนี้อุณหภูมิของน้ำยังส่งผลต่อปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำด้วย เมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงขึ้นปริมาณออกซิเจนละลายน้ำจะลดลง นอกจากนี้อุณหภูมิที่สูงขึ้นยังมีผลทำให้สารพิษประเภทต่าง ๆ เช่น ยากำจัดศัตรูพืชและโลหะหนักมีความเป็นพิษรุนแรงมากขึ้น ทั้งนี้จะช่วยเร่งให้มีการดูดซึมและการแพร่กระจายของสารพิษเข้าสู่ร่างกายได้เร็ว และทำให้แอมโมเนียในรูปที่เป็นพิษ (un-ionized ammonia) แตกตัวเพิ่มมากขึ้น (Boyd, 1982)

2.3 ซีโอไลต์ (Zeolite)

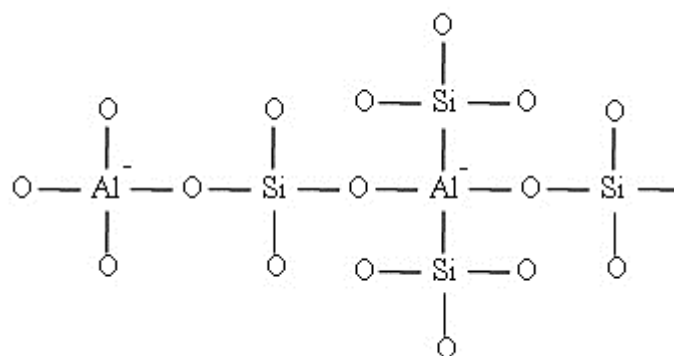
2.3.1 นิยามของซีโอไลต์

ซีโอไลต์ คือ ผลึกของอะลูมิโนซิลิเกตที่มีผลึกของโลหะอัลคาไลน์ หรืออัลคาไลน์เอิร์ท ซึ่งโดยมากจะเป็นโลหะโซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) สตรอนเทียม (Sr) และแบเรียม (Ba) โดยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์จะมีลักษณะเป็นโครงสร้าง 3 มิติของอะลูมิเนียม-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (AlO_4) และซิลิกอน-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (SiO_4) ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งสามารถประกอบกันเป็นอะลูมิโนซิลิเกต โดยการเชื่อมต่อของออกซิเจนอะตอมแบบไม่สิ้นสุด คือเป็นโคพอลิเมอร์ (copolymer) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 รูปทรงเตตระฮีดรอลของออกซิเจนโคออร์ดิเนตกับซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมในหน่วยโครงสร้างปฐมภูมิของซีโอไลต์ (Breck, 1974)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2.4 หน่วยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์ เตตระฮีดรอลสองหมู่ของ $\text{SiO}_4/\text{AlO}_4$

สูตรอย่างง่ายของซีโอไลต์ คือ



n คือ วาเลนซีของแคทไอออน (M) ส่วนมากมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 2 ของโลหะอัลคาไลน์ หรือ อัลคาไลน์เอิร์ท

x คือ จำนวนโมลของ SiO_2 โดยมากจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2

y คือ จำนวนโมลของน้ำที่อยู่ในช่องว่างของผลึกซีโอไลต์

สูตรแสดงหน่วยเซลล์ของซีโอไลต์



n คือ วาเลนซีของแคทไอออน (M)

w คือ จำนวนโมลของน้ำต่อหน่วยเซลล์

x+y คือ จำนวนรูปทรงเตตระฮีดรอลทั้งหมดของหน่วยเซลล์

y/x มักจะมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 5 โดยขึ้นกับโครงสร้าง

ซิลิกอน-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (SiO_4) จะมีประจุลบสี่และอะลูมิเนียม-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (AlO_4) มีประจุเป็นลบห้า การเชื่อมต่อกันของซิลิกอน-ออกซิเจนเตตระฮีดรอลกับอะลูมิเนียม-ออกซิเจนเตตระฮีดรอลเป็นลักษณะโครงสร้างตาข่าย จึงทำให้เกิดประจุลบขึ้น เนื่องจาก Al^{3+} แทนที่ Si^{4+} ในโครงสร้างซึ่งถูกทำให้สมดุลโดยประจุบวกจากแคทไอออนของโลหะอัลคาไลน์ หรืออัลคาไลน์เอิร์ท โดย Breck (1974) และ Dyer (1988) ได้อธิบายไว้ว่าซีโอไลต์สามารถเกิดขึ้นได้ 2 วิธี

1) ซีโอไลต์ธรรมชาติ (natural zeolite)

เป็นซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยกระบวนการ hydrothermal ของสารละลายใต้ผิวโลก ที่มีองค์ประกอบของอะลูมินา (alumina) และซิลิกา (silica) ภายใต้สภาวะเป็นเบสอย่างแรง (มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ที่เกิดจากการชะล้างของน้ำฝนผ่านชั้นหินลงมา) ภายใต้อุณหภูมิ 70 - 350 องศาเซลเซียสและความดันค่อนข้างสูงเป็นเวลานานจนก่อตัวเป็นโครงสร้างซีโอไลต์ ส่วนมากซีโอไลต์ชนิดนี้จะพบในบริเวณที่เป็นหินภูเขาไฟ ได้พื้นมหาสมุทร น้ำพุร้อน ธารน้ำจากแหล่งภูเขาไฟ หรือพื้นผิวดินบางแห่ง เราสามารถแบ่งชนิดของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติตามอุทกศาสตร์ ได้ดังนี้ คือ

- Open Hydrologic Systems ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของน้ำใต้ดินที่ไหลผ่าน porous pyroclastic ซึ่งทำปฏิกิริยากับ vitric ash

- Hydrothermal Systems ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากระบบที่มีอัลคาไลน์กับสารละลายกรดอ่อน การตกตะกอนถูกกำหนดจากปัจจัยของอุณหภูมิ ความสามารถในการเปียกได้ของแร่หินและลักษณะของของไหลที่ไหลผ่าน ในส่วนที่ต้นและเย็นที่สุดจะเกิดซีโอไลต์ชนิด mordenite และ clinoptilolite สำหรับในส่วนที่ลึกและร้อนกว่าจะเกิดซีโอไลต์ชนิด analcime และ laumontite

2) ซีโอไลต์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมี (Synthetics Zeolites) ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของเบสิกออกไซด์ต่าง ๆ เช่น AlO_2 , SiO_2 , Na_2O , K_2O เป็นต้น ในระบบที่มีน้ำ เพื่อให้ได้ซีโอไลต์ที่มีผลึกและการสังเคราะห์สามารถทำให้เกิดขึ้นได้ทั้งในลักษณะที่เป็นเจล (Gelation) เป็นรูพรุน (porous) และลักษณะที่คล้ายเม็ดทราย (Sandlike) ซึ่งเป็นประโยชน์ในการที่จะได้ซีโอไลต์ที่มีองค์ประกอบและโครงสร้างตามวัตถุประสงค์การใช้งาน

ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมีวิธีการเรียกชื่อได้หลายวิธี เช่น วิธีเรียกชื่อคล้ายระบบของ IUPAC โดยเรียกชื่อเป็นสารประกอบเชิงซ้อน 1 หน่วยเซลล์ เช่น

- Analcime ($Na_{16}(AlO_2)_{16}(SiO_2)_{32} \cdot 16H_2O$) เรียกว่า โซเดียม-16-อะลูมิเนียม-32-ซิลิกेट-16-น้ำ

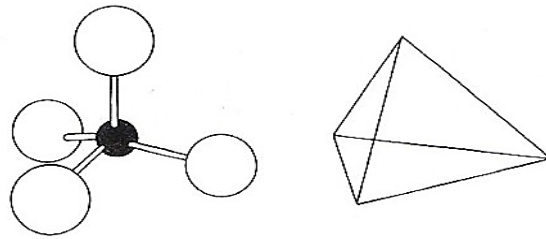
- Jadeite ($Na_4Al_4Si_8O_{24}$) เรียกว่า โซเดียม-4-อะลูมิเนียม-8-ซิลิกेट

- Zeolite A ($Na_{12}(AlO_2)_{12}(SiO_2)_{12} \cdot 27H_2O$) เรียกว่า โซเดียม-12-อะลูมิเนียม-12-ซิลิกेट-27-น้ำ

2.3.2 การแบ่งประเภทของซีโอไลต์ตามลักษณะโครงสร้าง

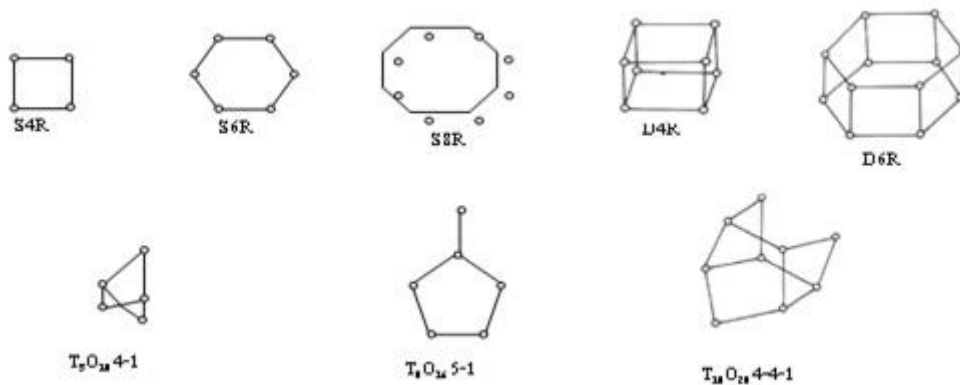
1) หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary building units) เป็นหน่วยที่เล็กที่สุด มีรูปร่างเป็นเตตระฮีดรอลของซิลิกอนเตตระออกไซด์ (SiO_4)⁴⁻ หรืออะลูมิเนียมเตตระออกไซด์ (AlO_4)⁵⁻ ดังรูปที่

2.5



รูปที่ 2.5 หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิของซีโอไลต์ (Breck, 1974)

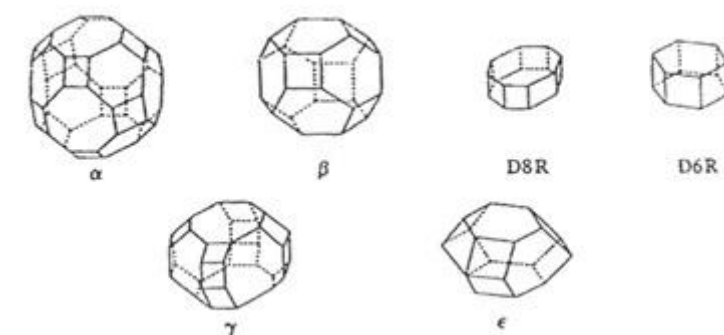
2) หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary building units) เกิดจากหน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ เชื่อมต่อกันเป็นรูปร่างวงเหลี่ยมต่าง ๆ อาจเป็นวงเดี่ยว เช่น Single 4-Ring (S4R) Single 6-Ring (S6R) Single 8-Ring (S8R) หรือต่อกันเป็นวงคู่ เช่น Double 4-Ring (D4R) และ Double 6-Ring (D6R) หรือต่อเป็นโครงข่ายที่ซับซ้อน เช่น Complex 4-1 Complex 5-1 และ Complex 4-4-1 ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์ (Breck, 1974)

3) หน่วยโครงสร้างหลายหน้า (Polyhedral units) เป็นรูปทรงขนาดใหญ่ที่สมมาตรได้จาก โครงสร้างปฐมภูมิหลายโครงสร้างต่อกันเป็นทรงที่สลับซับซ้อนยิ่งขึ้น เช่น

- รูปทรงเหลี่ยมแปดหน้า หรือ β (truncated octahedral type)
- รูปทรงยี่สิบหกหน้า หรือ α (truncated cubooctahedral)
- รูปทรงสิบแปดหน้า หรือ γ (18-hedral)
- รูปทรงสิบเอ็ดหน้า หรือ ϵ (11-hedral) แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะหน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าขนาดใหญ่ของซีโอไลต์ (Breck, 1974)

2.3.3 การสังเคราะห์ซีโอไลต์

Breck (1974) ได้แนะนำองค์ประกอบหลักของการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ดังนี้

องค์ประกอบหลักของการสังเคราะห์ซีโอไลต์

1) แหล่งของอะลูมิเนียม การสังเคราะห์ซีโอไลต์ในการทดลอง โดยทั่วไปจะใช้สารประกอบอะลูมิเนียม (Aluminium Compound) เป็นสารตั้งต้น เช่น สารประกอบโซเดียมอะลูมิเนต (Sodium Aluminate Compound) อะลูมิเนียมอัลคอกไซด์ (Aluminium Alkoxide) เกลืออะลูมิเนียม (Aluminium Salt) และแหล่งแร่อะลูมิเนียมตามธรรมชาติ เช่น ถ้ำลอยถ่านหิน ดินเหนียว

2) แหล่งของซิลิกอน โดยทั่วไปจะใช้สารละลายของซิลิกา เช่น ซิลิกาโซล (Silica Sol) ซิลิกาเจล (Silica Gel) แร่ควอทซ์ (Quartz) เป็นต้น

3) แหล่งของไอออนบวก ได้แก่ ไอออนของโลหะหมู่ IA และหมู่ IIA ที่อยู่ในรูปของไอออนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Ion) นอกจากนี้สามารถได้จากสารประกอบออกไซด์ (Oxide Compound) และเกลือของโลหะหมู่ IA และหมู่ IIA ได้

4) สารเคมีอื่น ๆ เช่น สารประกอบอินทรีย์ (Organic Compound) ที่แตกตัวไอออนบวก ซึ่งเรียกว่าสารโครงสร้าง (Template) ในเจลเพื่อช่วยในการตกผลึกของซีโอไลต์ เช่น เตตระเอทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TEAOH) และเตตระโพรพิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (TPABr) เป็นต้น

ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล องค์ประกอบของอะลูมินา ซิลิกา ประจุบวก สารอินทรีย์และน้ำจะรวมตัวกันเป็นเจล ซึ่งอยู่ในสภาพสารละลายต่างอิ่มตัวยิ่งยวด (an alkaline super-saturated solution) แปลงสภาพเป็นโครงสร้างรูพรุนของผลึกอะลูมิโนซิลิเกต (microporous crystalline aluminosilicate) ซึ่งเรียกกระบวนการทางเคมีนี้ว่า กระบวนการซีโอไลไทเซชัน (zeolitization) เป็นการกระตุ้นโดยความร้อนภายในช่วงเวลาที่เหมาะสม อุณหภูมิที่ใช้โดยปกติจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงเพื่อที่จะให้ได้ผลผลิตที่สูง

Weitkamp, Karge, Pfeifer, and Holderich (1994) ได้อธิบายถึงขั้นตอนสำคัญในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ไว้ ดังนี้

1) ระยะเวลาการปล่อยให้ตกผลึก (The ageing period) หมายถึง ช่วงเวลาหรือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายหลังการเตรียมเจล โดยที่อุณหภูมิของเจลมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของการเกิดผลึก (crystallization temperature) สิ่งหนึ่งที่สำคัญในระหว่างระยะเวลาการปล่อยให้ตกผลึก คือ การละลายหรือดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) ของซิลิกาด้วยสารละลายต่าง ซึ่งการละลายดังกล่าวเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของซิลิกา ผลิตภัณฑ์เริ่มแรกอยู่ในรูปของโมโนเมอร์ซิลิเกตแอนไอออน (monomeric silicate anions) หลังจากนั้นโมโนเมอร์ซิลิเกตแอนไอออนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นโอลิโกเมอร์ (oligomeric species) โดยปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบควบแน่น (condensation-polymerization) สารละลายต่างดังกล่าวประกอบไปด้วยอะลูมิเนียมไอออนลบ ได้แก่ $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ (tetrahedral $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ species) ซึ่งโอลิโกเมอร์ซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับโมโนเมอร์ $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ เกิดเป็นโครงสร้างอะลูมิโนซิลิเกต

2) กลไกการเกิดผลึก (Mechanism of Crystallization) แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

- การอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturation) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นระหว่างช่วงของการตกผลึก (ageing) และชัดเจนมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ถูกละลาย (dissolved components: aluminosilicate species) เพิ่มมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารละลายจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของสารละลายจากสารละลายที่มีเสถียรภาพไปเป็นสารละลายที่ความเสถียรภาพไม่แน่นอน (metastable solution) และสุดท้ายอยู่ในสภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ (labile solution)

- การเกิดนิวเคลียส (Nucleation) จะจำแนกเป็นการเกิดนิวเคลียสขั้นปฐมภูมิ (primary nucleation) ของสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด สามารถแบ่งออกเป็น การเกิดนิวเคลียสแบบเนื้อเดียวและแบบเนื้อผสม (homogeneous and heterogeneous nucleation) ซึ่งการเกิดนิวเคลียสแบบเนื้อ

ผสมเกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำของสิ่งแปลกปลอมที่มีอยู่ในสารละลาย (impurities or foreign particles) ต่อมาการเกิดนิวเคลียสขั้นทุติยภูมิ (secondary nucleation) เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำของผลึกที่เกิดขึ้น

- การก่อตัวผลึกซีโอไลต์ (Crystal Growth) เริ่มเกิดขึ้นหลังจากการเกิดนิวเคลียส โดยนิวเคลียสที่เกิดจากการเพิ่มหรือควบแน่นขององค์ประกอบข้างต้นกลายเป็นผลึกซีโอไลต์ที่สมบูรณ์ ลักษณะของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ซึ่งประกอบไปด้วยอัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ของสารตั้งต้น อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไป ช่วงเวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราเร็วในการกวน และปริมาณของไอออนบวกของทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ปะปนอยู่ โดยปกติการก่อตัวของซีโอไลต์มีความซับซ้อนมาก แต่แนวความคิดหลักนั้นอยู่ที่ว่า ไอออนบวกที่มีอยู่นั้นจะช่วยทำให้เกิดแรงกระทำต่อแม่แบบ (templating action) ได้ดีขนาดไหน ซึ่งเป็นการนำสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์มาใช้เป็นแม่แบบหรือแม่พิมพ์เพื่อให้อะตอมของสารที่ต้องการให้เกิดผลึกเข้ามาเกาะ ทำให้โครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นมีลักษณะโครงสร้างเหมือนโครงสร้างของแม่แบบนั้น ๆ ในขั้นตอนสุดท้ายของการสังเคราะห์นั้นสารที่นำมาเป็นแม่แบบจะถูกกำจัดออกไปเหลือแต่โครงสร้างผลึกของสารที่ต้องการเท่านั้น (Weitkamp et al., 1994)

2.4 เถ้าลอยถ่านหิน (Fly Ash)

เถ้าลอยถ่านหินเกิดจากการนำถ่านหินมาบดละเอียดและส่งเข้าไปในเตาเผาที่มีอากาศพอเพียง โดยเถ้าลอยถ่านหินเป็นเถ้าที่ถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกมาจากปล่องควัน และถูกจับไว้โดยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) หรืออาจมาจากการดักจับด้วยถุงกรองฝุ่น (Bag Filter)

2.4.1 สารที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหิน

สารที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินประกอบไปด้วยแร่อนินทรีย์ที่อยู่ในถ่านหิน และสารอินทรีย์ที่ถูกเผาไหม้ไม่หมด แร่อนินทรีย์ที่ได้จะอยู่ในรูปของเถ้าลอย โดยส่วนมากการเผาถ่านหินจะเกิดเถ้าลอยประมาณร้อยละ 3 - 30 ของปริมาณถ่านหินที่ใช้ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสารบางส่วนจะเกิดการระเหยและมีการเปลี่ยนแปลงต่างระหว่างการเผาไหม้ เช่น ดินเหนียวและหินดินดานจะสูญเสียน้ำไปจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) เกิดการสูญเสียคาร์บอนจากการสลายตัว ซึ่งจะให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกมา เหล็กไพไรต์ (iron pyrites) จะเปลี่ยนไปเป็นเหล็กออกไซด์ (iron oxide) และจะให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ออกมาซึ่งจะถูกปล่อยไปในบรรยากาศ นอกจากนี้แคลเซียมออกไซด์อิสระจะเกิดการจับตัวใหม่เกิดเป็นคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ในถ่านหินจะมีสารแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ส่วนในเถ้าลอยถ่านหินจะมีซัลเฟอร์ในรูปแคลเซียม

ซัลเฟต (CaSO_4) แล้วย่อยเหล่านี้ประกอบด้วยซิลิกา (Si) อะลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) และหินปูนเป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบอื่น ๆ เช่น แมกนีเซียม (Mg) ไทเทเนียม (Ti) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) ซัลเฟอร์ (S) และสารประกอบแอลคาไลน์ นอกจากนี้ยังมีหินปูนกับแมกนีเซียมที่เกิดจากสารพวกคาร์บอเนตและซัลเฟต ระดับปริมาณแร่ล่อยในถ่านหินจะมีช่วงปริมาณที่กว้างมาก โดยจะแปรเปลี่ยนไปตามสถานที่ หรืออาจแตกต่างกันเนื่องจากระดับชั้นของพื้นผิวในพื้นที่เดียวกัน หรือมีความต่างกันในเมืองที่ต่างกัน

2.4.2 การจัดรูปของแร่ล่อยขณะทำการเผาไหม้

ขณะทำการเผาไหม้ แร่ล่อยจะเกิดการจัดรูปออกเป็น 3 ประเภท คือ

1) แอ่หนัก เป็นส่วนที่อนุภาคของแอ่ไหลอมมารวมกันจนหนักพอที่จะตกออกนอกเตาไอน้ำซึ่งมีอนุภาคใหญ่กว่าแร่ล่อย และมีผิวหยาบกว่า มีสีอยู่ในช่วงเทาถึงดำ มีลักษณะเป็นเหลี่ยมที่มีมุมหลายมุม เนื่องจากความพรุนของผิวอนุภาค แอ่หนักเหล่านี้สามารถจับตัวกันก่อให้เกิดสแลก (Slag) ซึ่งสแลกเหล่านี้จะมีสีดำ มีรูปร่างหลายมุมและมีสมบัติของซิลิกาด้วย สำหรับขนาดของแอ่หนักนั้นอยู่ระหว่าง 0.03 - 30 มิลลิเมตร แต่โดยส่วนใหญ่แล้วจะมีขนาดต่ำกว่า 2 มิลลิเมตร

2) ไอ เป็นส่วนของถ่านหินที่ระเหยออกระหว่างการเผาไหม้ บางส่วนของไอนี้จะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ และบางส่วนจะควบแน่นแล้วไปเกาะบนผิวของแร่ล่อยซึ่งจะถูกดักจับที่เครื่องดักจับแร่ล่อย ปริมาณของไอที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ ความเข้มข้นและสมบัติของสารต่างๆ ในถ่านหินนั้น

3) แร่ล่อย เป็นอนุภาคของแข็งซึ่งล่อยอยู่ในแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้และล่อยออกมาจากหม้อต้มไอน้ำพร้อมกับแก๊สอื่น ๆ แร่ล่อยส่วนใหญ่จะถูกเก็บโดยเครื่องดักทางกล (Mechanical collectors) หรือเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต ซึ่งอนุภาคขนาดเล็กของแร่ล่อยจะผ่านเครื่องดักจับและถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศไป แร่ล่อยจะมีปริมาณร้อยละ 10 - 85 ของปริมาณแอ่ทั้งหมด และมีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลม โดยมากจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 - 100 ไมครอน มีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีดำซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณระดับคาร์บอนในถ่านหิน

จากการวิเคราะห์ทางธรณีวิทยาพบว่า แร่ล่อยมีส่วนประกอบของซิลิกอนเป็นส่วนใหญ่ โดยมีปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก อนุภาคของแร่ล่อยที่มีผิวเรียบจะมีส่วนประกอบของซิลิกอนสูงกว่าแร่ล่อยที่มีผิวหยาบกว่า และส่วนประกอบอื่น ๆ ได้แก่ อะลูมินา แมกเนไทต์ เฮมาไทต์ คาร์บอน มุลไลต์ และควอตซ์

สิ่งที่น่าสนใจของแร่ล่อย คือ ความเป็นอนุภาคเบาที่เรียกว่า เซโนสเฟียร์ (cenospheres) ซึ่งมีปริมาณร้อยละ 20 ของแร่ล่อย อนุภาคเหล่านี้มีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีส่วนประกอบของซิลิกेट

ไนโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 20 - 200 ไมครอน ถ้าเหล่านี้มีลักษณะลอยตัวทำให้เกิดปัญหาในการกำจัด

2.4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดักเก็บเถ้าลอยถ่านหิน

1) เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitators) วิธีการควบคุมนี้ใช้ในโรงผลิตกระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่ ซึ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ระหว่างแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ผ่านอนุภาคของเถ้าลอยจะได้รับประจุไฟฟ้าลบ และจะถูกดึงดูดให้เกาะบนขั้วบวก ในทางปฏิบัติเครื่องนี้จะต้อง

2) ถุงกรอง (Bag Filter) ถุงนี้จะทำจากผ้าที่สามารถดักจับอนุภาคเถ้าลอยได้ ซึ่งถุงนี้มักจะใช้หลายถุงในโครงสร้างหนึ่งจึงเรียกว่า Baghouse ถุงนี้จะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเครื่องตกตะกอน และถูกนำไปใช้ในโรงผลิตกระแสไฟฟ้าบางแห่ง

3) ไซโคลน (Cyclone collector) เครื่องไซโคลนจะทำงานโดยการหมุนวนอย่างปั่นป่วนของแก๊สจนทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง ซึ่งจะทำให้เกิดการแยกของอนุภาคที่หนักออกจากแก๊ส เครื่องไซโคลนควรมีประสิทธิภาพร้อยละ 70 - 85 เมื่อใช้กับหม้อไอน้ำที่ใช้ถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิง เครื่องไซโคลนไฟบอยเลอร์ (Cyclone-Fired Boiler) จะทำให้เกิดเถ้าที่มีขนาดเล็กจำนวนมากกว่าหน่วยที่ใช้ถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นเครื่องไซโคลนจะมีประสิทธิภาพต่อยกกว่าเครื่องไซโคลนไฟบอยเลอร์

2.4.4 ชนิดของเถ้าลอยถ่านหินเมื่อแยกตามส่วนประกอบทางธรรมชาติ

เถ้าลอยแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามส่วนประกอบทางธรรมชาติ คือ เถ้าลอยบิทูมินัสและเถ้าลอยลิกไนต์ ความแตกต่างของเถ้าลอยทั้งสองชนิด คือ ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์จะหยาบกว่า คือ มีช่วงกว้างกว่า ค่าดัชนีหักเหของเถ้าลอยลิกไนต์มีค่าสูงกว่า และเถ้าลอยลิกไนต์จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) รวมกับแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) มากกว่าเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) ในทางตรงกันข้ามสำหรับเถ้าลอยบิทูมินัสจะมีปริมาณเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) มากกว่าปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) รวมกับแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ถ่านหินที่มีเถ้าลอยประเภทบิทูมินัสจะเป็นถ่านหินยุคเก่าซึ่งอยู่ในช่วงอายุไทรแอสสิก ส่วนถ่านหินที่มีเถ้าลอยประเภทลิกไนต์จะเป็นถ่านหินยุคใหม่จะอยู่ในช่วงอายุจูราสสิก

2.4.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหิน

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหินจะขึ้นกับปัจจัยทางด้านธรณีวิทยา และด้านภูมิศาสตร์ที่สัมพันธ์กับการเกิดถ่านหินเป็นหลัก แต่อาจขึ้นอยู่กับภาวะการเผาไหม้ และประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมมลภาวะทางอากาศ สารอนินทรีย์ที่เป็นส่วนประกอบในเถ้าลอยจะเป็นไปตามชนิด

ของหินและดิน คือ มีออกไซด์ของซิลิกอน (Si) อะลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) และแคลเซียม (Ca) คิดเป็นร้อยละ 95 - 99 ของส่วนประกอบทั้งหมด และมีส่วนประกอบย่อยอื่น ๆ ได้แก่ แมกนีเซียม (Mg) ไทเทเนียม (Ti) โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) ซัลเฟอร์ (S) และฟอสฟอรัส (P) คิดเป็นร้อยละ 0.5-3.5 ของส่วนประกอบทั้งหมด นอกจากนี้ถ้าลวยยังมีส่วนประกอบของธาตุต่าง ๆ ที่มีปริมาณน้อยๆ (trace element) ประมาณ 20 - 50 ธาตุ

องค์ประกอบทางเคมีของถ้าลวยในประเทศต่าง ๆ ตามที่ได้รวบรวมและสรุปไว้ พบว่าองค์ประกอบของถ้าลวยจากแหล่งต่าง ๆ จะแตกต่างกันมาก ซึ่งเป็นผลจากความแตกต่างระหว่างถ่านหินที่ใช้ และประสิทธิภาพของเตาเผาที่ใช้ในแต่ละแหล่ง โดยเฉพาะแล้วถ้าลวยจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญดังต่อไปนี้

- Silica (SiO₂) ร้อยละ 41 - 58 โดยน้ำหนัก
- Alumina (Al₂O₃) ร้อยละ 21 - 27 โดยน้ำหนัก
- Iron Oxide (Fe₂O₃) ร้อยละ 4 - 17 โดยน้ำหนัก
- Lime (CaO) ร้อยละ 4 - 6 โดยน้ำหนัก

ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์ของแร่ชนิดต่าง ๆ ที่ผสมอยู่ในถ่านหิน เช่น MgO, SO₃, Na₂O และ K₂O เป็นต้น จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของถ้าลวยนั้นจะคล้ายคลึงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาก ทั้งนี้เนื่องจากทั้งถ้าลวยและปูนซีเมนต์ต่างก็เป็นสารที่เกิดจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง

เนื่องด้วยองค์ประกอบส่วนใหญ่ของถ้าลวยเป็นซิลิกาและอะลูมินา ถ้าลวยจึงสามารถรวมตัวกับปูนขาว (Lime) ได้เมื่อมีน้ำเป็นส่วนประกอบ และทำให้เกิดสารเชื่อมประสาน (cementitious material) จึงถือได้ว่าถ้าลวยเป็นวัสดุป้อโซลัน (pozzolan) ชนิดหนึ่ง ปฏิกิริยาทางเคมีที่ทำให้เกิดสารเชื่อมประสาน วิชาญ ภูพัฒน์ (2526) แสดงได้ดังนี้คือ



2.4.6 สมบัติเชิงวิศวกรรมของถ้าลวยถ่านหิน

ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์ (2526) ได้อธิบายไว้ว่า ถ้าลวยถ่านหินมีลักษณะพิเศษเฉพาะ คือ มีความถ่วงจำเพาะต่ำ มีการกระจายของขนาดอนุภาคค่อนข้างสม่ำเสมอและมีความชื้นเหนียว (plasticity) ต่ำค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ของถ้าลวยจะแปรเปลี่ยนไปตามองค์ประกอบทางเคมี โดยเฉพาะถ้าลวยในประเทศญี่ปุ่นมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.14 ใน

ประเทศอเมริกามีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.40 และในประเทศอังกฤษมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.10 อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยนั้นต่ำกว่าค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินโดยทั่วไปที่ปรกติอยู่ในช่วง 2.60 - 2.80 จากการสังเกตโดยใช้กล้องขยายพบว่าเม็ดเถ้าลอยมีลักษณะเป็นเม็ดกลม และมีหลักฐานที่ทำให้เชื่อว่าเม็ดกลมเหล่านี้ด้านในจะกลวง ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เถ้าลอยมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าเม็ดดินโดยทั่วไป

เนื่องด้วยเถ้าลอยเกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินที่ถูกบด ขนาดของเม็ดเถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับความละเอียดของผงถ่านหิน และอุณหภูมิขณะเกิดการเผาไหม้ โดยทั่วไปพบว่าเม็ดเถ้าลอยมีขนาดอยู่ในช่วงขนาดกลางถึงหยาบ

ในสภาพปกติเถ้าลอยจะเป็นฝุ่นที่กระจายได้ง่ายเมื่อแห้ง และจะแฉะเป็นเลนเมื่ออิมตัวด้วยไอน้ำ แต่ถ้าผสมน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสมและได้รับการบดอัดที่เพียงพอแล้วเถ้าลอยจะเกาะตัวเป็นก้อนแข็ง และมีกำลังอัด (unconfined compressive strength) สูง (ตารางที่ 2.3)

การจัดรูปของเถ้าถ่านหินระหว่างส่วนของเถ้าลอยกับเถ้าหนักจะขึ้นอยู่กับชนิดของเตาเผา ชนิดของถ่านหิน อุณหภูมิของการหลอมเถ้า และชนิดของหม้อต้ม เตาเผาเป็นปัจจัยแรกที่สำคัญในการเกิดการแยกส่วนของเถ้าลอยและเถ้าหนัก เช่น เตาเผาชนิดสครับเบอร์ (Scrubbers) จะมีการปล่อยเถ้าลอยออกมาน้อยที่สุด

ตารางที่ 2.3 สรุปลสมบัติเชิงวิศวกรรมของเถ้าลอยทั่วไป (ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์, 2526)

สรุปลสมบัติเชิงวิศวกรรมของเถ้าลอยโดยทั่วไป	
Specific Gravity	1.901 - 2.69
Specific Surface Area (cm ² /g)	1220 - 8100
Optimum Water Content (% , standard compaction test)	18 - 45
Maximum Dry Unit Weight (kN/m ³)	9 - 16

ในหน่วยไซโคลอนอุณหภูมิของเครื่องจะสูงกว่าจุดหลอมเหลวของเถ้าประมาณร้อยละ 80 - 85 ของเถ้าที่จะหลอม และรวมตัวกันเกิดเป็นสแลก ส่วนหนึ่งของเถ้าลอยปริมาณไม่มากที่เกิดจากหน่วยไซโคลอนจะมีลักษณะอนุภาคละเอียด (เล็กกว่า 10 ไมครอน) ในหน่วยพัลเวไรซ์ (Pulverized coal) มีเถ้าลอยเกิดขึ้นร้อยละ 65 - 80 และเกิดเถ้าหนักร้อยละ 20 - 35 สำหรับอุณหภูมิการหลอมของเถ้าเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง เถ้าที่มีอุณหภูมิการหลอมต่ำมีแนวโน้มที่จะหลอมในหม้อต้มไอน้ำ และสะสมตัวออกมาในรูปของเถ้าหนักนั่นคือ หม้อต้มไอน้ำที่กันเปียกจะก่อให้เกิดเถ้าหนักมากกว่าหม้อต้มไอน้ำที่กันแห้ง

2.4.7 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมบางประการที่เกิดจากเถ้าลอย

ผลกระทบต่อสุขภาพ สำหรับในเมืองถ่านหินนั้น สารที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ประกอบ ด้วยอะลูมิเนียมซิลิเกต และซิลิกาไดออกไซด์ รวมถึงสารประกอบออกไซด์ของโซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม และในถ่านหินนั้นยังมีซิลิกาอิสระที่เรียกว่า α -quartz จากส่วนประกอบนี้อาจจะเป็นอันตรายต่อระบบหายใจได้ หากมีการเข้าไปสะสมภายในร่างกายในปริมาณมาก โดยส่วนของ α -quartz อาจเป็นสาเหตุให้เกิดโรคปอดอักเสบ ถ้าหากอยู่ในภาวะที่เสี่ยงคือ การทำงานอยู่ภายใต้สภาวะที่มี α -quartz เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้

2.4.8 ประโยชน์ของเถ้าลอยถ่านหิน

จากรายงานของ อีริชาติ รื่นไกรฤกษ์ และ วิชาญ ภูพัฒน์ (2526) ได้กล่าวถึงประโยชน์ของเถ้าลอยถ่านหินไว้ดังนี้

1) การใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุถม (Fill Material)

เมื่อผสมน้ำให้เข้ากับเถ้าลอยในอัตราส่วนที่เหมาะสม และทำการบดอัดอย่างดีแล้วเถ้าลอยจะเป็นวัสดุที่มีความสามารถรับน้ำหนักได้สูงและเกิดการยุบตัวน้อย ค่าสัดส่วนของน้ำหนักสูงสุดที่เถ้าลอยสามารถรับได้ในการบดอัดเถ้าลอยในห้องปฏิบัติการ โดยวิธีบดอัดมาตรฐาน (standard compaction) จะอยู่ในช่วงร้อยละ 18 - 45 และค่าความหนาแน่นสูงสุด (maximum dry unit weight) จะอยู่ในช่วง 9 - 16 kN/m³ แต่ในสนามเป็นการยากที่จะบดอัดเถ้าลอยให้ได้ความหนาแน่นสูงสุด โดยปกติมักจะกำหนดให้บดอัดได้ที่ความหนาแน่นไม่ต่ำกว่าร้อยละ 90 ของความหนาแน่นสูงสุด

กำลังอัด (unconfined compressive strength) ของเถ้าลอยนอกจากจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นจากการบดอัดแล้วยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีด้วย เถ้าลอยที่ได้จากการบดอัดแล้วจะมีน้ำหนักเบา และมีกำลังอัดสูงเมื่อเทียบกับดินซึ่งมักจะใช้เป็นวัสดุถมโดยทั่วไป ดังนั้นความนิยมในการนำเถ้าลอยไปใช้เป็นวัสดุถมในพื้นที่ที่เป็นชั้นหินอ่อนเนื่องจากข้อได้เปรียบสองประการ คือ น้ำหนักที่เบาจะช่วยลดการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในชั้นดินอ่อน และการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในชั้นเถ้าลอยเองจะน้อยมาก เพราะมีกำลังอัดสูง

2) การใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุโครงสร้างของถนน

ส่วนของถนนที่นิยมใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุ คือ ชั้นรองพื้นทาง (sub-base) และชั้นพื้นทาง (base) แม้ว่าเถ้าลอยที่บดอัดแล้วจะมีกำลังค่อนข้างสูงแต่คงยังมีสมบัติบางอย่างที่ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้ในงานโครงสร้างของถนนโดยลำพัง แต่จะสามารถนำไปใช้ได้เมื่อผสมด้วยปูนซีเมนต์หรือปูนขาว บางครั้งอาจใช้เป็นสารสำหรับปรับปรุงสมบัติของดินให้เหมือนกับปูนซีเมนต์หรือปูนขาวก็ได้

- การปรับปรุงสมบัติของเถ้าลอยด้วยปูนซีเมนต์ ในกรณีนี้เถ้าลอยจะทำหน้าที่เหมือนกับชอยแอกกรีกเกต (soil aggregate) โดยมีซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสาน (cementitious material) กำลังอัดของส่วนผสมขึ้นอยู่กับสมบัติของเถ้าลอย ปริมาณซีเมนต์ที่ผสมเพิ่มความหนาแน่นจากการบดอัด และประสิทธิภาพในการผสมปูนซีเมนต์เข้ากับเถ้าลอย ในการออกแบบส่วนผสมมักใช้กำลังอัด (unconfined compressive strength) เป็นเกณฑ์กำหนด ในประเทศอังกฤษใช้กำลังอัด 2.8 MN/m² ที่อายุ 7 วัน เป็นเกณฑ์ทั่วไปสำหรับการปรับปรุงสมบัติชอยแอกกรีกเกตต่างๆ ด้วยปูนซีเมนต์พบว่า สำหรับเถ้าลอยต้องใช้ปูนซีเมนต์ผสมประมาณร้อยละ 5 - 15

- การปรับปรุงสมบัติของเถ้าลอยด้วยปูนขาว การผสมปูนขาว (lime) ในเถ้าลอยจะช่วยให้กำลังอัดของเถ้าลอยเพิ่มขึ้น แต่สาเหตุการเพิ่มกำลังอัดนั้นต่างจากการผสมปูนซีเมนต์คือ ในกรณีของปูนซีเมนต์นั้นจะมีสารเชื่อมประสานเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างองค์ประกอบของซีเมนต์เอง ส่วนในกรณีของปูนขาวสารเชื่อมประสานจะเกิดจากปฏิกิริยาปซโซลานิก (puzzolanic reaction) ระหว่างปูนขาวกับซิลิกาในเถ้าลอย ในเกณฑ์กำลังอัดที่ใกล้เคียงกันมักจะใช้ปูนขาวผสมเพิ่มในปริมาณที่มากกว่าปูนซีเมนต์

- การใช้เถ้าลอยในการปรับปรุงสมบัติของดิน ในกรณีนี้เถ้าลอยจะทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานช่วยให้กำลังอัดของชอยแอกกรีกเกตเพิ่มขึ้น โดยส่วนใหญ่พบว่าจะต้องใช้ ปูนขาวผสมกับเถ้าลอยในการใช้เป็นสารปรับปรุงสมบัติ ทั้งนี้เพื่อให้มีปฏิกิริยาปซโซลานิกสร้างสารเชื่อมประสานได้มากขึ้น ชอยแอกกรีกเกตที่สามารถปรับปรุงสมบัติได้ดีโดยใช้เถ้าลอยปูนขาว ได้แก่ พวกทรายที่มีมวลละเอียดน้อย

- การใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมของแอสฟัลติกคอนกรีต (Asphaltic Concrete) แอสฟัลติกคอนกรีต คือ ส่วนผสมระหว่างหินย่อยและยางแอสฟัลต์ ซึ่งมักใช้ปูผิวถนน ในการออกแบบส่วนผสมจะต้องใช้หินย่อยที่มีขนาดละเอียดและมีมวลละเอียดที่เรียกว่า ฟิลเลอร์ (filler) ผสมอยู่ด้วยเพื่อแทรกภายในช่องว่างระหว่างเม็ดหินย่อยเพื่อเป็นการช่วยลดปริมาณยางแอสฟัลต์ที่จะต้องใส่ และทำให้ส่วนผสมมีความหนาแน่นสูงเมื่อได้รับการบดอัด ที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน คือ ฝุ่นที่เกิดจากการโม่หินปูน (lime stone dust) ผลงานวิจัยในหลายประเทศได้ แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้เถ้าลอยเป็นฟิลเลอร์แทนหินปูนได้

3) การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตสามารถทำได้ 3 ลักษณะดังนี้ คือ

- ใช้เป็นสารเพิ่ม (Admixture) ในส่วนผสมคอนกรีต
- ใช้เป็นส่วนผสมปูนซีเมนต์ก่อนนำไปใช้งานคอนกรีต
- ใช้เป็นส่วนหนึ่งของวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์

การใช้เถ้าลอยเป็นสารเพิ่มในส่วนผสมคอนกรีต ในกรณีนี้จุดประสงค์หลักคือ ลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตลง เถ้าลอยจะทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานแทนปูนซีเมนต์ในส่วนที่ลดไปได้ ซึ่งคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมเพิ่มจะมีสมบัติพิเศษดังนี้ คือ

ข้อดี

- มีสภาพการใช้งานดี (Workability)
- มีความต้านทานต่อการแยกกลุ่ม (Segregation) ดี
- มีค่าความซึมได้ของน้ำ (Permeability) ดี
- มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต (Sulphate resistance) ดี
- เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ช้า ทำให้ปริมาณความร้อนที่ระบายออกในขณะที่คอนกรีตแข็งตัวมีค่าน้อย ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบในกรณีการเทคอนกรีต

ข้อเสีย

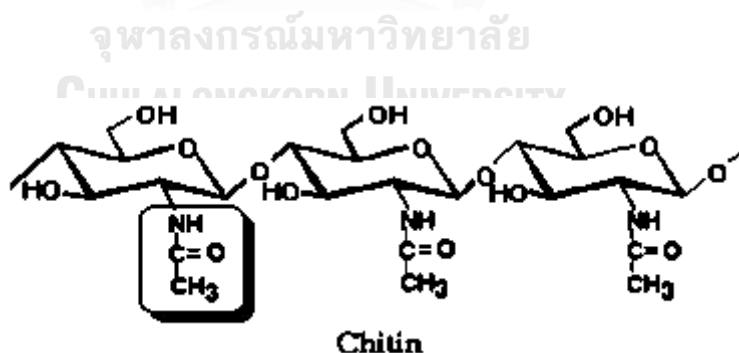
- อัตราการเพิ่มของกำลังอัดช้า
- สมบัติของเถ้าลอยแปรปรวนไม่แน่นอน ทำให้การควบคุมคุณภาพทำได้ยากการใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุเติมในการผลิตซีเมนต์

(วิชาญ ภูพัฒน์, 2526) กล่าวไว้ว่า การใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุเติมผลิตซีเมนต์สามารถทำได้เนื่องจากเถ้าลอยมีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักเหมือนกับที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ด้วยจึงสามารถนำเถ้าลอยนี้ไปใช้เป็นวัสดุเติมในการผลิตซีเมนต์ได้ไม่เฉพาะแต่ในงานคอนกรีตเท่านั้นที่สามารถนำเถ้าลอยมาผสมทดแทนในบางส่วนของปูนซีเมนต์ได้ งานเกือบทุกประเภทที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนประกอบก็สามารถนำเถ้าลอยไปใช้ด้วยได้เช่นเดียวกัน ตัวอย่างเช่น การผลิตคอนกรีตบล็อก การใช้ในการผลิตซีเมนต์กราวด์ (cement groundting) เป็นต้น การนำไปใช้อีกอย่างหนึ่งที่แตกต่างจากแนวทางที่กล่าวมาในข้างต้นคือ ใช้ทำมวลรวมเบา (light weight aggregate) ในกรณีนี้เถ้าลอยจะถูกนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงถึง 1,000 - 1,200 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้เม็ดเถ้าลอยเกาะตัวเป็นก้อนที่แข็งมาก และสามารถใช้เป็นมวลรวมแทนหินย่อยได้ มวลรวมนี้จะเบากว่าหินย่อยธรรมดาซึ่งเป็นข้อได้เปรียบเมื่อใช้เป็นมวลรวมในคอนกรีตสำหรับงานอาคาร

2.5 ลักษณะทั่วไปของไคตินและไคโตซาน

ไคตินและไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีมากเป็นอันดับสองของโลก รองจากเซลลูโลส (Cellulose) จัดเป็นสารจำพวกพอลิเมอร์ชีวภาพกลุ่มเดียวกับคาร์โบไฮเดรตพอลิเมอร์ แต่มีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีแตกต่างกับเซลลูโลส เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างไคติน (Chitin) ประกอบด้วยสารพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ซึ่งเป็นไบโอพอลิเมอร์ที่พบมากในสัตว์ทะเลที่มีเปลือกแข็ง เช่น กุ้ง ปู กุ้ง เปลือกหุ้มของแพลงตอน แกนของปลาหมึก แมงกะพรุน หรือดาวทะเล เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบในแมลงมีปีก เช่น แมลงสาบ ตั๊กแตน และยังพบในผนังของเห็ด รา และยีสต์บางชนิด (Freier, Koh, Kazazian, & Shoichet, 2005)

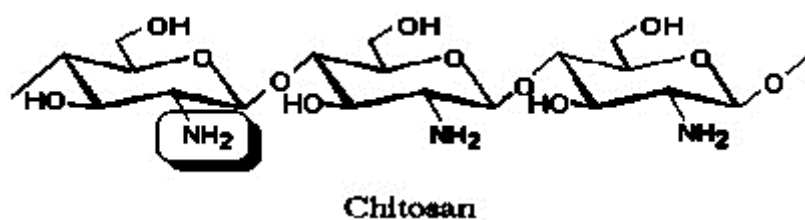
ไคติน มีชื่อทางเคมีว่า Poly- β - (1, 4)-2-acetamino-2-deoxy-D-glucose หรือ Poly N-acetyl-glucosamine เป็นพอลิเมอร์อินทรีย์ที่มีโมเลกุลสายยาว ซึ่งคล้ายกับโครงสร้างเซลลูโลสแต่ต่างกันที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 เป็นหมู่ Acetylated amino (-NH-CO-CH₃) แทนที่จะเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ดังในเซลลูโลส ไคตินมีสูตรทั่วไปคือ (C₈H₁₃NO₅)_n ประกอบด้วย คาร์บอนร้อยละ 47.29 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจนร้อยละ 6.45 โดยน้ำหนัก ไนโตรเจนร้อยละ 6.89 โดยน้ำหนัก และออกซิเจนร้อยละ 39.47 โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตาม ไคตินในธรรมชาติจะมีบางหน่วยที่ไม่มีหมู่แอซิติล (-CO-CH₃) โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 10 ในสายพอลิเมอร์ เมื่อพิจารณาจากสูตรโครงสร้างของไคติน พบว่าเป็นสารโมเลกุลยาวที่ไร้ประจุ (Non-electrolytic polymer) ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งทำให้ไคตินละลายได้ยากในสารละลายทั่วไป ทำให้การใช้ประโยชน์จากไคตินไม่แพร่หลายนัก อย่างไรก็ตามสามารถดัดแปรไคตินโดยวิธีการทางเคมีเพื่อเพิ่มประโยชน์ในการใช้งานมากขึ้น โดยการเตรียมเป็นไคโตซาน



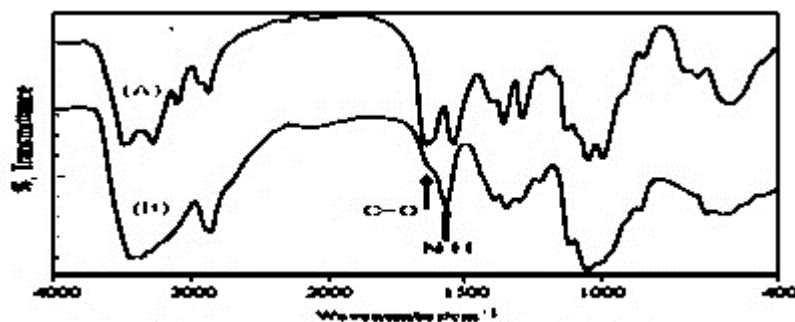
รูปที่ 2.8 โครงสร้างโมเลกุลของไคติน (สุภาพร ห้วยหงษ์ทอง, 2548)

ไคโตซานมีชื่อทางเคมีว่า Poly (D-glucosamine) หรือ Poly- β - (1,4)-2-amino-2-deoxy-D-glucose ซึ่งสามารถเตรียมขึ้นได้โดยการแยกหมู่แอซิติลออก (Deacetylation) จากไคตินเหลือเป็น

หมู่แอมิโนอิสระ (-NH₂) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ดังรูปที่ 2.9 โดยทั่วไปถ้าหมู่แอสติลถูกตัดหรือหลุดไปประมาณร้อยละ 90 - 100 จะเรียกว่า Fully deacetylated chitosan ในทางทฤษฎีไคตินประกอบด้วย ไนโตรเจนร้อยละ 6.89 และในไคโตซานมีไนโตรเจนประมาณร้อยละ 8.70 แต่ในทางปฏิบัติการแยกเอาหมู่แอสติลออกมักไม่สมบูรณ์ ดังนั้นปริมาณไนโตรเจนจะไม่แน่นอน จะอยู่ในช่วงร้อยละ 6.89 - 8.70 เมื่อพิจารณาสูตรโครงสร้างของไคโตซานแล้ว จะเห็นว่าไคโตซานมีประจุบวกบนหมู่แอมิโน ถือว่าเป็น Cationic polymer และสมบัติ Polyelectrolyte ของไคโตซานมีสมบัติในการดูดซับ (Adsorption) สารจำพวกอินทรีย์ รวมถึง Polychlorinated biphenyls โปรตีน และ Nucleic acid รวมถึงไอออนโลหะ เนื่องจากสมบัติการดูดซับที่ดี ไคโตซานจึงทำหน้าที่เป็น Coagulating agent ได้ดี นอกจากนี้มีสมบัติในการละลายในตัวทำละลายกรดอินทรีย์หลายชนิด เช่น สารละลายกรดฟอร์มิก สารละลายกรดแอสติก เป็นต้น และละลายได้เล็กน้อยในกรดอินทรีย์เจือจาง เช่น กรดเกลือ เป็นต้น จึงเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้ไคโตซานใช้ประโยชน์ได้สูงกว่าไคติน และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในไคโตซานมีสมบัติที่สำคัญในการดูดซับโลหะหนัก IIR spectra ของไคตินและไคโตซานมีโครงสร้างต่างกันดังในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างโมเลกุลของไคโตซาน (สุภาพร ห้วยหงษ์ทอง, 2548)



รูปที่ 2.10 IR spectra ของไคตินและไคโตซาน (A) ไคติน (B) ไคโตซาน (สุภาพร ห้วยหงษ์ทอง, 2548)

2.5.1 แหล่งของไคตินและไคโตซาน

ไคตินเป็นสารอินทรีย์ที่เกิดตามธรรมชาติ ซึ่งมีปริมาณมากเป็นอันดับสองของโลกรองจากเซลลูโลส เราจะพบตามผนังเซลล์ของพืชและสัตว์ เช่น ในยีสต์ที่ใช้ทำเบียร์และไวน์ในพืชบางชนิด อาจจะมีไคตินแทนเซลลูโลสหรือเกิดร่วมกันกับเซลลูโลส ก็ได้ ส่วนในสัตว์จะมีไคตินอยู่เป็นคิวติเคิล (Cuticle) ที่ผนังของอวัยวะที่สัมผัส (Epithelium) ส่วนมากเราจะพบไคตินในเปลือกของสัตว์ทะเลที่ไม่มีกระดูกสันหลัง แมลง เชื้อรา เชื้อยีสต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสัตว์ที่มีโครงร่างแข็งภายนอก (Exoskeleton) ของสัตว์ใน Phylum Arthropod โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน Class Crustacean ได้แก่ กุ้ง ปู กุ้ง ตลอดจนใน Class Insect ได้แก่ แมลงสาบ ตัวด้วง เป็นต้น ไคตินที่พบในแหล่งต่างๆ จะมีปริมาณที่แตกต่างกันออกไป ดังตารางที่ 2.4

2.5.2 การละลาย (Solubility)

ไคโตซานจะไม่ละลายน้ำที่มีค่าพีเอชสูงกว่า 6.5 ตัวทำละลายที่เป็นต่างและกรดเกลือที่เข้มข้น เช่น กรดซัลฟิวริก ไคโตซานสามารถละลายได้ในสารละลายกรดอินทรีย์เจือจาง ได้แก่ สารละลายกรดแอสติค สารละลายกรดซิตริก และสารละลายกรดฟอร์มิกที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 0.2 - 100 โดยปริมาตร (Knoor, 1984) และในภาวะที่เป็นกรดนี้มีหมู่เอมีนอิสระ ($-NH_2$) จะถูกโปรตอนเตไปอยู่ในรูปของหมู่ Cationic amino ($-NH_3^+$) (Muzzarelli, 1977) นอกจากนี้ไคโตซานยังสามารถละลายได้ในตัวทำละลายกรดอินทรีย์เจือจาง ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรคลอริก สารละลายกรดไนตริก และละลายได้เล็กน้อยในสารละลายฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร ความสามารถในการละลายของไคโตซานในสารละลายกรดชนิดต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 ปริมาณไคตินที่มีอยู่ในสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ (Knorr, 1984)

ชนิด	ปริมาณไคติน (%)	ชนิด	ปริมาณไคติน (%)
<u>สัตว์น้ำเปลือกแข็ง (Crustaceans)</u>		<u>แมลง (Insects)</u>	
ปู (Cancer)	72.1 ^c	แมลงสาบ (Periplaneta)	2.0 ^a
ปู (Carcinus)	0.4-3.3 ^a	แมลงสาบ (Blatella)	18.4 ^c
	8.29 ^b		10 ^b
	64.2 ^b		35 ^c
ปูใหญ่ (Paralithodes)	35 ^b	แมลงปีกแข็ง (Colcoptera)	5-15 ^b
ปูน้ำเงิน (Callinectes)	14 ^a		27-35 ^c
ปูแดง (Pleuroncodes)	1.3-1.8 ^b	แมลงปีกแข็ง (Tenebrio)	2.1 ^a
กุ้ง (Crangon)	5.8 ^b		4.9 ^b
	69.1 ^c		31.3 ^c
กุ้งลอบสเตอร์ (Nephropes)	69.8 ^c	แมลงวัน (Dipteral)	54.8 ^c
	6.7 ^b	ผีเสื้อ (Pieris)	64 ^c
กุ้งลอบสเตอร์ (Homarus)	60.8-77.0 ^c	ตั๊กแตน (Grasshoppers)	2-4 ^c
เพรียง (Lepas)	58.3 ^c	ตัวไหม (Bombyx)	44.2 ^c
กุ้ง (Alaskan shrimp)	28 ^d	ตัวไหม (Calleria)	33.7 ^c
<u>เห็ด รา (Fungi)</u>		<u>สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังแต่</u>	
<u>Aspergillus Niger</u>	42.2 ^e	มีเปลือกแข็ง	6.1 ^b
<u>Penicillium notatum</u>	18.5 ^e	เปลือกหอยกาบ	3.6 ^a
<u>Penicillium chrysogenum</u>	20.1 ^e	(Clamshell)	
<u>Saccharomyces cerevisiae</u>	2.9 ^e	เปลือกหอยนางรม	41.0 ^c
<u>Mucor rouxii</u>	44.5 ^e	(Oyster shell)	
		แกนปลาหมึก (Squid, skeletal pen)	40.2 ^c
<u>Lactarius vellereus</u>	19.0 ^e	เคย (Krill, deproteinized shell)	16 ^b
		แมลงปีกแข็ง (May)	

a น้ำหนักเปียก (Wet body weight)

b น้ำหนักแห้ง (Dry body weight)

c น้ำหนักเปลือกนอก (Organ weight of cuticle)

d น้ำหนักแห้งของเปลือกนอกทั้งหมด (Total dry weight of cuticle)

e น้ำหนักแห้งของผนังเซลล์ (Dry weight of the cell wall)

ตารางที่ 2.5 ความสามารถในการละลายของไคโตซานในสารละลายกรดชนิดต่างๆที่ความเข้มข้นของกรดต่างๆกัน (Muzzarelli, 1977)

ชนิดของกรด	ความเข้มข้นของสารละลายกรด				
	1%	5%	10%	50%	>50%
กรดแอซติก (Acetic acid)	+	+	+	+	
กรดแอดิพิค (Adipic)	+				
กรดซิตริก (Citric)	-				
กรดฟอร์มิก (Formic)	+	+	+	+	+
กรดแลคติก (Lactic)	+	+	+		
กรดมาลิก (Malic)	+	+	+		
กรดทาร์ทาลิก (Tartaric)	-		+		
กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric)	+	-	-		
กรดไนตริก (Nitric)	+	-	-		
กรดฟอสฟอริก (H ₃ PO ₄ *)	-	-	-		
กรดซัลฟิวริก (Sulfuric)	-	-	-		

หมายเหตุ

+ แสดงว่าไคโตซานสามารถละลายได้

- แสดงว่าไคโตซานไม่สามารถละลายได้

* แสดงว่าไคโตซานไม่สามารถละลายได้ในกรดซัลฟิวริกและกรดฟอสฟอริก แต่สามารถละลายได้ในกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้นกรดน้อยกว่า 0.5%

2.5.3 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดของสารละลายไคโตซานขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอซิติล ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอซิติล ซึ่งพบว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นมากและเวลานาน จะทำให้ความหนืดของสารละลายลดลง เนื่องจากภาวะที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอซิติลรุนแรงโดยจะมีผลทำให้เกิดการแตกขาดของสายโซ่โมเลกุล เวลาที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอซิติลทำให้ความหนืดของสารละลายไคโตซานเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งพบว่าทำให้มีปัญหาในการผลิตไคโตซานที่มีมวลโมเลกุลสูง

2.5.4 การใช้ประโยชน์จากไคโตซาน

ในการใช้ประโยชน์จากไคโตซานสามารถใช้ได้อย่างกว้างขวางโดยอาศัยคุณลักษณะทั่วไป

และคุณลักษณะพิเศษจำเพาะ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นกลุ่มดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 การใช้ประโยชน์จากโคโตซาน

การใช้ประโยชน์	ตัวอย่าง	การใช้ประโยชน์	ตัวอย่าง
การบำบัดน้ำ (Water Treatment)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ การกำจัดไอออนโลหะหนัก ◆ ฟลอกกูแลนต์/โคแอกกูแลนต์: <ul style="list-style-type: none"> - โปรตีน (Protein) - สี (Dyes) - กรดแอมิโน (Amino Acids) ◆ การกรอง (Filtration) 	เทคโนโลยีชีวภาพ (Biotechnology)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ การตรึงเอนไซม์ ◆ การคัดแยกโปรตีน ◆ โครมาโทกราฟี ◆ การฟื้นฟูเซลล์ ◆ การตรึงเซลล์ ◆ ขั้วกลูโคส
อุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ (Pulp and Paper)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ การบำบัดพื้นผิว ◆ กระดาษถ่ายภาพ ◆ กระดาษก๊อปปี้คาร์บอน 	อุตสาหกรรมเกษตร (Agriculture)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ การเคลือบเมล็ดพืช ◆ การเคลือบใบ ◆ ทำปุ๋ย ◆ ควบคุมการหลังสารเคมีของพืชผล

การใช้ประโยชน์	ตัวอย่าง	การใช้ประโยชน์	ตัวอย่าง
อุตสาหกรรมยา (Medical)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ ผ้าพันแผล, ฟองน้ำ ◆ หลอดเลือดเทียม ◆ ควบคุมคอเลสเตอรอลในเลือด ◆ ยับยั้งการเกิดเนื้องอก ◆ เยื่อแลกเปลี่ยน ◆ ยับยั้งการเกิดหินปูนและโรคฟัน ◆ ป้องกันผิวหนัง/ผิวหนังเทียม ◆ คอนแทคเลนส์ ◆ ควบคุมการออกฤทธิ์ของยา ◆ การบำบัดโรคกระดูก 	อุตสาหกรรมอาหาร (Food)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ กากกำจัดสี ของแข็งและกรด ◆ ช่วยในการถนอมอาหาร ◆ ช่วยให้สีคงสภาพเดิม ◆ ช่วยเพิ่มปริมาณในอาหารสัตว์
อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง (Cosmetics)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ แป้งแต่งหน้า ◆ น้ำยาเคลือบเล็บ ◆ ให้ความชุ่มชื้น ◆ โลชั่นอาบน้ำ ◆ ครีมทาหน้า มือ และร่างกาย ◆ ยาสีฟัน ◆ สารช่วยเพิ่มการเกิดฟอง 	เยื่อแลกเปลี่ยน (Membranes)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ รีเวิร์สออสโมซิส ◆ ควบคุมการซึมผ่าน ◆ การแยกตัวทำละลาย

2.6 การออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design)

วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology, RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ

$$y = f(x_1, x_2) + \mathcal{E} \quad (2.6)$$

โดยกำหนดให้ปัจจัยนั้นแทนค่าด้วย x และ \mathcal{E} คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบ y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ถ้ากำหนดว่า $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้น สามารถเขียนสมการของพื้นผิว ได้คือ

$$\eta_{x_2} = f(x_1) \quad (2.7)$$

ซึ่งจะเรียกว่า “พื้นผิวผลตอบ (Response Surface)” โดยส่วนใหญ่จะแสดงพื้นผิวผลตอบในรูปของกราฟิก โดยที่ η จะถูกพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวผลตอบ โดยที่ปัญหาในส่วนใหญ่จะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ โดยในขั้นแรกจะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่ใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซตของตัวแปรอิสระ อาจจะเป็น แบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้เป็นแบบจำลองกำลังหนึ่ง

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \mathcal{E} \quad (2.8)$$

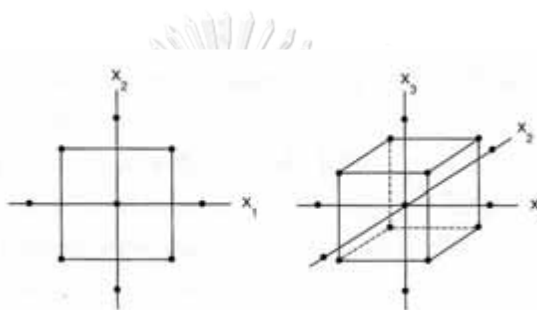
แต่ถ้ามีส่วนโค้งเกี่ยวข้องในระบบ จะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง

$$y = \beta_0 + \sum_i^k \beta_i x_1 + \sum_i^k \beta_i x_2 + \dots + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_k + \mathcal{E} \quad (2.9)$$

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบส่วนมากจะใช้แบบจำลองกำลังหนึ่งหรือแบบจำลองกำลังสองในการหาผลตอบ แต่แบบจำลองทั้งสองชนิดไม่สามารถใช้ประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ ถ้าพื้นผิวที่เราสนใจอยู่มีขนาดใหญ่ การออกแบบพื้นผิวผลตอบมีวิธีการที่นำมาใช้ใน

การหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบอยู่หลายวิธีด้วยกัน ได้แก่ วิธีการกำลังสองน้อยสุดการป็นด้วยทางชั้น การออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง และการออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่สอง ซึ่งการออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่สองนี้เป็นการเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองควอดราติกของผลตอบ มีวิธีการที่น่าสนใจอยู่ 2 วิธีด้วยกัน คือ

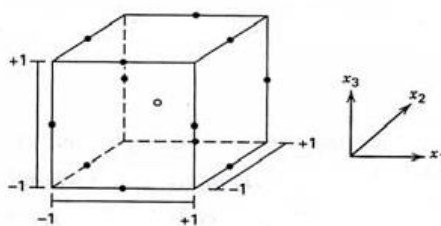
1) การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) เป็นหนึ่งในวิธีการหาพื้นผิวผลตอบที่นิยมใช้เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสม โดยทั่วไปส่วนประสมกลางจะประกอบด้วย $2k$ แฟกทอเรียลที่มี n_f รัน ซึ่ง $2k$ รันในแนวแกนหรือแนวรูปดาว และ n_c รันที่จุดศูนย์กลาง ดังรูปที่ 2.11 แสดงส่วนประสมกลางสำหรับ $k=2$ และ $k=3$ ปัจจัย



รูปที่ 2.11 การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) สำหรับ $k=2$ และ $k=3$

2) การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับพิตพื้นผิวผลตอบสอง การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่สมบูรณ์ ผลของการออกแบบนี้มีประสิทธิภาพในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ และการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย

CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูป 2.12 แสดงการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับ $k = 3$

เนื่องจากการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบรูปทรงกลมที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี 2 และไม่ได้รวมเอาจุดใดๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ รูปที่ 2.11 ซึ่งการกระทำเช่นนี้มีประโยชน์มากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของ

ลูกบาศก์เป็นการรวมเอาปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปได้ที่จะทำการทดลองอันเนื่องมาจากข้อจำกัดทางด้านกายภาพของกระบวนการ

2.7 หลักการและทฤษฎีการดูดซับ (principle of adsorption)

การดูดซับ (adsorption) เป็นการดึงดูดระหว่างผิวหน้าของของแข็งหรือของเหลวที่เรียกว่าตัวดูดซับ (adsorbent) กับโมเลกุลสารตั้งต้นที่เรียกว่าตัวถูกดูดซับ (adsorbate) บนตำแหน่งกัมมันต์ (active site) ขณะที่การคาย (desorption) คือการแตกออกของพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับทำให้ได้ตำแหน่งกัมมันต์กลับคืนมา

2.7.1 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับจะเกิดขึ้นด้วยแรงระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับผิวหน้าของตัวดูดซับโดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

1) การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) ที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับบนผิวหน้าของตัวดูดซับด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ซึ่งเป็นการดูดซับที่อ่อนและไม่มีพันธะเคมีเกิดขึ้น ลักษณะสำคัญของการดูดซับประเภทนี้คือ การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิปกติและจะเกิดได้ดียิ่งขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิปกติ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นทั้งบนผิวหน้าของตัวดูดซับโดยตรงและบนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับ จึงเกิดการซ้อนทับของจำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับอย่างไม่จำกัด ที่เรียกว่าการดูดซับหลายชั้น (multilayer adsorption)

2) การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption) เป็นการเกิดพันธะเคมีหรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับผิวหน้าของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการดูดซับที่แข็งแรง เช่น แรงแควาเลนต์ (covalent bond) และไอออนิก (ionic bond) ทำให้การดูดซับประเภทนี้จะเกิดขึ้นได้ดีหรือเกิดขึ้นเร็วที่อุณหภูมิสูง และเกิดขึ้นเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้น นั่นคือการดูดซับทางเคมีจะไม่เกิดบนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับ ทำให้การดูดซับเกิดเพียงชั้นเดียวเท่านั้นที่เรียกว่า การดูดซับชั้นเดียว (monolayer adsorption) ดังนั้น การดูดซับประเภทนี้จะมีเฉพาะเจาะจงสูง โดยขึ้นอยู่กับชนิดของตัวถูกดูดซับและชนิดของผิวตัวดูดซับเท่านั้น

นอกจากนี้การดูดซับทางกายภาพและทางเคมีสามารถเกิดพร้อมกันได้ โดยการดูดซับที่เกิดขึ้นเหนือการดูดซับชั้นแรกขึ้นไปจะถือว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับอาจเกิดการดูดซับทางกายภาพบนผิวของตัวดูดซับก่อนแล้วค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นการดูดซับทางเคมี ซึ่งการ

เกิดการดูดซับทางกายภาพนั้นสามารถเกิดขึ้นได้บนชั้นของการดูดซับทางเคมี (จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์, 2547)

2.7.2 กลไกการดูดซับ

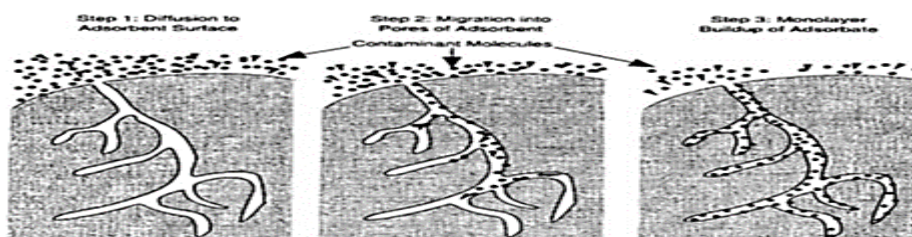
การดูดซับหรือการเกาะบนพื้นผิวสัมผัสระหว่างของเหลว-ของแข็ง ซึ่งเป็นลักษณะของการดูดซับที่เกิดขึ้นในกระบวนการบำบัดและกำจัดมลพิษ ขั้นตอนของการดูดซับโมเลกุลบนพื้นผิวของแข็งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

1) การเคลื่อนที่ด้วยการพา (bulk solution transport) เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายจากสารละลายไปยังชั้นล้อมรอบ (boundary layer) ที่เป็นของเหลวหรือชั้นฟิล์มของเหลว ซึ่งอยู่ล้อมรอบตัวดูดซับ (ของแข็ง) การเคลื่อนที่ลักษณะนี้อาจเกิดจากการปั่นป่วนของของเหลวที่มาจากการไหลหรือการกวนผสมได้

2) การแพร่ภายนอก (external diffusion) เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายผ่านชั้นฟิล์มของเหลวที่อยู่ล้อมรอบตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง การเคลื่อนที่ลักษณะนี้เกิดจากการแพร่กระจายของโมเลกุล ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของตัวที่ถูกดูดซับระหว่างชั้นล้อมรอบภายนอกและชั้นฟิล์มของเหลว

3) การดูดซับ (adsorption) เป็นการเกิดปฏิกิริยาของตัวที่ถูกดูดซับกับอะตอมที่พื้นผิวของตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง ซึ่งเป็นการดูดซับทางกายภาพหรือทางเคมี หรือทั้งสองชนิดพร้อมกัน

ในกรณีที่ตัวดูดซับเป็นวัสดุที่มีรูพรุนภายใน หลังจากในตัวถูกละลายนั้นได้แพร่กระจายผ่านชั้นฟิล์มของเหลวสู่พื้นผิวตัวดูดซับแล้ว จะเกิดการแพร่ของตัวถูกละลายเข้าไปในรูพรุนซึ่งอยู่ภายในตัวดูดซับนั้น ๆ (intraparticle diffusion) ซึ่งการแพร่ในลักษณะนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของโครงสร้างรูพรุนของตัวดูดซับ โดยการแพร่นี้อาจอยู่ในลักษณะของการแพร่ในรูพรุน (pore diffusion) และการแพร่บนพื้นผิว (surface diffusion) และเข้าสู่ภาวะของการดูดซับตัวถูกละลายบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อไป



รูปที่ 2.13 กลไกการดูดซับ (จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์, 2547)

2.7.3 สมดุลการดูดซับ

การดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยตัวถูกดูดซับจะถูกดึงดูดไว้บนผิวของตัวดูดซับ ในขณะที่เดียวกันจะเกิดการคายร่วมด้วย จนกระทั่งอัตราการดูดซับและการคายเท่ากัน ณ สถานะที่ควบคุมไว้ ดังนั้นการดูดซับของตัวถูกดูดซับดังกล่าวจึงเข้าสู่สมดุล (equilibrium) นั่นคือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ ณ สถานะที่ควบคุมไว้ เท่ากับความเข้มข้นในตัวดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ ที่กำหนดไว้ ภายใต้สภาวะสมดุลนี้ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับนั้นสามารถคำนวณจากสมการที่ 2.10 และสามารถใช้อิโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) เป็นการอธิบายความสมดุลที่เกิดขึ้น

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{W} \quad (2.10)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับหรือความสามารถในการดูดซับ ณ สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม), C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร), C_e คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร), V คือ ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร) และ W คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)

ไอโซเทอมของการดูดซับมีอยู่หลายชนิด เนื่องจากทฤษฎีที่ใช้อธิบายสมดุลของการดูดซับมีหลายทฤษฎี ซึ่งนิยมใช้มาก ได้แก่ ทฤษฎีแลงเมียร์และฟรุนดลิช

1) ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) ใช้สำหรับการดูดซับทางเคมีบนผิวหน้าอุดมคติ เป็นไอโซเทอมที่ง่ายที่สุด ใช้กันมากสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว หลักการเกิดการดูดซับมาจากสมมุติฐานต่อไปนี้

- การดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมีซึ่งแข็งแรงและเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer)
- สารหนึ่งตัวจะดูดซับบนหนึ่งตำแหน่งเท่านั้น
- พลังงานของการดูดซับแต่ละตำแหน่งมีพลังงานเท่า ๆ กันและไม่มีอันตรกิริยาระหว่างตำแหน่งและ/หรือระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็แรงผลักหรือแรงดึงดูด

- มีสมมูลเกิดขึ้นระหว่างการดูดซับและการคาย นั่นคือ อัตราเร็วของการดูดซับเท่ากับ อัตราเร็วของการคายจากผิวหน้า
จากสมมติฐานดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการแลงเมียร์ ได้ดังนี้

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2.11)$$

โดยที่ q_e คือ ปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

q_m คือ ปริมาณการดูดซับสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_L คือ ค่าคงที่สมมูลของการดูดซับ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

สามารถจัดสมการที่ 2.11 ให้อยู่ในรูปใหม่ได้ดังสมการที่ 2.12

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} + \frac{1}{q_m} C_e \quad (2.12)$$

เมื่อสร้างกราฟระหว่างค่า C_e กับ C_e/q_e จะได้กราฟเส้นตรง ซึ่งหาค่า $1/q_m$ และ $1/K_L q_m$ ได้จากความชันและจุดตัดแกน y

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm) ใช้ทั้งการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ มักอธิบายการดูดซับของสารอินทรีย์และอนินทรีย์บนตัวดูดซับหลายประเภท เช่น ถ่านกัมมันต์ เรซินสังเคราะห์ เป็นต้น ไอโซเทอมนี้ถูกพัฒนาจากไอโซเทอมแลงเมียร์ที่เกิดบนผิวหน้าวิวิธพันธุ์ (heterogeneous) ซึ่งไม่เป็นเนื้อเดียว โดยการดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับเป็นแบบหลายชั้น (multilayer) จากการทดลองโดยอาศัยสมมติฐานของทฤษฎีนี้ในแนวคิดของแบบจำลองหลายชั้น ทำให้ได้สมการ ดังนี้

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2.13)$$

โดยที่ q_e คือ ปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

K_F คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ (ลิตรต่อกรัม)

n คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

ซึ่งสามารถแสดงสมการในรูปลอการิทึม ได้ดังสมการที่ 2.14

$$\ln(q_e) = \ln(K_F) + 1/n \ln(C_e) \quad (2.14)$$

เมื่อสร้างกราฟระหว่าง $\ln C_e$ กับ $\ln q_e$ จะได้กราฟเส้นตรง ซึ่งหาค่า $1/n$ และ $\ln K_F$ ได้ จากความชันและจุดตัดแกน y จากสมการการดูดซับแบบฟรอยด์ลิช ความสามารถในการดูดซับพิจารณาจากความชัน ของกราฟระหว่าง $\ln C_e$ กับ $\ln q_e$ โดยถ้าเส้นกราฟที่ได้มีค่าความชันมาก หรือค่า n น้อย แสดงว่าการดูดซับ จะเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูง ๆ แต่เกิดขึ้นได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นกราฟที่มีค่าความชันมากจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง

2.7.4 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

จลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นการศึกษาอัตราเร็วของกระบวนการเคมี โดยการพิจารณาภาวะที่ส่งผลต่อความไวของปฏิกิริยาเคมี และช่วยให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ โดยการอธิบายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งใช้ในการอธิบายการดูดซับในแต่ละช่วง โดยแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายกลไกในการควบคุมการดูดซับของตัวดูดซับที่เป็นรูพรุนประกอบด้วยแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first order) และอันดับสองเทียม (pseudo-second order) โดยมีรายละเอียดของแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ ดังนี้ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first-order) และอันดับสองเทียม (pseudo-second order) โดยสมการแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมของ Lagergren นี้ใช้อธิบายถึงอัตราการดูดซับในระบบของเหลวและของแข็ง เกิดจากสมมุติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับระหว่างผิวตัวดูดซับกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่เกิดกระบวนการทางเคมี ซึ่งสามารถคำนวณหาอัตราเร็วในการดูดซับได้โดยใช้สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.15)$$

โดยที่ q_e คือ ปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t คือ ปริมาณการดูดซับที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 2.15 โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t = 0$ จนถึง $t = t$ และตั้งแต่ $q_t = 0$ จนถึง $q_t = q_t$ จะได้สมการที่ 2.16

$$\ln \frac{q_e}{q_e - q_t} = k_1 t \quad (2.16)$$

จัดรูปสมการที่ 2.16 ให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น ได้สมการที่ 2.17

$$\ln (q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2.17)$$

สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม เกิดจากสมมติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับที่เกิดกระบวนการทางเคมี ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ ดังนี้

สามารถเขียนสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ได้สมการที่ 2.18

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t) \quad (2.18)$$

โดยที่ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 2.14 โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t = 0$ จนถึง $t = t$ และตั้งแต่ $q_t = 0$ จนถึง $q_t = q_t$ จะได้สมการที่ 2.19

$$\frac{1}{q_e - q_t} = \frac{1}{q_e} - k_2 t \quad (2.19)$$

จัดรูปสมการที่ 2.16 ให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น ได้สมการที่ 2.20

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 - q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2.20)$$

เมื่อสร้างกราฟระหว่าง t/q_t กับ t จะได้กราฟเส้นตรง ซึ่งหาค่า $1/q_e$ และ $1/k_2 - q_e^2$ ได้ จากความชันและจุดตัดแกน y

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิทยา เทียมสุข (2544) ศึกษาการกำจัดไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจนและเจดาคัลท์ไนโตรเจนในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติ ได้แก่ Clinoptilolite, Smectite และ Pumice พบว่า น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจน 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนโดยใช้ Clinoptilolite คือ 3 - 8 เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในขณะที่ความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนของ Smectite และ Pumice จะแปรผันไปตามค่าพีเอช โดยที่พีเอช 9 เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัด ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนเมื่อใช้ Clinoptilolite, Smectite และ Pumice ปริมาณสูงสุดที่ 120 กรัมต่อน้ำเสีย 0.5 ลิตร คือร้อยละ 85.63 ร้อยละ 35.13 และร้อยละ 36.84 ตามลำดับ การกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเสียจริงจากฟาร์มเลี้ยงหมูที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจน และที่เคเอ็นเป็น 230.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 250.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ปริมาณ Clinoptilolite สูงสุดที่ 120 กรัม ต่อน้ำเสีย 0.5 ลิตร ปรับพีเอชเป็น 6 พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนและที่เคเอ็นเท่ากับร้อยละ 91.48 และ ร้อยละ 87.70 ตามลำดับ

อารักษ์ ดำรงสัตย์ (2546) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อหมักยูเอเอสบีโดยซีโอไลต์และทรายไม่คัดขนาด ชั้นตอนแรกใช้น้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6 ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนของซีโอไลต์ดีที่สุด จากนั้นทำการทดลองโดยใช้แบบจำลองแบบต่อเนื่อง พบว่าเมื่อปรับค่าพีเอชของน้ำเสียเท่ากับ 6 ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนในคอลัมน์ที่บรรจุ ซีโอไลต์ 80 เซนติเมตรสูงกว่าทุกคอลัมน์ คือร้อยละ 74.04 ปริมาณน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์ช่วง 250 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนสูงกว่าทุกช่วงปริมาตร ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรจะต่ำลงเมื่อสัดส่วนของซีโอไลต์ลดลงและปริมาณน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์เพิ่มมากขึ้น

จุฑาทิพย์ เพชรอินทร์ (2547) ศึกษาการกำจัดตะกั่วโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน และถ้ำลอยชานอ้อย โดยอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 100 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 โมลาร์ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วัน ซึ่งจะให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกเท่ากับ 565.62 cmol/kg ส่วนสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยชานอ้อย คือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ความ

เข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 โมลาร์ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 4 วัน ซึ่งจะ
ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกเท่ากับ 303.19 cmol/kg พบว่า ภาวะที่เหมาะสม
ในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน คือ ที่ พีเอช 5
เวลาสัมผัส 120 นาที ประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 98.59 ส่วนภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด
ตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อย คือ ที่พีเอช 5 เวลาสัมผัส
90 นาที ประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 97.84 ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำเสียจริง
โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อยเท่ากับร้อยละ 93.24 และร้อยละ
91.36 ตามลำดับ

อนรรฆอร พันธุ์ไพศาล (2549) ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอย
ขานอ้อยด้วยสารละลายต่างที่ผ่านการใช้แล้วจากอุตสาหกรรมด่าง (spent alkaline) พบว่า
ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อย คือ ที่
อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลาย spent alkaline 2 โมลาร์ ระยะเวลาในการ
ทำปฏิกิริยา 5 วัน ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน
เท่ากับ 418.36 เซนติโมลต่อกิโลกรัม และ 286.29 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ นำซีโอไลต์ที่
สังเคราะห์ได้ไปทดสอบความสามารถในการกำจัดตะกั่ว พบว่า ที่พีเอช 5 ความเข้มข้นตะกั่ว 10
มิลลิกรัมต่อลิตร ซีโอไลต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วที่ดีที่สุด ค่าความสามารถในการดูดซับ
ตะกั่วสูงสุดของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อย เท่ากับ 78.51 และ
63.23 มิลลิกรัมต่อกรัมซีโอไลต์ ตามลำดับ

Wu, Zhang, Li, Zhang, and Kong (2006) ศึกษาการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนและ
ฟอสเฟตโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอย (Na-ZFA) ซึ่งจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูป Ca, Mg, Al
และ Fe-ZFA โดยใช้สารละลายเกลือ จากนั้นนำไปศึกษาการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนและ
ฟอสเฟต พบว่า Al^{3+} -ZFA มีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนสูงสุด คือ ร้อยละ 80-
98 ในขณะที่ Mg^{2+} -ZFA, Ca^{2+} -ZFA -, Na^+ -ZFA - และ Fe^{3+} -ZFA มีประสิทธิภาพในการกำจัด
แอมโมเนียมไนโตรเจนเป็นร้อยละ 43-58, ร้อยละ 40-54, < ร้อยละ 20 และ < ร้อยละ 1 ตามลำดับ
ในกรณีของ Na^+ , Ca^{2+} และ Mg^{2+} ค่าพีเอชที่ต่างกัน และในกรณีของ Fe^{3+} ค่าพีเอชที่เป็นกรดจะ
ขัดขวางการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนในส่วนของประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟต Al^{3+} และ
 Fe^{3+} -ZFA มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตร้อยละ 100 ขณะที่ Ca^{2+} , Na^+ และ Mg^{2+} เป็นร้อยละ
60 - 85 น้อยกว่าร้อยละ 25 และน้อยกว่าร้อยละ 5 ตามลำดับ

Arora et al. (2010) ทำการศึกษา การปรับสภาพสารซีโอไลต์ที่ได้จากธรรมชาติด้วย ไคโตซาน (Chitosan) เพื่อใช้สำหรับกำจัดไนเตรทในพื้นที่เย็น พบว่า ซีโอไลต์ที่ปรับสภาพด้วยไคโตซาน (Ch-Z) มีความสามารถในการกำจัดไนเตรทได้เหมาะสมที่อุณหภูมิที่อุณหภูมิ 20 และ 4 องศาเซลเซียส และมีค่าความสามารถในการดูดซับไนเตรทเท่ากับ 0.74 มิลลิโมลไนเตรทต่อกรัม

Huang, Xiao, Yan, and Yang (2010) ศึกษาการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำเสียโดยใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติในประเทศจีน (Chende) โดยได้ศึกษาปัจจัยของ พีเอช ระยะเวลา ปริมาณซีโอไลต์และปริมาณไอออนบวกชนิดอื่นในน้ำเสียที่ปนเปื้อนแอมโมเนียมไนโตรเจน จากผลการทดลองพบว่า ปัจจัยทั้งหมดมีผลต่อการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน ผลของการดูดซับของไอออนประจุบวกเรียงลำดับ $Na^+ > K^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$ จลนพลศาสตร์ของการดูดซับมีความสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมและมีพฤติกรรมการดูดซับแลงเมียร์

Zhang et al. (2011) ทำการทดสอบการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนในสารละลายโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินด้วยวิธี Fusion จากการทดลองพบว่า ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity: CEC) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.03 เป็น 0.279 มิลลิอิกวาเลนต์ต่อกรัม โดยใช้สมการ Koble –Corrigan Model มาอธิบายพฤติกรรมของการดูดซับได้เหมาะสมที่สุด ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนสูงสุดที่สามารถดูดซับได้คือ 24.3 มิลลิกรัมต่อกรัมของซีโอไลต์ และการนำเอาซีโอไลต์หลังจากการไปใช้แล้ว มาฟื้นฟูสภาพใหม่พบว่ามีประสิทธิภาพเกือบใกล้เคียงซีโอไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์เดิม

Wan Ngah, Teong, Toh, and Hanafiah (2012) ทำการศึกษาการใช้ประโยชน์จากซีโอไลต์ที่ปรับสภาพด้วยไคโตซานเพื่อกำจัดทองแดงในน้ำเสีย โดยใช้ซีโอไลต์และไคโตซาน เกรดการค้าเชิงพาณิชย์เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารดูดซับ พบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดทองแดงมีค่าเท่ากับ 3 พฤติกรรมการดูดซับสามารถใช้สมการของ Redlich-Peterson และ Langmuir model อธิบายได้และประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงมีค่าเท่ากับร้อยละ 49.97 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทองแดงถูกกักด้วยพันธะที่แข็งแรงบนพื้นผิวของซีโอไลต์ที่ปรับสภาพด้วยไคโตซาน

Lin et al. (2013) ศึกษากลไกการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนบนซีโอไลต์ธรรมชาติและซีโอไลต์ที่ปรับสภาพด้วย NaCl โดยใช้ความเข้มข้นของแอมโมเนียมไนโตรเจนในช่วง 10-4000 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช เริ่มต้น ที่ 3.4-11.1 จากการศึกษาพบว่า ที่ พีเอชใกล้เคียง 7 และการปรับสภาพด้วย NaCl ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนเพิ่มขึ้น โดยจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีส่วนประกอบของ Na ที่เพิ่มขึ้น และการปรับสภาพทำให้พื้นที่ผิวมีการดูดซับได้เพิ่มขึ้น ซีโอไลต์

ที่ปรับสภาพมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณแอมโมเนียมในน้ำชะขยะ น้ำจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ และน้ำจากระบบบำบัดน้ำเสียได้

Xie, Li, et al. (2013) ทำการศึกษาการปรับสภาพซีโอไลต์ด้วยไคโตซานเพื่อให้เป็นตัวดูดซับที่สามารถกำจัดมลพิษทางน้ำได้แบบกว้าง ๆ โดยใช้ สารซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน (Zeolite synthesized from fly ash :ZFA) และปรับสภาพด้วยไคโตซาน (Chitosan modified zeolite :CMZFA) มาทดสอบการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย พบว่า ในการกำจัดฟอสเฟตนั้น ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity: CEC) ของ CMZFA มีค่ามากกว่า ZFA ,มีความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่ 4.05 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีพฤติกรรมดูดซับที่สามารถใช้ Langmuir model อธิบายได้

Nešić, Veličković, and Antonović (2013) ศึกษาการทดสอบปรับสภาพซีโอไลต์เอเบนแผ่นฟิล์ม โดยใช้ไคโตซาน เพื่อกำจัดสารละลาย Bezactive Orange 16 พบว่า ซีโอไลต์ชนิดเอเบนแผ่นฟิล์มที่ปรับสภาพด้วยไคโตซานมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดถึง 305.8 มิลลิกรัมต่อกรัมและมีพฤติกรรมดูดซับที่สามารถใช้ Langmuir model อธิบายได้ แผ่นฟิล์มสามารถประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับในการกำจัดสีย้อมในระบบบำบัดน้ำเสียได้

Yang, Zhang, Chao, Zhang, and Liu (2014) ศึกษาการเตรียมซีโอไลต์เอไคโตซาน ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล และศึกษาการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธี Nesslerization จากการทดลอง พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 47.62 มิลลิกรัมต่อกรัม พฤติกรรมดูดซับสามารถใช้ Langmuir model อธิบายได้ ตัวดูดซับจากการทดลองนี้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ถึง 10 ครั้งและยังคงมีประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนถึงร้อยละ 90 หลังจากการนำกลับมาใช้ใหม่

Huang et al. (2015) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยจำลองน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ใช้การแลกเปลี่ยนประจุกับซีโอไลต์และการใช้คลอรีนในการนำกลับมาใช้ใหม่ จากการทดลองพบว่าค่าจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสอดคล้องกับสมการแบบจำลองอันดับสองเทียม และสามารถอธิบายพฤติกรรม การดูดซับของแอมโมเนียมไนโตรเจนกับซีโอไลต์ได้ด้วยสมการ Langmuir model ซีโอไลต์นำกลับมาใช้ใหม่ได้ถึง 20 ครั้ง โดยประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนลดลงหลังจากการนำกลับมาใช้ใหม่ครั้งแรก จากร้อยละ 93.8 เหลือร้อยละ 86.1

Ding and Sartaj (2015) ศึกษาวิเคราะห์ค่าสถิติและสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง ปัจจัยที่ใช้ใน

การศึกษาคือ ค่าพีเอช ปริมาณสารดูดซับ ระยะเวลาสัมผัส อุณหภูมิ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแอมโมเนียไนโตรเจน ช่วงพีเอชที่ต่ำที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน คือ พีเอชเท่ากับ 6 ปริมาณสารดูดซับที่มากมีผลต่อการประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนที่มากด้วย และจากการวิเคราะห์วิธีพื้นผิวแบบตอบสนองพบว่า อุณหภูมิไม่มีนัยสำคัญทางสถิติสำหรับการดูดซับแอมโมเนียไนโตรเจน ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 22.90 มิลลิกรัมต่อกรัมที่พีเอชเท่ากับ 7 และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแอมโมเนียไนโตรเจนที่ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จลนพลศาสตร์ของการดูดซับมีความสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมและพฤติกรรมของการดูดซับมีความสอดคล้องกับสมการ Freundlich model

Millar, Winnett, Thompson, and Couperthwaite (2016) ศึกษาสภาวะสมดุลการแลกเปลี่ยนสารละลายแอมโมเนียมไนโตรเจนซีโอไลต์ธรรมชาติของประเทศออสเตรเลีย จากการทดลองพบว่าซีโอไลต์ที่นำมาทดสอบคือ Castle Mountain Zeolite และ Zeolite Australia โดยทดสอบการดูดซับจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าความเข้มข้นของ แอมโมเนียมไนโตรเจนจาก 250-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดย Castle Mountain Zeolite มีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่า Zeolite Australian ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียมไนโตรเจนที่ ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 12.81 และ 10.71 กรัมต่อกิโลกรัม และมีพฤติกรรมดูดซับสอดคล้องกับสมการ Freundlich mode

Liu et al. (2018) ศึกษา การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด P1 จากเถ้าลอยถ่านหินภายใต้สภาวะไม่ใช้ตัวทำละลายเพื่อกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ซีโอไลต์คือ 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลา เท่ากับ 24 - 96 ชั่วโมง ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้คือ ซีโอไลต์ชนิด P1 ค่าความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนสูงสุดเท่ากับ 22.9 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ระยะเวลา 40 นาที ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับมีความสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมและพฤติกรรมดูดซับมีความสอดคล้องกับสมการ Langmuir model

Sivalingam and Sen (2018) ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน (CFA) ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองโดยใช้ Box-Behnken design ในการออกแบบการทดลอง มีปัจจัยในการทดลอง ได้แก่ อัตราส่วนระหว่าง NaOH/CFA อุณหภูมิในการสังเคราะห์และระยะเวลาในการสังเคราะห์ จากผลวิเคราะห์ค่า XRD พบว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้คือ ซีโอไลต์ X สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ คือ อัตราส่วนระหว่าง NaOH/CFA เท่ากับ 1.5 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 10 ชั่วโมง ซีโอไลต์ X ที่สังเคราะห์ได้มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 648.42 m²/g

และมีขนาดรูพรุนเท่ากับ 9.048 อังสตรอม เมื่อนำซีไอไลต์ที่สังเคราะห์ได้มาดูดซับกับ Crystal Violet (CV) พบว่าให้ประสิทธิภาพในการดูดซับมากถึง 99.62 % และนำซีไอไลต์มาเปรียบเทียบกับถ้ำลอยถ่านหินและซีไอไลต์ X เปรียบเทียบค่าพบว่าให้ค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 82.42%และ 96.23% ตามลำดับ



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 รูปแบบการวิจัย

เป็นการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการและทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการสหสาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ อนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์และเทคโนโลยีสุขภาพ วิทยาลัยนครราชสีมา วิทยากร กรุงเทพฯ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย

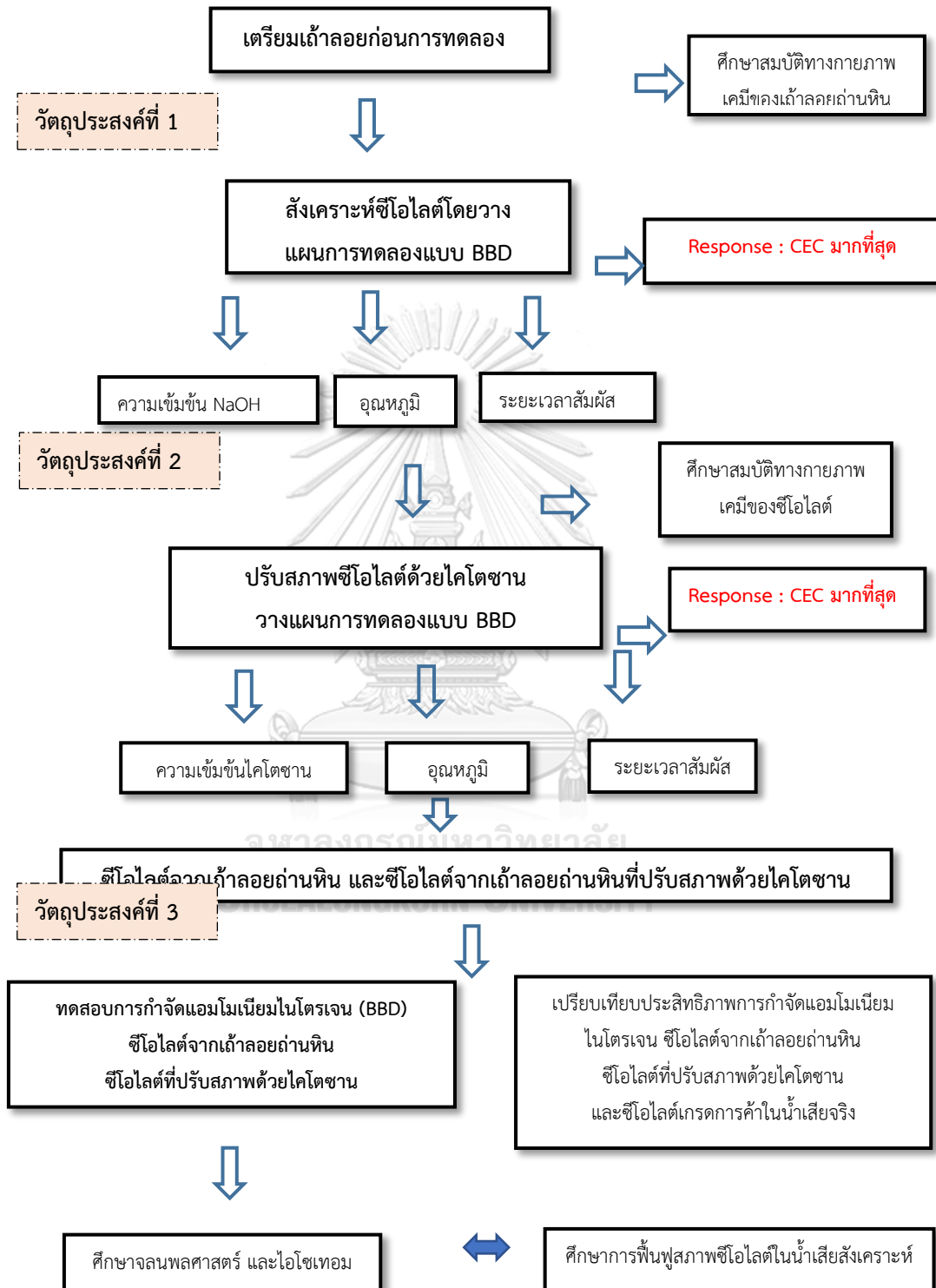
- 1.ชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
- 2.ชุดเครื่องกวนแม่เหล็ก (Stirrer)
- 3.โถดูดความชื้น (Desiccators)
- 4.กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร
- 5.กระดาษกรอง Whatman เบอร์ GF/C ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร
- 6.ครุชีเบลพอร์ซีเลน พร้อมฝาปิด
- 7.เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum Pump) พร้อมชุดกรอง
- 8.เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ HANNA
- 9.เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ AND รุ่น HM-300-Japan
- 10.เครื่องเขย่า (Shaker) ยี่ห้อ K รุ่น VRN-300
- 11.เครื่องวัดการดูดกลืนแสง ยี่ห้อ HACH รุ่น TJTTP JO 6749
- 12.ตู้อบความร้อน ยี่ห้อ WTB Binding Germany
- 13.เตาเผา ยี่ห้อ Valeam box furnace รุ่น 3-1750.USA
- 14.ภาชนะดินเผาพร้อมฝาปิด
- 15.ตะแกรงร้อนมาตรฐานเบอร์ 100 และ 325 เมช
- 16.เครื่อง Heating Water bath ยี่ห้อ MEMMERT รุ่น Model WB 7/14/22/29/45

17. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน: Scanning Electron Microscope (SEM)
18. X-rays Diffraction Spectroscopy JOEL รุ่น JDX-8030, JAPAN
19. X-rays Fluorescence Spectroscopy JOEL รุ่น PW 2400 PHILIPS, JAPAN

3.3 เคมีภัณฑ์

1. กรดอะซิติกเข้มข้น (glacial CH_3COOH) บริษัท Merck, Germany
2. ซิงค์ซัลเฟต เฮปตะไฮเดรต ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) บริษัท Merck, Germany
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) Pellets for analysis บริษัท Merck, Germany
4. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) GR, for analysis, บริษัท Merck, Germany
5. โพแทสเซียม โซเดียม ทาร์เทรต เตตระไฮเดรต ($\text{C}_4\text{H}_4\text{KNaO}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) บริษัท Quality Reagent Chemical, New Zealand
6. แอนไฮไดรรัส เมอร์คิวริก ไอโอไดด์ (Anhydrous mercuric iodide (HgI_2 , RED) บริษัท Ajax Finechem Pty Limited, Australia
7. แอนไฮไดรรัส โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) บริษัท Ajax Finechem Pty Limited, Australia
8. แอมโมเนียมซัลเฟต (NH_4) $_2$ SO $_4$ บริษัท Ajax Finechem, Australia
9. Disodium Dihydrogen Ethylenediaminetetraacetate Dihydrate บริษัท Merck, Germany
10. ไคโตซานเกรดการค้า บริษัท Bona Fides Marketing
11. ซีโอไลต์เกรดการค้า บริษัท M.A. Zeolite

3.3 กรอบแผนงานวิจัย



3.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้จะแบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอน ดังนี้

1.ขั้นเตรียมถ้ำลอยถ่านหิน

นำถ้ำลอยถ่านหินมาเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ร้อนผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 100 เมช และเบอร์ 325 เมช ได้ ทำการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปเก็บไว้ให้เย็นในหม้อดูดความชื้น เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

2.ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน (Zeolite synthesized from coal fly ash; ZFA)

ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ นำถ้ำลอยที่เผาแล้ว 15 กรัม และนำสารละลาย NaOH มาใช้ปริมาตร 120 มิลลิลิตร ใส่ในขวดที่ซึ่งถ้ำลอย แล้วนำไปเขย่าโดยใช้ Shaker water bath ที่ใช้ทำปฏิกิริยา วางแผนการทดลองแบบ Box –Behnken Design ด้วยเทคนิค Response Surface Methodology (RSM) โดยกำหนดให้ Factor มีทั้งหมด 3 ปัจจัยที่ได้จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (จุฑาทิพย์ เพชรอินทร์, 2547; อนุธรรม พันธ์ไพศาล, 2549) คือ ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH (2, 3 และ 4 โมลต่อลิตร) เวลา (12, 24 และ 36 ชั่วโมง) และอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ (80 ,90 และ 100 องศาเซลเซียส) และกำหนดค่า Response คือ ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC)(meq/100g)

3.ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่เหมาะสมในการปรับสภาพซีโอไลต์ถ้ำลอยถ่านหินด้วยไคโตซาน (Chitosan modified zeolite from Fly ash; CZFA)

นำซีโอไลต์ถ้ำลอยถ่านหินที่สังเคราะห์จากข้อ 2 แล้วซึ่งมาประมาณ 5 กรัม และสารละลายไคโตซานผงเกรดการค้า ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ แล้วนำไปเขย่าโดยใช้ Shaker water bath ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที วางแผนการทดลองแบบ Box –Behnken Design ด้วยเทคนิค Response Surface Methodology (RSM) โดยกำหนดให้ Factor มีทั้งหมด 3 ปัจจัยได้จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Xie, Li, et al., 2013; Nešić et al., 2013) คือ ความเข้มข้นของสารละลาย ไคโตซาน (5, 10 และ 15 กรัมต่อลิตร) เวลา (12, 24 และ 36 ชั่วโมง) และอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ (40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส) และกำหนดค่า Response คือ ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) (meq/100g)

4.ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีที่สำคัญของถ้ำลอยถ่านหิน

ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน การวิเคราะห์ พารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

- หาค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรโพรงโดยใช้เครื่อง Specific Surface Area Analyzer ด้วยวิธี BET (Brunance-Emmett-teller)

- วิเคราะห์การเกิดรูปทรงผลึกโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope: SEM)

- วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหินโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectrophotometer: XRF)

- วิเคราะห์โครงสร้างของซีโอไลต์โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันโทรมิเตอร์ (X-ray Diffractometer: XRD)

- วิเคราะห์ลักษณะหมู่ฟังก์ชันเฉพาะด้วยวิธีฟูเรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FT-IR)

5. ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนโดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน

น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียมไนโตรเจนเริ่มต้น ที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมโดยจาก $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ซึ่ง $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 4.719 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตรจากนั้นนำมาเจือจางให้ได้ความเข้มข้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมได้ มาทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนโดยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน วางแผนการทดลองแบบ Box –Behnken Design ด้วยเทคนิค Response Surface Methodology (RSM) โดยกำหนดให้ Factor มีทั้งหมด 4 ปัจจัย คือ พีเอช (4, 7 และ 10) ปริมาณซีโอไลต์ (1, 2.5 และ 4 กรัม) ระยะเวลาที่ใช้ในการสัมผัส (15 ,67.5 และ 120 นาที) และความเร็วรอบในการเขย่า (0,100 และ 200 รอบต่อนาที) โดยกำหนดค่า Response คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจน (ร้อยละ)

5.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

จลนพลศาสตร์การดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน (ZFA) ศึกษาความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่เวลา 3,5,10,15,30,45,60,75,90,120,150,180 และ 210 นาที ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน หรือค่า qt ที่มีปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน เริ่มต้น เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ สภาวะที่เหมาะสมในการทดลองในข้อที่ 5 ได้แก่ พีเอช ปริมาณซีโอไลต์ ระยะเวลาในการสัมผัส และความเร็วรอบ และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการอธิบายการดูดซับในแต่ละช่วง โดยแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายกลไกในการควบคุมการดูดซับของตัวดูดซับที่เป็นรูพรุนประกอบด้วย pseudo-first-order และ pseudo-second-order

5.2 ไอโซเทอมการดูดซับ

ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมในการทดลองข้อที่ 5 ได้แก่ พีเอช ปริมาณซีโอไลต์ ระยะเวลาในการสัมผัส และความเร็วยรอบ ในกระบวนการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนที่ความเข้มข้น (25, 50, 75, 100, 125 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร) จากนั้นคำนวณหาไอโซเทอมการดูดซับที่เหมาะสมตามสมการไอโซเทอมแลงเมียร์และฟรุนดิช

6.ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนจากน้ำเสียโดยใช้ซีโอไลต์เถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน

น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียมไนโตรเจนเริ่มต้น ที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมโดยจาก NH_4SO_4 ชั่ง NH_4SO_4 4.719 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมได้มาทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนโดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน วางแผนการทดลองแบบ Box – Behnken Design ด้วยเทคนิค Response Surface Methodology (RSM) โดยกำหนดให้ Factor มีทั้งหมด 4 ปัจจัย คือ พีเอช (4, 7 และ 10) ปริมาณซีโอไลต์ (1, 2.5 และ 4 กรัม) ระยะเวลาที่ใช้ในการสัมผัส (15, 67.5 และ 120 นาที) และ ความเร็วรอบในการเขย่า (0, 100 และ 200 รอบต่อนาที) โดยกำหนดค่า Response คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจน (ร้อยละ)

6.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

จลนพลศาสตร์การดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน (CZFA) ศึกษาความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน ที่เวลาใด ๆ (3,5,10,15,30,45,60,75,90,120,150,180 และ 210 นาที) ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน หรือค่า q_t ที่มีปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน เริ่มต้น เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมในการทดลองในข้อที่ 6 ได้แก่ พีเอช ปริมาณซีโอไลต์ ระยะเวลาในการสัมผัส และความเร็วยรอบ และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายการดูดซับในแต่ละช่วง โดยแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายกลไกในการควบคุมการดูดซับของตัวดูดซับที่เป็นรูพรุนประกอบด้วย pseudo-first-order และ pseudo-second-order

6.2 ไอโซเทอมการดูดซับ

ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมในการทดลองข้อที่ 6 ได้แก่ พีเอช ปริมาณซีโอไลต์ ระยะเวลาในการสัมผัส และความเร็วยรอบ ในกระบวนการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนที่ความเข้มข้น (25, 50, 75, 100, 125 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร) จากนั้นคำนวณหาไอโซเทอมการดูดซับที่เหมาะสมตามสมการไอโซเทอมแลงเมียร์และฟรุนดิช

7. ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยโคโคซาน และซีโอไลต์เกรดพาณิชย์ ในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำเสียจากนาุ้ง โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test)

8. ศึกษาการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ใช้แล้วนำสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำซีโอไลต์ที่ใช้แล้วปริมาณ 5 กรัม ใส่ลงไปในช่วงจากนั้นนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที นำซีโอไลต์ที่ได้ไปกรองอบให้แห้งและปล่อยให้เย็นในหม้อดูดความชื้น นำซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้วมาใช้กับน้ำเสียจริง โดยวิธีที่ใช้วิเคราะห์ทั้งหมดในการทดลองใช้วิธีการและมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ และมาตรฐานที่ใช้วิเคราะห์

ค่าพารามิเตอร์	วิธีการ/เครื่องมือ	มาตรฐาน
รูปผลึก	Scanning Electron Microscope	-
ปริมาตรโพรง (cm ³ /g)	Brunacce-Emmett-teller	ASTM D4365-95
ขนาดรูพรุน (nm)	Brunacce-Emmett-teller	ASTM D4365-95
พื้นที่ผิว (m ² /g)	Brunacce-Emmett-teller	ASTM D4365-95
องค์ประกอบทางเคมี	X-ray Fluouessence Spectrophotometer	ASTM D4326-13
โครงสร้างผลึก	X-ray Diffractometer	ASTM D5357-03
ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก	Ammonium acetate method	EPA METHOD 9080
หมู่ฟังก์ชันเฉพาะ	Fourier Transfrom Infrared Spectroscopy	-
แอมโมเนียมไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	Direct Nesslerization	ASTM D1426-08
ความสามารถในการดูดซับ	Determination of Adsorptive Capacity of Activated Carbon by Aqueous Phase Isotherm Technique1	ASTM D3860-98

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เป็นการนำถ้ำลอยถ่านหิน ซึ่งเป็นของเสีย จากบริษัทไทยเทรทีกซีโกลด์มิลล์ส์ จำกัด (มหาชน) มาสังเคราะห์ซีโอไลต์และปรับสภาพด้วยไคโตซาน และทำการหาสภาวะที่เหมาะสมของการสังเคราะห์และการปรับสภาพ รวมทั้งการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง ซึ่งการทดลองทั้งหมดแบ่งออกเป็น 8 ส่วน คือ

1. ขึ้นเตรียมถ้ำลอยถ่านหิน
2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน (ZFA)
3. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพซีโอไลต์ด้วยไคโตซาน (CZFA)
4. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหิน ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยไคโตซาน
5. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน จลนพลศาสตร์การดูดซับ และไอโซเทอม
6. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยไคโตซาน จลนพลศาสตร์การดูดซับ และ ไอโซเทอม
7. ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยไคโตซาน และซีโอไลต์เกรดการค้า ในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำเสียจริงจากนากุ้ง โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test)
8. ศึกษาการฟื้นฟู ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยไคโตซานที่ใช้แล้วและนำกลับมาใช้ใหม่

4.1 การเตรียมเถ้าลอยถ่านหิน

เถ้าลอยถ่านหิน (Coal fly ash) จากบริษัทไทยโพรเทคซีโกล์มิลลส์จำกัด (มหาชน) เกิดจากการบดถ่านหินให้ละเอียดและส่งเข้าเตาเผาที่มีอากาศเพียงพอ โดยเถ้าลอยเป็นเถ้าที่ถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกจากปล่องควันซึ่งอาจถูกจับไว้ด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต มีลักษณะเป็นผงละเอียด ร่วน เป็นสีเทาดำ เนื่องจากการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ (รูปที่ 4.1(ก)) เถ้าลอยถ่านหินที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้ ผ่านการทดสอบว่าไม่เป็นของเสียอันตราย สิ่งปนเปื้อนหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีองค์ประกอบ หรือปนเปื้อนสารอันตราย หรือมีคุณสมบัติที่เป็นอันตรายตามข้อกำหนดในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปนเปื้อนหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (รายละเอียดดังภาคผนวก จ) โดยองค์ประกอบของสารอนินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อหนึ่งกิโลกรัมของสิ่งปนเปื้อนหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (Total Concentration) ต้องมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่า Total Threshold Limit Concentration (TTL) และ สิ่งปนเปื้อนหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เมื่อนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) มีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตราย ในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อลิตรของน้ำสกัด (mg/L) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) ($WET \geq STLC$) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2

การเตรียมเถ้าลอยถ่านหินก่อนสังเคราะห์ซีโอไลต์นั้น ทำได้โดยการนำเอาวัสดุดิบ คือ เถ้าลอยถ่านหินมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำเถ้าลอยถ่านหินที่ผ่านการอบแล้วมาทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 mesh และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 mesh แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เถ้าลอยถ่านหินที่ผ่านการเผาแล้ว สารคาร์บอนในเถ้าลอยจะลดลงทำให้เถ้าลอยเปลี่ยนสีจากสีดำเทาไปเป็นสีน้ำตาลแดง ดังรูปที่ 4.1(ข)



(ก) เถ้าลอยถ่านหิน



(ข) เถ้าลอยถ่านหินหลังการเผา

รูปที่ 4.1 ลักษณะของเถ้าลอยถ่านหิน

ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์ ค่า TTLC ของเถ้าลอยถ่านหิน

Parameter	Test Method ¹	Unit	LOD ²	LOQ ³	Results	Standard ⁵
Arsenic, As	Hydried Generation Test-AAS	mg/l	0.004	0.01	N.D. ⁴	5.0
Barium, Ba	Acid digest Test-AAS	mg/l	0.01	0.04	1.79	100
Chromium, Cr	Acid digest Test-AAS	mg/l	0.01	0.04	<0.04	5.0
Copper, Cu	Acid digest Test-AAS	mg/l	0.02	0.07	0.07	25.0
Cadmium, Cd	Acid digest Test-AAS	mg/l	0.001	0.003	N.D. ⁴	1.0
Mercury, Hg	Cold Vapor Test-AAS	mg/l	0.001	0.003	N.D. ⁴	0.2
Nickel, Ni	Acid digest Test-AAS	mg/l	0.004	0.01	<0.01	20.0
Lead, Pb	Acid digest Test-AAS	mg/l	0.005	0.01	N.D. ⁴	5.0
Zinc, Zn	Acid digest Test-AAS	mg/l	0.01	0.04	0.63	250

Remark

¹ Test Method : United States Environmental Protection Agency. Test Method for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Method. SW-846

² LOD : Limit of detection

³ LOQ : Limit of Quantitation

⁴ N.D. : Not detected at the method detection level.

⁵ Standard : Refer to Notification of Ministry of Industry, Subject : Waste Disposal, 2548 B.E.

ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์ ค่า STLC ของเถ้าลอยถ่านหิน

Parameter	Test Method	Unit	LOD ²	LOQ ³	Results	Standard ⁵
Arsenic, As	Hydried Generation TestAAS	mg/kg	0.40	1.33	N.D. ⁴	500
Barium, Ba	Acid digest Test-AAS	mg/kg	1.00	4.40	222	10,000
Chromium, Cr	Acid digest Test-AAS	mg/kg	2.00	4.22	25.36	2,500
Copper, Cu	Acid digest Test-AAS	mg/kg	2.00	7.06	32.75	2,500
Cadmium, Cd	Acid digest Test-AAS	mg/kg	0.10	0.35	<0.35	100
Mercury, Hg	Cold Vapor Test-AAS	mg/kg	0.10	0.26	N.D. ⁴	20
Nickel, Ni	Acid digest Test-AAS	mg/kg	0.40	1.31	46.44	2,000
Lead, Pb	Acid digest Test-AAS	mg/kg	0.50	0.90	2.64	1,000
Zinc, Zn	Acid digest Test-AAS	mg/kg	1.00	4.46	78.76	5,000
pH value at 25°C	Solid and waste pH by pH meter	-	-	-	11.4	2.0-12.5

Remark

¹ Test Method : United States Environmental Protection Agency. Test Method for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Method. SW-846

² LOD : Limit of detection

³ LOQ : Limit of Quantitation

⁴ N.D. : Not detected at the method detection level.

⁵ Standard : Refer to Notification of Ministry of Industry, Subject : Waste Disposal, 2548 B.E.

4.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์

4.2.1 สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน

ทำการศึกษาโดยการออกแบบการทดลองแบบ Box-Benhken ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MINITAB version 17.0 (Pennsylvania, USA) โดยศึกษาปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย และระดับของตัวแปรอิสระที่ใช้ในการทดลองมี 3 ระดับ คือ ระยะเวลา (X_1 : 12-36 ชั่วโมง) ความเข้มข้นของ NaOH (X_2 : 2-4 โมลต่อลิตร) และ อุณหภูมิ (X_3 : 80-90 องศาเซลเซียส) ดังตารางที่ 4.2 จากการออกแบบการทดลอง ได้การทดลองทั้งหมด 30 การทดลอง ดังตารางที่ 4.3 จากการออกแบบการทดลองได้สมการการทำนายผลการแลกเปลี่ยนประจุบวกของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินในรูปของสมการ Full quadratic regression model ดังนี้

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_i^2 X_i^2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j \neq i}^3 \beta_{ij} X_i X_j \pm \epsilon \quad (1)$$

โดยที่ Y คือค่า Response (ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก; CEC)
 β_0 β_i β_i^2 β_{ij} คือค่า ปัจจัย X_1 X_2 X_3

ตารางที่ 4.3 ปัจจัยและระดับของแต่ละตัวแปรอิสระที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ		
	-1	0	1
X_1 :ระยะเวลา (ชั่วโมง)	12	24	36
X_2 :ความเข้มข้นของ NaOH (โมลต่อลิตร)	2	3	4
X_3 :อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	80	90	100

จากตารางที่ 4.4 พบว่าค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของซีโอไลต์ของเถ้าลอยถ่านหิน (CEC) มีค่าระหว่าง 117.27meq/100g ถึง 268.17 meq/100g ที่สภาวะต่างๆกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ของระยะเวลาในการสัมผัส ความเข้มข้นของ NaOH และ อุณหภูมิ เป็นปัจจัยที่มีผลต่อ CEC

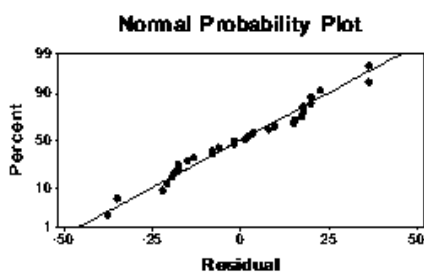
ตารางที่ 4.4 การออกแบบการทดลองและผลที่สภาวะที่เหมาะสมของการเพิ่มค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก

ลำดับการทดลอง	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นNaOH (โมลต่อลิตร)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	CEC (meq/100g)	Y predict (meq/100g)
1	24	2	100	266.25	250.73
2	24	3	90	147.37	137.48
3	24	3	90	145.61	137.48
4	12	4	90	192.72	177.55
5	36	4	90	160.39	181.16
6	36	4	90	162.11	181.16
7	36	3	100	117.27	118.86
8	24	4	80	241.89	259.63
9	24	2	100	268.17	250.72
10	36	3	80	219.96	183.56
11	12	2	90	206.61	186.70
12	24	2	80	193.72	211.55
13	24	3	90	129.67	137.48
14	24	4	100	225.56	203.11
15	24	3	90	129.67	137.48
16	24	2	80	189.43	211.55
17	12	3	80	135.31	133.31
18	36	3	80	219.96	183.56
19	36	2	90	151.94	171.55
20	12	4	90	195.21	177.55
21	24	4	80	244.41	259.63
22	36	2	90	158.33	171.55
23	24	4	100	220.61	203.11
24	12	2	90	206.61	186.70
25	12	3	100	142.84	180.65
26	36	3	100	120.33	118.87
27	24	3	90	131.43	137.48
28	12	3	80	131.44	133.31
29	24	3	90	141.11	137.48
30	12	3	100	145.67	180.65

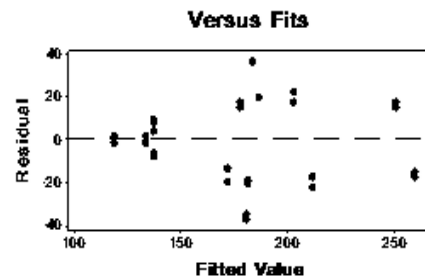
จากการออกแบบการทดลองสามารถสร้างสมการ Full quadratic regression model เพื่อใช้ในการทำนายค่า CEC ได้ ดังสมการที่ (2)

$$Y = 2304 + 25.49 X_1 - 150.7 X_2 - 49.4 X_3 - 0.1229 X_1^2 + 59.46 X_2^2 + 0.3432 X_3^2 + 0.391 X_1 X_2 - 0.2334 X_1 X_3 - 2.393 X_2 X_3 \quad (2)$$

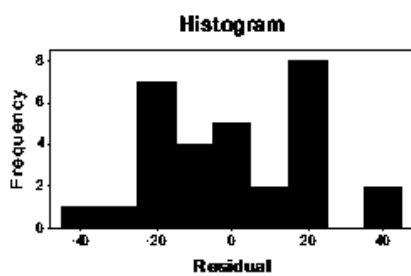
เมื่อ Y คือ CEC (meq/100g)
 X_1 คือ ระยะเวลา (ชั่วโมง)
 X_2 คือ ความเข้มข้นของ NaOH (โมลต่อลิตร)
 และ X_3 คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ตามลำดับ



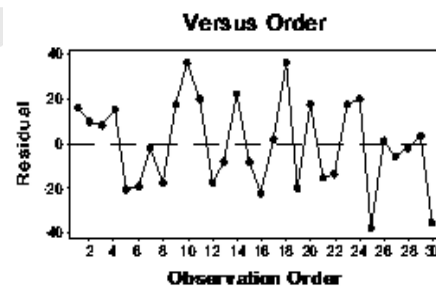
(ก)



(ข)



(ค)

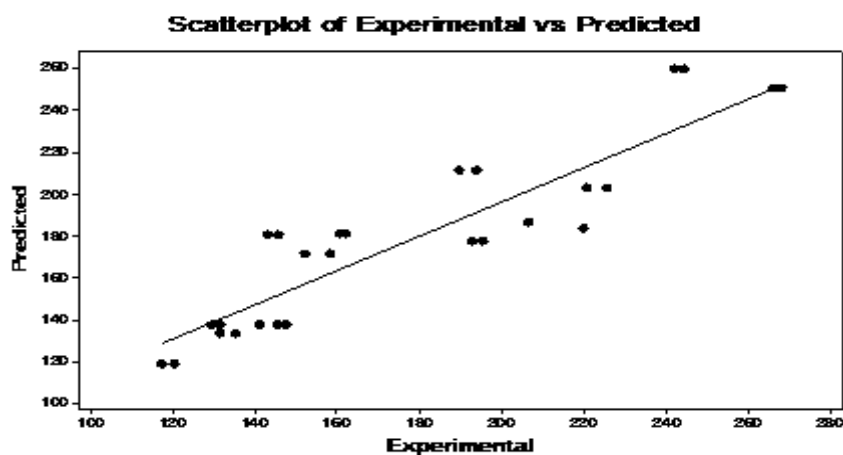


(ง)

รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่า Normal probability Fits Histogram และ Order

ความแม่นยำและความถูกต้องของสมการของการทำนายสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.2 พบว่ารูปที่ 4.2 (ก) แสดงค่าการกระจายตัวแบบปกติ (Normality Probability Plot) พบว่าข้อมูลที่ได้มีการกระจายบนเส้นตรง ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองและจากการทำนายมีค่าใกล้เคียงกัน รูปที่ 4.2 (ข) แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Fitted value กับ Residual พบว่าข้อมูลค่า CEC ที่ได้จากการทำนายอยู่ระหว่าง 100 – 300 meq/100g ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทำนายอยู่ระหว่าง -2 ถึง 2 meq/100g รูปที่ 4.2 (ค) กราฟอีสีโทแกรม พบว่าลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการทำนายมีลักษณะเหมือนระฆังคว่ำ ซึ่งเป็นการแจกแจงข้อมูลแบบปกติ และรูปที่ 4.2 (ง) ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Observation order กับ Residual พบว่าลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการทำนายมีลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลแบบสุ่ม ไม่มีการกระจุกตัวของข้อมูล จากกราฟทั้ง 4 ชนิด สรุปได้ว่าลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลที่ได้จากการทำนายจากการทดลองนี้มีความเหมาะสมสามารถนำไปใช้ในการทำนายค่า CEC ของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ได้จากเถ้าลอยถ่านหิน (Wantala et al., 2013) (Sriprom et al., 2015)

จากการเปรียบเทียบค่า ค่า CEC ของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ได้จากเถ้าลอยถ่านหินที่ได้จากการทดลองกับ ค่า CEC ของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ได้จากเถ้าลอยถ่านหินที่ได้จากการทำนายตามสมการที่ (2) พบว่ามีความมีค่า R^2 เท่ากับ 81.47% ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ค่า CEC ที่ได้จากการทำนายและค่า CEC ที่ได้จากการทดลอง

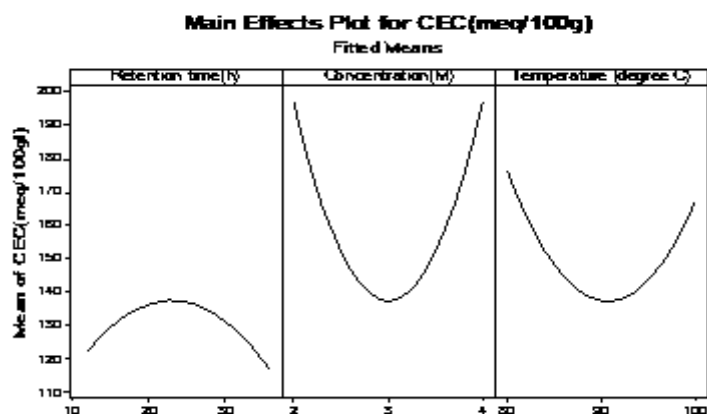
จากตารางที่ 4.5 พบว่า เวลาในการสัมผัส ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH และอุณหภูมิ มีผลต่อค่า CEC ของซีโอไลท์สังเคราะห์ที่ได้จากเถ้าลอยถ่านหิน อย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 (P-value > 0.05) แต่อย่างไรก็ตาม ผลในสมการรูปยกกำลังสองของทุกปัจจัย มีผลต่อค่า CEC ของซีโอไลท์สังเคราะห์ที่ได้จากเถ้าลอยถ่านหิน อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 (P-value < 0.05) ซึ่งหมายความว่า เมื่อทั้งสามปัจจัยในปริมาณมากยกกำลังสองจะมีผลต่อ CEC ของซีโอไลท์สังเคราะห์ที่ได้จากเถ้าลอยถ่านหิน และผลของปัจจัยร่วมระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย NaOH กับอุณหภูมิ และเวลาในการสัมผัสกับอุณหภูมิ มีผลต่อค่า CEC ของซีโอไลท์สังเคราะห์ที่ได้จากเถ้าลอยถ่านหิน อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 (P-value < 0.05) นอกจากนี้แล้วการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการทำนาย (Analysis Of Variance; Anova) จากตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ค่าทางสถิติ พบว่ามีค่า R² เท่ากับ 81.47%

ตารางที่ 4.5 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	48590.5	5398.9	9.77	0.000
Linear	3	434.3	144.8	0.26	0.852
Retention time ,hr	1	132.9	132.9	0.24	0.629
Concentration,M	1	0.2	0.2	0.00	0.985
Temperature, C	1	301.2	301.2	0.55	0.469
Square	3	37124.5	12374.8	22.40	0.000
Retention time ,hr * Retention time ,hr	1	2312.8	2312.8	4.19	0.054
Concentration ,M * Concentration,M	1	26108.6	26108.6	47.26	0.000
Temperature, C*Temperature, C	1	8697.0	8697.0	15.74	0.000
2-Way Interaction	3	11031.7	11031.7	6.66	0.003
Retention time ,hr* Concentration,M	1	176.0	176.0	0.32	0.579
Retention time ,hr* Temperature, C	1	6276.5	6276.5	11.36	0.003
Concentration ,M * Temperature, C	1	4579.2	4579.2	8.29	0.009
R ²		81.47%			

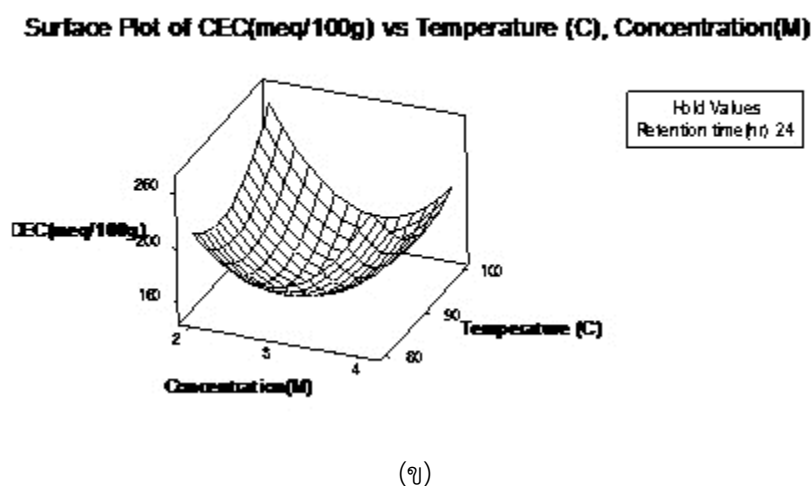
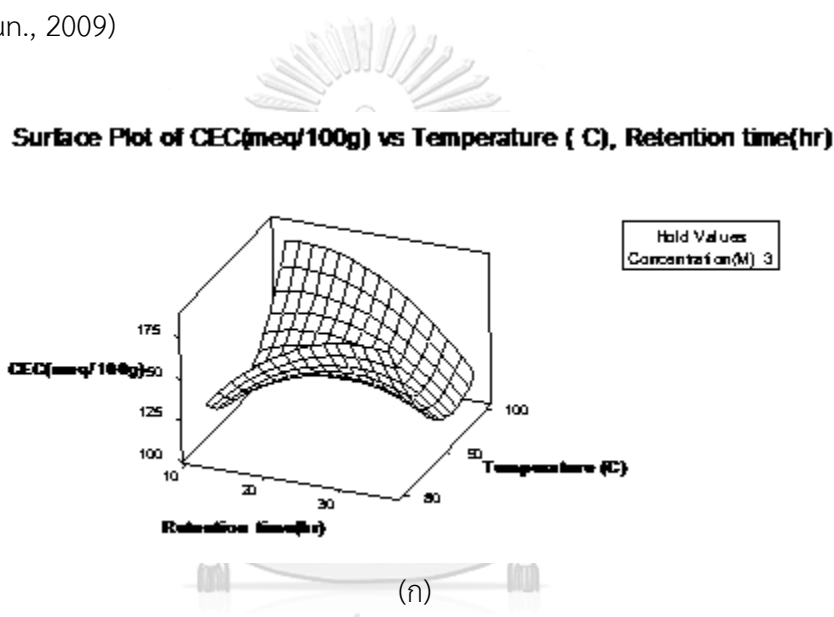
4.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน

จากการออกแบบการทดลองแบบ Box-Benhken Design โดยทำการวิเคราะห์แบบตอบสนองพื้นผิว (Response Surface Methodology) พบว่า ผลของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่า CEC ของซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินที่สังเคราะห์ที่สภาวะต่างๆ ดังรูปที่ 4.4 พบว่า ปัจจัยด้านระยะเวลา มีผลต่อค่า CEC ของการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน กล่าวคือ เมื่อระยะเวลาในการสัมผัสเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 10-20 ชั่วโมง ค่า CEC จะเพิ่มขึ้น และจะลดลงเมื่อเวลา 20 ชั่วโมงขึ้นไป เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Ojha, Pradhan, and Samanta (2004a) ที่พบว่าค่า CEC ของสารซีโอไลต์ชนิด X จะมีค่ามาก ในระยะเวลาเริ่มการทำปฏิกิริยาเนื่องจาก สารกำลังสร้างผลึก (crystallization) แต่ถ้าใช้ระยะเวลานานเกินกว่า 15 ชั่วโมงค่า CEC ชนิด X จะมีค่าลดลง ปัจจัยด้านความเข้มข้นของ NaOH ในแต่ละช่วงมีผลต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารที่ปรับสภาพต่างกัน เช่น หากใช้ NaOH ความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร และ 4 โมลต่อลิตร พบว่ามีค่า CEC ที่ใกล้เคียงกัน และจากงานวิจัย ของ Wang และ Lin ระบุว่าหากใช้ความเข้มข้นของ NaOH มากขึ้นจะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยลง ในส่วนของปัจจัยด้านอุณหภูมิพบว่า ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนถึง อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ค่า CEC ลดลง หลังจากนั้น ค่า CEC ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิมิมีผลต่อการเกิดโครงสร้างของผลึกที่อุณหภูมิต่ำและที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดโครงสร้างของผลึกมีความซับซ้อนมากขึ้น ทำให้ค่า CEC ลดลงด้วย (Wang & Lin., 2009; Zhang, Dong, Guo, Shao, & Wu., 2018)



รูปที่ 4.4 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน

ผลของปัจจัยร่วมระหว่างระยะเวลากับอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.5 (ก) พบว่าค่า CEC มีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้เวลาในการทดลองเพิ่มมากขึ้น แต่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินลดน้อยลง รูปที่ 4.5 (ข) แสดงผลของปัจจัยร่วมระหว่าง ความเข้มข้นของ NaOH กับ อุณหภูมิ พบว่าค่า CEC ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินจะมีค่าสูง เมื่อความเข้มข้นของ NaOH สูง และอุณหภูมิของการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินต่ำลง ในขณะเดียวกันหากใช้ความเข้มข้นของ NaOH ต่ำและอุณหภูมิสูงส่งผลให้ ค่า CEC ของการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินสูงได้เช่นกัน โดยผลของปัจจัยร่วมกันในด้านระยะเวลา ความเข้มข้นของ NaOH และอุณหภูมิ ล้วนส่งผลร่วมกันต่อการเพิ่มสูงขึ้นของค่า CEC (Ojha, Pradhan, & Samanta., 2004b; Wang, Li, Sun, Wang, & Sun., 2009)



รูปที่ 4.5 ปัจจัยร่วมที่มีผลต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน

จากการออกแบบการทดลองแบบ Box-Benhken design พบว่า สภาวะที่เหมาะสมของการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน ที่มีค่า CEC สูงสุด คือ ระยะเวลา 34 ชั่วโมง ความเข้มข้นของ NaOH 4 โมลต่อลิตร และอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สามารถให้ค่า CEC สูงสุด เท่ากับ 272.12 meq/100g ทำการยืนยันผลที่สภาวะที่เหมาะสม โดยทำการทดลองซ้ำ จำนวน 3 ซ้ำ พบว่า CEC สูงสุดที่ได้ มีค่าเท่ากับ 269.50 ± 2 meq/100g ซึ่งใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ Full Quadratic Regression Model แสดงให้เห็นว่าสมการที่ใช้ในการทำนายมีความถูกต้องแม่นยำ ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มค่า CEC ที่สูงสุดของการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินจากงานวิจัยอื่น ๆ มีค่าดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ซีโอไลต์	แหล่งเถ้าลอย	CEC (meq/100g)	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
GIS	China	69	Zhang et al. (2011)
Na-P1	Brazil	290	Cardoso, Horn, Ferret, Azevedo, and Pires (2015)
Na-P1	China	213	Zhang et al. (2007)
Na-P1, FAU, CHA	India	283.30	Prasad, Sangita, and Tewary (2001)
Zeolite X with small amounts of A, P and HS	China	279	Zhang et al. (2011)
A	South Africa	105	Koukouzas, Vasilatos, Itskos, Mitsis, and Moutsatsou (2010)
FAU, SOD, A	South Africa	95	Somerset, Petrik, and Iwuoha (2008)
Unnamed zeolite ซีโอไลต์สังเคราะห์จาก เถ้าลอยถ่านหิน	Thailand	272.12	งานวิจัยที่กำลังศึกษา

4.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยถ่านหินด้วยการใช้ไคโตซาน

4.3.1 สภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินด้วยการใช้ไคโตซาน

ทำการศึกษา โดยการออกแบบการทดลองแบบ Box-Benhken ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MINITAB version 17.0 (Pennsylvania, USA) โดยศึกษาปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย และระดับของตัวแปรอิสระที่ใช้ในการทดลองมี 3 ระดับ คือ ความเข้มข้นของไคโตซาน (X_1 : 5-10 กรัมต่อลิตร) ระยะเวลา (X_2 : 12-36 ชั่วโมง) และ อุณหภูมิ (X_3 : 40-60 องศาเซลเซียส) ดังตารางที่ 4.7 จากการออกแบบการทดลอง ได้การทดลองทั้งหมด 30 การทดลอง ดังตารางที่ 4.8 จากการออกแบบการทดลองจะได้สมการการทำนายผลการแลกเปลี่ยนประจุบวกของการปรับสภาพซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินด้วยการใช้ไคโตซานในรูปของสมการ Full quadratic regression model ดังนี้

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_i^2 X_i^2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j \neq i}^3 \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon \quad (3)$$

โดยที่ Y คือค่า Response (ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก; CEC) β_0 β_1 β_1^2 β_{ij} คือค่า ปัจจัย X_1 X_2 X_3

ตารางที่ 4.7 ปัจจัยและระดับของแต่ละตัวแปรอิสระที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ		
	-1	0	1
X_1 :ความเข้มข้นของไคโตซาน (g/L)	5	10	15
X_2 :ระยะเวลา(hr)	12	24	36
X_3 :อุณหภูมิ (°C)	40	50	60

ตารางที่ 4.8 การออกแบบการทดลองและผลที่สภาวะที่เหมาะสมของการเพิ่มค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก

ลำดับการทดลอง	ความเข้มข้นของไคโตซาน (g/L)	ระยะเวลา hr	อุณหภูมิ, °C	CEC, meq/100g	Y predict meq/100g
1	5	36	50	144.22	139.53
2	15	24	60	217.81	209.80
3	10	36	40	251.11	255.42
4	10	12	60	236.39	226.94
5	10	24	50	279.72	295.80
6	5	36	50	149.44	139.53
7	10	24	50	336.25	295.80
8	15	12	50	192.64	199.94
9	10	24	50	269.17	295.80
10	10	36	40	256.67	255.42
11	5	12	50	144.31	151.98
12	15	12	50	192.64	199.94
13	10	12	60	220.56	226.94
14	15	24	40	215.28	214.20
15	15	36	50	235.97	242.48
16	15	36	50	251.00	242.48
17	10	36	60	177.50	174.28
18	10	36	60	157.50	174.28
19	5	24	40	142.08	147.78
20	5	24	60	128.61	125.31
21	5	24	60	120.97	125.31
22	15	24	40	214.17	214.20
23	10	24	50	289.71	295.81
24	10	24	50	279.72	295.81
25	10	12	40	179.44	172.66
26	10	24	50	320.28	295.81
27	5	12	50	157.64	151.98
28	5	24	40	141.94	147.78
29	10	12	40	179.44	172.66
30	15	24	60	213.33	209.80

ผลการทดสอบค่า CEC ของซีโอไลท์สังเคราะห์จากเถ้าลอยก่อนการปรับสภาพมีค่า เท่ากับ 272.12 meq/100g ค่า CEC ของโคโตซานเกรดการค้า มีค่าเท่ากับ 80.55 meq/100g และผลการทดลองหาความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของโคโตซาน ระยะเวลา และอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีผลต่อ CEC พบว่าค่า CEC หลังการปรับสภาพซีโอไลท์จากเถ้าลอยถ่านหินด้วยโคโตซานมีค่า CEC อยู่ระหว่าง 120.97 meq/100g ถึง 336.25 meq/100g และจากการออกแบบการทดลองสามารถสร้างสมการ Full quadratic regression model เพื่อใช้ในการทำนายค่า CEC ได้ ดังในสมการที่ (4)

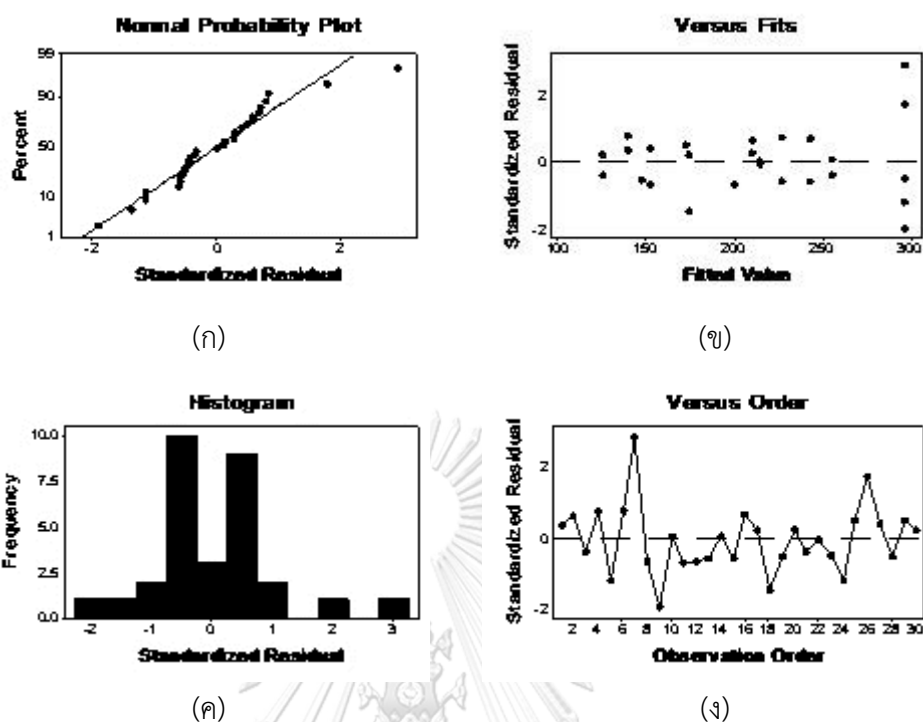
$$Y = -1670 + 55.68 X_1 + 25.65 X_2 + 54.04 X_3 - 2.908 X_1 X_1 - 0.2753 X_2 X_2 - 0.4885 X_3 X_3 + 0.2291 X_1 X_2 + 0.090 X_1 X_3 - 0.2821 X_2 X_3 \quad (4)$$

เมื่อ Y คือ CEC (meq/100g)

X_1 คือ ความเข้มข้นของโคโตซาน (g/L)

X_2 คือ ระยะเวลา (hr) และ

X_3 คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ตามลำดับ

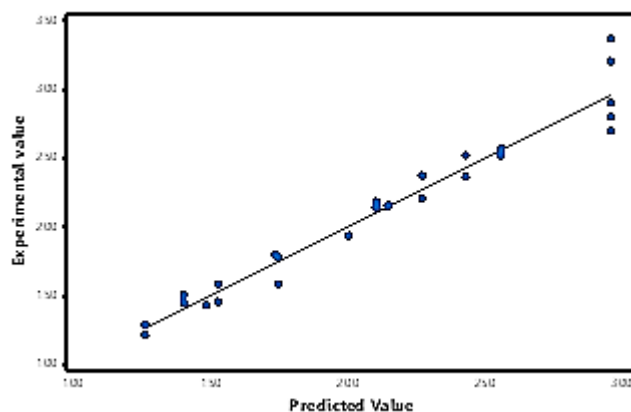


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่า Normal probability Fits Histogram และ Order

ความแม่นยำและความถูกต้องของสมการของการทำนายสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.6 พบว่ารูปที่ 4.6 (ก) แสดงค่าความสัมพันธ์ Normality Probability Plot พบว่าผลข้อมูลที่ได้มีการกระจายบนเส้นตรง ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองและจากการทำนายมีค่าใกล้เคียงกัน รูปที่ 4.6 (ข) ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Fited value กับ Residual พบว่าข้อมูลค่า CEC ที่ได้จากการทำนายอยู่ระหว่าง 100-300 meq/100g ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทำนายอยู่ระหว่าง -2 ถึง 2 meq/100 g รูปที่ 4.6 (ค) กราฟฮิสโทแกรม พบว่า ลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการทำนายมีลักษณะเหมือนระฆังคว่ำซึ่งเป็นการแจกแจงข้อมูลแบบปกติ และรูปที่ 4.6 (ง) ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Observation order กับ Residual พบว่าลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการทำนายมีลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลแบบสุ่ม ไม่มีการกระจุกตัวของข้อมูล จากกราฟทั้ง 4 ชนิด สรุปได้ว่าลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลที่ได้จากการทำนายจากการทดลองนี้มีความเหมาะสมสามารถนำไปใช้ในการทำนายค่า CEC ของการปรับสภาพซีโอไลท์สังเคราะห์ที่ได้จากเถ้าลอยถ่านหินด้วยการใช้โคโตซาน (Wantala et al., 2013; Sriprom et al., 2015)

จากการเปรียบเทียบค่า CEC ของการปรับสภาพซีโอไลท์สังเคราะห์ที่ได้จากเถ้าลอยถ่านหินด้วยการใช้โคโตซานที่ได้จากการทดลองกับ ค่า CEC ของการปรับสภาพซีโอไลท์สังเคราะห์ที่ได้จากเถ้า

ล่อยถ่านหินด้วยการใช้ไคซานที่ได้จากการทำนายตามสมการที่ (4) พบว่ามีความมีค่า R^2 เท่ากับ 95.35% ดังในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ค่า CEC ที่ได้จากการทำนายและค่า CEC ที่ได้จากการทดลอง

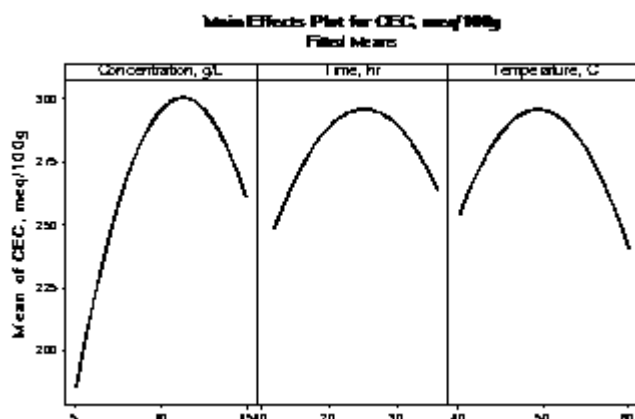
จากตารางที่ 4.9 พบว่าความเข้มข้นของสารละลายไคโตซานมีผลต่อค่า CEC ของการปรับสภาพซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ได้จากถ่านล่อยถ่านหินด้วยการใช้ไคโตซานอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับกับผลในสมการรุกรายกำลังสองของทุกปัจจัย นั่นหมายความว่า เมื่อทั้งสามปัจจัยในปริมาณมากยกกำลังสองจะมีผลต่อ CEC ของการปรับสภาพซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ได้จากถ่านล่อยถ่านหินด้วยการใช้ไคซานอย่างมีนัยสำคัญ และผลของปัจจัยร่วมระหว่างความเข้มข้นของสารละลายไคโตซานกับอุณหภูมิ และเวลากับอุณหภูมิ มีผลต่อ CEC ของการปรับสภาพซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ได้จากถ่านล่อยถ่านหินด้วยการใช้ไคซาน อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ($P\text{-value} < 0.05$)

ตารางที่ 4.9 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	95316.4	10590.7	45.66	0.000
Linear	3	24400.1	8133.4	35.06	0.000
Concentration, g/L	1	22773.1	22773.1	98.17	0.000
Time, hr	1	905.3	905.3	3.90	0.062
Temperature, C	1	721.7	721.7	3.11	0.093
Square	3	60071.3	20023.8	86.32	0.000
Concentration, g/L*Concentration, g/L	1	39018.2	39018.2	168.21	0.000
Time, hr*Time, hr	1	11601.7	11601.7	50.01	0.000
Temperature, C*Temperature, C	1	17618.8	17618.8	75.95	0.000
2-Way Interaction	3	10845.1	3615.0	15.58	0.000
Concentration, g/L*Time, hr	1	1512.0	1512.0	6.52	0.019
Concentration, g/L*Temperature, C	1	163.2	163.2	0.70	0.412
Time, hr*Temperature, C	1	9170.0	9170.0	39.53	0.000
R ²		95.36%			

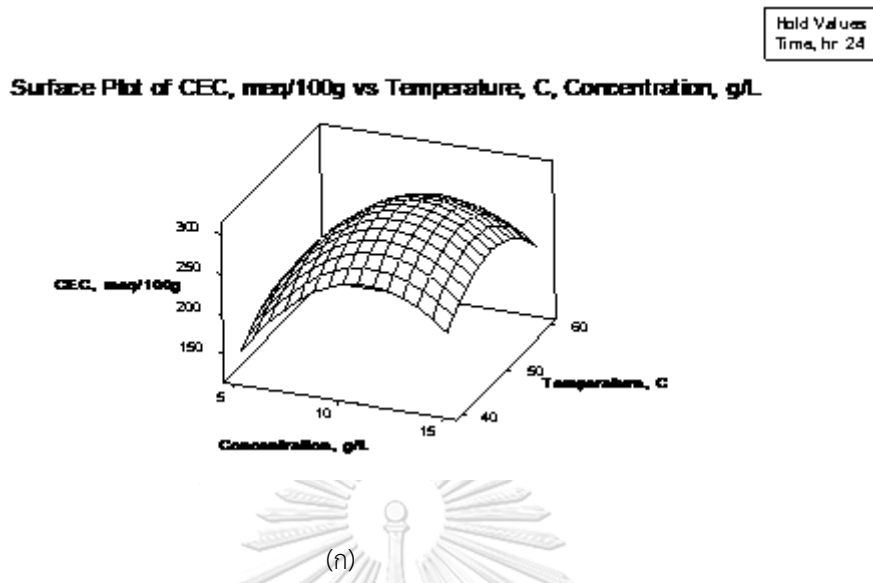
4.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับสภาพซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินด้วยการใช้ไคโตซาน

จากการออกแบบการทดลองแบบ Box-Benkhken Design โดยทำการวิเคราะห์แบบตอบสนองพื้นผิว (Response Surface Methodology) พบว่า ผลของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่า CEC ของซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยไคโตซาน ด้วยสภาวะต่างๆ ดังรูปที่ 4.8 เมื่อพิจารณาปัจจัยด้านระยะเวลา พบว่าระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น จะให้ค่า CEC เพิ่มขึ้นแค่ช่วงเวลาหนึ่งและก็จะลดลง ส่วนปัจจัยด้านความเข้มข้นของสารละลายไคโตซาน ในแต่ละช่วงมีผลต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารที่ปรับสภาพต่างกัน เช่น หากใช้สารละลายไคโตซานที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจาก 5 โมลต่อลิตร เป็น 10 โมลต่อลิตร พบว่ามีค่า CEC ที่เพิ่มขึ้น และปัจจัยด้านอุณหภูมิพบว่าอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส มีค่า CEC สูงและค่า CEC จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

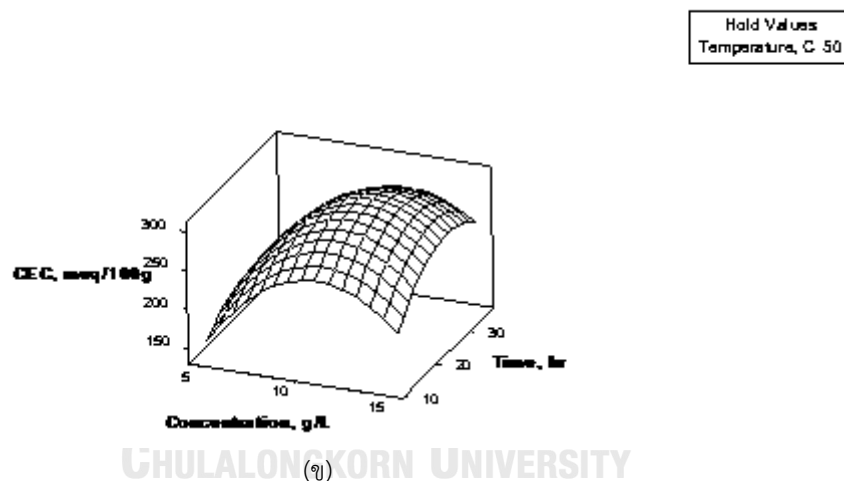


รูปที่ 4.8 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน

ปัจจัยผลของร่วมระหว่างความเข้มข้นของไคโตซานกับอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ก) พบว่าค่า CEC มีค่าสูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นของไคโตซานเพิ่มมากขึ้นถึง 10 กรัมต่อลิตร หลังจากนั้นค่า CEC จะลดต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิในการปรับสภาพซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินด้วยไคโตซานที่เพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 40-50 องศาเซลเซียส และลดน้อยลงหลังจากอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และผลของปัจจัยร่วมระหว่าง ความเข้มข้นของไคโตซาน กับ เวลา (รูปที่ 4.9 (ข)) พบว่าค่า CEC ของการปรับสภาพซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินด้วยไคโตซานจะมีค่าสูง เมื่อความเข้มข้นไคโตซานสูง และเวลาของการปรับสภาพซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินด้วยไคโตซานสูงขึ้น ในทางกลับกัน ค่า CEC ของการปรับสภาพซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินด้วยไคโตซานลดลง เมื่อความเข้มข้นของไคโตซานสูงกว่า 10 กรัมต่อลิตรและเวลาสูงกว่า 26 ชั่วโมง ในการปรับสภาพซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินด้วยไคโตซาน พบว่าผลของปัจจัยร่วมกันในด้านระยะเวลา ความเข้มข้นของไคโตซานและอุณหภูมิ มีผลร่วมกันต่อการเพิ่มขึ้นของค่า CEC ของการปรับสภาพซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินด้วยไคโตซาน



Surface Plot of CEC, meq/100g vs Time, hr, Concentration, g/L



รูปที่ 4.9 ปัจจัยร่วมที่มีผลต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยไคโตซาน

จากการหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของค่า CEC สูงสุดของการปรับสภาพซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินด้วยการใช้ไคโตซาน พบว่า ที่ระยะเวลาในการสัมผัส 26 ชั่วโมง ความเข้มข้นของสารละลายไคโตซาน 11 กรัมต่อลิตร และ อุณหภูมิ 48 องศาเซลเซียส ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยไคโตซาน ให้ค่า CEC เท่ากับ 301.39 meq/100g ยืนยันผลที่สภาวะเหมาะสม โดยทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ซ้ำ พบว่า CEC เท่ากับ 300 ± 2 meq/100g ซึ่งใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทำนายของสมการ แสดงให้เห็นว่าสมการที่ใช้ในการทำนายมีความถูกต้องแม่นยำในการหาสภาวะที่

เหมาะสมในการเพิ่มค่า CEC ที่สูงสุดของซีโอไลท์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยไคโตซาน ซึ่งหลังจากการปรับสภาพด้วยไคโตซานแล้วพบว่าค่า CEC ของซีโอไลท์จากเถ้าลอยถ่านหินมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 272.12 meq/100g เป็น 301.39 meq/100g และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของซีโอไลท์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินจากงานวิจัยอื่น ๆ มีค่าดังตารางที่ 4.10

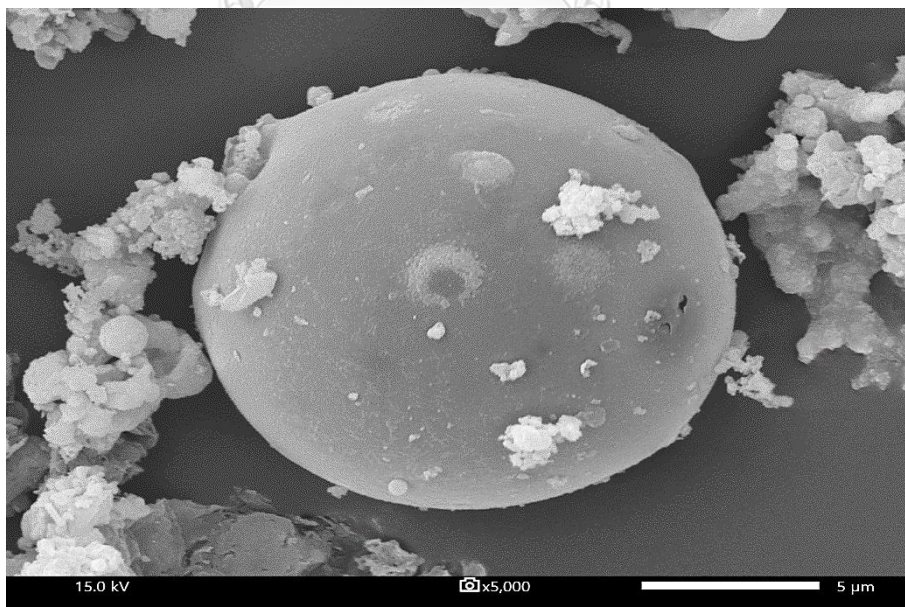
ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของซีโอไลท์ที่สังเคราะห์ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ซีโอไลท์	แหล่งเถ้าลอย	CEC (meq/100g)	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
GIS	China	69	Zhang et al. (2011)
Na-P1	Brazil	290	Cardoso et al. (2015)
Na-P1	China	213	Zhang et al. (2007)
Na-P1, FAU, CHA	India	283.30	Prasad et al. (2001)
Zeolite X with small amounts of A, P and HS	China	279	Zhang et al. (2011)
Z(South Africa	105	Koukouzas et al. (2010)
FAU, SOD, A	South Africa	95	Somerset et al. (2008)
X ,A	China	270.04	Zhang et al. (2018)
ซีโอไลท์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน	Thailand	272.12	งานวิจัยที่กำลังศึกษา
ซีโอไลท์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน	Thailand	301.39	งานวิจัยที่กำลังศึกษา

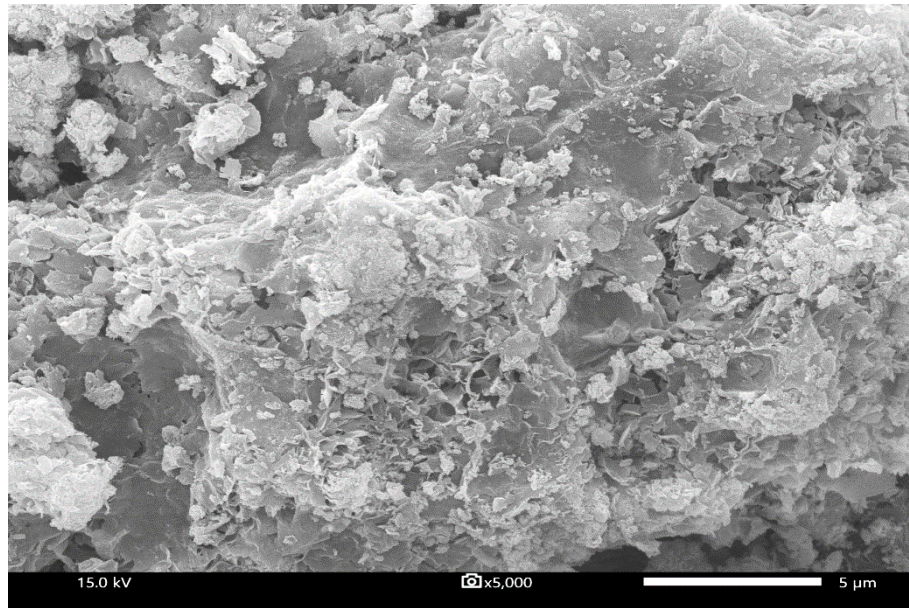
4.4 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของถั่วลอยถ่านหิน ซีโอไลต์จากถั่วลอยถ่านหิน และซีโอไลต์จากถั่วลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยไคโตซาน

4.4.1 ลักษณะรูปร่างของถั่วลอยถ่านหิน ซีโอไลต์จากถั่วลอยถ่านหิน และ ซีโอไลต์จากถั่วลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยไคโตซานที่สังเคราะห์ได้

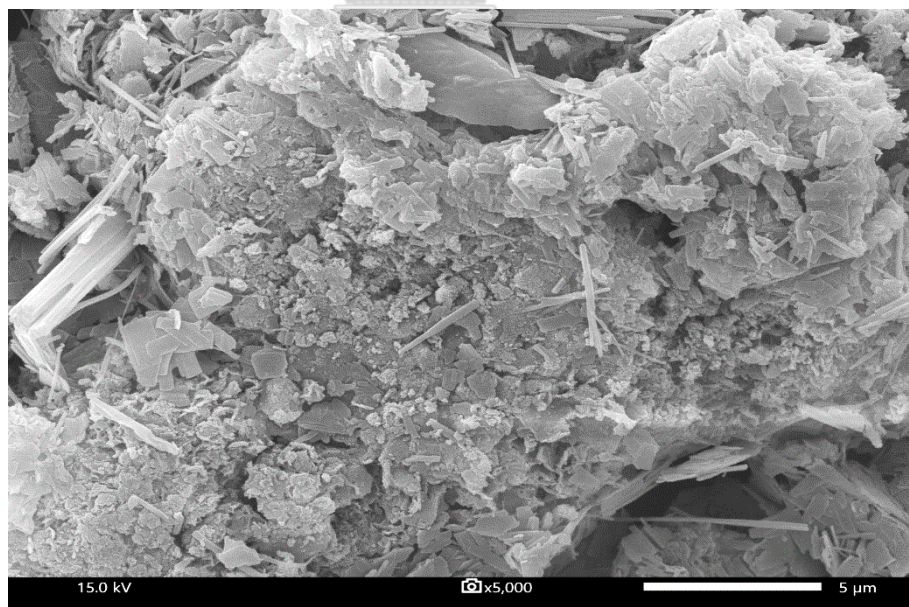
จากการวิเคราะห์โครงสร้าง พื้นที่ผิวถั่วลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope: SEM) โดยรูปที่ 4.10 แสดงโครงสร้างและพื้นที่ผิวของถั่วลอยถ่านหินเมื่อใช้กำลังขยาย 5,000 เท่า พบว่า รูปร่างของถั่วลอยถ่านหินมีลักษณะค่อนข้างกลมถึงกลม (Sub-round to round) ในขณะที่รูปร่างและโครงสร้างพื้นที่ผิวของซีโอไลต์จากถั่วลอยถ่านหินเมื่อใช้กำลังขยาย 5,000 เท่า ดังแสดงใน รูปที่ 4.11 มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปจากถั่วลอยถ่านหิน โดยรูปร่างมีลักษณะไม่เป็นทรงกลม พื้นที่ผิวมีความพรุนมากขึ้นและพบว่ามีผลึกเกิดขึ้น (Xie, et al., 2013) ขณะที่โครงสร้างและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถั่วลอยที่ปรับสภาพด้วยไคโตซาน เมื่อใช้กำลังขยาย 5,000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่า รูปร่างของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถั่วลอยที่ปรับสภาพด้วยไคโตซานมีลักษณะมีแผ่นราบเรียบของไคโตซานเคลือบอยู่บนผิวนอกของซีโอไลต์



รูปที่ 4.10 โครงสร้างและพื้นที่ผิวของถั่วลอยถ่านหินเมื่อใช้กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูปที่ 4.11 โครงสร้างและพื้นที่ผิวของซิลิโอสองที่สังเคราะห์จากแก้วลอยแก้วลอยถ่านหิน เมื่อใช้กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูปที่ 4.12 โครงสร้างและพื้นที่ผิวของซิลิโอสองที่สังเคราะห์จากแก้วลอยที่ปรับสภาพด้วยไฮดรอกไซด์ เมื่อใช้กำลังขยาย 5,000 เท่า

4.4.2 ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุน และพื้นที่ผิว ของถ้ำลอยถ่านหิน ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยไคโตซาน

ปริมาณพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนรวม และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ้ำลอยถ่านหิน ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน และซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยไคโตซาน ดังตารางที่ 4.11 ซึ่งพบว่า ถ้ำลอยถ่านหินมีพื้นที่ผิว 18.130 ตารางเมตรต่อกรัม จากนั้นเมื่อนำถ้ำลอยถ่านหินไปทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล พื้นที่ผิวของซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น มีค่าเท่ากับ 34.550 ตารางเมตรต่อกรัม (ร้อยละ 47.53) เมื่อทำการปรับปรุงสภาพซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินด้วยการเคลือบไคโตซาน พบว่า พื้นที่ผิวของซีโอไลต์ที่มีการปรับสภาพด้วยไคโตซาน เพิ่มขึ้น เป็น 39.460 ตารางเมตรต่อกรัม (ร้อยละ 0.13) ค่าพื้นที่ผิวของซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีค่าดังในตารางที่ 4.12 นอกจากนี้แล้ว ปริมาตรรูพรุนรวมของถ้ำลอยถ่านหิน ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน และ ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ปรับด้วยสภาพไคโตซาน มีค่า เท่ากับ 0.026 0.133 และ 0.043 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเฉลี่ยของถ้ำลอยถ่านหิน ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน และ ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน มีค่า เท่ากับ 5.754 15.400 และ 34.550 นาโนเมตร ตามลำดับ

จากผลการทดลองดังกล่าว เห็นได้ว่า ปริมาตรรูพรุนรวม เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเฉลี่ย และพื้นที่ผิวเป็นลักษณะทางกายภาพที่สำคัญที่จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดซับของซีโอไลต์ โดยซีโอไลต์ที่มีปริมาตรรูพรุนรวม ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และพื้นที่ผิวมากจะทำให้มีความสามารถในการดูดซับดีกว่า จากผลการวิเคราะห์ปริมาตรรูพรุนรวม เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเฉลี่ย และพื้นที่ผิวของถ้ำลอยถ่านหิน และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ พบว่า ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จะมีพื้นที่ผิวและปริมาตรโพรงมากกว่าถ้ำลอยถ่านหินที่ยังไม่ผ่านสังเคราะห์ที่สภาวะต่างๆ แต่ในซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซานนั้น ปริมาตรรูพรุนรวมและขนาดรูพรุนเฉลี่ยจะมีลดลงแต่พื้นที่ผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซานจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ปริมาณรุกรุนรวม ขนาดรุกรุนเฉลี่ย และ พื้นที่ผิวของถ้ำลอยถ่านหิน และซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยโคโคซาน

ชนิดของตัวอย่าง	ปริมาตรรุกรุน (ลบ.ซม./กรัม)	เส้นผ่านศูนย์กลางของรุกรุน เฉลี่ย (นาโนเมตร)	พื้นที่ผิว (ตรม./กรัม)
ถ้ำลอยถ่านหิน	0.026	5.754	18.130
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำ ลอยถ่านหิน	0.133	15.400	34.550
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำ ลอยถ่านหินปรับสภาพด้วย โคโคซาน	0.043	4.361	39.460

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบค่าพื้นที่ผิวของสารซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ซีโอไลต์และสารประกอบอื่นๆ	แหล่งถ้ำ ลอย	พื้นที่ผิว (ตรม./กรัม)	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
GIS	China	45.511	Zhang et al. (2011)
HS	South Africa	7.4	Woolard, Strong, and Erasmus (2002)
NaP1	Australia	24	Wang, Soudi, Li, and Zhu(2006)
Na-P1, Y, X, SOD, ANA	Turkey	27.4	Atun, Hisarlı, Kurtoğlu, and Ayar (2011)
HS	China	91.49	Chen et al. (2006)
Zeolite X with small amounts of A, P and HS	China	27.015	Zhang et al. (2011)
Na-P1, SOD	Thailand	35.38	Pengthamkeerati, Satapanajaru, and Chularuengsoarn (2008)
Na-P1,HS,Quartz.Mullite	China	91.50	Xie, Li, et al. (2013)
Na-P1	China	18.5	Liu et al. (2018)
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอย ถ่านหิน	Thailand	34.55	This work
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอย ถ่านหินปรับสภาพด้วยโคโคซาน	Thailand	39.46	

4.4.3 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหิน ซีโอไลท์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน และซีโอไลท์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน โดยวิธีเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของของถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลท์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน และซีโอไลท์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน ซึ่งทำการศึกษาโดยใช้เครื่องเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ให้ผลดังตารางที่ 4.13 พบว่าสารประกอบที่พบในถ้ำลอยถ่านหิน เป็นสารเริ่มต้นที่สำคัญในการสังเคราะห์ซีโอไลท์ เนื่องจากถ้ำลอยถ่านหินประกอบไปด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความสำคัญมากในการเกิดเป็นซีโอไลท์ ในถ้ำลอยถ่านหินมี SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เท่ากับ ร้อยละ 31.8 ร้อยละ 13.7 ร้อยละ 38.7 และ ร้อยละ 7.23 ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อนำถ้ำลอยถ่านหินมาทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดเป็นซีโอไลท์สังเคราะห์ขึ้นมาได้

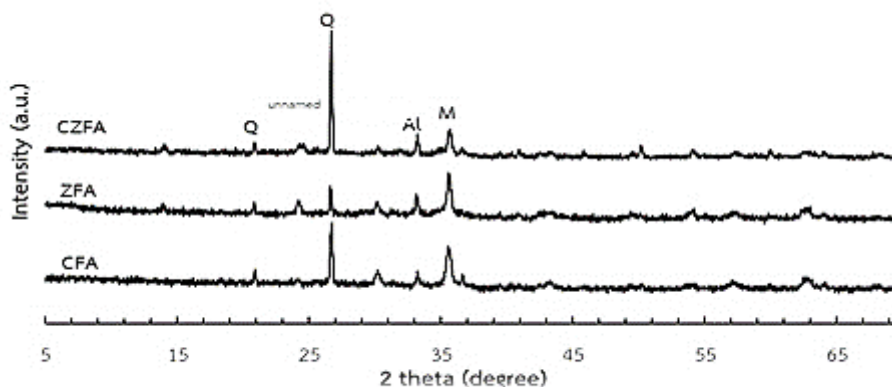
ตารางที่ 4.13 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหิน ซีโอไลท์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน และซีโอไลท์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน

องค์ประกอบ	ถ้ำลอยถ่านหิน (ร้อยละ)	ซีโอไลท์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน (ร้อยละ)	ซีโอไลท์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน (ร้อยละ)
SiO_2	31.8	27.6	32.6
Al_2O_3	13.7	11.0	13.5
Fe_2O_3	38.7	40.6	36.4
CaO	7.23	9.05	3.86
MgO	2.14	2.47	2.30
Na_2O	0.361	6.95	3.05
K_2O	0.844	0.18	0.234

จากองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหินและถ้ำลอยถ่านหินที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า SiO_2 และ Al_2O_3 ของถ้ำลอยถ่านหินจะลดลงเมื่อถูกสังเคราะห์เป็นซีโอไลท์ โดยถ้ำลอยถ่านหินนั้นถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้มีปริมาณ SiO_2 และ Al_2O_3 ลดลง จากร้อยละ 31.80 เป็นร้อยละ 27.60 และ จากร้อยละ 13.70 เป็นร้อยละ 11.00 ตามลำดับ ในขณะที่ Fe_2O_3 ของถ้ำลอยถ่านหินที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ไซด์ จะเพิ่มขึ้นเมื่อแก้ล้อย่านหินถูกสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์ จากร้อยละ 38.70 เป็นร้อยละ 40.60 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า Na_2O ของแก้ล้อย่านหินจะเพิ่มขึ้นเมื่อถูกสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์ทั้งที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากร้อยละ 0.361 เป็นร้อยละ 6.95 ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากการกระตุ้นแก้ล้อย่านหินด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้โซเดียมไอออน (Na^+) เข้าไปประกอบอยู่ในโครงสร้างของซิลิกาออกซิเจนเตตระอีตรอล และอะลูมิเนียมออกซิเจนเตตระอีตรอล ซึ่งทำให้อยู่ในสภาพที่เสถียรยิ่งขึ้น (Yang et al., 2014)

4.4.4 โครงสร้างทางเคมีของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)



รูปที่ 4.13 โครงสร้างทางเคมีของแก้ล้อย่านหิน (CFA) ซีโอไลต์สังเคราะห์จากแก้ล้อย่านหิน (ZFA) และซีโอไลต์สังเคราะห์จากแก้ล้อย่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน (CZFA)

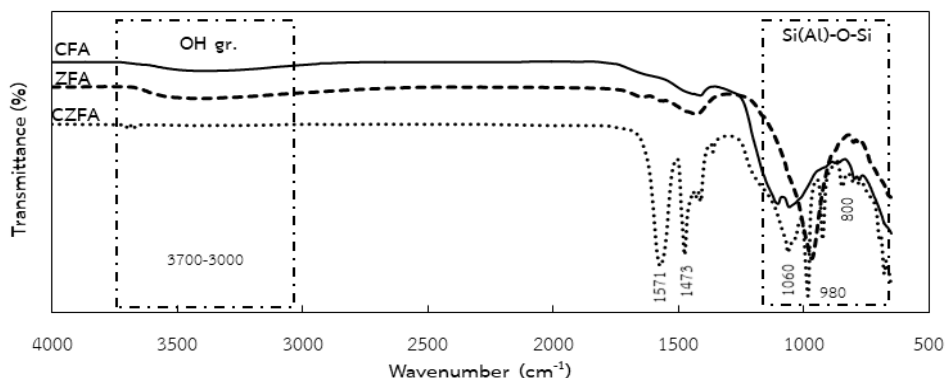
จากรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าแก้ล้อย่านหิน (CFA) ซีโอไลต์สังเคราะห์จากแก้ล้อย่านหิน (ZFA) และซีโอไลต์สังเคราะห์จากแก้ล้อย่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน (CZFA) ในช่วง 2 theta เท่ากับ $5^\circ - 70^\circ$ พบพีคหลักที่ตำแหน่ง 2 theta เท่ากับ 22° , 27° , 30° , 33° และ 36° ซึ่งตำแหน่ง 2 theta ดังกล่าวบ่งบอกถึงโครงสร้างและองค์ประกอบภายในแก้ล้อย่านหิน ซีโอไลต์สังเคราะห์จากแก้ล้อย่านหิน และซีโอไลต์สังเคราะห์จากแก้ล้อย่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน และลักษณะพีคที่ broad บ่งบอกถึงโครงสร้างของตัวอย่างส่วนใหญ่มีลักษณะแบบอสัณฐาน (amorphous) (Colin & David, 2005) โดยเฉพาะตำแหน่ง 2 theta เท่ากับ 22° และ 27° หรือตำแหน่ง Q ทั้งในแก้ล้อย่านหิน ซีโอไลต์สังเคราะห์จากแก้ล้อย่านหิน และซีโอไลต์สังเคราะห์จากแก้ล้อย่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน บ่งบอกถึงโครงสร้างของควอตซ์ (SiO_2) (Qi, Xu, Jiang, Hu, & Zou, 2004; Visa, 2016; Xie, Wang, Wu, Zhang, & Kong, 2013) และตำแหน่ง 2 theta เท่ากับ 36° หรือตำแหน่ง

M จะบ่งบอกถึงโครงสร้างของซิลิกาอะลูมินาชนิด mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) และตำแหน่ง Al (2 theta เท่ากับ 33°) ที่แสดงถึงโครงสร้างอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งมีอยู่ทั้งในแก้วลอยถ่านหิน ซีโอไลต์จากแก้วลอยถ่านหิน และซีโอไลต์จากแก้วลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน (Visa, 2016) นอกจากนี้ที่ตำแหน่ง 2 theta เท่ากับ 13.913° , 24.232° , 31.555° ที่บ่งบอกถึงโครงสร้างซีโอไลต์ชนิด Unnamed zeolite ซึ่งพบในซีโอไลต์สังเคราะห์จากแก้วลอยถ่านหิน และซีโอไลต์สังเคราะห์จากแก้วลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซานเป็นส่วนใหญ่ ขณะที่แก้วลอยถ่านหินพบเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับซีโอไลต์ทั้งสองประเภท (รายละเอียดดังภาคผนวก ค) เนื่องจากแก้วลอยถ่านหินผ่านกระบวนการสังเคราะห์ซีโอไลต์ จึงเกิดโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเมื่อแก้วลอยถ่านหินถูกให้ความร้อนแบบปริฟลักซ์ด้วยต่างตำแหน่งของพีคดังกล่าวจะหายไปบางส่วนและเกิดพีคที่ตำแหน่งใหม่ โดยสารประกอบใหม่ที่พบจะเป็นซีโอไลต์ซึ่งเป็นซีโอไลต์ชนิด unnamed zeolite ดังแสดงในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 แสดงซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากแก้วลอยถ่านหิน

ชนิดของตัวอย่าง	ชนิดซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้	สูตรทั่วไปของซีโอไลต์	สารประกอบชนิดอื่น
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากแก้วลอยถ่านหิน	1.Sodium Aluminum Silicate Hydrate (unnamed zeolite)	$1.08\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1.68 \text{SiO}_2 \cdot 1.8\text{H}_2\text{O}$	Quartz, Aluminum oxide, Mullite
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากแก้วลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน	2. Sodium Aluminum Silicate Hydrate (unnamed zeolite)	$\text{Na}_6[\text{AlSiO}_4]_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Quartz ,Aluminum oxide, Mullite
	1. Sodium Aluminum Silicate Hydrate (unnamed zeolite)	$1.08\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1.68\text{SiO}_2 \cdot 1.8\text{H}_2\text{O}$	Quartz, Aluminum oxide, Mullite

4.4.5 หมู่ฟังก์ชันในแก้วลอย (CFA) ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากแก้วลอยถ่านหิน (ZFA) ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากแก้วลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยไคโตซาน (CZFA) ด้วยเทคนิค FT-IR



รูปที่ 4.14 FT-IR สเปกตรัมของแก้วลอยถ่านหิน (CFA) ซีโอไลต์สังเคราะห์จากแก้วลอยถ่านหิน (ZFA) และซีโอไลต์สังเคราะห์จากแก้วลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน (CZFA)

จากรูปที่ 4.14 เป็นการแสดง IR สเปกตรัมของแก้วลอยถ่านหิน (CFA) ซีโอไลต์สังเคราะห์จากแก้วลอยถ่านหิน (ZFA) และซีโอไลต์สังเคราะห์จากแก้วลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน (CZFA) ตามลำดับ ที่ความยาวคลื่นในช่วง $600 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ พบว่ามีความถี่ 6 ตำแหน่งที่เด่นชัด คือ 3400 , 1570 , 1473 , 1060 , 980 และ 800 cm^{-1} ซึ่งแก้วลอยถ่านหิน (CFA) พบความถี่ในช่วง $3300 - 3500 \text{ cm}^{-1}$ ที่แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) (Liu et al., 2016; Zhang, Wang, & Provis, 2012) สำหรับความถี่ที่ 1060 และ 800 cm^{-1} จะแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของ Si-O และ Al-O (Liu et al., 2018) ขณะเดียวกันซีโอไลต์สังเคราะห์จากแก้วลอยถ่านหิน (ZFA) จะแสดง IR สเปกตรัมในช่วงความถี่ $3300 - 3500 \text{ cm}^{-1}$ และความถี่ที่ 980 และ 800 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ OH และ Si(Al)-O-Si ซึ่งความถี่ในช่วง $600 - 1400 \text{ cm}^{-1}$ ที่แสดงลักษณะของโครงสร้างเตตระอีตรอนระหว่างซิลิกาหรืออะลูมินากับออกซิเจน (SiO_4 หรือ AlO_4) (Liu et al., 2018; McDonald, 1958) โดยเฉพาะความถี่ที่ 980 cm^{-1} จะแสดงถึงการเกิดซีโอไลต์ ด้วยการเกิดพันธะระหว่างซิลิกาและอะลูมินา (Si(Al)-O-Si) ในทำนองเดียวกับซีโอไลต์สังเคราะห์จากแก้วลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน (CZFA) ซึ่งแสดงการเกิดซีโอไลต์ในความถี่ที่ 980 และ 800 cm^{-1} นอกจากนั้นยังพบความถี่เล็กน้อยที่ 3690 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ OH และพบความถี่สูงในตำแหน่งที่ 1570 และ 1473 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงหมู่ N-H (หมู่อะมิโน) (Corazzari et al., 2015) และ C-O (Alias, Chee, & Mohamad, 2017; Corazzari et al., 2015) จากโครงสร้างของไคโตซานที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลร่วมกับซีโอไลต์จากแก้วลอยถ่านหิน

4.5 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในจุดซบแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน (ZFA)

4.5.1 สถานะที่เหมาะสมในการจุดซบแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน (ZFA)

ทำการศึกษา โดยการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MINITAB version 17.0 (Pennsylvania, USA) โดยศึกษาปัจจัยหลัก 4 ตัว คือ มี 3 ระดับ คือ พีเอช (X_1 : 4-10) ปริมาณซีโอไลต์ (X_2 : 1-4 กรัมต่อลิตร) ระยะเวลาในการสัมผัส (X_3 : 15-120 นาที) และ ความเร็วรอบในการเขย่า (X_4 : 0-200 รอบต่อนาที) ดังแสดงในตารางที่ 4.15 จากการออกแบบการทดลอง ได้การทดลองทั้งหมด 54 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.16 จากการออกแบบการทดลอง จะได้สมการการทำนายร้อยละการดูดซบแอมโมเนียมไนโตรเจน ในรูปของสมการ Full quadratic regression model ดังนี้

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^4 \beta_i^2 X_i^2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j \neq i}^4 \beta_{ij} X_i X_j \pm \epsilon \quad (5)$$

โดยที่ Y คือ ค่า Response ร้อยละการดูดซบแอมโมเนียมไนโตรเจน

$\beta_0, \beta_1, \beta_1^2, \beta_{ij}$ คือ ค่า ปัจจัย X_1, X_2, X_3, X_4

ตารางที่ 4.15 ปัจจัยและระดับของแต่ละตัวแปรอิสระที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ		
	-1	0	1
X_1 :พีเอช	4	7	10
X_2 :ปริมาณซีโอไลต์ (g/L)	1	2.5	4
X_3 :ระยะเวลาในการสัมผัส (min)	15	67.5	120
X_4 :ความเร็วรอบในการเขย่า (rpm)	0	100	200

ตารางที่ 4.16 การออกแบบการทดลองและผลที่สภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนโดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน

Run Order	pH	Absorbent(g/L)	Time (min)	Stirrer (rpm)	% Removal	Predict
1	4	2.5	67.5	200	48.76	46.68
2	4	2.5	120	100	51.99	54.28
3	4	4	67.5	100	59.84	58.89
4	4	2.5	67.5	0	50.56	50.36
5	4	2.5	67.5	0	50.56	50.36
6	4	2.5	15	100	46.37	48.94
7	4	4	67.5	100	59.84	58.90
8	4	2.5	15	100	49.20	48.94
9	4	1	67.5	100	49.91	49.58
10	4	2.5	67.5	200	48.76	46.68
11	4	2.5	120	100	51.75	54.28
12	4	1	67.5	100	49.91	49.58
13	7	2.5	67.5	100	60.86	61.00
14	7	1	67.5	0	53.01	53.51
15	7	4	67.5	200	57.60	58.18
16	7	1	15	100	43.16	42.28
17	7	2.5	67.5	100	61.10	61.00
18	7	2.5	67.5	100	60.76	61.00
19	7	2.5	120	200	54.47	52.26
20	7	4	120	100	61.85	63.91
21	7	2.5	120	0	63.68	61.37
22	7	4	67.5	0	63.65	62.13
23	7	1	67.5	200	41.04	43.74
24	7	4	67.5	0	63.79	62.13
25	7	4	120	100	61.75	63.91
26	7	2.5	120	0	62.63	61.37
27	7	2.5	15	0	47.27	49.02
28	7	4	67.5	200	57.29	58.18
29	7	2.5	67.5	100	61.10	61.00
30	7	2.5	15	200	43.08	44.40

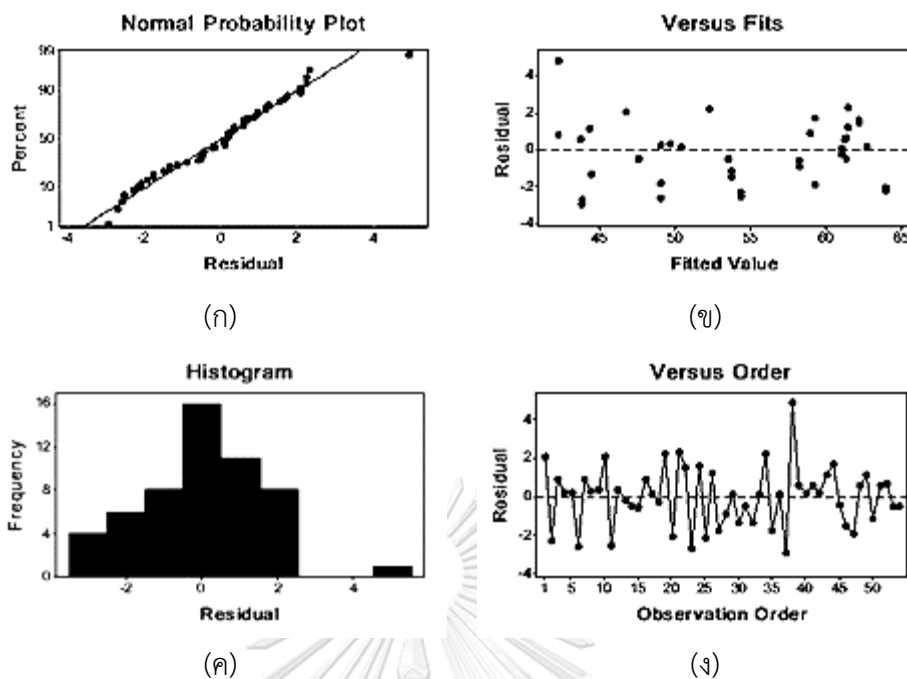
ตารางที่ 4.16 การออกแบบการทดลองและผลที่สภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนโดยใช้ไฮโดรไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน

Run order	pH	Absorbent(g/L)	Time (min)	Stirrer (rpm)	% Removal	Predict
31	7	1	67.5	0	53.01	53.52
32	7	2.5	15	200	43.08	44.40
33	7	2.5	67.5	100	61.11	61.00
34	7	2.5	120	200	54.48	52.26
35	7	2.5	15	0	47.27	49.02
36	7	2.5	67.5	100	61.11	61.00
37	7	1	67.5	200	40.81	43.75
38	7	1	15	100	47.17	42.28
39	7	1	120	100	61.75	61.16
40	7	4	15	100	62.77	62.58
41	7	1	120	100	61.75	61.16
42	7	4	15	100	62.77	62.58
43	10	2.5	15	100	45.49	44.32
44	10	2.5	120	100	60.93	59.20
45	10	4	67.5	100	60.83	61.27
46	10	2.5	67.5	0	52.21	53.69
47	10	2.5	120	100	57.31	59.21
48	10	2.5	67.5	200	44.24	43.66
49	10	2.5	15	100	45.49	44.33
50	10	2.5	67.5	0	52.57	53.69
51	10	2.5	67.5	200	44.24	43.65
52	10	4	67.5	100	61.97	61.27
53	10	1	67.5	100	47.03	47.53
54	10	1	67.5	100	47.03	47.53

ผลร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน และผลการทดลองหาความสัมพันธ์ของ พีเอช ปริมาณซีโอไลต์ ระยะเวลาในการสัมผัส และความเร็วนวนในการเขย่าเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน พบว่าค่าการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน มีค่าร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนอยู่ระหว่าง ร้อยละ 40.81 ถึง ร้อยละ 63.68 และจากการออกแบบการทดลองสามารถสร้างสมการ Full quadratic regression model เพื่อใช้ในการทำนายร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนได้ ดังแสดงในสมการที่ (6)

$$Y = 1.01 + 8.63 X_1 + 5.90 X_2 + 0.3015 X_3 + 0.1163 X_4 - 0.6937 X_1X_1 - 0.198 X_2X_2 - 0.001116 X_3X_3 - 0.000617 X_4X_4 + 0.246 X_1X_2 + 0.01515 X_1X_3 - 0.00529 X_1X_4 - 0.05572 X_2X_3 + 0.00969 X_2X_4 - 0.000214 X_3X_4 \quad (6)$$

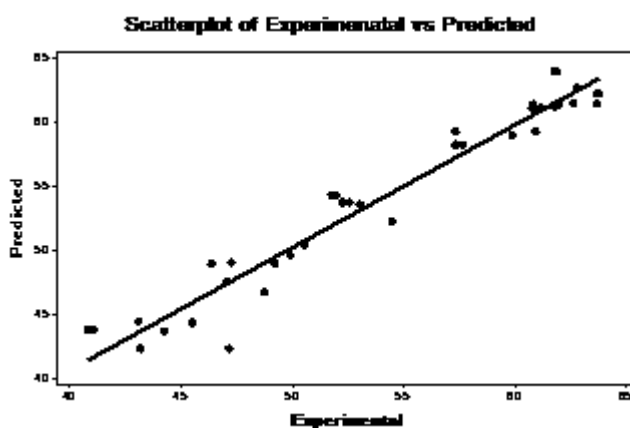
- เมื่อ
- Y คือ ร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน
 - X₁ คือ พีเอช
 - X₂ คือ ปริมาณซีโอไลต์ (g/L)
 - X₃ คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการสัมผัส (min)
 - X₄ คือ ความเร็วนวนในการเขย่า (rpm) ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่า Normal probability Fits Histogram และ Order

ความแม่นยำและความถูกต้องของสมการของการทำนายสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.15 พบว่ารูปที่ 4.15 (ก) โดยค่าความสัมพันธ์ Normality Probability Plot พบว่าผลข้อมูลที่ได้มีการกระจายบนเส้นตรง ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองและจากการทำนายมีค่าใกล้เคียงกัน รูปที่ 4.15 (ข) ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Fited value กับ Residual พบว่า ข้อมูลร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนที่ได้จากการทำนายอยู่ระหว่าง ร้อยละ 41 ถึง 63 ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทำนายอยู่ระหว่างร้อยละ -4 ถึง 4 รูปที่ 4.15 (ค) กราฟฮิสโทแกรมพบว่า ลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการทำนายมีลักษณะเหมือนระฆังคว่ำซึ่งเป็นการแจกแจงข้อมูลแบบปกติ และรูปที่ 4.15 (ง) ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Observation order กับ Residual พบว่าลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการทำนายมีลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลแบบสุ่ม ไม่มีการกระจุกตัวของข้อมูล จากกราฟทั้ง 4 ชนิด สรุปได้ว่าลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลที่ได้จากการทำนายจากการทดลองนี้มีความเหมาะสมสามารถนำไปใช้ในการทำนายร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน ของซีโอไลท์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่าน (Wantala et al., 2013) (Sriptom et al., 2015)

จากการเปรียบเทียบค่าร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก
จากถ้ำลอยถ่านหิน ที่ได้จากการทดลองกับ ร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์
สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน ที่ได้จากการทำนายตามสมการที่ (6) พบว่ามีความมีค่า R^2 เท่ากับ
95.44 % ดังในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงค่าร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่าน
หินที่ได้จากการทดลองและการทำนาย

จากตารางที่ 4.17 พบว่า ปริมาณซีโอไลต์ ระยะเวลา และความเร็วยรอบในการเขย่า มีผลต่อ
การดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน อย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับผลในสมการรูปยกกำลังสองของทุก
ปัจจัย เมื่อทั้งสี่ปัจจัยในปริมาณที่มากยกกำลังสองจะมีผลต่อร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน
อย่างมีนัยสำคัญและผลของปัจจัยร่วมระหว่าง พีเอชกับเวลา พีเอชกับความเร็วยรอบในการเขย่า
ปริมาณสารซีโอไลต์กับเวลา และปริมาณสารซีโอไลต์กับความเร็วยรอบในการเขย่า มีผลต่อร้อยละการ
ดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.44 ($P\text{-value} < 0.05$)

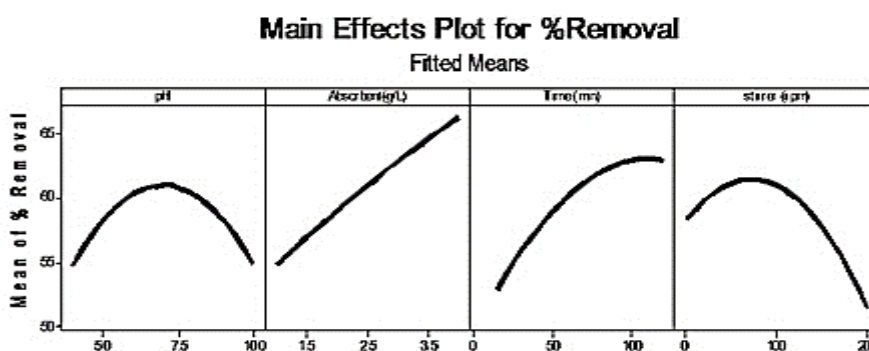
ตารางที่ 4.17 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	14	2659.17	189.941	58.30	0.000
Linear	4	1692.79	423.198	129.90	0.000
pH	1	0.15	0.149	0.05	0.832
Absorbent(g/L)	1	797.63	797.627	244.83	0.000
Time (min)	1	612.45	612.449	187.99	0.000
Stirrer (rpm)	1	282.57	282.568	86.73	0.000
Square	4	709.84	177.461	54.47	0.000
pH* pH	1	415.77	415.765	4124.51	0.000
Absorbent (g/L)* Absorbent (g/L)	1	2.12	2.120	0.65	0.425
Time (min) *Time (min)	1	100.97	100.971	30.99	0.000
Stirrer (rpm)* Stirrer (rpm)	1	405.66	405.662	124.51	0.000
2-Way Interaction	6	256.54	42.756	13.12	0.000
pH* Absorbent (g/L)	1	9.83	9.825	3.02	0.090
pH* Time (min)	1	45.56	45.557	13.98	0.001
pH* Stirrer (rpm)*	1	20.14	20.144	6.18	0.017
Absorbent (g/L)*Time (min)	1	154.03	154.028	47.28	0.000
Absorbent (g/L)* Stirrer (rpm)*	1	16.90	16.903	5.19	0.028
Time (min) * Stirrer (rpm)	1	10.08	10.081	3.09	0.086
R ²		95.44%			

4.5.2 ปัจจัยหลักที่มีต่อการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จากถั่ว ลอยถ่านหิน (ZFA)

จากการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน โดยทำการวิเคราะห์แบบตอบสนองพื้นผิว (Response Surface Methodology) รูปที่ 4.17 แสดงผลของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์จากถั่วลอยถ่านหิน พบว่า เมื่อค่าพีเอชเมื่อค่าเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์จากถั่วลอยถ่านหินจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งที่มีการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชจะส่งผลให้ร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมของซีโอไลต์จากถั่วลอยถ่านหินลดลง ค่าพีเอชที่ระดับต่างกันมีผลกับการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน (Zhang et al., 2011) โดยช่วงพีเอชที่มากกว่า 7 แอมโมเนียมจะเริ่มถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียทำให้ไม่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกกับสารซีโอไลต์ได้ (Saltali, Sari, & Aydin, 2007) (Zhang et al., 2011) และจากการทดลองนี้ ค่าพีเอชที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Huang, Xiao, Yan, & Yang.(2010) และ Zhang et al. (2011) ที่รายงานว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนโดยใช้ซีโอไลต์นั้นมีค่าอยู่ระหว่าง พีเอช 5 ถึง 8

โดยปัจจัยด้านความเร็วรอบในการเขย่าก็ส่งผลต่อค่าตอบสนองเช่นเดียวกับปัจจัยด้านพีเอช ในขณะที่ปัจจัยด้านปริมาณของซีโอไลต์จากถั่วลอยถ่านหินที่ใช้เป็นตัวดูดซับ พบว่าหากเพิ่มปริมาณตัวดูดซับมากขึ้น ยิ่งส่งผลให้ค่าร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์จากถั่วลอยถ่านหินมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตาม ส่วนปัจจัยด้านเวลาในการดูดซับพบว่าหากเพิ่มเวลาที่ใช้ในการดูดซับมากขึ้น ค่าร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมของซีโอไลต์จากถั่วลอยถ่านหินจะเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.17 จะพบว่าหากใช้เวลาในการดูดซับเกิน 100 นาที ค่าร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมของซีโอไลต์จากถั่วลอยถ่านหินจะเริ่มคงที่และลดต่ำลงเล็กน้อย



รูปที่ 4.17 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน

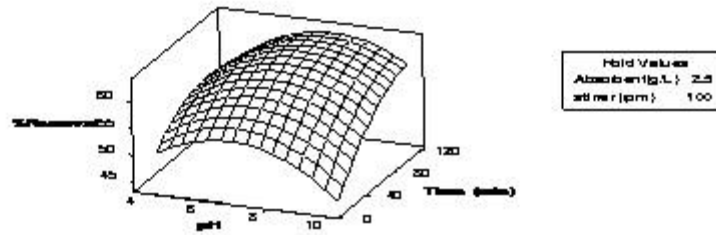
เมื่อพิจารณาผลของปัจจัยร่วมระหว่างค่าพีเอชและเวลาในการดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ก) พบว่าหากต้องการให้ค่าร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมของซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินสูง ค่าพีเอชที่เลือกใช้ควรอยู่ในช่วง 6 ถึง 8 และเวลาในการดูดซับที่ค่อนข้างนานแต่ไม่ควรเกิน 100 นาที ตามที่พิจารณาจากผลของปัจจัยเดียว

รูปที่ 4.18 (ข) แสดงผลของปัจจัยร่วมระหว่างค่าพีเอชและความเร็วรอบในการเขย่า พบว่าค่าพีเอชและความเร็วรอบในการเขย่าที่ส่งผลค่าร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมของซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินเกิดได้ดี ควรมีค่าพีเอชที่อยู่ในช่วง 6 ถึง 8 และรอบการเขย่าที่ใกล้เคียง 100 รอบต่อนาที

รูปที่ 4.18 (ค) แสดงผลของปัจจัยร่วมระหว่างตัวดูดซับและเวลาที่ใช้ในการดูดซับ พบว่าค่าร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมของซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้นและระยะเวลาในการดูดซับนานขึ้น โดยในการทดลองนี้ ได้มีการแปรผันค่าปริมาณตัวดูดซับที่ 1 ถึง 4 กรัมต่อลิตร ซึ่งการใช้ตัวดูดซับที่ 4 กรัมต่อลิตร จะส่งผลให้ค่าร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมของซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินสูงที่สุด

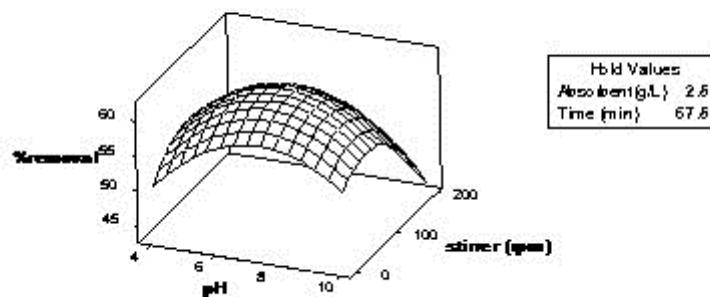
จากการหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของค่าร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนสูงสุดด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินนั้น พบว่าที่พีเอช 7.5 ปริมาณซีโอไลต์ 4 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการสัมผัสเท่ากับ 80 นาที และความเร็วรอบเขย่าเท่ากับ 80 รอบต่อนาที ร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนมีค่าเท่ากับ 66.68 ยืนยันผลสภาวะที่เหมาะสม โดยทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ซ้ำ พบว่า ร้อยละการดูดซับเท่ากับ 67.50 ± 2 ซึ่งใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทำนายของสมการ แสดงให้เห็นว่าสมการที่ใช้ในการทำนายมีความถูกต้องแม่นยำในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน

Surface Plot of % removal vs Time (min), pH



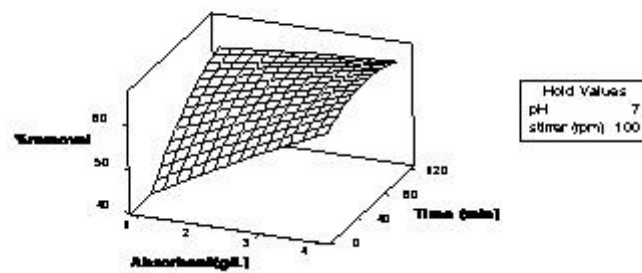
(ก)

Surface Plot of %removal vs stirrer (rpm), pH



(ข)

Surface Plot of %removal vs Time (min), Absorbent(g/L)



(ค)

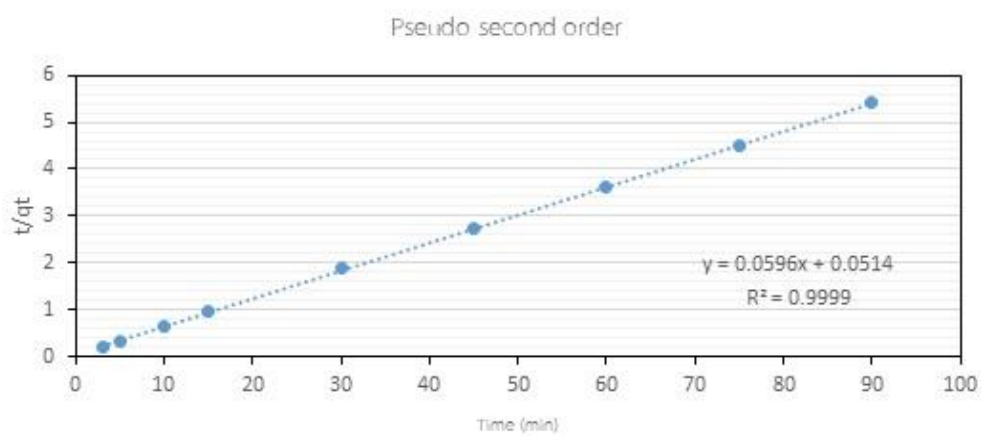
รูปที่ 4.18 ปัจจัยร่วมที่มีผลต่อร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก
 ถ้ำลอยถ่านหิน

4.5.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน (ZFA)

จลนพลศาสตร์การดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน (ZFA) ศึกษาความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน ที่เวลาใด ๆ ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน หรือค่า q_t ที่มีปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน เริ่มต้น เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับตามแบบจำลอง pseudo-first-order และ pseudo-second order โดยนำมาเขียนกราฟเส้นตรงตามแบบจำลองดังกล่าว ซึ่งจุดตัดแกน y และความชันของสมการ pseudo-first order และ pseudo-second order สามารถนำมาใช้คำนวณค่าคงที่อัตราเร็วของการดูดซับ (k_1 และ k_2) และความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนที่ภาวะสมดุล (q_e) ของซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน (ZFA) โดยปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 17.5 mg/g ความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของ ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน ตามสมการ pseudo-first order ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์หรือ R^2 เท่ากับ 0.945 สำหรับสมการ pseudo-second order ให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.999 จากค่า R^2 ที่มีค่ามากแสดงว่าจลนพลศาสตร์การดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน เป็นแบบ pseudo-second order เป็นการดูดซับบนผิวตัวดูดซับที่เกิดกระบวนการทางเคมี โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากกว่าสองปัจจัยคือ ปริมาณสารดูดซับ ความเข้มข้น และเวลา เมื่อพิจารณาค่าคงที่ k_1 , k_2 และค่า q_e จากการคำนวณตามแบบจำลอง ($q_{e,cal}$) แสดงในตารางที่ 4.18 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.18 ค่าคงที่จลนพลศาสตร์การดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของ ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน (ZFA) ตามสมการ pseudo-first order และ pseudo-second order

ตัวอย่าง	q_e (exp) mg/g	Pseudo-first-order			Pseudo-second order		
		q_e (mg/g)	k_1 (min)	R^2	q_e (mg/g)	K_2 (min)	R^2
ซีโอไลต์จากถ้ำ ลอยถ่านหิน	17.5	2.39	0.134	0.945	16.778	0.365	0.999



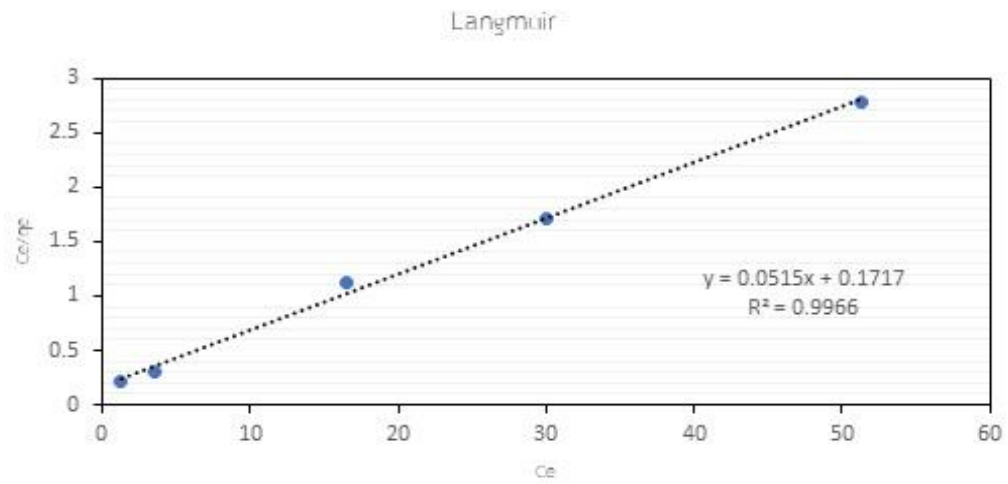
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน (ZFA)ตามสมการ pseudo first order และ pseudo second order

4.5.4 ไอโซเทอมการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน (ZFA)

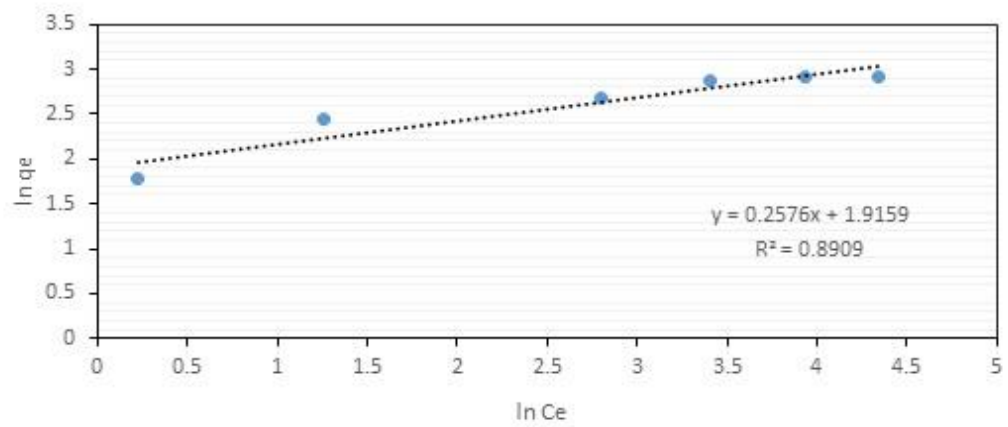
ศึกษาการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนโดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน (ZFA) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 50 75 100 125 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้น้ำหนักซีโอไลต์เท่ากับ 4 กรัม ค่าพีเอช เท่ากับ 7.5 ความเร็วรอบที่ 80 รอบต่อนาที ระยะเวลา 80 นาที เมื่อเปรียบเทียบความสอดคล้องของข้อมูลการทดลองที่ภาวะสมดุล (รูปที่ 4.20 และตารางที่ 4.17) พบว่าการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนโดยใช้ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน สามารถอธิบายด้วยไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ได้ดีกว่า ไอโซเทอมแบบฟรุนดิช โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์หรือ R^2 ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน มีค่าเท่ากับ 0.997 และ 0.891 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณา q_m หรือความสามารถในการดูดซับปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 19.417 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าคงที่ของการดูดซับชั้นเดียวหรือ K_L มีค่าเท่ากับ 0.299 ลิตรต่อมิลลิกรัม ดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 ค่าคงที่ของสมการไอโซเทอมการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนโดยใช้ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน ตามแบบจำลองของแลงเมียร์และฟรุนดิช

ตัวอย่าง	ไอโซเทอมของแลงเมียร์			ไอโซเทอมของฟรุนดิช		
	q_m (มิลลิกรัมต่อกรัม)	K_L (ลิตรต่อมิลลิกรัม)	R^2	K_F (ลิตรต่อกรัม)	n	R^2
ซีโอไลต์ จากเถ้า ลอยถ่าน หิน	19.417	0.299	0.996	6.793	3.8819	0.891

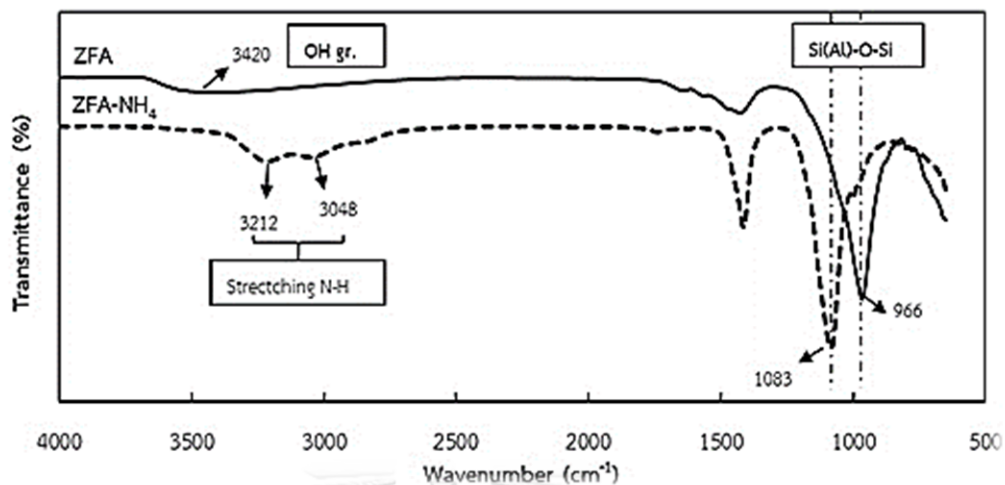


Freundlich



รูปที่ 4.20 ไอโซเทอมของการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนแบบแลงเมียร์และฟรุนดิช โดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน (ZFA)

4.5.5 หมู่ฟังก์ชันหลังการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน



รูปที่ 4.21 FT-IR ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน (ZFA) และซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน (ZFA) หลังดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน

จากรูปที่ 4.21 เป็นการแสดง IR สเปกตรัมของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน (ZFA) ก่อนการดูดซับ และซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินหลังการดูดซับ (ZFA-NH₄) ที่ความยาวคลื่นในช่วง 600 - 4000 cm⁻¹ (รายละเอียดดังภาคผนวก ก) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในช่วงความถี่ 3000 - 3200 cm⁻¹ ที่แสดงถึงพันธะของไนโตรเจนและไฮโดรเจน (stretching N-H) หลังการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน และพีคที่สูงขึ้นที่ความถี่ 1083 cm⁻¹ ซึ่งแสดงถึงกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นหลังการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนภายในโครงสร้างซีโอไลต์บริเวณ Si(Al)-O-Si (Liu et al., 2016; Zhang et al., 2012)

4.6 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยโคโคซาน (CZFA)

4.6.1 สถานะที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยโคโคซาน (CZFA)

ทำการศึกษา โดยการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MINITAB version 17.0 (Pennsylvania, USA) โดยศึกษาปัจจัยหลัก 4 ปัจจัย และระดับของแต่ละตัวแปรอิสระที่ใช้ในการทดลองมี 3 ระดับ คือ พีเอช (X_1 : 4-10) ปริมาณซีโอไลต์ (X_2 : 1-4 กรัมต่อลิตร) ระยะเวลาในการสัมผัส (X_3 : 15-120 นาที) และ ความเร็วรอบในการเขย่า (X_4 : 0-200 รอบต่อนาที) ดังแสดงในตารางที่ 4.20 จากการออกแบบการทดลอง ได้การทดลองทั้งหมด 54 การทดลอง (ตารางที่ 4.21) จากการออกแบบการทดลองจะได้สมการการทำนายผลการแลกเปลี่ยนประจุบวกของการปรับสภาพซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินด้วยการใช้โคโคซานในรูปของสมการ Full quadratic regression model ดังนี้

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^4 \beta_i^2 X_i^2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j \neq i}^4 \beta_{ij} X_i X_j \pm \epsilon \quad (7)$$

โดยที่ Y คือ ค่า Response (ร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน)
 $\beta_0 \beta_1 \beta_1^2 \beta_{ij}$ คือ ค่า ปัจจัย $X_1 X_2 X_3 X_4$

ตารางที่ 4.20 ปัจจัยและระดับของแต่ละตัวแปรอิสระที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ		
	-1	0	1
X_1 :พีเอช	4	7	10
X_2 :ปริมาณซีโอไลต์ (กรัมต่อลิตร)	1	2.5	4
X_3 :ระยะเวลาในการสัมผัส (นาที)	15	67.5	120
X_4 :ความเร็วรอบในการเขย่า(รอบต่อนาที)	0	100	200

ตารางที่ 4.21 การออกแบบการทดลองและผลที่สภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน

Run order	pH	Absorbent(g/L)	Time (min)	Stirrer (rpm)	% Removal	Predicted
1	4	2.5	67.5	200	53.75	50.50
2	4	2.5	120	100	57.00	57.75
3	4	4	67.5	100	65.84	69.93
4	4	2.5	67.5	0	55.56	54.71
5	4	2.5	67.5	0	55.56	54.71
6	4	2.5	15	100	51.38	52.17
7	4	4	67.5	100	65.84	69.93
8	4	2.5	15	100	54.20	52.17
9	4	1	67.5	100	53.92	53.67
10	4	2.5	67.5	200	53.76	50.50
11	4	2.5	120	100	56.75	57.75
12	4	1	67.5	100	53.92	53.67
13	7	2.5	67.5	100	66.87	67.01
14	7	1	67.5	0	58.01	58.11
15	7	4	67.5	200	73.50	72.42
16	7	1	15	100	48.17	48.15
17	7	2.5	67.5	100	67.10	67.01
18	7	2.5	67.5	100	66.77	67.01
19	7	2.5	120	200	60.48	59.36
20	7	4	120	100	79.70	80.19
21	7	2.5	120	0	69.68	69.24
22	7	4	67.5	0	85.90	81.21
23	7	1	67.5	200	46.04	52.13
24	7	4	67.5	0	85.90	81.21
25	7	4	120	100	79.70	80.19
26	7	2.5	120	0	68.63	69.24
27	7	2.5	15	0	52.27	56.39
28	7	4	67.5	200	73.50	72.42
29	7	2.5	67.5	100	67.11	67.01
30	7	2.5	15	200	49.08	51.50

ตารางที่ 4.21 การออกแบบการทดลองและผลที่สภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน

Run order	pH	Absorbent(g/L)	Time (min)	Stirrer (rpm)	% Removal	Predict
31	7	1	67.5	0	58.01	58.11
32	7	2.5	15	200	49.08	51.51
33	7	2.5	67.5	100	67.10	67.01
34	7	2.5	120	200	60.47	59.36
35	7	2.5	15	0	53.26	56.40
36	7	2.5	67.5	100	67.10	67.01
37	7	1	67.5	200	50.81	52.13
38	7	1	15	100	52.16	48.15
39	7	1	120	100	66.75	66.79
40	7	4	15	100	79.70	78.14
41	7	1	120	100	66.75	66.79
42	7	4	15	100	79.70	78.14
43	10	2.5	15	100	49.49	47.63
44	10	2.5	120	100	64.93	62.75
45	10	4	67.5	100	71.94	75.59
46	10	2.5	67.5	0	56.21	58.12
47	10	2.5	120	100	61.31	62.75
48	10	2.5	67.5	200	48.24	47.56
49	10	2.5	15	100	49.49	47.63
50	10	2.5	67.5	0	56.57	58.12
51	10	2.5	67.5	200	48.24	47.56
52	10	4	67.5	100	73.73	75.59
53	10	1	67.5	100	50.03	48.46
54	10	1	67.5	100	50.03	48.46

ผลร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน และผลการทดลองหาความสัมพันธ์ของพีเอช ปริมาณซีโอไลต์ ระยะเวลาในการสัมผัส และความเร็วยรอบในการเขย่าเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน พบว่าค่าการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน ของซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน มีค่าร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน อยู่ระหว่าง ร้อยละ 46.04 ถึง ร้อยละ 85.90 และจากการออกแบบการทดลองสามารถสร้างสมการ Full quadratic regression model เพื่อใช้ในการทำนายร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน ได้ ดังแสดงในสมการที่ (8)

$$Y = -0.22 + 12.30 X_1 - 2.03 X_2 + 0.2833 X_3 + 0.1302 X_4 - 1.0186 X_1^2 + 1.811 X_2^2 - 0.001003 X_3^2 - 0.000512 X_4^2 + 0.604 X_1 X_2 + 0.01515 X_1 X_3 - 0.00529 X_1 X_4 - 0.0527 X_2 X_3 - 0.00469 X_2 X_4 - 0.000238 X_3 X_4 \quad (8)$$

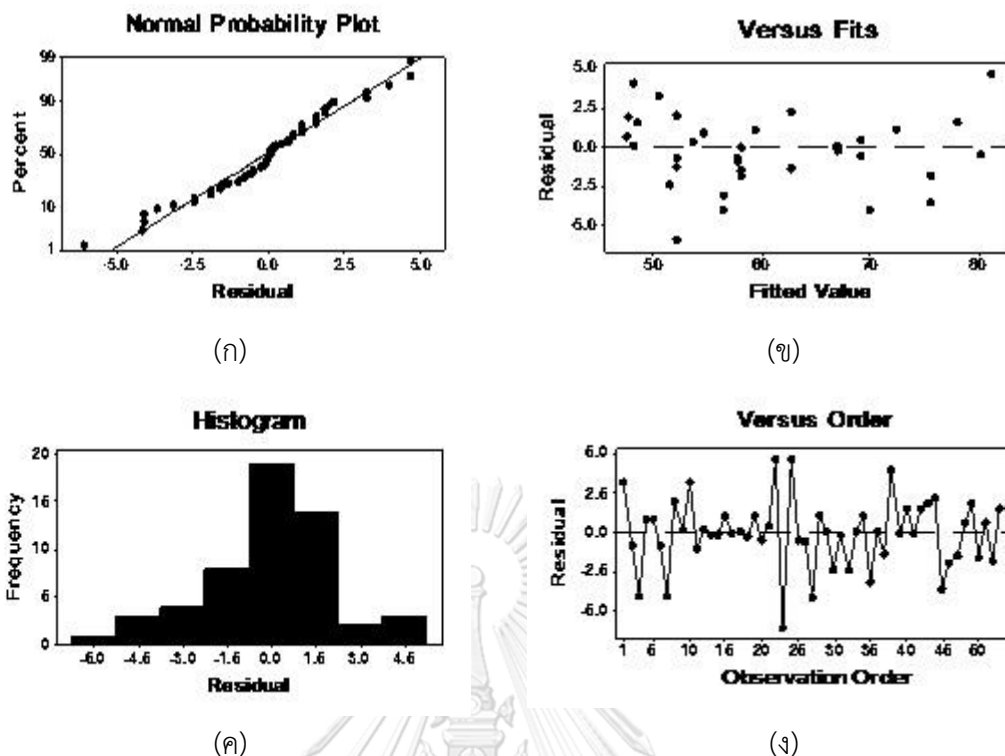
เมื่อ Y คือ ร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน

X_1 คือ พีเอช

X_2 คือ ปริมาณซีโอไลต์ (g/L)

X_3 คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการสัมผัส (min)

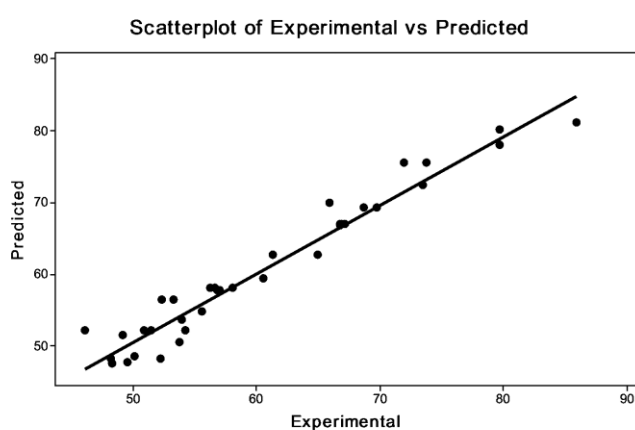
X_4 คือ ความเร็วยรอบในการเขย่า (rpm)



รูปที่ 4.22 ค่า Normal probability Fits Histogram และ Order

ความแม่นยำและความถูกต้องของสมการของการทำนายสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.22 พบว่ารูปที่ 4.22 (ก) แสดงค่าความสัมพันธ์ Normality Probability Plot พบว่าผลข้อมูลที่ได้มีการกระจายบนเส้นตรง ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองและจากการทำนายมีค่าใกล้เคียงกัน รูปที่ 4.22 (ข) ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Fited value กับ Residual พบว่า ข้อมูลร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนที่ได้จากการทำนายอยู่ระหว่าง ร้อยละ 48 ถึง 81 ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทำนายอยู่ระหว่างร้อยละ -5 ถึง 5 รูปที่ 4.22 (ค) กราฟ ฮิสโทแกรม พบว่า ลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการทำนายมีลักษณะเหมือนระฆังคว่ำซึ่งเป็นการแจกแจงข้อมูลแบบปกติ และรูปที่ 4.22 (ง) ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Observation order กับ Residual พบว่าลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการทำนายมีลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลแบบสุ่ม ไม่มีการกระจุกตัวของข้อมูล จากกราฟทั้ง 4 ชนิด สรุปได้ว่าลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลที่ได้จากการทำนายจากการทดลองนี้มีความเหมาะสมสามารถนำไปใช้ในการทำนายร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านปรับสภาพด้วยโคโคซาน

จากการเปรียบเทียบร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน ที่ได้จากการทดลองกับร้อยละ การดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่ได้จากการทำนายตามสมการที่ 8 พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 95.79



รูปที่ 4.23 ค่าร้อยละการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนที่ได้จากการทดลองและการทำนาย

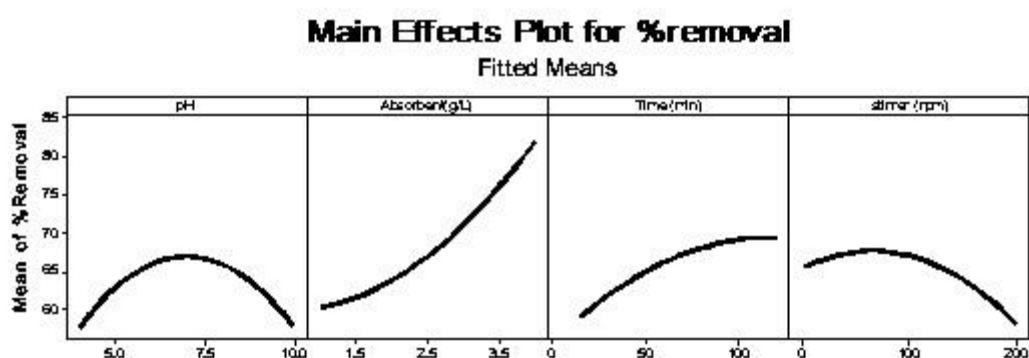
จากตารางที่ 4.22 พบว่า ปริมาณซีโอไลต์ ระยะเวลา และความเร็วรอบในการเขย่า มีผลต่อการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน อย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับ ผลในสมการรูปยกกำลังสองของทุกปัจจัย เมื่อทั้งสี่ปัจจัยในปริมาณที่มากยกกำลังสองจะมีผลต่อร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนอย่างมีนัยสำคัญ และผลของปัจจัยร่วมระหว่าง พีเอชกับปริมาณซีโอไลต์ พีเอชกับเวลา ปริมาณซีโอไลต์กับเวลา มีผลต่อร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.79 ($P\text{-value} < 0.05$)

ตารางที่ 4.22 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	14	5774.76	412.48	63.46	0.000
Linear	4	3793.53	948.38	145.90	0.000
pH	1	0.32	0.32	0.05	0.826
Absorbent(g/L)	1	2823.71	2823.71	434.41	0.000
Time (min)	1	642.42	642.42	98.83	0.000
stirrer (rpm)	1	327.08	327.08	50.32	0.000
Square	4	1702.52	425.63	65.48	0.000
pH*pH	1	896.46	896.46	137.91	0.000
Absorbent(g/L)*Absorbent(g/L)	1	177.03	177.03	27.24	0.000
Time (min)*Time (min)	1	81.54	81.54	12.55	0.001
stirrer (rpm)*stirrer (rpm)	1	279.29	279.29	42.97	0.000
2-Way Interaction	6	278.71	46.45	7.15	0.000
pH*Absorbent(g/L)	1	59.06	59.06	9.09	0.005
pH*Time (min)	1	45.56	45.56	7.01	0.012
pH*stirrer (rpm)	1	20.14	20.14	3.10	0.086
Absorbent(g/L)*Time (min)	1	137.55	137.55	21.16	0.000
Absorbent(g/L)*stirrer (rpm)	1	3.96	3.96	0.61	0.440
Time (min)*stirrer (rpm)	1	12.45	12.45	1.92	0.174
R ²		95.79			

4.6.2 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการปรับสภาพซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ได้จากเถ้าลอยถ่านหินด้วยการใช้โคโคซาน (CZFA)

จากการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน โดยทำการวิเคราะห์แบบตอบสนองพื้นผิว (Response Surface Methodology) พบว่าผลของปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยโคโคซานดังรูปที่ 4.24 พบว่า ปัจจัยด้านพีเอช พบว่าค่าพีเอชประมาณ 7.0 ถึง 7.5 ส่งผลให้ร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนเกิดได้สูงสุด ในขณะที่ปัจจัยด้านปริมาณของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยโคโคซาน พบว่าหากเพิ่มปริมาณตัวดูดซับมากขึ้น ยิ่งส่งผลให้ค่าร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนเพิ่มสูงขึ้นตาม ส่วนปัจจัยด้านเวลาที่ใช้ในการดูดซับ พบว่ายิ่งเพิ่มเวลาในการดูดซับ ยิ่งส่งผลให้ร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนเกิดได้สูงขึ้น แต่หากใช้เวลาเกิน 100 นาที ค่าการดูดซับจะเริ่มคงที่ ปัจจัยด้านความเร็วรอบในการเขย่า พบว่า ความเร็วรอบที่ใกล้เคียง 100 รอบต่อนาที ให้ผลการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนเกิดได้ดี



รูปที่ 4.24 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน

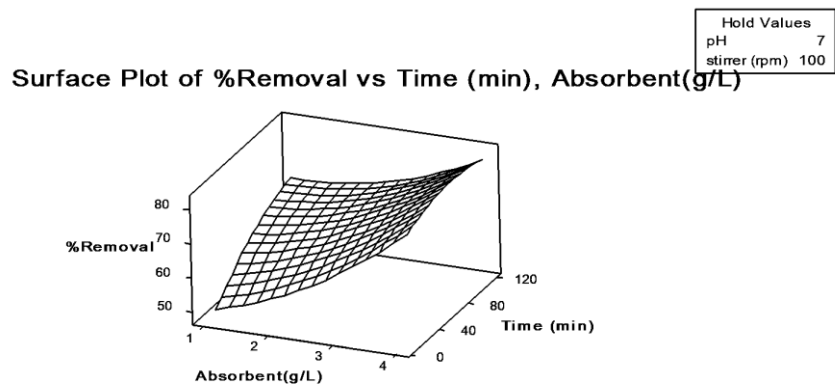
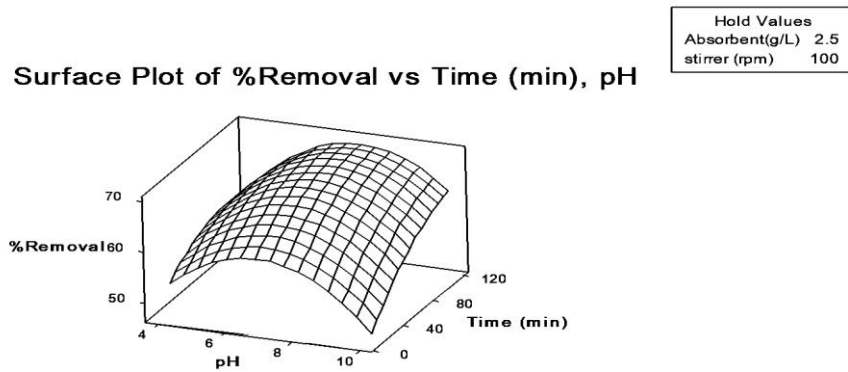
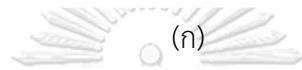
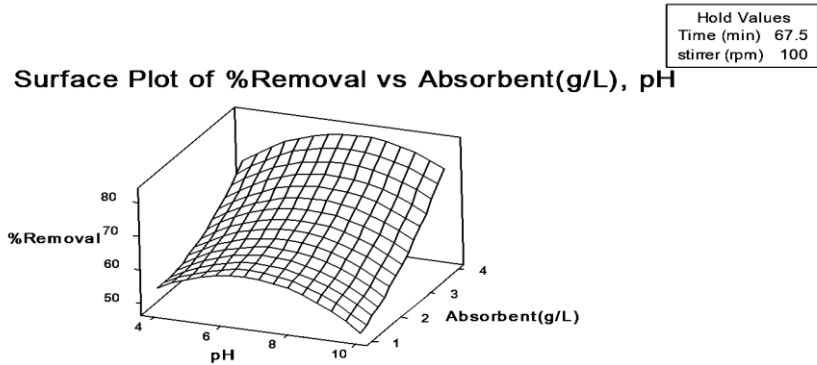
เมื่อพิจารณาผลของปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัยทดสอบต่อค่าร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยโคโคซาน พบว่าให้ผลเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับค่าร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน โดยพบว่า ค่าพีเอชที่เลือกใช้ควรอยู่ในช่วง 6 ถึง 8 และปริมาณตัวดูดซับที่ 4 กรัมต่อลิตร จะส่งผลให้ค่าร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนเกิดได้ดีที่สุด (รูปที่ 4.25 (ก)) ส่วนปัจจัยร่วมระหว่างค่าพีเอช

กับเวลาที่ใช้ในการดูดซับพบว่า ค่าพีเอชที่เลือกใช้ควรอยู่ในช่วง 6 ถึง 8 และเวลาในการดูดซับที่ค่อนข้างนานแต่ไม่ควรเกิน 100 นาที ตามที่พิจารณาจากผลของปัจจัยเดียว (รูปที่ 4.25 (ข))

รูปที่ 4.25 (ค) แสดงผลของปัจจัยร่วมระหว่างตัวดูดซับและเวลาที่ใช้ในการดูดซับ พบว่าค่าร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้นและระยะเวลาในการดูดซับนานขึ้น

จากการหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของค่าร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนสูงสุดด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยไคโตซานนั้น พบว่า ที่พีเอช 7.5 ปริมาณซีโอไลต์ 4 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการสัมผัสเท่ากับ 90 นาที และความเร็วรอบเขย่าเท่ากับ 50 รอบต่อนาที ร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 83.57 ยืนยันผลสภาวะที่เหมาะสม โดยทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ซ้ำ พบว่า ร้อยละการดูดซับเท่ากับ 81.50 ± 2 ซึ่งใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทำนายของสมการ แสดงให้เห็นว่าสมการที่ใช้ในการทำนายมีความถูกต้องแม่นยำในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน





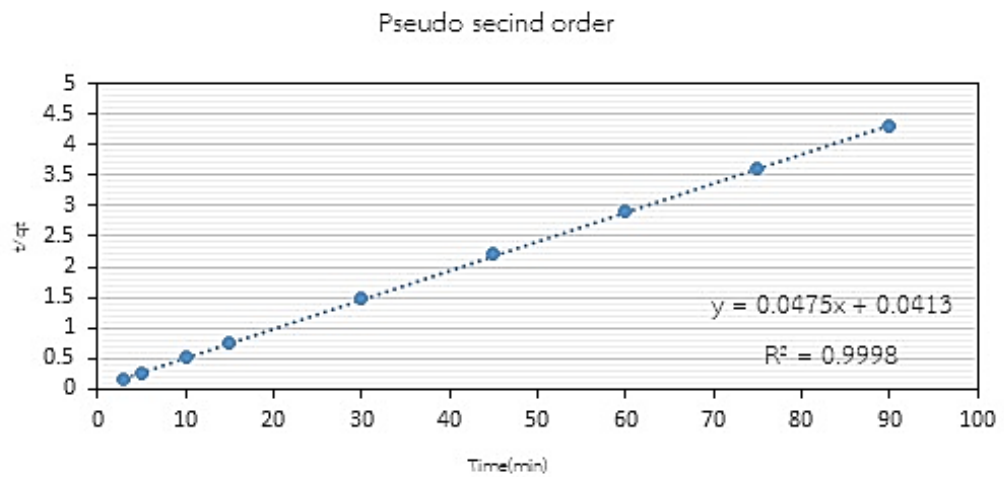
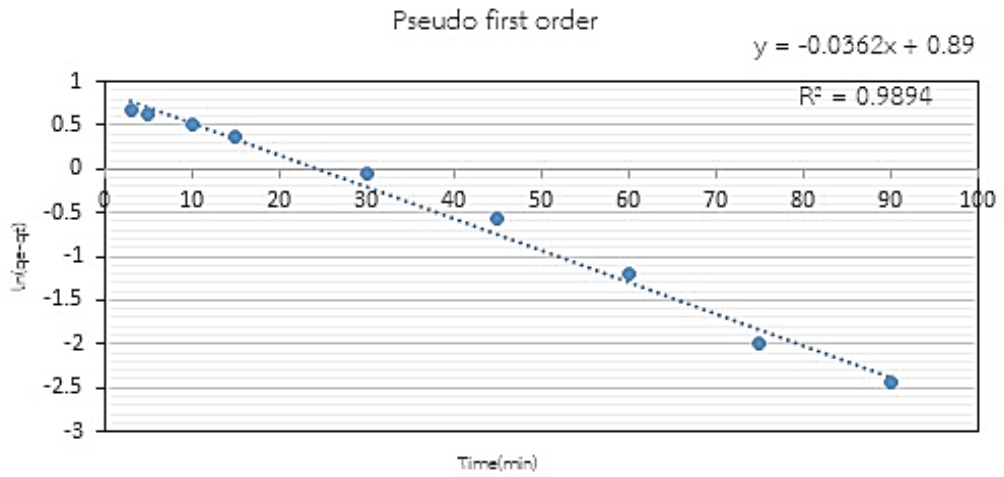
รูปที่ 4.25 ปัจจัยร่วมที่มีผลต่อร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลท์ที่สังเคราะห์จาก
 ถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน (CZFA)

4.6.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยโซดา(CZFA)

จลนพลศาสตร์การดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยโซดา ศึกษาความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน ที่เวลาใด ๆ ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน หรือค่า q_e ที่มีปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน เริ่มต้น เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับตามแบบจำลอง pseudo-first-order และ pseudo-second order โดยนำมาเขียนกราฟเส้นตรงตามแบบจำลองดังกล่าว ซึ่งจุดตัดแกน y และความชันของสมการ pseudo-first order และ pseudo-second order สามารถนำมาใช้คำนวณค่าคงที่อัตราเร็วของการดูดซับ (k_1 และ k_2) และความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนที่ภาวะสมดุล (q_e) ของซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยโซดา มีค่าเท่ากับ 21 มิลลิกรัมต่อกรัม ความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของ ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน ตามสมการ pseudo-first order ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์หรือ R^2 เท่ากับ 0.945 สำหรับสมการ pseudo-second order ให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.999 จากค่า R^2 ที่มีค่ามากแสดงว่าจลนพลศาสตร์การดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน เป็นแบบ pseudo-second order เป็นการดูดซับบนผิวตัวดูดซับที่เกิดกระบวนการทางเคมี โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากกว่าสองปัจจัยคือ ปริมาณสารดูดซับ ความเข้มข้น และเวลา และเมื่อพิจารณาค่าคงที่ k_1 , k_2 และค่า q_e จากการคำนวณตามแบบจำลอง ($q_{e,cal}$) แสดงในตารางที่ 4.23 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.23 ค่าคงที่จลนพลศาสตร์การดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของ ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินตามสมการ pseudo-first order และ pseudo-second order

ตัวอย่าง	q_e (exp) mg/g	Pseudo-first-order			Pseudo-second order		
		q_e (mg/g)	k_1 (min)	R^2	q_e (mg/g)	K_2 (min)	R^2
ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยโซดา	21	2.44	-0.036	0.989	21.88	0.051	0.999



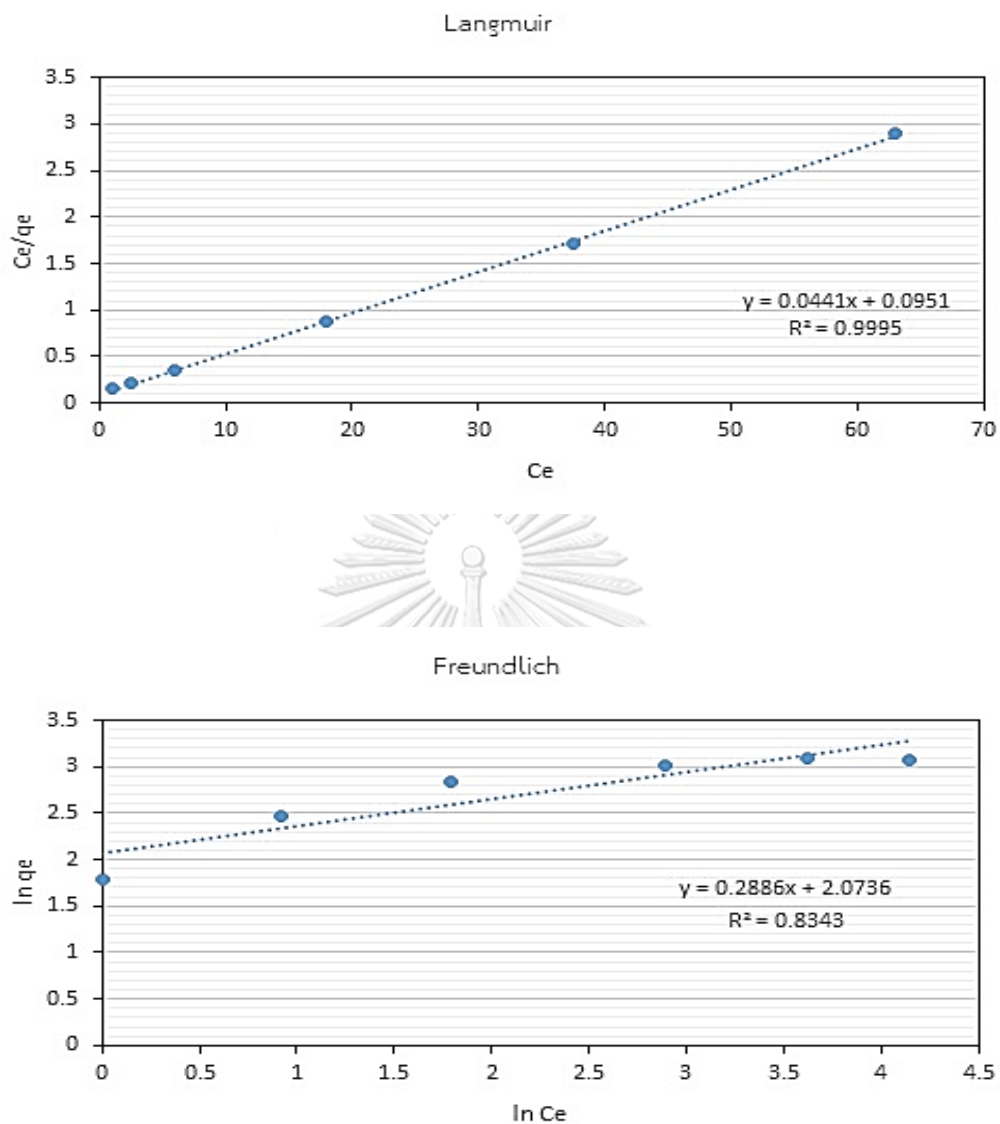
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับปรุงสภาพด้วยโคโคซาน (CZFA) ตามสมการ pseudo first order และ pseudo second order

4.6.4 ไอโซเทอมการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน (CZFA)

ศึกษาการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนโดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยไคโตซาน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 50 75 100 125 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้น้ำหนักซีโอไลต์เท่ากับ 4 กรัม ค่าพีเอช เท่ากับ 7.5 ความเร็วรอบที่ 48 รอบต่อนาที ระยะเวลา 90 นาที เมื่อเปรียบเทียบความสอดคล้องของข้อมูลการทดลองที่ภาวะสมดุล รูปที่ 4.27 และตารางที่ 4.24 พบว่าการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนโดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซานสามารถอธิบายด้วยไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ได้ดีกว่า ไอโซเทอมแบบฟรุนดิช โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์หรือ R^2 ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน มีค่าเท่ากับ 0.997 และ 0.891 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณา q_m หรือความสามารถในการดูดซับปริมาณแอมโมเนียมสูงสุดมีค่าเท่ากับ 22.66 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าคงที่ของการดูดซับชั้นเดียวหรือ K_L มีค่าเท่ากับ 0.464 ลิตรต่อมิลลิกรัม ดังตารางที่ 4.24

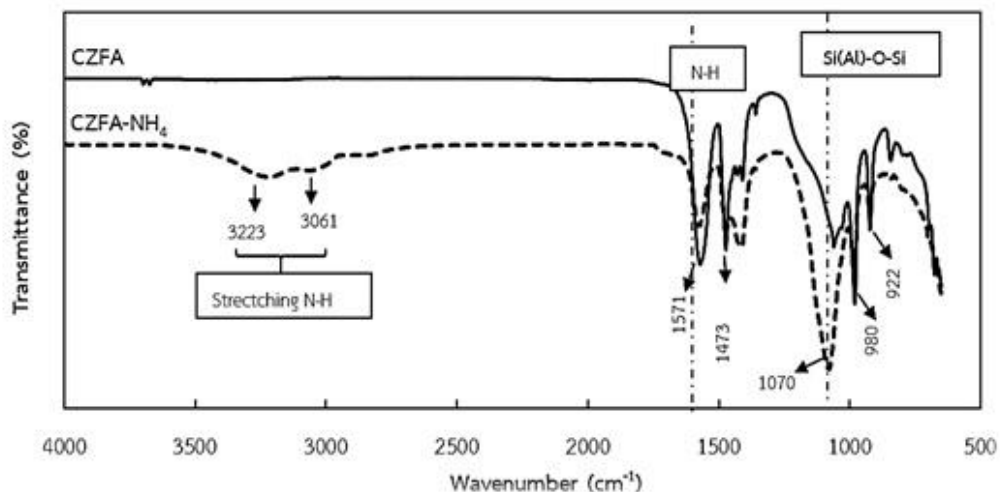
ตารางที่ 4.24 ค่าคงที่ของสมการไอโซเทอมการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนโดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน ตามแบบจำลองของแลงเมียร์และฟรุนดิช

ตัวอย่าง	ไอโซเทอมของแลงเมียร์			ไอโซเทอมของฟรุนดิช		
	q_m (มิลลิกรัมต่อกรัม)	K_L (ลิตรต่อมิลลิกรัม)	R^2	K_F (ลิตรต่อกรัม)	n	R^2
ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน	22.66	0.464	0.996	7.95	3.46	0.891



รูปที่ 4.27 ไอโซเทอมของการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนแบบแลงเมียร์และฟรุนดิช โดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยโคโคซาน (CZFA)

4.6.5 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันหลังการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน (CZFA)



รูปที่ 4.28 FT-IR ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน(CZFA) และซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพไคโตซาน (CZFA) หลังดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน

จากรูปที่ 4.28 เป็นการแสดง IR สเปกตรัมของซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน (CZFA) ก่อนการดูดซับ และซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซานหลังการดูดซับ (CZFA-NH₄) ที่ความยาวคลื่นในช่วง 600 - 4000 cm⁻¹ (รายละเอียดดังภาคผนวก ก) พบว่าการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในช่วงความถี่ 3000 - 3200 cm⁻¹ ที่แสดงถึงพันธะของไนโตรเจนและไฮโดรเจน (stretching N-H) หลังการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน และพีคที่ลดลงที่ความถี่ 1571, 1473 และ 980 cm⁻¹ ซึ่งแสดงถึงกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นหลังการดูดซับแอมโมเนียมที่เกิดภายในโครงสร้างซีโอไลต์ บริเวณพันธะ N-H และ Si(Al)-O-Si (Liu et al., 2016; Zhang et al., 2012) ขณะที่ความถี่ 1070 cm⁻¹ มีพีคสูงขึ้นหลังผ่านการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน

4.7 ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน (ZFA) ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน (CZFA) และซีโอไลต์เกรดการค้า ในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำเสียจากนาุ้ง โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test)

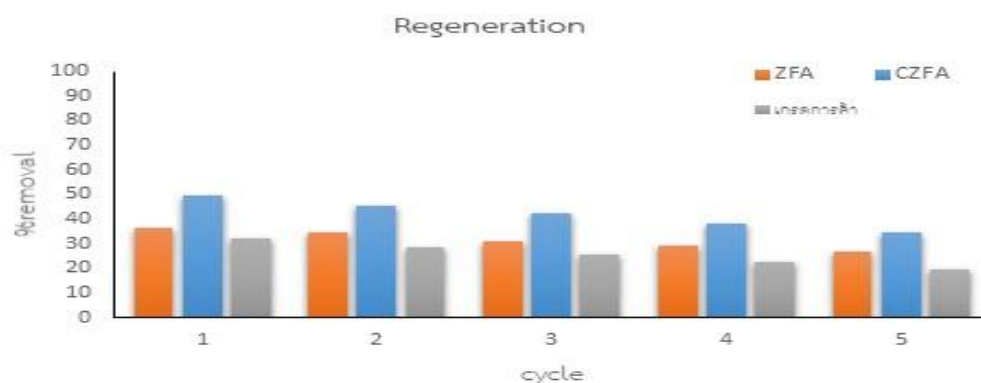
ทำการศึกษาการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยเปรียบเทียบความสามารถของสารดูดซับทั้งสามชนิด คือ ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน (ZFA) และซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน (CZFA) และซีโอไลต์เกรดการค้า โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 4.5 และ 4.6 ผลการทดลอง พบว่าค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียมไนโตรเจนของบ่อกุ้งเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 2.34 ± 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองโดยไม่ใส่ปริมาณซีโอไลต์ (Blank) ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน และซีโอไลต์เกรดการค้า ให้ค่าร้อยละการดูดซับเท่ากับ 1.28 36.23 49.28 และ 31.88 ตามลำดับ ดังในตารางที่ 4.25 และจากการทดลองที่ 4.5.4 ที่ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน และจากการทดลองที่ 4.6.4 ที่ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน เมื่อพิจารณาค่า q_m การดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและซีโอไลต์เถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซานในน้ำเสียสังเคราะห์ มีค่าเท่ากับ 19.42 มิลลิกรัมต่อกรัมและ 22.66 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่เมื่อเรามาประยุกต์ใช้ในน้ำเสียจริง ค่าความสามารถในการดูดซับของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซานมีค่าเท่ากับ 0.21 มิลลิกรัมต่อกรัมและ 0.29 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ จากประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำเสียจริงนั้นมีค่าลดน้อยลงกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องจาก ในสภาวะของน้ำเสียจริงที่เกิดขึ้นในบ่อเลี้ยงกุ้งนั้นต้องเลี้ยงในน้ำที่มีความเค็มและอิทธิพลของความเค็มมีผลกับการลดลงของประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำ (Isnansetyo, Getsu, Seguchi, & Koriyama, 2014) โดยน้ำในบ่อกุ้ง ที่ระดับความเค็ม 0-5 ส่วนในพันส่วนไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนแต่ที่ระดับความเค็ม 10-30 ส่วนในพันส่วนส่งผลต่อการดูดซับปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน (ณัชพงศ์ ฐัฏระกุล, 2542) ในน้ำเสียในบ่อกุ้งนั้นมีปริมาณไอออนกระจายตัวอยู่มากมายหลายชนิด อาทิเช่น มี K^+ , Ca^{2+} และ Mg^{2+} (Huang et al., 2010) การแลกเปลี่ยนประจุบวกของซีโอไลต์นั้น อาศัยกลไกในการแลกเปลี่ยนประจุบวกกับบวกนอกจาก Na^+ ในซีโอไลต์ที่จะแลกเปลี่ยน NH_4^+ แล้วยังมี K^+ , Ca^{2+} และ Mg^{2+} ซึ่งเป็น Competitive ion ที่สามารถแย่งการแลกเปลี่ยนประจุระหว่าง Na^+ กับ NH_4^+ ด้วยจึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนมีค่าลดลง (Zhang et al., 2011; Huang et al., 2010)

ตารางที่ 4.25 ประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้ง

ชนิดสารดูดซับ	น้ำในบ่อเลี้ยงกุ้ง		
	ความเข้มข้นแอมโมเนียมไนโตรเจนเฉลี่ยก่อนดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นแอมโมเนียมไนโตรเจนเฉลี่ยหลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการดูดซับ
Blank	2.34±0.20	2.31±0.005	1.28
ZFA	2.34 ± 0.20	1.49 ± 0.12	36.23
CZFA	2.34 ± 0.20	1.19 ± 0.16	49.28
เกรดการค้า	2.34 ± 0.20	1.60 ± 0.06	31.88

4.8 ศึกษาการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ใช้แล้ว

จากการทดสอบการฟื้นฟูสภาพของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน (ZFA) ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน (CZFA) และซีโอไลต์เกรดการค้า หลังจากการนำซีโอไลต์ที่ดูดซับแล้วใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 4.5 และ 4.6 ผลการทดลองกลับมาใช้ใหม่ทั้งหมด 5 รอบ พบว่า ประสิทธิภาพของสารดูดซับลดลงโดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินลดลงจากร้อยละ 36.23 เหลือร้อยละ 26.79 ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยไคโตซานลดลงจากร้อยละ 49.28 เหลือ 34.92 ซีโอไลต์สังเคราะห์ และซีโอไลต์เกรดการค้าลดลงจากร้อยละ 31.88 เหลือร้อยละ 19.32 ดังแสดงในรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 ร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนหลังการฟื้นฟูกลับมาใช้ใหม่จำนวน 5 รอบ

4.9 การประเมินต้นทุนการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและปรับสภาพด้วยไคโตซานในระดับห้องปฏิบัติการ

การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและปรับสภาพด้วยไคโตซานในระดับห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์สามารถคิดคำนวณได้ดังต่อไปนี้

4.9.1. ต้นทุนคงที่ หมายถึง ต้นทุนที่มีราคาคงที่ ประกอบด้วย ค่าวัตถุดิบในการผลิต เช่น เถ้าลอย น้ำกลั่น สาร NaOH ดังในตารางที่ 4.26 และตารางที่ 4.27

ตารางที่ 4.26 ราคาต้นทุนคงที่ในการผลิตซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินต่อ 1 กิโลกรัม

รายการ	จำนวน	ราคาต่อหน่วย	ราคารวม(บาท)
1.เถ้าลอยถ่านหิน	1 กิโลกรัม	1บาท/กิโลกรัม	1
2.NaOH	128 กรัม	500 กรัม/300บาท	76.80
3.น้ำกลั่น	33.33 ลิตร	25 บาท/ลิตร	833.25
รวม			911.05

ตารางที่ 4.27 ราคาต้นทุนคงที่ในการผลิตซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซานต่อ 1 กิโลกรัม

รายการ	จำนวน	ราคาต่อหน่วย	ราคารวม (บาท)
1.เถ้าลอยถ่านหิน	1 กิโลกรัม	1บาท/ กิโลกรัม	1
2.NaOH	128 กรัม	300บาท/500กรัม	76.80
3.น้ำกลั่น	33.33 ลิตร	25 บาท/ลิตร	833.25
4.ไคโตซานเกรดการค้า	360 กรัม	1890บาท/กิโลกรัม	680.40
5.สารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์	480 มิลลิลิตร	450มิลลิลิตร/90บาท	96
น้ำกลั่นที่ใช้ละลายกรดแอสติติก	23.52 ลิตร	25 บาท/ลิตร	588
รวม			2275.45

4.9.2. ต้นทุนแปรผัน หมายถึง ต้นทุนที่มีราคาแปรผันตามหน่วยที่ใช้ เช่น ค่าไฟฟ้า โดยไม่คิดค่าลงทุนในอุปกรณ์และค่าจ้างแรงงาน เนื่องจากเป็นงานวิจัยในห้องปฏิบัติการ แสดงในตารางที่ 4.28

ตารางที่ 4.28 ตารางต้นทุนค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและปรับสภาพด้วยไคโดซาน

รายการ	กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	จำนวน ชั่วโมงที่ใช้	ราคา (บาท)	หมายเหตุ
1. ตู้อบ	2	24	558.66	
2. เตาดูชา	15	3	544.63	
3. Shaker water bath (ZFA)	2	34	652.23	
4. Shaker water bath (CZFA)	2	34+26	858.09	

4.9.3 การประเมินต้นทุนในการผลิตซีโอไลต์

$$A = \Sigma B + \Sigma Z$$

เมื่อ A คือ ต้นทุนในการผลิตซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินต่อกิโลกรัม

B คือ ค่าต้นทุนคงที่ในการผลิตซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินต่อกิโลกรัม

Z คือ ค่าต้นทุนแปรผันในการผลิตต่อกิโลกรัม

ตารางที่ 4.29 ต้นทุนในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและซีโอไลต์เถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยต่อ 1 กิโลกรัม

รายการ	ซีโอไลต์เถ้าลอยถ่านหิน (บาท/ กิโลกรัม)	ซีโอไลต์เถ้าลอยถ่านหิน ปรับสภาพด้วยไคโดซาน (บาท/ กิโลกรัม)
ต้นทุนคงที่ (วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต)	911.25	2,275.45
ต้นทุนแปรผัน (ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิต)	1,755.52	1,961.38
รวมต้นทุนในการผลิต	2,666.77	4,236.83

จากตารางที่ 4.29 ต้นทุนของการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน 1 กิโลกรัมมีค่าเท่ากับ 2,666.77 บาท และต้นทุนของการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยไคโตซาน 1 กิโลกรัมมีเท่ากับ 4,236.83 บาท และในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ใช้ซีโอไลต์เกรดการค้า โดยราคาของซีโอไลต์เกรดการค้ามีราคา 250 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งมีราคาที่ถูกกว่าซีโอไลต์ทั้งสองชนิดที่ได้ทำการสังเคราะห์ขึ้น แต่เนื่องจากการทดลองการหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ทั้งสองชนิดเป็นการทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการและสังเคราะห์ได้ปริมาณน้อย จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายต่อกิโลกรัมที่สูงกว่าซีโอไลต์เกรดการค้าซึ่งผลิตขึ้นจากภาคอุตสาหกรรม ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบราคาและค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของซีโอไลต์ทั้ง 3 ชนิด มาวิเคราะห์ร่วมด้วย แสดงในตาราง 4.26 ซึ่งจากตารางพบว่า ราคาซีโอไลต์เกรดการค้า ราคาถูกที่สุดและให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกน้อยที่สุดในขณะที่ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซานใช้ต้นทุนในการสังเคราะห์สูงสุดและให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงสุดด้วยเช่นกัน แต่จากตาราง 4.30 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของซีโอไลต์ปรับสภาพด้วยไคโตซานมีค่ามากกว่าค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุไม่ได้เพิ่มขึ้นมากกว่าของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินแต่กับใช้ ต้นทุนที่มากกว่าเกือบเท่าตัวรวมถึงมีขั้นตอนในการทำการทดลองที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำเสียจริง จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.7 พบว่าซีโอไลต์เถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซานมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนสูงสุดถึงร้อยละ 49.28 ดังนั้นการเลือกใช้ซีโอไลต์ในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนในบ่อกึ่งนั้น ต้องคำนึงถึงต้นทุน ราคา และประสิทธิภาพในการกำจัด รวมถึงกระบวนการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยวิธีอื่น เช่น การเติมอากาศ ร่วมด้วย

ตารางที่ 4.30 เปรียบเทียบต้นทุนการสังเคราะห์ซีโอไลต์และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก

ชนิดสารดูดซับ	ต้นทุน :กิโลกรัม/บาท	ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (meq/100g)
ซีโอไลต์เถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน	4,236.83	301.39
ซีโอไลต์เถ้าลอยถ่านหิน	2,666.77	272.12
ซีโอไลต์เกรดการค้า	250	80.55

4.10 การประเมินต้นทุนการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและปรับสภาพด้วยไคโตซาน ในระดับอุตสาหกรรม

การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและปรับสภาพด้วยไคโตซานในระดับอุตสาหกรรมสามารถคิดคำนวณได้ดังต่อไปนี้

4.10.1. ต้นทุนคงที่ หมายถึง ต้นทุนที่มีราคาคงที่ ประกอบด้วย ค่าวัตถุดิบในการผลิต เช่น เถ้าลอย น้ำกลั่น สาร NaOH ดังในตารางที่ 4.31 และตารางที่ 4.32

ตารางที่ 4.31 ราคาต้นทุนคงที่ในการผลิตซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินต่อ 100 กิโลกรัม

รายการ	จำนวน	ราคาต่อหน่วย	ราคารวม (บาท)
1. เถ้าลอยถ่านหิน	100 กิโลกรัม	1 บาท/กิโลกรัม	100.00
2. NaOH 50%	12.8 กิโลกรัม	24.40 บาท/กิโลกรัม	312.32
3. น้ำประปา	3,333 ลิตร	10.23 บาท/ลูกบาศก์เมตร	34.10
รวม			446.42

ตารางที่ 4.32 ราคาต้นทุนคงที่ในการผลิตซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซานต่อ 100 กิโลกรัม

รายการ	จำนวน	ราคาต่อหน่วย	ราคารวม (บาท)
1. เถ้าลอยถ่านหิน	100 กิโลกรัม	1 บาท/กิโลกรัม	100.00
2. NaOH 50%	12.8 กิโลกรัม	24.40 บาท/กิโลกรัม	312.32
3. น้ำประปา	3,333 ลิตร	10.23 บาท/ลูกบาศก์เมตร	34.10
4. ไคโตซานเกรดการค้า	36 กิโลกรัม	200 บาท/กิโลกรัม	7,200.00
5. สารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์	48 กิโลกรัม	50 บาท/กิโลกรัม	2,400.00
6. น้ำกลั่นที่ใส่ละลายกรดอะซิติก	2,352 ลิตร	10.23 บาท/ลูกบาศก์เมตร	24,060.96
รวม			34,107.38

4.10.2. ต้นทุนแปรผัน หมายถึง ต้นทุนที่มีราคาแปรผันตามหน่วยที่ใช้ เช่น ค่าไฟฟ้า โดยไม่คิดค่าลงทุนในอุปกรณ์และค่าจ้างแรงงาน เนื่องจากเป็นงานวิจัยในห้องปฏิบัติการ แสดงในตารางที่ 4.33

ตารางที่ 4.33 ตารางต้นทุนค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและปรับสภาพด้วยไคโตซาน

รายการ	กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	จำนวน ชั่วโมงที่ใช้	ราคา (บาท)	หมายเหตุ
1. ตู้อบ	2.8	24	648.49	
2. เต้าเผา	66	3	1,260.43	
3. Shaker water bath (ZFA)	2.5	34	737.76	
4. Shaker water bath (CZFA)	2.5	34+26	1,035.87	
รวม			3,682.55	

4.10.3 การประเมินต้นทุนในการผลิตซีโอไลต์

$$A = \Sigma B + \Sigma Z$$

เมื่อ A คือ ต้นทุนในการผลิตซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินต่อกิโลกรัม

B คือ ค่าต้นทุนคงที่ในการผลิตซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินต่อกิโลกรัม

Z คือ ค่าต้นทุนแปรผันในการผลิตต่อกิโลกรัม

ตารางที่ 4.34 ต้นทุนในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและซีโอไลต์เถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยต่อ 100 กิโลกรัม

รายการ	ซีโอไลต์เถ้าลอยถ่านหิน (บาท/ 100 กิโลกรัม)	ซีโอไลต์เถ้าลอยถ่านหินปรับ สภาพด้วยไคโตซาน (บาท/ 100 กิโลกรัม)
ต้นทุนคงที่ (วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต)	446.42	34,107.38
ต้นทุนแปรผัน (ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิต)	2,646.68	2,944.79
รวมต้นทุนในการผลิต	3,093.10	37,052.17

ต้นทุนในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและซีโอไลต์เถ้าลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยต่อ 100 กิโลกรัมจะมีต้นทุนการผลิตอยู่ที่ -3,093.10 บาท (30.93 บาท/กิโลกรัม) และ 37,052.17 บาท (370.52 บาท/กิโลกรัม) ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในการศึกษาการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำเสียโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน (ZFA) และปรับสภาพด้วยไคโตซาน (CZFA) สามารถสรุปผลการทดลอง ได้ดังนี้ สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินนั้น พบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงสุด (CEC) คือ ที่ระยะเวลา 34 ชั่วโมง ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมลต่อลิตร และ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงสุด เท่ากับ 272.12 มิลลิอิกวาเลนซ์ต่อ100กรัม และสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยไคโตซาน พบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงสุด คือ ระยะเวลา ในการสัมผัส 26 ชั่วโมง ความเข้มข้นของสารละลายไคโตซาน 11 กรัมต่อลิตร และ อุณหภูมิ 48 องศาเซลเซียส ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยไคโตซาน ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (CEC) เท่ากับ 301.39 มิลลิอิกวาเลนซ์ต่อ100 กรัม ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากสภาวะที่เหมาะสมจากถ้ำลอยถ่านหินและปรับสภาพด้วยไคโตซาน คือ Sodium Aluminum Silicate Hydrate (unnamed zeolite) $1.08\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1.68\text{SiO}_2 \cdot 1.8\text{H}_2\text{O}$ Sodium Aluminum Silicate Hydrate (unnamed zeolite) $\text{Na}_6[\text{AlSiO}_4]_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ และ Sodium Aluminum Silicate Hydrate (Unnamed zeolite) $1.08\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1.68\text{SiO}_2 \cdot 1.8\text{H}_2\text{O}$ ตามลำดับ และพบสารที่ไม่ใช่ซีโอไลต์คือ Quartz - Magnetite, Hematite

สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและปรับสภาพด้วยไคโตซาน พบว่า ที่ พีเอช 7.5 ปริมาณซีโอไลต์ 4 กรัม ระยะเวลาในการสัมผัส 80 นาที และ รอบเขย่า 80 รอบต่อนาที มีประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน ร้อยละเท่ากับ 66.68 และให้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 19.42 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่ สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของ ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ปรับสภาพด้วยไคโตซานพบว่า ที่ พีเอช 7.5 ปริมาณซีโอไลต์ที่ 4 กรัม ระยะเวลาในการสัมผัส 90 นาที และรอบเขย่าเท่ากับ 50 รอบต่อนาที มีประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนเท่ากับร้อยละ 83.57 ให้ค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 22.66 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อนำซีโอไลต์ทั้งสองชนิดมาทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำเสียจริงในบ่อเลี้ยงกุ้ง แล้วเปรียบเทียบกับซีโอไลต์เกรดการค้า พบว่า ประสิทธิภาพ

การกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์ถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซานมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนสูงสุดถึงร้อยละ 49.28 ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจน ร้อยละ 36.63 และซีโอไลต์เกรดการค้ามีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนร้อยละ 31.88 แม้ว่าซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซานจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนสูงสุด แต่เมื่อมาวิเคราะห์ถึงต้นทุนในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซานแล้ว พบว่า มีต้นทุนในการสังเคราะห์มากกว่าซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินถึงเกือบสองเท่าและขั้นตอนในการสังเคราะห์ที่เพิ่มมากขึ้นแต่ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนต่างกันเพียงร้อยละ 12.65 ดังนั้นการเลือกใช้ซีโอไลต์ในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนในบ่อกึ่งนั้น ต้องคำนึงถึงต้นทุนราคา และประสิทธิภาพในการกำจัด รวมถึงกระบวนการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยวิธีอื่น เช่น การเติมอากาศ การเปลี่ยนถ่ายน้ำระหว่างการเลี้ยงกุ้งร่วมด้วย

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินปรับสภาพด้วยไคโตซาน มีความสอดคล้องกับ แบบจำลองอันดับสองเทียม ทั้งสองตัวดูดซับ และไอโซเทอมของการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและปรับสภาพด้วยไคโตซานมีความสอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์มากกว่าของฟรุนดลิช

ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป

1. ควรมีการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและปรับสภาพด้วยไคโตซานไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่จริง
2. ในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและปรับสภาพด้วยไคโตซาน ควรมีการศึกษาอิทธิพลของ interfere ion ในน้ำเสียจริง

บรรณานุกรม

- Alias, S. S., Chee, S. M., & Mohamad, A. A. (2017). Chitosan–ammonium acetate–ethylene carbonate membrane for proton batteries. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S3687-S3698. doi:<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.05.001>
- Arora, M., Eddy, N. K., Mumford, K. A., Baba, Y., Perera, J. M., & Stevens, G. W. (2010). Surface modification of natural zeolite by chitosan and its use for nitrate removal in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*, 62(2-3), 92-97.
- Atun, G., Hisarlı, G., Kurtoğlu, A. E., & Ayar, N. (2011). A comparison of basic dye adsorption onto zeolitic materials synthesized from fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, 187(1), 562-573. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.075>
- Boyd, C. E. (1982). *Water Quality Management For Pond Fish Culture*: Elsevier Science.
- Boyd, C. E. (1989). Water Quality Management and Aeration in Shrimp Farming. . In *Fisheries and Allied Aquacultures Departmental Series No. 2*: Alabama Agriculture Experiment Station, Auburn University, Alabama.
- Boyd, C. E. (1995). *Bottom Soils, Sediment and Pond Aquaculture*: Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn University, Alabama, USA. .
- Boyd, C. E., & Fast, A. W. (1992). Pond monitoring and management. In *Marine Shrimp Culture. Principles and Practices*: Elsevier Science B.V., Amsterdam.
- Boyd, C. E., & Tucker, C. S. (1998). *Pond aquaculture water quality management*: Kluwer Academic Publishers, Massachusetts.
- Breck, D. W. (1974). *Zeolite molecular sieve : Structure, chemistry, and use*: John Wiley & Sons.
- Brock, J. A., & Main, K. (1994). *A Guide to the Common Problems and Disease of Cultured Penaeus vannamei*. Retrieved from Oceanic Institute, Makapuu Point, Honolulu, Hawaii, USA.:
- Cardoso, A. M., Horn, M. B., Ferret, L. S., Azevedo, C. M., & Pires, M. (2015). Integrated synthesis of zeolites 4A and NaP1 using coal fly ash for application in the formulation of detergents and swine wastewater treatment. *J. Hazard. Mater*, 287, 69-77.

doi:doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.01.042>

- Chen, J., Kong, H., Wu, D., Hu, Z., Wang, Z., & Wang, Y. (2006). Removal of phosphate from aqueous solution by zeolite synthesized from fly ash. *Journal of colloid and interface science*, 300(2), 491-497. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.04.010>
- Colin, R. W., & David, F. (2005). *Relation between coal and fly ash mineralogy, based on quantitative X-ray diffraction methods*. Paper presented at the 2005 World of Coal Ash (WOCA), Lexington, Kentucky, USA.
- Corazzari, I., Nisticò, R., Turci, F., Faga, M. G., Franzoso, F., Tabasso, S., & Magnacca, G. (2015). Advanced physico-chemical characterization of chitosan by means of TGA coupled on-line with FTIR and GCMS: Thermal degradation and water adsorption capacity. *Polymer Degradation and Stability*, 112, 1-9. doi:<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.12.006>
- Ding, Y., & Sartaj, M. (2015). Statistical analysis and optimization of ammonia removal from aqueous solution by zeolite using factorial design and response surface methodology. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(2), 807-814. doi:10.1016/j.jece.2015.03.025
- Dyer, A. (1988). *Introduction to zeolite molecular sieves* John Wiley & Sons.
- Freier, T., Koh, H. S., Kazazian, K., & Shoichet, M. S. (2005). Controlling cell adhesion and degradation of chitosan films by N-acetylation. *Biomaterials*, 26(29), 5872-5878. doi:10.1016/j.biomaterials.2005.02.033
- Hargreaves, J. A. (1998). Nitrogen biogeochemistry of aquaculture ponds. *Aquaculture*, 166(3-4), 181-212.
- He, Y., Lin, H., Dong, Y., Liu, Q., & Wang, L. (2016). Simultaneous removal of ammonium and phosphate by alkaline-activated and lanthanum-impregnated zeolite. *Chemosphere*, 164, 387-395. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.110>
- Huang, H., Xiao, X., Yan, B., & Yang, L. (2010). Ammonium removal from aqueous solutions by using natural Chinese (Chende) zeolite as adsorbent. *J Hazard Mater*, 175(1-3), 247-252. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.09.156
- Huang, H., Xiao, X., Yan, B., & Yang, L. (2010). Ammonium removal from aqueous solutions by using natural Chinese (Chende) zeolite as adsorbent. *Journal of Hazardous Materials*, 175(1), 247-252.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.09.156>

Huang, H., Yang, L., Xue, Q., Liu, J., Hou, L., & Ding, L. (2015). Removal of ammonium from swine wastewater by zeolite combined with chlorination for regeneration. *Journal of Environmental Management*, 160, 333-341.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.06.039>

Isnansetyo, A., Getsu, S. A. I., Seguchi, M., & Koriyama, M. (2014). Independent Effects of Temperature, Salinity, Ammonium Concentration and pH on Nitrification Rate of the Ariake Seawater Above Mud Sediment. *HAYATI Journal of Biosciences*, 21(1), 21-30. doi:<https://doi.org/10.4308/hjb.21.1.21>

Knorr, D. (1984). Use of Chitinous Polymers in Food—A Challenge for Food Research and Development. *Food Technology (USA)*, 38, 85-97.

Koukouzas, N., Vasilatos, C., Itskos, G., Mitsis, I., & Moutsatsou, A. (2010). Removal of heavy metals from wastewater using CFB-coal fly ash zeolitic materials. *Journal of Hazardous Materials*, 173(1), 581-588.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.126>

Lin, L., Lei, Z., Wang, L., Liu, X., Zhang, Y., Wan, C., . . . Tay, J. H. (2013). Adsorption mechanisms of high-levels of ammonium onto natural and NaCl-modified zeolites. *Separation and Purification Technology*, 103, 15-20.

doi:10.1016/j.seppur.2012.10.005

Liu, Y., Yan, C., Qiu, X., Li, D., Wang, H., & Alshameri, A. (2016). Preparation of faujasite block from fly ash-based geopolymer via in-situ hydrothermal method. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 59, 433-439.

Liu, Y., Yan, C., Zhao, J., Zhang, Z., Wang, H., Zhou, S., & Wu, L. (2018). Synthesis of zeolite P1 from fly ash under solvent-free conditions for ammonium removal from water. *Journal of Cleaner Production*, 202, 11-22.

doi:10.1016/j.jclepro.2018.08.128

McDonald, R. S. (1958). Surface functionality of amorphous silica by infrared spectroscopy. *The Journal of Physical Chemistry*, 62(10), 1168-1178.

Millar, G. J., Winnett, A., Thompson, T., & Couperthwaite, S. J. (2016). Equilibrium studies of ammonium exchange with Australian natural zeolites. *Journal of Water Process Engineering*, 9, 47-57. doi:10.1016/j.jwpe.2015.11.008

- Muzzarelli, R. A. A. (1977). Chitin chemistry. In *Chitin* (pp. 87-153): Pergamon of Canada Ltd.1977, Toronto.
- Nešić, A. R., Veličković, S. J., & Antonović, D. G. (2013). Modification of chitosan by zeolite A and adsorption of Bezactive Orange 16 from aqueous solution. *Composites Part B: Engineering*, 53, 145-151.
- Ojha, K., Pradhan, N. C., & Samanta, A. N. (2004a). Zeolite from fly ash synthesis and characterization. *Bull. Mater. Sci.*, 27, 555-564.
- Ojha, K., Pradhan, N. C., & Samanta, A. N. (2004b). Zeolite from fly ash: synthesis and characterization. *Bull Mater Sci*, 27, 555-564.
- Pengthamkeerati, P., Satapanajaru, T., & Chularuengsoarn, P. (2008). Chemical modification of coal fly ash for the removal of phosphate from aqueous solution. *Fuel*, 87(12), 2469-2476. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.03.013>
- Prasad, B., Sangita, K., & Tewary, B. K. (2001). Reducing the hardness of mine water using transformed fly ash. *Mine Water Environ*, 30(1), 61-66.
- Qi, L., Xu, Z., Jiang, X., Hu, C., & Zou, X. (2004). Preparation and antibacterial activity of chitosan nanoparticles. *Carbohydrate Research*, 339(16), 2693-2700. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carres.2004.09.007>
- Queensland, D. o. E. a. S. (2018). Coastal and subcoastal non-floodplain tree swamp—Melaleuca spp. and Eucalyptus spp. – Nutrient dynamics, WetlandInfo. Retrieved from <https://wetlandinfo.des.qld.gov.au/wetlands/ecology/aquatic-ecosystems-natural/palustrine/non-floodplain-tree-swamp/nutrients.html>
- Randall, D. J., & Tsui, T. K. N. (2002). Ammonia toxicity in fish. *Marine Pollution Bulletin*, 45(1), 17-23.
- Saltali, K., Sari, A., & Aydın, M. (2007). Removal of ammonium ion from aqueous solution by natural Turkish (Yıldızeli) zeolite for environmental quality. *Journal of Hazardous Materials*, 141(1), 258-263. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.06.124>
- Schuler, D. J., Boardman, G. D., Kuhn, D. D., & Flick, G. J. (2010). Acute Toxicity of Ammonia and Nitrite to Pacific White Shrimp, *Litopenaeus vannamei*, at Low Salinities. *Journal of the World Aquaculture Society*, 41(3), 438-446. doi:doi:10.1111/j.1749-7345.2010.00385.x

- Sivalingam, S., & Sen, S. (2018). Optimization of synthesis parameters and characterization of coal fly ash derived microporous zeolite X. *Applied Surface Science*, 455, 903-910. doi:10.1016/j.apsusc.2018.05.222
- Somerset, V., Petrik, L., & Iwuoha, E. (2008). Alkaline hydrothermal conversion of fly ash precipitates into zeolites 3: The removal of mercury and lead ions from wastewater. *Journal of Environmental Management*, 87(1), 125-131.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.01.033>
- Sriprom, P., Neramittagapong, S., Lin, C., Wantala, K., Neramittagapong, A., & Gridanurak, N. (2015). Optimizing chemical oxygen demand removal from synthesized wastewater containing lignin by catalytic wet-air oxidation over CuO/Al₂O₃ catalysts. *J Air Waste Manag Assoc*, 65(7), 828-836.
doi:10.1080/10962247.2015.1023908
- Toniolo, N., & Boccaccini, A. R. (2017). Fly ash-based geopolymers containing added silicate waste. A review. *Ceramics International*, 43(17), 14545-14551.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.07.221>
- Visa, M. (2016). Synthesis and characterization of new zeolite materials obtained from fly ash for heavy metals removal in advanced wastewater treatment. *Powder Technology*, 294, 338-347. doi:<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.02.019>
- Wan Ngah, W. S., Teong, L. C., Toh, R. H., & Hanafiah, M. A. K. M. (2012). Utilization of chitosan-zeolite composite in the removal of Cu(II) from aqueous solution: Adsorption, desorption and fixed bed column studies. *Chemical Engineering Journal*, 209, 46-53.
- Wang, C., Li, J., Sun, X., Wang, L., & Sun, X. (2009). Evaluation of zeolites synthesized from fly ash as potential adsorbents for wastewater containing heavy metals. *Journal of Environmental Sciences*, 21(1), 127-136.
doi:[https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60022-X](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60022-X)
- Wang, S., Soudi, M., Li, L., & Zhu, Z. H. (2006). Coal ash conversion into effective adsorbents for removal of heavy metals and dyes from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 133(1), 243-251.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.10.034>
- Wang, Y., & Lin, F. (2009). Synthesis of high capacity cation exchangers from a low-grade

- Chinese natural zeolite. *J Hazard Mater*, 166(2-3), 1014-1019.
doi:10.1016/j.jhazmat.2008.12.001
- Wantala, K., Sriprom, P., Pojananukij, N., Neramittagapong, A., Neramittagapong, S., & Kasemsiri, P. (2013). Optimal Decolorization Efficiency of Reactive Red 3 by Fe-RH-MCM-41 Catalytic Wet Oxidation Coupled with Box-Behnken Design. *Key Engineering Materials*, 545, 109-114. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.545.109
- Weitkamp, J., Karge, H. G., Pfeifer, H., & Holderich, W. (1994). Zeolites and related microporous materials: State of the art 1994. In *Studies in surface science and catalysis*: Elsevier.
- Woolard, C. D., Strong, J., & Erasmus, C. R. (2002). Evaluation of the use of modified coal ash as a potential sorbent for organic waste streams. *Appl. Geochem*, 17(8), 1159-1164. doi:doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00057-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00057-4).
- Wu, D., Zhang, B., Li, C., Zhang, Z., & Kong, H. (2006). Simultaneous removal of ammonium and phosphate by zeolite synthesized from fly ash as influenced by salt treatment. *Journal of colloid and interface science*, 304(2), 300-306.
- Xie, J., Li, C., Chi, L., & Wu, D. (2013). Chitosan modified zeolite as a versatile adsorbent for the removal of different pollutants from water. *Fuel*, 103, 480-485.
doi:10.1016/j.fuel.2012.05.036
- Xie, J., Wang, Z., Wu, D., Zhang, Z., & Kong, H. (2013). Synthesis of Zeolite/Aluminum Oxide Hydrate from Coal Fly Ash: A New Type of Adsorbent for Simultaneous Removal of Cationic and Anionic Pollutants. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(42), 14890-14897. doi:10.1021/ie4021396
- Yang, K., Zhang, X., Chao, C., Zhang, B., & Liu, J. (2014). In-situ preparation of NaA zeolite/chitosan porous hybrid beads for removal of ammonium from aqueous solution. *Carbohydr Polym*, 107, 103-109. doi:10.1016/j.carbpol.2014.02.001
- Zhang, B.-h., Wu, D.-y., Wang, C., He, S.-b., Zhang, Z.-j., & Kong, H.-n. (2007). Simultaneous removal of ammonium and phosphate by zeolite synthesized from coal fly ash as influenced by acid treatment. *Journal of Environmental Sciences*, 19(5), 540-545. doi:[https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(07\)60090-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60090-4)
- Zhang, M., Zhang, H., Xu, D., Han, L., Niu, D., Tian, B., . . . Wu, W. (2011). Removal of ammonium from aqueous solutions using zeolite synthesized from fly ash by a

- fusion method. *Desalination*, 271(1), 111-121.
- Zhang, M., Zhang, H., Xu, D., Han, L., Niu, D., Zhang, L., . . . Tian, B. (2011). Ammonium removal from aqueous solution by zeolites synthesized from low-calcium and high-calcium fly ashes. *Desalination*, 277(1), 46-53.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.03.085>
- Zhang, Y., Dong, J., Guo, F., Shao, Z., & Wu, J. (2018). Zeolite Synthesized from Coal Fly Ash Produced by a Gasification Process for Ni²⁺ Removal from Water. *Minerals*, 8(3). doi:10.3390/min8030116
- Zhang, Z., Wang, H., & Provis, J. L. (2012). Quantitative study of the reactivity of fly ash in geopolymerization by FTIR. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 1(4), 154-166. doi:10.1080/21650373.2012.752620
- Zheng, Y., & Wang, A. (2009). Evaluation of ammonium removal using a chitosan-g-poly (acrylic acid)/rectorite hydrogel composite. *J Hazard Mater*, 171(1-3), 671-677. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.06.053
- กรมประมง. (2547). โครงการประเมินผลกระทบการนำกุ้งขาว (*Penaeus vannamei*) เข้าประเทศไทย. Retrieved from หน่วยวิจัยเพื่อความเป็นเลิศเทคโนโลยีชีวภาพกุ้ง: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และนุรักษ์ กฤษดาภิรักษ์. (2547). การเร่งปฏิริยา: พื้นฐานและการประยุกต์. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- จารุมาศ เมฆสัมพันธ์. (2548). ดินตะกอน. ภาควิชาชีววิทยาประมง คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- จุฑาทิพย์ เพชรอินทร์. (2547). การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ไฮโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขาน้อย. สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชลอ ลิมสุวรรณ. (2543). กุ้งไทย 2000 สู่วัยยืนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม: โรงพิมพ์เจริญรัตน์การพิมพ์, กรุงเทพฯ.
- ชลอ ลิมสุวรรณ, นิตี ชูเชิด, สุธี วงศ์มณีประทีป, สาธิต ประเสริฐศรี, เกศินี หลายสุทธิสาร, ปัทมา วิริยพัฒน์ทรัพย์, จริยวดี สุริยพันธ์, และ แก้วดา ลิมเฮง. (2552). ผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมการกินอาหารของกุ้งขาวแวนนาไม (*Litopeneus vannamei*). Paper presented at the การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- ชลอ ลิมสุวรรณ และ พรเลิศ จันทร์รัชชกุล. (2547). อุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงกุ้งในประเทศไทย: บริษัทเมจิกพับลิเคชั่น จำกัด, กรุงเทพฯ.
- ณัชพงศ์ ฐัฏระกุล. (2542). อิทธิพลของความเป็นกรดและความเค็มที่มีต่อการวัดปริมาณแอมโมเนียในน้ำด้วยวิธีเนสเลอโรเซนชันและโซเดียมไนโตรพรัสไซด์. (วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,

- ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์. (2526). แก่ล่อยกับงานอุตสาหกรรมในประโยชน์ของกากของเสียจากโรงงานไฟฟ้า.
กรุงเทพมหานคร : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- พรเลิศ จันทร์รัชชกุล และ ชะลอ ลี้มสุวรรณ. (2549). การจัดการคุณภาพน้ำและบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำรายงานวิจัย
สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง.
- พุทธ ส่องแสงจินดา. (2544). การจัดการสารประกอบไนโตรเจนและออกซิเจนในฟาร์มเลี้ยงกุ้งระบบปิด. กลุ่มวิจัย
วิศวกรรมการเพาะเลี้ยงและสิ่งแวดล้อม. ศูนย์วิจัยและพัฒนาการ เพาะเลี้ยงกุ้งทะเลฝั่งอ่าวไทย กรมประมง
สงขลา.
- วิชาญ ภูพัฒน์. (2526). การใช้ซี้แก่ล่อยในงานผลิตปูนซีเมนต์ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์. กรุงเทพมหานคร :
การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- วิทยา เทียมสุข. (2544). การกำจัดไนโตรเจนในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยใช้ซีโอไลต์. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สุภาพร ห้วยหงษ์ทอง. (2548). การเตรียมเรซินไคโตซานสำหรับการจัดไอออนโลหะหนักในน้ำเสีย. (ปริญาโท),
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.,
- อนรรฆอร พันธุ์ไพศาล. (2549). การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากแก่ล่อยถ่านหินและแก่ล่อยขานอ้อยเพื่อกำจัดตะกั่วในน้ำ
เสียอุตสาหกรรม. สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อารักษ์ ดำรงสัตย์. (2546). การกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยใช้ซีโอไลต์และทรายไม่คัดขนาด.
สาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ภาคผนวก



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ผล BET

ก.1 ผล BET ของถ้ำลอยถ่านหิน

Date: 04/04/2017		Page 1	
Quantachrome Corporation Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report Autosorb for Windows® Version 1.19			
Sample ID	CFA 500C		
Description	BET=11pt. Ads=22pt. Des=22pt.		
Comments			
Sample Weight	0.0659 g	Outgas Temp	300.0 °C
Adsorbate	NITROGEN	Operator	BomB
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	Outgas Time	7.0 hrs
NonIdeality	6.580E-05	Analysis Time	296.1 min
Molecular Wt	28.0134 g/mol	P/Po Toler	3
Station #	1	End of Run	04/03/2017 1
		Equil Time	2
		File Name	600403_2.RAV
		Bath Temp.	77.35
AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY			
SURFACE AREA DATA			
Multipoint BET.....	1.813E+01	m ² /g	
Langmuir Surface Area.....	-1.070E+02	m ² /g	
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	2.592E+01	m ² /g	
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	4.354E+01	m ² /g	
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	2.948E+01	m ² /g	
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	4.717E+01	m ² /g	
t-Method External Surface Area.....	1.464E+01	m ² /g	
t-Method Micro Pore Surface Area.....	3.490E+00	m ² /g	
DR Method Micro Pore Area.....	3.543E+01	m ² /g	
PORE VOLUME DATA			
Total Pore Volume for pores with Diameter			
less than 16349.0 Å at P/Po = 0.99883.....	2.608E-02	cc/g	
BJH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	3.576E-02	cc/g	
BJH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	3.692E-02	cc/g	
BJH Interpolated Cumulative Adsorption Pore Volume for pores			
in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	3.318E-02	cc/g	
BJH Interpolated Cumulative Desorption Pore Volume for pores			
in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	3.473E-02	cc/g	
DH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	3.663E-02	cc/g	
DH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	3.740E-02	cc/g	
t-Method Micro Pore Volume.....	-8.668E-04	cc/g	
DR Method Micro Pore Volume.....	1.259E-02	cc/g	
HK Method Cumulative Pore Volume.....	2.450E-03	cc/g	
SF Method Cumulative Pore Volume.....	2.710E-03	cc/g	
PORE SIZE DATA			
Average Pore Diameter.....	5.754E+01	Å	
BJH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	2.173E+01	Å	
BJH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	2.130E+01	Å	
DH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	2.173E+01	Å	
DH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	2.130E+01	Å	
DR Method Micro Pore Width	2.766E+02	Å	
DA Method Pore Diameter (Mode).....	1.920E+01	Å	
HK Method Pore Width (Mode).....	1.912E+01	Å	
SF Method Pore Diameter (Mode).....	3.654E+01	Å	
DATA REDUCTION PARAMETERS			
Thermal Transpiration : ON			
Effective Molecule Diameter (D) 3.5400 Å			
Effective Cell Stem Inner Diameter (d) 4.0000 mm			
Last Po Acquired 757.40 mm Hg			
Additional Initialization Information Not Recorded.			
BJH/DH Moving Average Size : 1			

ก.2 ผล BET ของ ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน (ZFA)

Date: 04/04/2017		Page 1			
Quantachrome Corporation Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report Autosorb for Windows® Version 1.19					
Sample ID	ZeO				
Description	BET=11pt. Ads=22pt. Des=22pt.				
Comments					
Sample Weight	0.0646 g				
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Temp	300.0 °C	Operator	BomB
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	Outgas Time	14.6 hrs	Analysis Time	339.3 min
NonIdeality	6.580E-05	P/Po Toler	3	End of Run	04/01/2017 2
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Equil Time	2	File Name	600401_1.RAW
Station #	1	Bath Temp.	77.35		
AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY					
SURFACE AREA DATA					
Multipoint BET.....	3.455E+01	m ² /g			
Langmuir Surface Area.....	6.103E+01	m ² /g			
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	4.364E+01	m ² /g			
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	6.641E+01	m ² /g			
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	4.669E+01	m ² /g			
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	6.996E+01	m ² /g			
t-Method External Surface Area.....	3.455E+01	m ² /g			
t-Method Micro Pore Surface Area.....	0.000E+00	m ² /g			
DR Method Micro Pore Area.....	9.323E+01	m ² /g			
PORE VOLUME DATA					
Total Pore Volume for pores with Diameter					
less than 2824.8 Å at P/Po = 0.99317.....	1.336E-01	cc/g			
BJH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	1.400E-01	cc/g			
BJH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	1.442E-01	cc/g			
BJH Interpolated Cumulative Adsorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	1.400E-01	cc/g			
BJH Interpolated Cumulative Desorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	1.442E-01	cc/g			
DH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	1.375E-01	cc/g			
DH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	1.418E-01	cc/g			
t-Method Micro Pore Volume.....	0.000E+00	cc/g			
DR Method Micro Pore Volume.....	3.313E-02	cc/g			
HK Method Cumulative Pore Volume.....	1.107E-02	cc/g			
SF Method Cumulative Pore Volume.....	1.148E-02	cc/g			
PORE SIZE DATA					
Average Pore Diameter.....	1.547E+02	Å			
BJH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	2.172E+01	Å			
BJH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	2.134E+01	Å			
DH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	2.172E+01	Å			
DH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	2.134E+01	Å			
DR Method Micro Pore Width	2.304E+02	Å			
DA Method Pore Diameter (Mode).....	1.920E+01	Å			
HK Method Pore Width (Mode).....	1.802E+01	Å			
SF Method Pore Diameter (Mode).....	3.433E+01	Å			
DATA REDUCTION PARAMETERS					
Thermal Transpiration : ON					
Effective Molecule Diameter (D) 3.5400 Å					
Effective Cell Stem Inner Diameter (d) 4.0000 mm					
Last Po Acquired 758.19 mm Hg					
Additional Initialization Information Not Recorded.					
BJH/DH Moving Average Size : 1					

n.3 ผล BET ของ Zeolite Chitosan

Date: 05/21/2018		Page 1			
Quantachrome Corporation Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report Autosorb for Windows® Version 1.19					
Sample ID	Fly ash 700C				
Description	Ads 20 Pts Des 20 Pts BET 11 pts				
Comments					
Sample Weight	0.0505 g	Outgas Temp	300.0 °C	Operator	Best
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Time	16.5 hrs	Analysis Time	372.9 min
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	P/Po Toler	2	End of Run	05/15/2018 1
NonIdeality	6.580E-05	Equil Time	3	File Name	610515_1.RAW
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Bath Temp.	77.35		
Station #	1				
AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY					
SURFACE AREA DATA					
Multipoint BET.....	3.946E+01	m ² /g			
Langmuir Surface Area.....	6.737E+01	m ² /g			
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	4.664E+01	m ² /g			
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	6.306E+01	m ² /g			
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	4.931E+01	m ² /g			
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	6.545E+01	m ² /g			
t-Method External Surface Area.....	2.175E+01	m ² /g			
t-Method Micro Pore Surface Area.....	1.771E+01	m ² /g			
DR Method Micro Pore Area.....	8.819E+01	m ² /g			
PORE VOLUME DATA					
Total Pore Volume for pores with Diameter less than 31853.6 Å at P/Po = 0.99940.....	4.302E-02	cc/g			
BJH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	4.489E-02	cc/g			
BJH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	4.904E-02	cc/g			
BJH Interpolated Cumulative Adsorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	4.370E-02	cc/g			
BJH Interpolated Cumulative Desorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	4.781E-02	cc/g			
DH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	4.482E-02	cc/g			
DH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	4.864E-02	cc/g			
t-Method Micro Pore Volume.....	1.036E-02	cc/g			
DR Method Micro Pore Volume.....	3.134E-02	cc/g			
HK Method Cumulative Pore Volume.....	1.560E-02	cc/g			
SF Method Cumulative Pore Volume.....	1.612E-02	cc/g			
PORE SIZE DATA					
Average Pore Diameter.....	4.361E+01	Å			
BJH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	2.198E+01	Å			
BJH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	1.630E+01	Å			
DH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	2.198E+01	Å			
DH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	1.630E+01	Å			
DR Method Micro Pore Width	1.935E+02	Å			
DA Method Pore Diameter (Mode).....	1.840E+01	Å			
HK Method Pore Width (Mode).....	1.417E+01	Å			
SF Method Pore Diameter (Mode).....	2.667E+01	Å			
DATA REDUCTION PARAMETERS					
Thermal Transpiration : ON					
Effective Molecule Diameter (D) 3.5400 Å					
Effective Cell Stem Inner Diameter (d) 4.0000 mm					
Last Po Acquired 412.07 mm Hg					
Additional Initialization Information Not Recorded.					
BJH/DH Moving Average Size : 1					

ภาคผนวก ข

ผล XRF

ข.1 ผล XRF ของถ้ำลอย

Sample: 590707-1259
 Measured on 8/1/2016 10:20:13 AM
 Sample measured by Admin
 Measurement method: Best Detection-Vac34mm

Fe2O3	SiO2	Al2O3	CaO	MgO	SO3	K2O	MnO	TiO2	Na2O	BaO
3217.2 KCps	197.2 KCps	86.7 KCps	158.6 KCps	16.7 KCps	15.2 KCps	19.9 KCps	36.5 KCps	9.8 KCps	1.1 KCps	3.2 KCps
38.7 %	31.8 %	13.7 %	7.23 %	2.14 %	1.24 %	0.844 %	0.514 %	0.442 %	0.361 %	0.319 %
P2O5	SrO	NiO	V2O5	ZnO	Cl	Cr2O3	ZrO2	CuO	Rb2O	
2.1 KCps	38.6 KCps	1.9 KCps	0.7 KCps	2.7 KCps	0.3 KCps	0.6 KCps	11.8 KCps	1.0 KCps	1.7 KCps	
0.295 %	939 PPM	235 PPM	215 PPM	202 PPM	143 PPM	106 PPM	92.7 PPM	90.8 PPM	39.5 PPM	

ข.2 ผล XRF ของ Zeolite

Sample: 603103-4725
 Measured on 4/2/2017 12:45:21 PM
 Sample measured by Admin
 Measurement method: Best Detection-Vac34mm

Fe2O3	SiO2	Al2O3	CaO	Na2O	MgO	MnO	SO3	TiO2	BaO	K2O
3627.2 KCps	197.6 KCps	80.0 KCps	233.3 KCps	26.7 KCps	22.3 KCps	45.6 KCps	7.2 KCps	10.0 KCps	4.0 KCps	4.8 KCps
40.6 %	27.6 %	11.0 %	9.05 %	6.95 %	2.47 %	0.592 %	0.500 %	0.407 %	0.360 %	0.176 %

P2O5	SrO	NiO	ZnO	Cl	V2O5	CuO	ZrO2	Cr2O3	CoO	Y2O3
1.1 KCps	41.3 KCps	2.2 KCps	3.3 KCps	0.4 KCps	0.5 KCps	1.1 KCps	12.1 KCps	0.4 KCps	11.1 KCps	1.5 KCps
0.139 %	981 PPM	266 PPM	247 PPM	186 PPM	113 PPM	98.5 PPM	88.5 PPM	57.8 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM

Rh	Sb2O3	CeO2	Pr6O11	Gd2O3	Tb4O7	Dy2O3	Ho2O3	Er2O3	Intensity Scal
51.3 KCps	1.5 KCps	1.4 KCps	0.1 KCps	0.6 KCps	6.0 KCps	15.7 KCps	2.0 KCps	11.1 KCps	
0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.9739

Compton	
51.3 KCps	
105 %	

ข.3 ผล XRF ของ Zeolite Chitosan

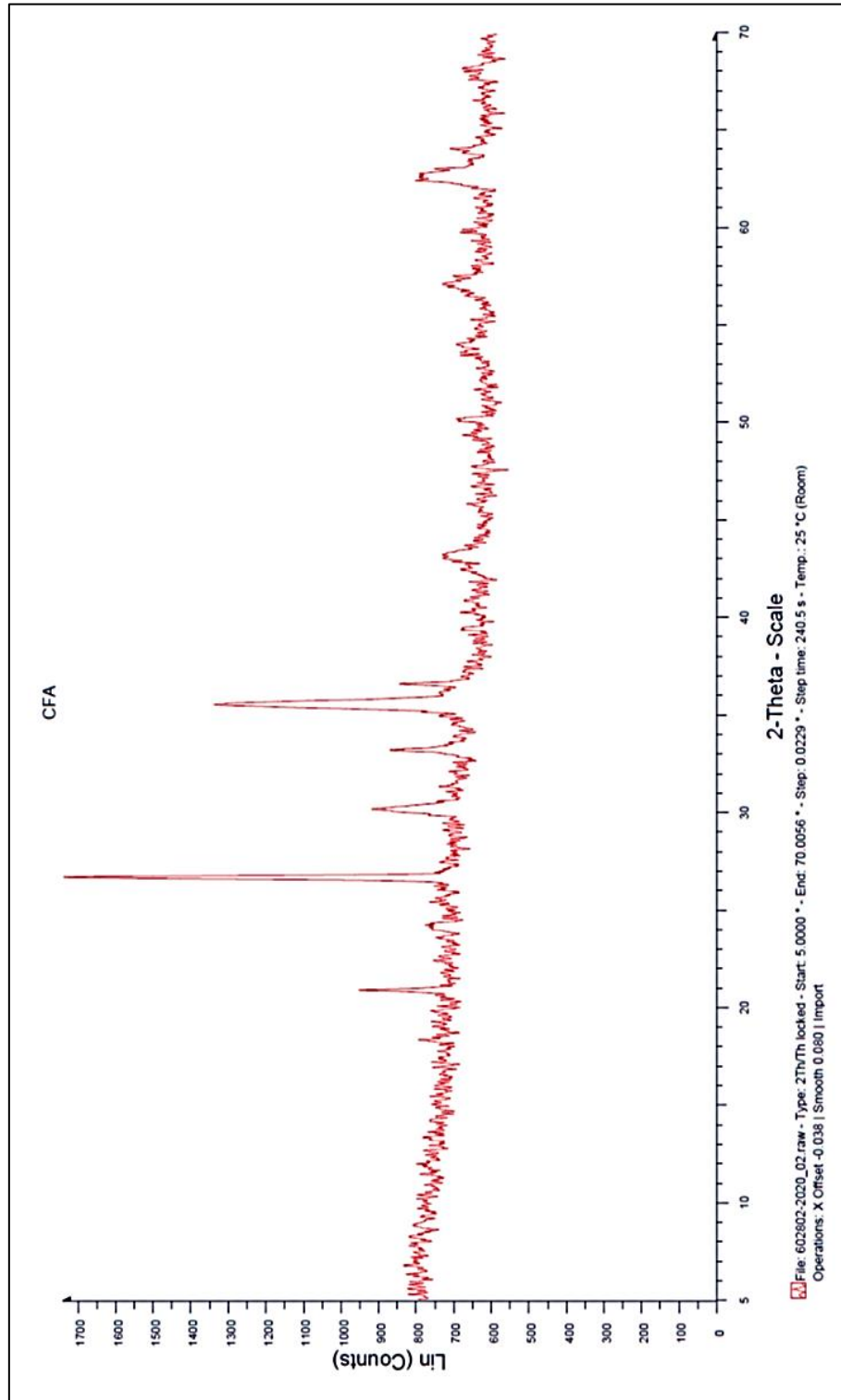
Sample: 601808-8400-ZEOCHI2
 Measured on 12/1/2017 9:04:37 AM
 Sample measured by Admin
 Measurement method: Best Detection-Vac34mm

Fe2O3	SiO2	Al2O3	CaO	Na2O	MgO	MnO	TiO2	BaO	SO3	K2O
3999.3 KCps	231.8 KCps	102.9 KCps	64.5 KCps	8.7 KCps	17.4 KCps	49.3 KCps	14.4 KCps	4.9 KCps	4.2 KCps	4.6 KCps
42.3 %	33.2 %	14.1 %	2.58 %	2.33 %	1.90 %	0.596 %	0.527 %	0.400 %	0.318 %	0.176 %
P2O5	SrO	NiO	ZnO	Cl	ZrO2	CuO	Cr2O3	V2O5	CoO	Ga2O3
0.8 KCps	30.5 KCps	2.2 KCps	2.8 KCps	0.3 KCps	11.6 KCps	1.1 KCps	0.6 KCps	0.6 KCps	11.5 KCps	0.2 KCps
0.111 %	739 PPM	260 PPM	213 PPM	159 PPM	114 PPM	102 PPM	98.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM

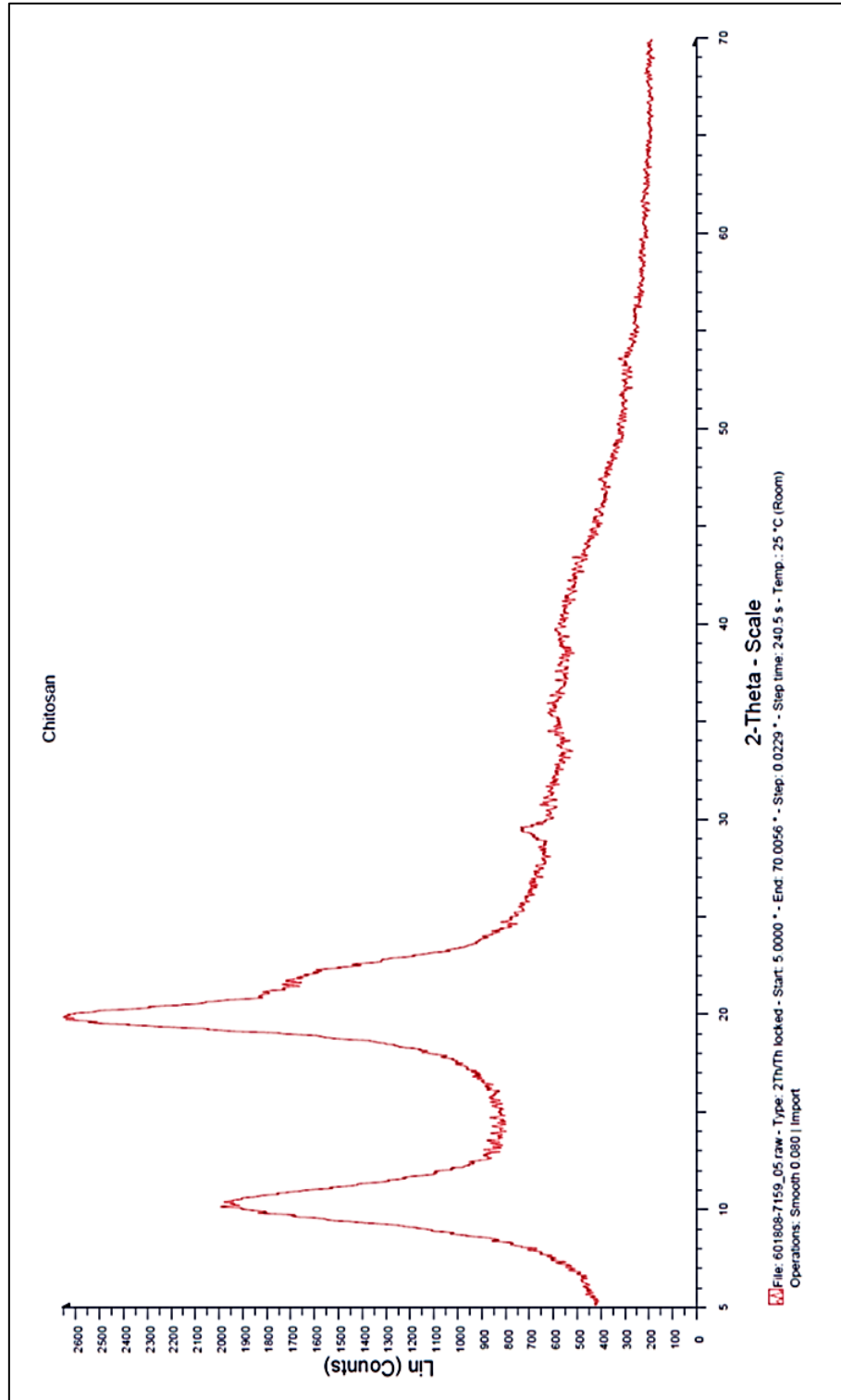
ภาคผนวก ค

ผล XRD

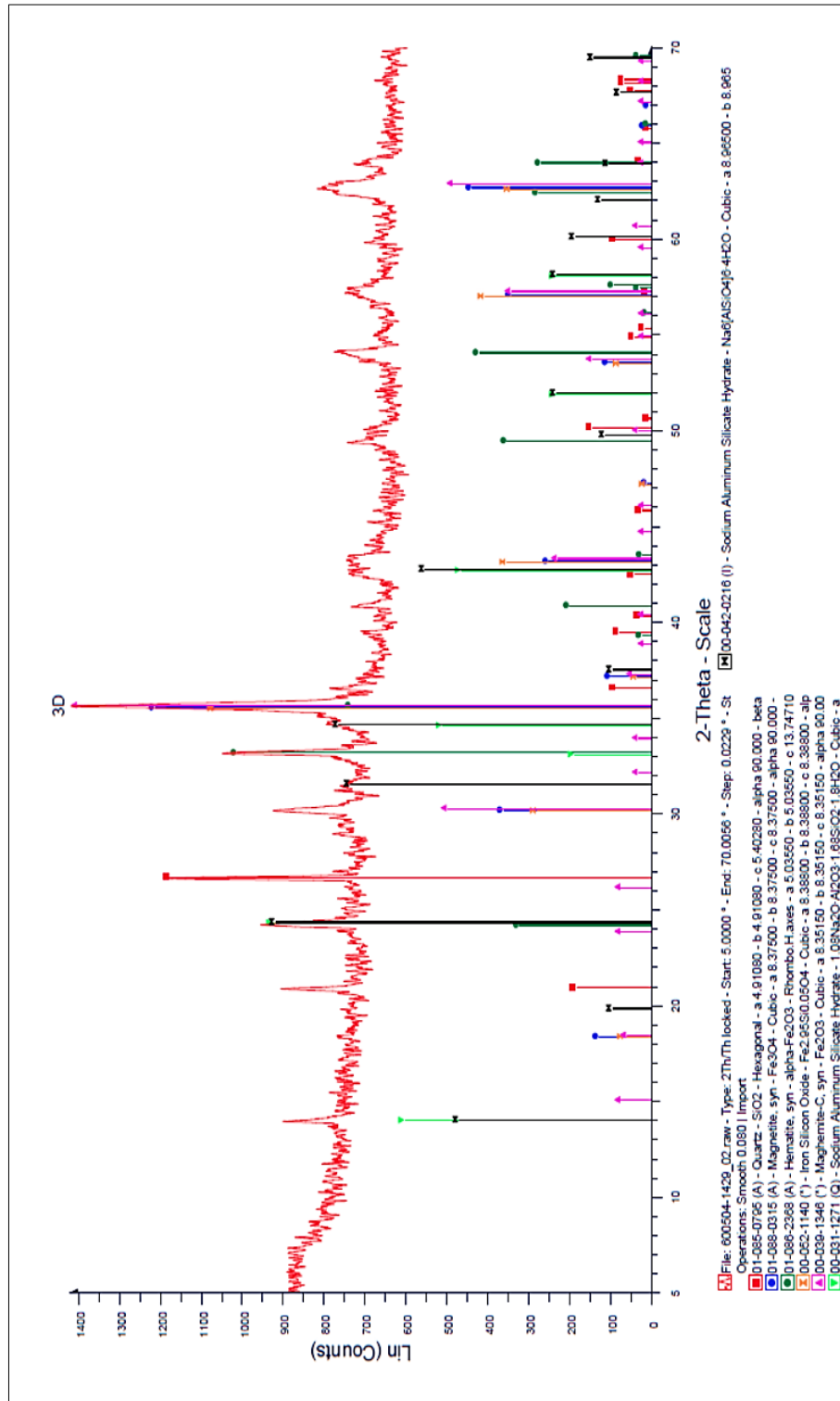
ค.1 ผล XRD ของถ้ำลอย



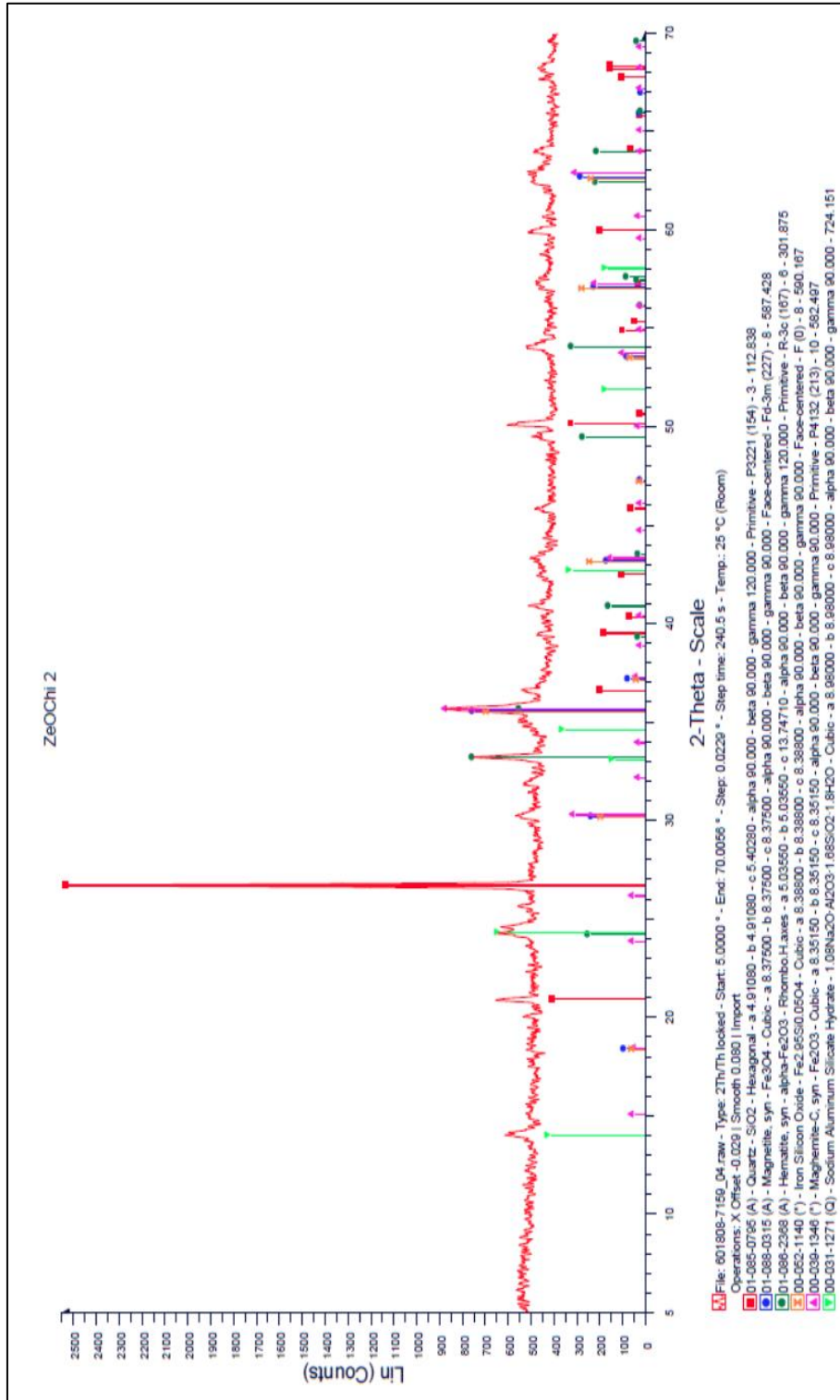
ค.2 ผล XRD ของ Chitosan



ค.3 ผล XRD ของ Zeolite



ค.4 ผล XRD ของ Zeolite Chitosan



ค.5 XRD library

Pattern : 00-031-1271		Radiation = 1.540600					Quality : Questionable				
1.08Na ₂ O·Al ₂ O ₃ ·1.68SiO ₂ ·1.8H ₂ O		2 θ	<i>i</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>					
Sodium Aluminum Silicate Hydrate Also called: Unnamed zeolite		13.913	65	1	1	0					
		24.232	100	2	1	1					
		32.778	20	3	1	1					
		34.605	55	2	2	2					
		42.739	50	4	1	1					
		51.879	25	5	1	0					
		58.035	25	4	4	0					
Lattice : Cubic		Mol. weight = 302.27									
S.G. : (0)		Volume [C] = 724.15									
a = 8.98000		Dx = 0.693									
<p>Sample preparation: Prepared by autoclave desilicification of a synthetic aluminate solution at 105 C. Reason 'O' quality was assigned: O assigned because only the most characteristic reflections are given. Data collection flag: Ambient.</p>											
Grigoreva, G. et al., Inorg. Mater. (Engl. Transl.), volume 8, page 1304 (1972)											
Radiation :		Filter : Not specified									
SS/FOM : F7- 4(0.0630,27)		d-sp : Not given									



13.913, 24.232

Pattern : 00-039-1346		Radiation = 1.540600		Quality : High	
<p>Fe₂O₃</p> <p>Iron Oxide Maghemite-C, syn</p>		2 θ	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
		14.958	5	1	0
		18.384	4	1	1
		23.772	5	2	0
		26.103	5	2	1
		30.241	35	2	0
		32.125	2	2	1
		33.883	2	3	0
		35.631	100	3	1
		37.250	3	2	2
		38.848	1	3	0
		40.378	1	3	1
		43.285	16	4	0
		44.705	1	4	0
		46.072	1	3	0
		50.008	2	4	1
		53.734	10	4	2
		54.926	1	4	3
		56.107	1	5	0
		57.273	24	5	1
		59.570	1	5	2
		60.687	2	5	1
		62.927	34	4	0
		63.996	1	4	1
		65.074	1	5	3
		67.203	1	4	4
		68.255	1	6	0
		69.307	1	6	1
		71.378	3	6	2
		72.403	1	6	4
		74.473	5	3	3
		75.445	2	6	2
		76.445	1	6	3
		77.445	1	6	4
		79.449	1	4	4
		80.426	1	6	3
		81.422	1	7	1
		85.341	1	7	2
		87.307	2	6	4
		89.247	1	7	3
		90.229	7	7	3
		95.107	3	8	0
<p>Lattice : Cubic</p> <p>S.G. : P4132 (213)</p> <p>a = 8.35150</p> <p>Z = 10</p>		<p>Mol. weight = 159.69</p> <p>Volume [CD] = 582.50</p> <p>Dx = 4.856</p> <p>Dm = 4.900</p> <p>ρ_{calc} = 1.40</p>			
<p>Color: Light brown</p> <p>Sample source or locality: Sample from Control Data as used in hard disks.</p> <p>Optical data: B-2.74</p> <p>General comments: Optical data on specimen from Iron Mountain, Shasta County, California, USA.</p> <p>Sample preparation: Space group dependent upon preparation (Bernal et al.).</p> <p>Additional pattern: To replace 00-004-0755 and 00-024-0081.</p> <p>General comments: Pattern reviewed by Syvinski, W., McCarthy, G., North Dakota State University, Fargo, North Dakota, USA, ICDD Grant-in-Aid (1990). Agrees well with experimental pattern. Additional weak reflections [indicated by brackets] were observed.</p> <p>Data collection flag: Ambient.</p>					
<p>Schulz, D., McCarthy, G., North Dakota State University, Fargo, North Dakota, USA., ICDD Grant-in-Aid (1987)</p>					
<p>Radiation : CuKα</p> <p>Lambda : 1.54178</p> <p>SS/FCM : F30= 95(0.0090,35)</p>		<p>Filter : Monochromator crystal</p> <p>d-sp : Diffractometer</p> <p>Internal standard : Si</p>			

Pattern : 00-042-0218		Radiation = 1.540600		Quality : Indexed		
$\text{Na}_6[\text{AlSiO}_4]_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ Sodium Aluminum Silicate Hydrate <i>Also called:</i> Unnamed zeolite		2 θ	i	h	k	l
		13.937	51	1	1	0
		19.761	10	2	0	0
		24.319	100	2	1	1
		31.555	80	3	1	0
		34.646	83	2	2	2
		37.442	10	3	2	1
		42.903	60	4	1	1
		49.816	12	4	2	2
		51.974	25	5	1	0
		58.155	25	4	4	0
		60.112	20	5	3	0
		62.028	13	6	0	0
		63.932	11	6	1	1
		67.694	8	5	4	1
		69.465	15	6	2	2
		71.278	5	6	3	1
		73.066	6	4	4	4
		74.748	4	5	5	0
		78.308	12	7	2	1
		80.030	4	6	4	2
		81.757	8	7	3	0
		85.202	5	7	3	2
		97.189	8	6	6	2
Lattice : Cubic S.G. : P-43n (218) a = 8.96500	Mol. weight = 924.39 Volume [CD] = 720.53 Dx = 2.130 Z = 1					
Color: White Sample preparation: Prepared from nonbasic hydrosodalite $\text{Na}_6[\text{AlSiO}_4]_6$ by slow rehydration over saturated Na N O ₂ -solution with 65% humidity. General comments: $\text{Na}_6[\text{AlSiO}_4]_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ can't be prepared by partial dehydration of $\text{Na}_6[\text{AlSiO}_4]_6 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. Data collection flag: Ambient.						
Sieger, P., Engelhardt, G., Felsche, J., Universitat Konstanz, Konstanz, Germany., Private Communication (1991)						
Radiation : CuK α 1 Lambda : 1.54050 SS/FOM : F23= 12(0,0320,61)	Filter : Monochromator crystal d-sp : Guinier Internal standard : Si					

31.555

Pattern : 00-052-1140		Radiation = 1.540600		Quality : High		
$\text{Fe}_{2.95}\text{Si}_{0.05}\text{O}_4$ Iron Silicon Oxide		2θ 18.300 30.105 35.467 37.105 43.124 47.202 53.480 57.013 62.587	l 6 26 100 3 33 1 7 38 32	h 1 2 3 2 4 3 4 5 4	k 1 2 1 2 0 3 2 1 4	l 1 0 1 2 0 1 2 1 0
Lattice : Face-centered cubic S.G. : F (0) a = 6.38800		Mol. weight = 230.15 Volume [CD] = 590.17 Dx = 5.181		Z = 8		
Sample preparation: A mixture of Fe ₃ O ₄ and α -Fe ₂ SiO ₄ (molar ratio 9:1) was held for 5 hours at 1200 C and 6 GPa pressure. Data collection flag: Ambient.						
Ohtaka, O., Tobe, H., Yamanaka, T., Phys. Chem. Miner., volume 24, page 555 (1997)						
Radiation : CoK α 1 Lambda : 1.78960 SS/FOM : F9= 83(0.0099,11)		Filter : Not specified d-sp : Diffractometer				

Pattern : 01-074-1877		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated		
FeO(OH)		2 θ	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
Iron Oxide Hydroxide Lepidocrocite		14.148	999	0	2	0
		27.072	532	1	2	0
		28.517	4	0	4	0
		30.040	25	0	1	1
		36.388	364	0	3	1
		36.924	52	1	4	0
		36.146	106	1	1	1
		43.363	23	0	6	0
		43.466	31	1	3	1
		46.867	210	0	5	1
		*46.867	210	0	0	0
		49.253	44	2	2	0
		49.253	44	2	2	0
		49.626	6	1	6	0
		52.811	126	1	5	1
		55.825	1	2	4	0
		56.720	7	2	1	1
		59.023	26	0	6	0
		60.459	46	0	0	2
		60.786	105	2	3	1
		62.437	17	0	2	2
		64.186	10	1	8	0
		65.010	68	1	7	1
		65.791	10	2	6	0
		67.451	39	1	2	2
		68.485	60	2	5	1
		72.993	13	1	4	2
		74.987	5	0	9	1
		75.136	13	3	2	0
		76.012	1	0	10	0
		77.287	5	0	6	2
		78.595	15	2	8	0
		79.641	4	1	9	1
		79.857	28	2	0	2
		80.471	6	3	4	0
		80.650	25	1	10	1
		81.225	8	3	1	1
		81.618	12	2	2	2
		81.904	7	1	6	2
		84.729	1	3	3	1
		86.860	1	2	4	2
		89.205	1	3	6	0
		89.556	9	0	8	2
Lattice : Base-centered orthorhombic		Mol. weight = 88.65				
S.G. : Amam (63)		Volume [CD] = 148.15				
a = 3.87000	Z = 4	Dx = 3.984				
b = 12.51000		Dm = 4.070				
c = 3.06000		I/Icor = 4.23				
a/b = 0.30935						
c/b = 0.24460						
ICSD collection code: 027846		Remarks from ICSD/ICSD: ATOM H 1 +1 4.00 Atoms not located in unit cell.				
Test from ICSD: Calc. density unusual but tolerable.		Test from ICSD: No R value given.				
Test from ICSD: At least one TF missing.		Sample source or locality: Specimen from Eislerfeld, Westerwald, Germany.				
Additional pattern: See PDF 00-009-0098.		Data collection flag: Ambient.				
Ewing, F.J., J. Chem. Phys., volume 3, page 420 (1935)		Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997)				
Radiation : CuK α 1		Filter : Not specified				
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings				
SS/FOM : F30=563(0.0016,33)						

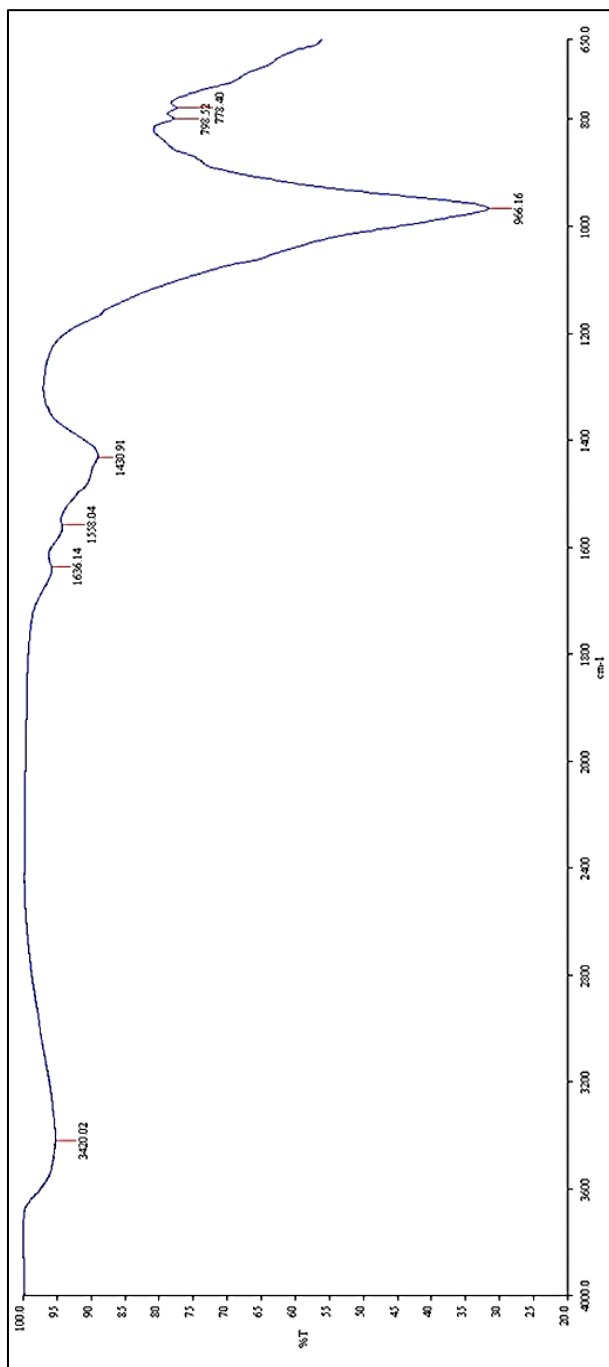
Pattern : 01-085-0795		Radiation = 1.540600		Quality : Alternate		
SiO ₂		2 θ	i	h	k	l
Silicon Oxide		20.871	153	1	0	0
Quartz		26.654	999	0	1	1
		36.567	71	1	1	0
		39.487	84	1	0	2
		40.314	20	1	1	-1
		42.477	33	2	0	0
		45.821	17	0	2	1
		50.168	120	1	1	-2
		50.646	2	0	0	3
		54.905	32	0	2	2
		55.355	11	0	1	3
		57.288	5	2	1	0
		59.996	71	2	1	-1
		64.070	17	1	1	-3
		65.827	2	3	0	0
		67.784	33	2	1	-2
		68.182	53	2	0	3
		68.356	53	0	3	1
		73.507	11	1	0	4
		75.707	19	3	0	2
		77.722	11	2	2	0
		79.931	20	1	2	-3
		80.096	13	2	2	-1
		81.217	17	1	1	-4
		81.544	24	1	3	0
		83.893	10	3	1	-1
		85.004	3	2	0	4
		87.501	1	3	0	3
Lattice : Hexagonal S.G. : P3221 (154) a = 4.91080 c = 5.40280 Z = 3		Mol. weight = 60.08 Volume [CDJ] = 112.84 Dx = 2.653 floor = 3.14				
<p>ICSD collection code: 027831 ICSD space group comment: ICSD SG: P3221S IT is: 154 SG short form: P3221 Remarks from ICSD/CSD: REM B Site occupation factor for O given by author greater than 1. Test from ICSD: At least one TF missing. Additional pattern: See PDF 01-078-2315, PDF 00-033-1161 and PDF 00-046-1045. Remarks from ICSD/CSD: R(Bragg)=0.117, sample with some clay, sharp reflections, Gaussian profiles (too narrow). Remarks from ICSD/CSD: RVP. Cancel: Data collection flag: Ambient.</p>						
Young, R.A., Mackie, P.E., von Dreele, R.B., J. Appl. Crystallogr., volume 10, page 282 (1977) Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997)						
Radiation : CuK α 1 Lambda : 1.54060 SS/FOM : F28=1000(0.0000,29)		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings				

Pattern : 01-086-2368		Radiation = 1.540600		Quality : Alternate		
α -Fe ₂ O ₃		2 θ	i	h	k	l
Iron Oxide		24.150	315	0	1	2
Hematite, syn		33.162	999	1	0	4
Also called: Diiron(III) oxide - α		35.630	722	1	1	0
		39.291	19	0	0	6
		40.863	194	1	1	3
		43.509	18	2	0	2
		49.465	346	0	2	4
		54.075	413	1	1	6
		56.158	5	2	1	1
		57.448	25	1	2	2
		57.608	87	0	1	8
		62.438	269	2	1	4
		64.000	263	3	0	0
		66.034	2	1	2	5
		69.804	25	2	0	8
		71.962	91	1	0	10
		72.293	22	1	1	9
		75.198	3	2	1	7
		75.453	57	2	2	0
		77.742	20	0	3	6
		78.776	9	2	2	3
		79.486	1	1	3	1
		80.581	16	3	1	2
		80.718	36	1	2	8
		82.967	44	0	2	10
		84.506	2	0	0	12
		84.935	66	1	3	4
		88.561	61	2	2	6
Lattice : Rhombohedral		Mol. weight = 159.69				
S.G. : R-3c (167)		Volume [CD] = 301.87				
a = 5.03550	Z = 6	Dx = 5.271				
c = 13.74710		Dm = 5.260				
		Wcor = 3.27				
<p>ICSD collection code: 040142 Temperature factor: ATF Remarks from ICSD/CSD: REM DEN. Remarks from ICSD/CSD: REM M PDF 33-664, without multipole refinement, cp. 81248. Remarks from ICSD/CSD: REM M Another crystal had z(Fe)=0.35522(1), x(O)=0.69395(10) Cancel: Data collection flag: Ambient.</p>						
<p>Maslen, E.N., Streltsov, V.A., Streltsova, N.R., Ishizawa, N., Acta Crystallogr., Sec. B: Structural Science, volume 50, page 435 (1994) Calculated from ICSD using POWD-12++</p>						
Radiation : CuK α 1		Filter : Not specified				
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings				
SS/FOM : F28=1000(0.0000,29)						

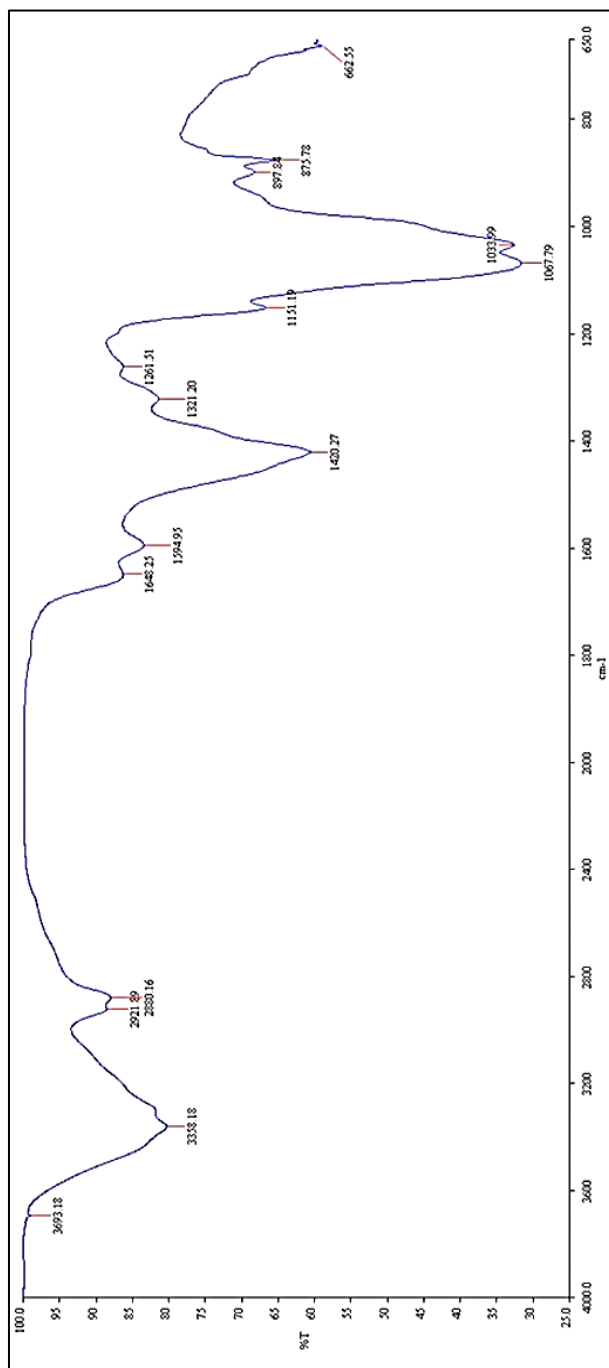
Pattern : 01-088-0315		Radiation = 1.540600		Quality : Alternate		
<p>Fe₃O₄</p> <p>Iron Oxide Magnetite, syn Also called: Iron diiron(III) oxide</p>		<p>2th</p> <p>18.333 103 30.158 296 35.522 999 37.158 79 43.173 204 47.271 5 53.563 84 57.100 279 62.704 359 65.932 9 66.989 1 71.142 27 74.188 68 75.193 30 79.171 22 82.119 4 86.989 27 89.899 97</p>	<p>i</p> <p>1 2 3 2 4 5 4 5 4 5 6 5 6 4 5 6 7</p>	<p>h</p> <p>1 2 1 2 0 3 4 1 4 3 2 5 4 5 4 5 6</p>	<p>k</p> <p>1 2 1 2 0 3 2 1 4 3 2 3 4 5 6 4 3</p>	<p>l</p> <p>1 0 1 2 0 1 2 1 0 1 2 0 3 2 4 1 2 1</p>
<p>Lattice : Face-centered cubic</p> <p>S.G. : Fd-3m (227)</p> <p>a = 8.37500</p>		<p>Mol. weight = 231.54</p> <p>Volume [CD] = 587.43</p> <p>Dx = 5.236</p> <p>Z = 8</p> <p>I/cor = 5.10</p>				
<p>ICSD collection code: 084811 Temperature factor: ATF Temperature of data collection: REM TEM 23 C. Remarks from ICSD/CSD: REM DEN. Additional pattern: See PDF 01-082-1533. Cancel: Data collection flag: Ambient.</p>						
<p>Sasaki, S., Acta Crystallogr., Sec. B: Structural Science, volume 53, page 762 (1997) Calculated from ICSD using POWD-12++</p>						
<p>Radiation : CuKα1</p> <p>Lambda : 1.54060</p> <p>SS/FOM : F18=1000(0.0000,18)</p>		<p>Filter : Not specified</p> <p>d-sp : Calculated spacings</p>				

ภาคผนวก ง
ผล FTIR

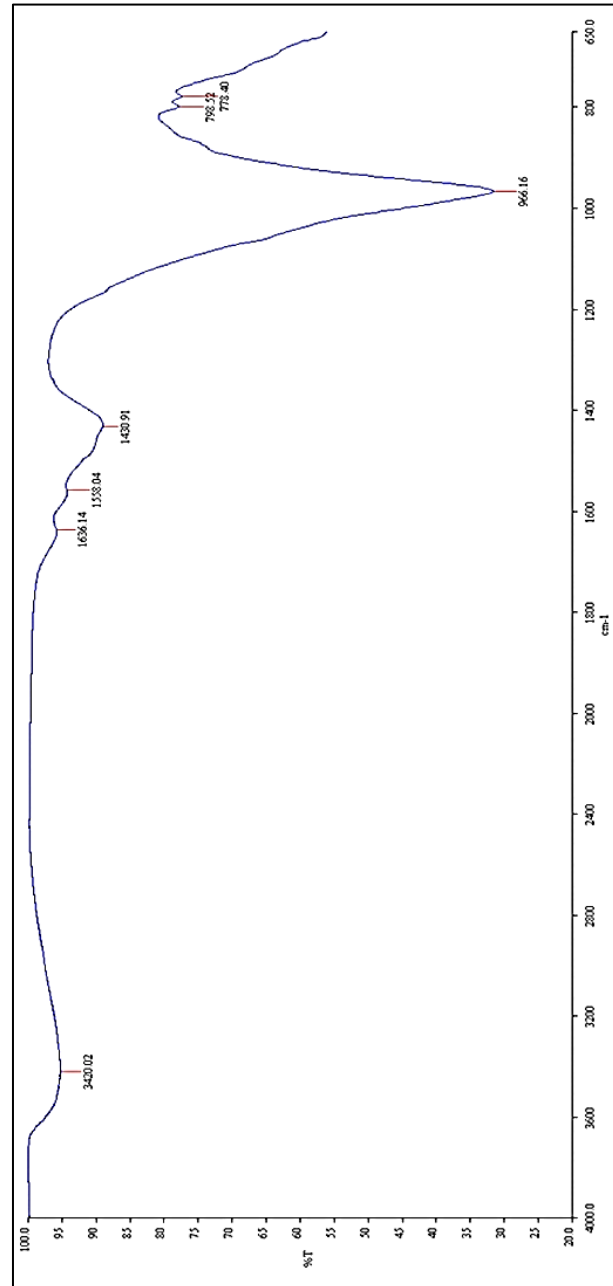
ง.1 ผล FTIR ของ ถ้ำลอย



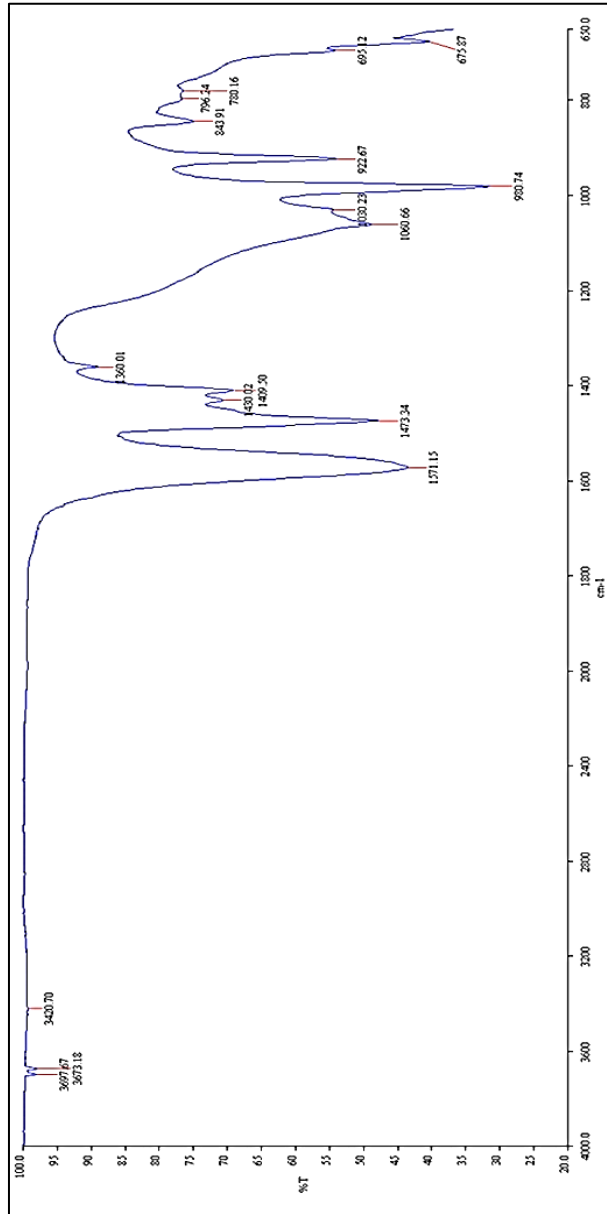
ง.2 ผล FTIR ของ Chitosan

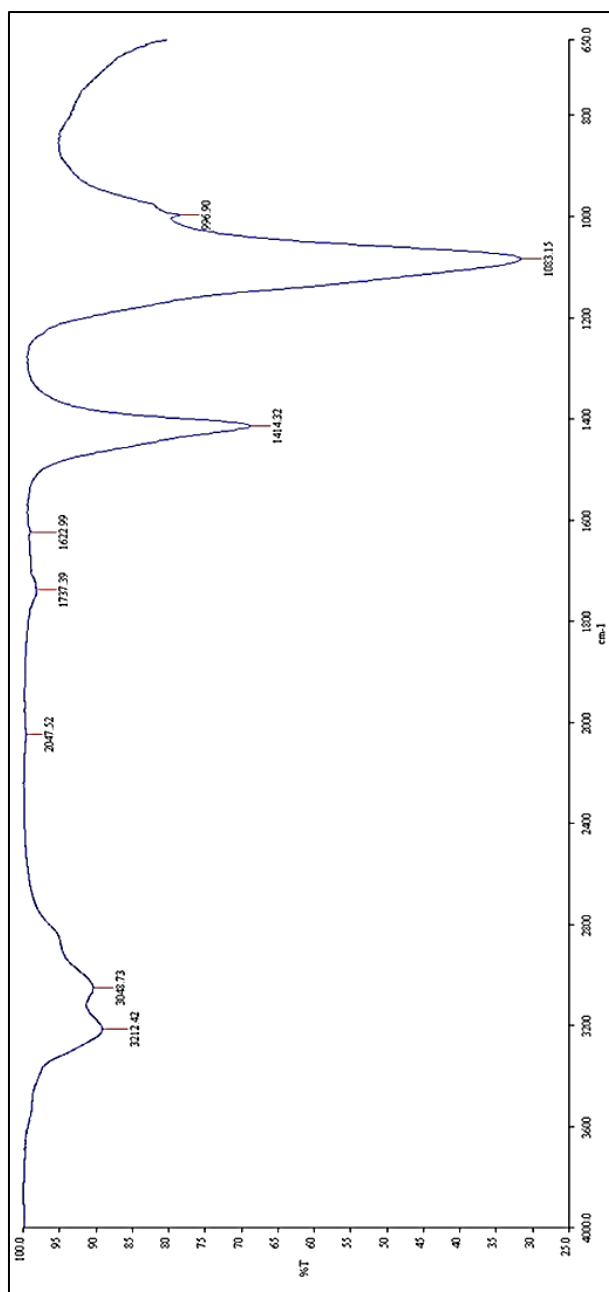


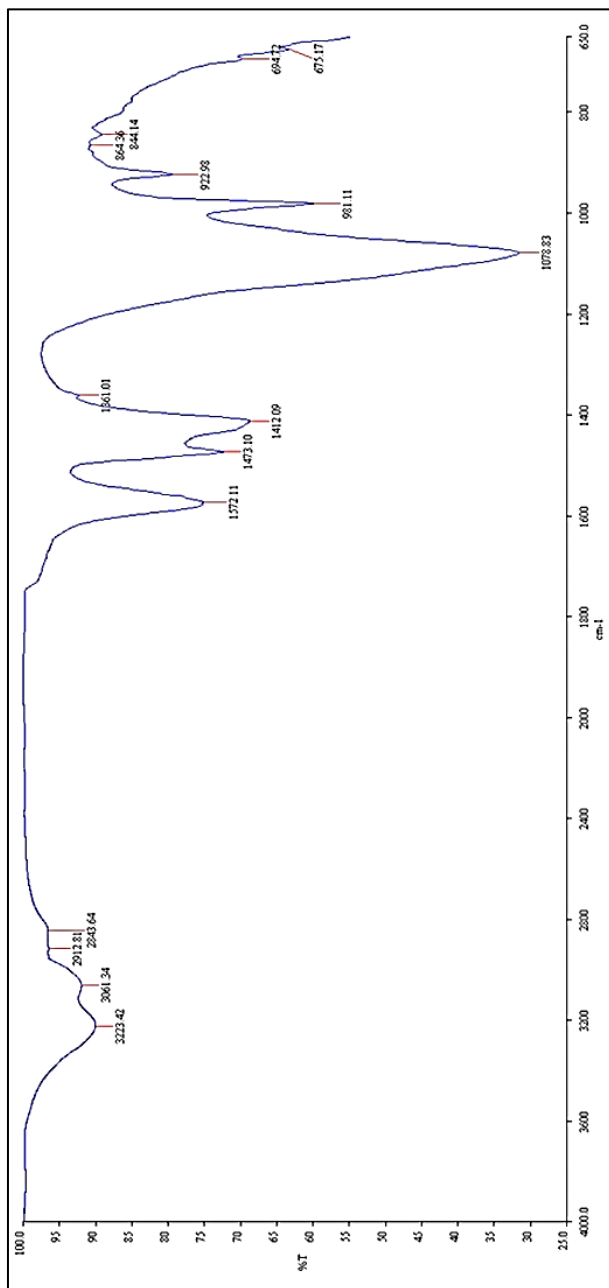
ง.3 ผล FTIR ของ Zeolite




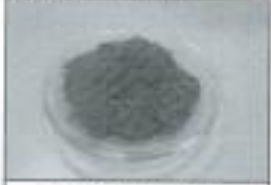
ง.4 ผล FTIR ของ Zeolite Chitosan



๓.5 ผล FTIR ของ Zeolite NH₄

๓.6 ผล FTIR ของ Zeolite Chitosan NH₄

จ.ผลการทดสอบของเสียอันตรายของถ้ำลอยถ่านหิน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม
เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ.2548

 WAX GARBAGE RECYCLE CENTER CO., LTD. 54/1 Moo 8 Rangbua, Chombung, Ratchaburi 70150 Tel : 0-3225-2898-8 Fax : 0-3225-2883-5 E-mail : waga.recycle@gmail.com Web site : www.waga.co.th						
TEST REPORT						Test Report No: W-LBM-004/18 Sample Code : 181043
Client Name	: บริษัท ไนโตรเจนซีเมนต์ จำกัด (มหาชน)				 Sample Photograph	
Address	: 257 ม. 3 อ.สูงเนิน อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30120					
Sample Name	: ฟ้าดี					
Sample Appearance	: 04 สีน้ำตาล					
Received Date	: 28 June 2018					
Testing Date	: 3 July 2018					
Issued Date	: 4 July 2018					
Test Results (TTEC)						
Parameter	Test Method ¹	Unit	LOD ²	LOQ ³	Results	Standard ⁴
Arsenic, As	Hydrid Generation Test-AAS	mg/kg	0.90	1.33	N.D. ⁵	500
Barium, Ba	Acid digest Test -AAS	mg/kg	1.00	4.40	222	10,000
Chromium, Cr	Acid digest Test -AAS	mg/kg	2.00	4.22	25.36	2,500
Copper, Cu	Acid digest Test -AAS	mg/kg	2.00	7.06	52.75	2,500
Cadmium, Cd	Acid digest Test -AAS	mg/kg	0.10	0.35	<0.35	100
Mercury, Hg	Cold Vapor Test -AAS	mg/kg	0.10	0.26	N.D. ⁵	20
Nickel, Ni	Acid digest Test -AAS	mg/kg	0.40	1.31	46.44	2,000
Lead, Pb	Acid digest Test -AAS	mg/kg	0.50	0.90	2.64	1,000
Zinc, Zn	Acid digest Test -AAS	mg/kg	1.00	4.46	78.76	5,000
pH value at 25 °C	Soil and waste pH by pH meter	-	-	-	11.4	2.0-12.5
Remark						
¹ Test Method	: United States Environmental Protection Agency, Test Method for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods, SW-846.					
² LOD	: Limit of detection					
³ LOQ	: Limit of Quantitation					
⁴ N.D.	: Not detected at the method detection level.					
⁵ Standard	: Refer to Notification of Ministry of Industry, Subject : Waste Disposal, 2548 B.E.					
The results shown in this test report refer only to the sample(s) tested unless otherwise stated. This test report can not be reproduced, except in full, without permission of company.						
						Page 1 of 2

 WAX GARBAGE RECYCLE CENTER CO., LTD. 54/1 Moo 8 Rangbua, Chombung, Ratchaburi 70150 Tel : 0-3226-2898-8 Fax : 0-3226-2893-5 E-mail : waxga.recycle@gmail.com Web site : www.waxga.co.th						
TEST REPORT						
Client Name : บริษัท ไรน์ทรีทเม้นท์ประเทศไทย จำกัด (มหาชน)	Test Report No: W-LB51-0843/18					
Address : 133 ซ. 3 อ.สุพรรณบุรี อ.สุพรรณบุรี อ.สุพรรณบุรี 33120	Sample Code : 181043					
Sample Name : ดิน						
Sample Appearance : ทรายปนดิน						
Received Date : 28 June 2018						
Testing Date : 3 July 2018						
Issued Date : 4 July 2018						
Test Results (STLC)						
Parameter	Test Method ¹	Unit	LOD ²	LOQ ³	Results	Standard ⁴
Arsenic, As	Hydriod Generation Test-AAS	mg/l	0.004	0.01	N.D. ⁵	5.0
Barium, Ba	Acid digest Test -AAS	mg/l	0.01	0.04	1.79	100
Chromium, Cr	Acid digest Test -AAS	mg/l	0.01	0.04	<0.04	5.0
Copper, Cu	Acid digest Test -AAS	mg/l	0.02	0.07	<0.07	25.0
Cadmium, Cd	Acid digest Test -AAS	mg/l	0.001	0.003	N.D. ⁵	1.0
Mercury, Hg	Cold Vapor Test -AAS	mg/l	0.001	0.003	N.D. ⁵	0.2
Nickel, Ni	Acid digest Test -AAS	mg/l	0.004	0.01	<0.01	20.0
Lead, Pb	Acid digest Test -AAS	mg/l	0.005	0.01	N.D. ⁵	5.0
Zinc, Zn	Acid digest Test -AAS	mg/l	0.01	0.04	0.63	250
Remark ¹ Test Method : United States Environmental Protection Agency, Test Method for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods, SW-846. ² LOD : Limit of detection ³ LOQ : Limit of Quantitation ⁴ N.D. : Not detected at the method detection level. ⁵ Standard : Refer to Notification of Ministry of Industry, Subject : Waste Disposal, 2548 B.E.						
===== END OF REPORT =====						
Tested by  (Mr. Nattawut Kamsamran) Chemist Register No. 2-530-0-0888		Approved by  (Mr. Siriphong Sudangam) Laboratory Supervisor Register No. 2-530-0-0897				
The results shown on this test report refer only to the sample(s) tested, unless otherwise stated. This test report can not be reproduced, except in full, without permission of company.						
						Page 2 of 2

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นาย ปธานิน แสงอรุณ
วัน เดือน ปี เกิด	27 กรกฎาคม 2527
สถานที่เกิด	อุดรธานี
วุฒิการศึกษา	ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีการศึกษา 2549 ปริญญาสาธารณสุขศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา อาชีวอนามัยและความ ปลอดภัย มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช ปีการศึกษา 2552 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2554 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี การศึกษา 2555
ที่อยู่ปัจจุบัน	40 ถนนราชวิถี แขวงบางยี่ขัน เขตบางพลัด กทม 10700
ผลงานตีพิมพ์	ปธานิน แสงอรุณ ิเรศ ศรีสถิตย์ และ พงษ์เสรีรัฐ ศรีพรหม. 2560.สภาวะที่ เหมาะสมในการเพิ่มค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของการ ปรับสภาพถ้ำลอยถ่านหิน โดยวิธีพ่นผิวตอสนอง. วารสารวิศวกรรม สิ่งแวดล้อมไทย (Thai Environmental Engineering Journal, TEEJ). 31(3)