



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรบัณฑิต)

ปริญญา

วิทยาศาสตรบัณฑิต

วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ด้วยแมงกานีสซีโอไลต์
ในรูปแบบจำลองคลองวนเวียน

Ammonia Nitrogen Removal from Mixed Swine and Chicken Farm Wastewater
Using Manganese Zeolite in the Oxidation Ditch Model

นามผู้วิจัย นายศัลป์ชัย มณีชาติย์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์สุภูมิ เจริญใจ, D.Agr.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์อัสริยา วุฒิสินธุ์, Ph.D.)

ประธานสาขาวิชา

(ศาสตราจารย์เกษม จันทร์แก้ว, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกู่, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่
ด้วยแมงกานีสซีโอไลต์ในแบบจำลองคลองวนเวียน

Ammonia Nitrogen Removal from Mixed Swine and Chicken Farm Wastewater
Using Manganese Zeolite in the Oxidation Ditch Model

โดย

นายศัลป์ชัย มณีชาติย์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม)
พ.ศ. 2552

ศิลป์ชัย มณีชัย 2552: การกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ด้วยเมกกานีสซีโอไลต์ในแบบจำลองคลองวนเวียน ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์สุชุม เจริญใจ, D.Agri. 98 หน้า

การศึกษาการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ด้วยเมกกานีสซีโอไลต์ในแบบจำลองคลองวนเวียนขนาด 34,633 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดำเนินการโดยทำการทดลองแบบเป็นขั้นตอนต่อเนื่อง มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถ และผลของปัจจัยผันแปร ได้แก่ อัตราการไหลน้ำเสีย ระยะเวลาการสัมผัสของเมกกานีสซีโอไลต์กับน้ำเสีย ขนาด และปริมาณของเมกกานีสซีโอไลต์ ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจน จากผลการศึกษาสรุปได้ว่า เมกกานีสซีโอไลต์สามารถกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ในแบบจำลองคลองวนเวียนได้เฉลี่ยร้อยละ 59 ด้วยเมกกานีสซีโอไลต์ขนาด 1.5- 5.0 มิลลิเมตร ปริมาณที่ใช้ 25,225 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อปริมาณน้ำเสีย 12 ลิตร ที่อัตราการไหล 20 ลิตรต่อชั่วโมง และมีระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างน้ำเสียกับซีโอไลต์ 120 นาที ค่าพีเอชน้ำเสียเท่ากับ 7.9 ที่อุณหภูมิห้อง และสามารถกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนได้เฉลี่ยร้อยละ 78 ด้วยเมกกานีสซีโอไลต์กำหนดขนาด 1.5 มิลลิเมตร ปริมาณที่ใช้ 25,225 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อปริมาณน้ำเสีย 12 ลิตร ที่อัตราการไหล 20 ลิตรต่อชั่วโมง และมีระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างน้ำเสียกับซีโอไลต์ 120 นาที ค่าพีเอชน้ำเสียเท่ากับ 8.6 ที่อุณหภูมิห้อง และเมกกานีสซีโอไลต์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว เมื่อนำมาฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 25 กรัมต่อลิตร สามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้อีก 2 ครั้ง โดยความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนของเมกกานีสซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพในครั้งที่ 1 สามารถให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนได้ดีกว่าเมกกานีสซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพในครั้งที่ 2 และจากการทดสอบไอโซเทอร์มในการดูดซับ พบว่า การดูดซับของเมกกานีสซีโอไลต์ในการศึกษานี้ สอดคล้องกับสมการฟรุนดลิช

Sinchai Maneeakat 2009: Ammonia Nitrogen Removal from Mixed Swine and Chicken Farm Wastewater Using Manganese Zeolite in the Oxidation Ditch Model. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, College of Environment. Thesis Advisor: Associate Professor Sukhoom Rowchai, D.Agri. 98 pages.

The study on ammonia nitrogen removal from mixed swine and chicken farm wastewater using manganese zeolite in the oxidation ditch model of 33,633 cubic centimeters was done as successive experiments to find out capacity and factors effecting on efficiency of ammonia nitrogen removal which were flow rates, touching times, size and quantities of manganese zeolite. The results shown that manganese zeolite could remove ammonia nitrogen by ion exchange and adsorption in the oxidation ditch model at efficiency rate of about 59 percents by manganese zeolite mixed size of 1.5 - 5.0 millimeters, at quantity of 25,225 cubic centimeters per 12 liters of mixed swine and chicken farm wastewater and at flow rate of 20 liters in 120 minutes touching time. The pH of experimented wastewater was 7.9 at room temperature. Manganese zeolite also could remove ammonia nitrogen at efficiency rate of about 78 percents by fixed size manganese zeolite of 1.5 millimeters, at quantity of 25,225 cubic centimeters per 12 liters of mixed swine and chicken farm wastewater and at flow rate of 20 liters in 120 minutes touching time. The pH of experimented wastewater was 8.6 at room temperature. The exhausted manganese zeolite that was regenerated with 25 grams NaCl per liter solution could be used again at 2 times. The first regenerated manganese zeolite could remove ammonia nitrogen at a better capacity than the second regenerated manganese zeolite. The isotherm tests indicated that adsorption of manganese zeolite of this study agreed with the Freundlich Isotherm.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดี ต้องขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สุชุม เจริญใจ ประธานกรรมการที่ปรึกษาที่ได้ให้ความเมตตา และกรุณาให้คำปรึกษา ให้ความรู้ คำแนะนำในการวางแผนงานวิจัย และการแก้ไขตรวจสอบข้อบกพร่องต่าง ๆ ตลอดจนความอนุเคราะห์ต่าง ๆ ที่ท่านมอบให้กับข้าพเจ้า จึงทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณอาจารย์อสิริยา วุฒิสินธุ์ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ และตรวจสอบแก้ไขรูปเล่ม และความเรียบร้อยสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอขอบคุณอาจารย์ปิยพงษ์ ทองดินนอก ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ข้อคิด และคำแนะนำในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร และเจ้าหน้าที่ฟาร์มสัตว์วิจัย หลวงสุวรรณวาลกิจ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย

ขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อการตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติ และระดับนานาชาติ ประจำปีงบประมาณ 2550 และ ขอขอบคุณวิทยาลัยสิ่งแวดล้อม และมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ได้ให้การสนับสนุนในการยกเว้นค่าธรรมเนียมในการศึกษา

สุดท้ายนี้ต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาที่คอยดูแลเป็นห่วงเป็นใย สนับสนุน และเป็นกำลังใจในการศึกษามาโดยตลอด ขอขอบคุณน้อง ๆ สิ่งแวดล้อมรุ่น 28 และรุ่น 29 หลาย ๆ คนที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจเสมอมา รวมทั้งขอบคุณคุณณรงค์ฤทธิ์ เมืองใหม่ และเพื่อนร่วมงานทุกคนที่ให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย และการจัดพิมพ์รูปเล่มเป็นอย่างดี

ศิลป์ชัย มณีขัติย์

พฤษภาคม 2552

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	43
อุปกรณ์	43
วิธีการ	44
ผลและวิจารณ์	56
สรุปและข้อเสนอแนะ	86
สรุป	86
ข้อเสนอแนะ	88
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	90
ภาคผนวก	96
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	98

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ปริมาณและลักษณะน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสุกร	5
2 คุณสมบัติของน้ำเสียจากบ่อบำบัดของฟาร์มสุกรในจังหวัดขอนแก่นเมื่อเทียบกับสุกร 1,000 ตัว	6
3 เปรียบเทียบอัตราการเกิดน้ำเสียและลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรขนาดเล็ก กลาง และใหญ่	7
4 Cation Exchange Propoties ของแร่ซีโอไลต์ที่สำคัญบางชนิดที่พบในดิน	18
5 ลักษณะที่พึงประสงค์ของซีโอไลต์	20
6 การใช้งานของซีโอไลต์ธรรมชาติ	21
7 ซีโอไลต์ที่ค้นพบในธรรมชาติ	29
8 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนด้วยเมงกานีสซีโอไลต์ คละขนาดในแบบจำลองคลองวนเวียน ที่อัตราการไหลของน้ำเสียในระดับต่าง ๆ	57
9 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนด้วยเมงกานีสซีโอไลต์คละขนาดในแบบจำลองคลองวนเวียน ที่ช่วงระยะเวลาการสัมผัสต่าง ๆ	59
10 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนด้วยเมงกานีสซีโอไลต์คละขนาดในปริมาณที่แตกต่างกันในแบบจำลองคลองวนเวียน	61
11 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนด้วยเมงกานีสซีโอไลต์กำหนดขนาด (1.5 มิลลิเมตร) ในแบบจำลองคลองวนเวียน ที่อัตราการไหลของน้ำเสียในระดับต่าง ๆ	64
12 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนด้วยเมงกานีสซีโอไลต์กำหนดขนาด (1.5 มิลลิเมตร)ในแบบจำลองคลองวนเวียน ที่ระยะเวลาการสัมผัสต่าง ๆ	66

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
13 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนด้วย แมงกานีสซีโอไลต์กำหนดขนาด (1.5 มิลลิเมตร) ในปริมาณที่แตกต่างกันใน แบบจำลองคลองวนเวียน	68
14 ผลการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนแบบต่อเนื่อง ครั้งที่ 1	72
15 ผลการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนแบบต่อเนื่องครั้งที่ 2 (ผ่านการ Regenerated ครั้งที่ 1)	74
16 ผลการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนแบบต่อเนื่องครั้งที่ 3 (ผ่านการ Regenerated ครั้งที่ 2)	75
17 ผลการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนแบบต่อเนื่องครั้งที่ 4 (ผ่านการ Regenerated ครั้งที่ 3)	77
18 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนที่เหลืออยู่ในสารพื้นสภาพ	82
 ตารางผนวกที่	
1 ค่ามาตรฐานแอมโมเนียไนโตรเจน	97

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1	การเปลี่ยนรูปต่าง ๆ ของไนโตรเจนในกระบวนการไนตริฟิเคชันและ ดีไนตริฟิเคชัน
2	ตัวอย่างโครงสร้างโมเลกุลซิลิโอส
3	โครงสร้างทรงสี่หน้าของ (ก) $[\text{SiO}_4]^{4-}$ (ข) $[\text{AlO}_4]^{5-}$ (ค) การเชื่อมต่อกันในผลึกซิลิโอส
4	กลไกการดูดซับของสารดูดซับ
5	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ
6	ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง
7	ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่องในชั้นตริง
8	ผังแบบจำลองคลองวนเวียน
9	แบบจำลองคลองวนเวียน ขนาด 33,663 ลบ.ชม. (Oxidation Ditch Model)
10	โรงเลี้ยงสุกร
11	โรงเลี้ยงไก่
12	บ่อเกรอะสำหรับพักน้ำเสีย
13	บ่อผึ่ง (Oxidation Pond)
14	ลักษณะน้ำเสียจากบ่อผึ่งฟาร์มสุกรและไก่
15	แมงกานีสซิลิโอสต์ขนาด (ขนาด 1.5 – 5.0 มิลลิเมตร)
16	แมงกานีสซิลิโอสต์กำหนดขนาด (ขนาด 1.5 มิลลิเมตร)
17	เครื่องวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Spectrophotometer Shimadzu UV-1700)
18	ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนด้วยแมงกานีสซิลิโอสต์ลักษณะขนาดที่อัตราการไหลของน้ำเสียในระดับต่าง ๆ
19	ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนด้วยแมงกานีสซิลิโอสต์ลักษณะขนาดในช่วงระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ
20	ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน ด้วยแมงกานีสซิลิโอสต์ลักษณะขนาด ในปริมาณต่าง ๆ

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนด้วยเมงกานีสซีโอไซด์ กำหนดขนาดในแบบจำลองคลองวนเวียนที่อัตราการไหลของน้ำเสียในระดับ ต่าง ๆ	65
22	ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนด้วยเมงกานีสซีโอไซด์ กำหนดขนาดที่ระยะเวลาการสัมผัสต่าง ๆ	67
23	ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนด้วยเมงกานีสซีโอไซด์ กำหนดขนาดในปริมาณที่แตกต่างกัน	69
24	เปรียบเทียบร้อยละการลดลงเฉลี่ยของแอมโมเนียไนโตรเจนจากการทดสอบ อัตราการไหลของเมงกานีสซีโอไซด์ชนิดลักษณะขนาดและชนิดกำหนดขนาดที่ อัตราการไหลต่าง ๆ	70
25	เปรียบเทียบร้อยละการลดลงเฉลี่ยของแอมโมเนียไนโตรเจนจากการทดสอบ ระยะเวลาในการสัมผัสของเมงกานีสซีโอไซด์ชนิดลักษณะขนาดและชนิด กำหนดขนาดที่ระยะเวลาการสัมผัสต่าง ๆ	70
26	เปรียบเทียบร้อยละการลดลงเฉลี่ยของแอมโมเนียไนโตรเจนจากการทดสอบ ปริมาณการใช้ของเมงกานีสซีโอไซด์ชนิดลักษณะขนาดและชนิดกำหนดขนาด ที่ปริมาณการใช้เมงกานีสซีโอไซด์ต่าง ๆ	71
27	ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนในแบบจำลองคลองวนเวียน แบบต่อเนื่อง และการฟื้นฟูสภาพเมงกานีสซีโอไซด์	81
28	Freundlich Adsorption Isoterm ของแอมโมเนียไนโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์ม สุกรและไก่	84
ภาพผนวกที่		
1	กราฟมาตรฐานแอมโมเนียไนโตรเจน	97

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ซม.	เซนติเมตร
มม.	มิลลิเมตร
มก./ล.	มิลลิกรัมต่อลิตร
ล./ชม.	ลิตรต่อชั่วโมง
ลบ.ซม.	ลูกบาศก์เซนติเมตร
cm ³	Cubic Centrimeter
nm	nanometer
ppm	part per million
BOD	BioChemical Oxygen Demand
COD	Chemical Oxygen Demand
NH ₃	unionize Ammonia
NH ₄ ⁺	Ammonium Ion
NO ₂ ⁻	Nitrite Ion
NO ₃ ⁻	Nitrate Ion
NH ₃ -N	แอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia nitrogen)
NH ₄ ⁺ -N	แอมโมเนียมไอออน (Ammonium nitrogen)
TKN	Total Kjedahl Nitrogen
TAN	Total Ammonia Nitrogen
gpm/ft ³	gram per minute/ cubic foot
meq/g	milli equivalent/ gram
regeneration	การฟื้นฟูสภาพ หรือ การทำให้ซีโอไลต์ที่หมดอำนาจ(เสื่อมสภาพชั่วคราว) กลับฟื้นตัวขึ้นมามีอำนาจในการดูดซับและแลกเปลี่ยนไอออนอีกครั้ง
regenerant	รีเจนเนอแรนต์ หรือ สารฟื้นฟูสภาพ หรือ สารเคมีที่ใช้เติมไอออนอิสระให้กับซีโอไลต์ที่เสื่อมสภาพ เช่น NaCl

การกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ ด้วยเมงกานีสซีโอไลต์ ในแบบจำลองคลองวนเวียน

Ammonia Nitrogen Removal from Mixed Swine and Chicken Farm Wastewater Using Manganese Zeolite in the Oxidation Ditch Model

คำนำ

น้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ และสิ่งมีชีวิต เนื่องจากเป็นองค์ประกอบสำคัญของเซลล์ มีความจำเป็นต่อหน้าที่ และการทำงานของสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ อันเป็นองค์ประกอบในระบบนิเวศ (กัณทริย์, 2547) จากการเพิ่มขึ้นของประชากรโลกทำให้มีการใช้น้ำ เพื่อการอุปโภคบริโภค และประกอบกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์มากขึ้น เมื่อน้ำผ่านการใช้แล้วคุณภาพของน้ำย่อมเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งน้ำที่ผ่านการใช้มาแล้วจากบ้านเรือน สถานประกอบการต่าง ๆ การเลี้ยงสัตว์ การเกษตร หรือ โรงงานอุตสาหกรรม มักมีสิ่งสกปรกต่าง ๆ ปนเปื้อนมาทั้งในรูปแบบของสารประกอบอินทรีย์ สารแขวนลอย เชื้อโรค และสารพิษต่าง ๆ ที่เป็นสาเหตุทำให้น้ำเน่าเสียเป็นปัญหาลี้ภัยสิ่งแวดล้อมที่สำคัญและเป็นที่น่าสนใจของประชากรโลก โดยนับวันจะยิ่งเป็นปัญหาที่ทวีความรุนแรงขึ้นทุกวัน

น้ำเสียจากฟาร์มสุกร และไก่ นั้น สารปนเปื้อนที่พบในน้ำเสียจากแหล่งนี้ส่วนใหญ่มักเป็นมูลสัตว์ และเศษอาหารจากการเลี้ยงสัตว์ ซึ่งประกอบไปด้วย สารอินทรีย์ที่วัดออกมาในรูปค่าบีโอดีสูง ซึ่งเป็นที่มาของสารประกอบพวกไนโตรเจนและเมื่อผ่านเข้าสู่วงจรของไนโตรเจน (nitrogen cycle) ทำให้เกิดสารแอมโมเนีย โดยแอมโมเนียในแหล่งน้ำจะมีอยู่ 2 รูปแบบ คือสารละลายแอมโมเนียมไอออน (ionized ammonia, NH_4^+) และแอมโมเนียอิสระ (un-ionized ammonia, NH_3) แอมโมเนียจะอยู่ในรูปแบบใด และแต่ละรูปแบบจะมีปริมาณมากหรือน้อยเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช (pH) อุณหภูมิ และปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ เป็นต้น โดยที่แอมโมเนียอิสระ (NH_3) นั้นจะมีความเป็นพิษมากกว่ารูปของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ถึง 50 เท่า (สุชาติ, 2546) ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ และย่อมส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้แอมโมเนียในแหล่งน้ำยังสามารถเปลี่ยนแปลงรูปเป็นไนเตรท (NO_3) ได้โดยกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งไนเตรทนี้เองเป็นสารอาหารที่สำคัญของพืกรสาหร่าย และแพลงก์ตอน ในแหล่งน้ำ ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ทำให้น้ำเน่าเสียได้ แสดงให้เห็นว่า

ถ้ามีการปล่อยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร และไก่โดยไม่ผ่านการกำจัดแอมโมเนียออกก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติย่อมสร้างปัญหาให้กับแหล่งน้ำ

การนำชีโอไลต์ธรรมชาติที่มีคุณสมบัติในการดูดซับ และแลกเปลี่ยนประจุโดยการผ่านแบบจำลองคลองวนเวียน มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของแอมโมเนียจากน้ำเสียฟาร์มสุกร และไก่ เป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งที่ดีในการกำจัดแอมโมเนียได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจากรายงานการวิจัยของ ทศนีย์ และคณะ (2540) ได้ศึกษาการใช้ชีโอไลต์เปรียบเทียบกับวัสดุอื่น ๆ ในระบบชั้นดินก่อกออิฐที่ใช้บำบัดน้ำเสียจากห้องสุขาบริเวณโรงอาหารกลางมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ผลการทดลองพบว่า การใช้ชีโอไลต์ธรรมชาติในระบบชั้นดินก่อกออิฐ เพื่อบำบัดน้ำเสียจากห้องสุขามีประสิทธิภาพในการลดค่าบีโอดี ซีโอดี ในโตรเจนทั้งหมด และ แอมโมเนียในโตรเจนได้ร้อยละ 94.7, 92.3, 99.3 และ 99.8 ตามลำดับ นอกจากนี้ชีโอไลต์ที่ผ่านการใช้งานจากระบบบำบัดแล้ว ยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยการรีเจนเนอเรชั่น (regeneration) ได้ จึงเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียได้ดีทางหนึ่ง

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ ด้วยเมกานีสซีโอไลต์ในแบบจำลองคลองวนเวียน
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนของเมกานีสซีโอไลต์ในแบบจำลองคลองวนเวียนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่
3. เพื่อให้ได้ข้อมูลการวิจัย สำหรับเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไปออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนแอมโมเนียไนโตรเจนจากระบบเกษตรกรรม

ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาความสามารถ และ ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ ด้วยเมกานีสซีโอไลต์ในแบบจำลองคลองวนเวียน โดยทำการศึกษาปริมาณแอมโมเนียทั้งหมดในรูปของไนโตรเจน และศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือ อัตราการไหลของน้ำเสีย ระยะเวลาการสัมผัสของน้ำเสียกับเมกานีสซีโอไลต์ ขนาด และปริมาณของเมกานีสซีโอไลต์ที่ใช้

การตรวจเอกสาร

1. น้ำเสีย (Wastewater)

น้ำเสีย หมายถึง ของเหลวหรือน้ำที่ผ่านการใช้มาแล้วจากบ้านเรือน การประกอบธุรกิจ การค้า การทำงานในสถานที่ต่าง ๆ การเกษตร หรือ โรงงานอุตสาหกรรม น้ำเสียมักมีสิ่งสกปรกต่าง ๆ ปนเปื้อนมาทั้งในรูปแบบของสารแขวนลอยหรือละลายในน้ำ ซึ่งความสกปรกหรือความไม่บริสุทธิ์นี้มีมากกว่าในแหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งลักษณะน้ำเสียจะเป็นเช่นไรนั้นขึ้นอยู่กับ ชนิด จำนวน และรูปแบบของเสียในน้ำเสียนั้น ๆ (พัฒนา, 2539) โดยสิ่งปนเปื้อนที่มากับน้ำเสีย จะมีคุณลักษณะแตกต่างกันไปตามแหล่งกำเนิดนั้น ๆ อาจมีสี กลิ่น น้ำมัน สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ สารแขวนลอย เชื้อโรค ตลอดจนสารพิษต่าง ๆ ในปริมาณที่แตกต่างกันออกไป (สมร, 2541)

1.1 น้ำเสียจากฟาร์มสุกรและไก่ (Mixed Swine and Chicken Farm Wastewater)

สมร (2541) ได้แบ่งประเภทของน้ำเสียไว้ว่าน้ำเสียที่เกิดจากการเลี้ยงสัตว์ เป็นน้ำเสียจากการเกษตรกรรม น้ำเสียจากฟาร์มสุกร และฟาร์มไก่นั้น สารปนเปื้อนที่พบในน้ำเสียจากแหล่งนี้มักเป็นมูลสัตว์ และเศษอาหารจากการเลี้ยงสัตว์ ซึ่งประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ที่วัดออกมาในรูปค่าบีโอดีสูง และสารกลุ่มไนโตรเจน ไนเตรต แอมโมเนีย หรือ แอมโมเนียมไอออน ซึ่งถ้าไม่มีการบำบัดสารเหล่านี้ก่อนที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติจะทำให้เกิดการเจริญเติบโตของสาหร่ายหรือพืชน้ำในแหล่งน้ำเหล่านั้นจะเกิดผลกระทบต่อเนื้อคือทำให้เกิดน้ำเน่าเสียได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในหน้าแล้งที่มีน้ำน้อยในแหล่งน้ำ ซึ่งทำให้กระบวนการทำให้บริสุทธิ์ด้วยตนเองของแหล่งน้ำ (Self Purify) เป็นไปได้ยาก

1.2 ลักษณะน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

น้ำเสียส่วนใหญ่ที่ได้จากฟาร์มสุกรเป็นน้ำที่เกิดจากการล้างคอกสัตว์ และตัวสัตว์เอง ซึ่งมีมูลสัตว์เป็นตัวสำคัญที่ทำให้น้ำเสียรวมอยู่ด้วย นอกจากนี้อาจมีสารอาหารหรือเศษวัสดุรองพื้นคอกสัตว์รวมทั้งปัสสาวะของสัตว์เอง ของเสียจากฟาร์มสุกรประเภทอุจจาระ และปัสสาวะที่สุกรขับถ่ายออกมาในแต่ละวัน โดยปกติ จะแปรผันไปตามอายุ เพศ ขนาด น้ำหนัก ชนิด และปริมาณอาหารที่สุกรกิน ปริมาณน้ำที่ได้รับและอื่น ๆ สำหรับปริมาณ และลักษณะสมบัติของน้ำเสียจะ

ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ วิธีการทำความสะอาดพื้นคอกประเภทของสุกรที่เลี้ยง การจัดการฟาร์ม เช่น ถ้ามีการเก็บกวาดมูลสุกรออกจากพื้นคอกก่อนใช้น้ำฉีดล้างความสกปรกของน้ำเสียจะต่ำกว่าการใช้น้ำฉีดล้างพื้นคอกโดยไม่มีการเก็บกวาดมูลก่อน หรือหากเป็นโรงเรือน พ่อ-แม่พันธุ์ก็จะเน้นการทำความสะอาดมากกว่าสุกรขุนทำให้มีการใช้น้ำมากกว่า นอกจากนี้ปริมาณน้ำที่ใช้ทำความสะอาดยังขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้น้ำ และลักษณะการทำความสะอาดของเจ้าของฟาร์ม รวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้ฉีดล้างคอก โดยทั่วไปฟาร์มสุกรจะมีการล้างคอกวันละ 1 ครั้ง ในช่วงระยะเวลาที่ผ่านมามีผลการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับปริมาณและลักษณะของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรดังนี้

ตารางที่ 1 ปริมาณและลักษณะน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสุกร

พารามิเตอร์	หน่วย	ฟาร์มสุกรแห่งที่1 ในจังหวัดนครปฐม (สุชาติ,2531)	ฟาร์มสุกรแห่งที่2 ในจังหวัดนครปฐม (สุชาติ,2531)	ของเสียที่เป็น ของเหลว ของสุกร (พงศธร,2535)	น้ำเสียที่ผ่าน บ่อหมักไว้ อากาศ (ชลทิศ,2538)
pH	-	6.7	7.28	-	7.70
COD	มก./ ล.	9,114	7,657	4,907	2,310
BOD	มก./ ล.	3,090	2,940	3,600	1,260
Settleable solids	มก./ ล.	97	56.4	-	-
SS	มก./ ล.	6,314	5,765	-	880
TS	มก./ ล.	8,006	7,519	-	3,700
TVS	มก./ ล.	5,605	4,006	-	-
TKN	มก./ ล.	308.4	323.4	554	1,775
PO ₄ -P	มก./ ล.	1.13	3.39	-	75
ปรอท	มก./ ล.	0.00254	0.00208	-	-
ปริมาณน้ำใช้ และน้ำทิ้ง	ล./ ตัว/ วัน	38.4	30	-	-

ที่มา: วิทยา (2544)

ในปี 2536 สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ได้ศึกษาปริมาณน้ำที่ใช้ล้างคอก พบว่า โดยทั่วไปในฟาร์มสุกรจะมีการล้างคอกวันละ 1 ครั้ง ๆ ละ 1-2 ชั่วโมง ปริมาณน้ำที่ใช้ล้างคอกประมาณวันละ 20- 40 ลิตรต่อสุกร 1 ตัว และพบว่าให้กำเนิดของเสียในรูปสาร

อินทรีย์วันละเท่ากับ 100- 136 กรัมบีโอดี เทียบเท่าของเสียจากคน 2-3 คน (ในแต่ละวันของเสียจากคนเท่ากับ 40-50 กรัมบีโอดี) โปรตีนมีความเข้มข้น 0.0023 มิลลิกรัม/ ลิตร (0.033 มิลลิกรัม/ ตัว/ วัน) และปริมาณสารเคมีกำจัดศัตรูพืชเท่ากับ 0.0002 มิลลิกรัม/ ลิตร (0.0064 มิลลิกรัม/ ตัว/ วัน) เมื่อระบายน้ำเสียนี้ออกจะมีผลกระทบต่อคุณภาพน้ำในแม่น้ำลำคลองได้ และสถานีวิจัยและศูนย์ฝึกอบรมการเกษตรแม่เหียะ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ได้ศึกษาปริมาณ และลักษณะสมบัติของน้ำล้างคอกในขณะที่มีจำนวนสุกร 400- 700 ตัว พบว่าเวลาที่ใช้ล้างคอก วันละประมาณ 3 ชั่วโมง ปริมาณน้ำที่ใช้ในการล้างคอกโดยเฉลี่ยประมาณวันละ 12 ลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็นประมาณ 17- 30 ลิตรต่อสุกร 1 ตัว และน้ำเสียมีค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีประมาณ 3,000- 5,000 มิลลิกรัม/ ลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2542)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของน้ำเสียจากบ่อบำบัดของฟาร์มสุกรในจังหวัดขอนแก่นเมื่อเทียบกับสุกร 1,000 ตัว

ค่าพารามิเตอร์	ฟาร์มสุกรแม่พันธุ์		ฟาร์มสุกรขุน		ฟาร์มสุกรแม่พันธุ์		ฟาร์มสุกรแม่พันธุ์	
	น้ำเสีย	น้ำเสียจากบ่อบำบัด	น้ำเสีย	น้ำเสียจากบ่อบำบัด	น้ำเสีย	น้ำเสียจากบ่อบำบัด	น้ำเสีย	น้ำเสียจากบ่อบำบัด
PO ₄ ³⁻ (มก./ล.)	340	88	364	82	86	106	295	166
pH	8.19	7.50	8.62	8.41	7.89	8.09	8.34	8.29
BOD (มก./ล.)	3,342	612	3,513	1,171	2,546	1,823	5,302	1,875
SS (มก./ล.)	7,313	466	15,985	1,636	11,239	12,271	15,302	6,681
TKN(มก./ล.)	1,000	886	1,249	937	1,021	1,028	3,328	2,052
NH ₄ -N (มก./ล.)	600	771	1,187	906	963	983	1,376	1,371
COD (มก./ล.)	6,980	1,592	18,844	3,388	8,037	5,651	18,207	8,497

ที่มา : ชลทิศ และวีระมนต์ (2538)

จากการศึกษาของกรมควบคุมมลพิษเพื่อจัดทำร่างการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร โดยการเปรียบเทียบอัตราการเกิดน้ำเสียเฉลี่ยต่อตัวสุกรของฟาร์มสุกรขนาดต่าง ๆ พบว่าฟาร์มสุกรขนาดเล็กจะทำให้เกิดน้ำเสียในอัตราสูงกว่าฟาร์มขนาดกลาง และขนาดใหญ่ กล่าวคือฟาร์มสุกรขนาดเล็กจะใช้น้ำประมาณ 20 ลิตร ต่อตัว ส่วนฟาร์มขนาดกลาง และ ขนาดใหญ่ จะใช้น้ำประมาณ 15 และ 10 ลิตรต่อตัว ตามลำดับ จากการสำรวจน้ำเสียจากฟาร์มสุกรขนาดใหญ่จะมีค่าความสกปรกอยู่ในรูป บีโอดีสูงกว่าน้ำเสียจากฟาร์มสุกรขนาดกลาง และขนาดเล็ก โดยมีค่าความ

สกปรกโดยเฉลี่ยประมาณ 3,000, 2,500 และ 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ สำหรับผลการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของน้ำเสียสำหรับฟาร์มสุกรทั้ง 3 ขนาด ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบอัตราการเกิดน้ำเสียและลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรขนาดเล็ก กลาง และใหญ่

ขนาดฟาร์ม สุกร	อัตราการเกิด น้ำเสีย (ลิตร/ ตัว)	ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย (มิลลิกรัม/ ลิตร)			
		บีโอดี	ซีโอดี	ของแข็ง	ทีเคเอ็น
ขนาดใหญ่	10	3,000	7,000	4,800	540
ขนาดกลาง	15	2,500	6,800	3,000	540
ขนาดเล็ก	20	1,500	4,000	2,000	400

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ (2542)

ขณะนี้ฟาร์มสุกรทั้งหมดประมาณมากกว่าร้อยละ 85 ไม่มีการบำบัดน้ำเสีย หรือมีแต่บ่อกักน้ำเสีย หรือเมื่อมีระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นระบบบ่อบำบัด หรือระบบ ไบโอะแก๊ส จะประสบปัญหา 2 ประการ คือ น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วแต่ยังมีความสกปรกสูงมาก และมีปัญหากลิ่นเหม็นจากการเกิดการบำบัดแบบไร้อากาศ (Anaerobic Process) ปัญหาดังกล่าวนี้นั้นส่วนหนึ่งเกิดจากการใช้เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียที่ไม่เหมาะสมกับลักษณะสมบัติของน้ำเสีย ส่วนหนึ่งเกิดจากการขาดการดูแลรักษาระบบ หรือการเดินระบบบำบัดน้ำเสียที่ไม่ถูกต้อง น้ำทิ้งที่บำบัดแล้วฟาร์มบางแห่งจะนำกลับมาใช้ในฟาร์มอีก เช่น ล้างพื้นคอก รดน้ำต้นไม้ ที่เหลือจะระบายออกนอกพื้นที่เลี้ยง

1.3 ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากของเสียจากฟาร์มสุกร

1.3.1 ปัญหาต่อคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติ

น้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยทั่วไป มีค่าความสกปรกสูงมาก เมื่อเทียบกับน้ำเสียจากแหล่งกำเนิดน้ำเสียประเภทอื่น ดังนั้นจึงมีโอกาสทำให้แม่น้ำลำคลอง หรือแหล่งน้ำเกิดการเน่าเสียได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แหล่งน้ำที่มีความสามารถในการรองรับน้ำเสียต่ำ เช่น คูคลองที่มีขนาด

เล็ก หรือแหล่งน้ำขนาดใหญ่ แต่ต้องรองรับน้ำเสียจากฟาร์มสุกรเป็นปริมาณมาก เช่น ปัญหา น้ำเน่าเสียของแม่น้ำท่าจีน หรือแม่น้ำบางปะกง เป็นต้น

1.3.2 ปัญหากลิ่นเหม็น

ส่วนใหญ่เกิดจากสารอาหารที่ตกค้างในมูลสุกรที่ไม่สามารถย่อยได้ หรือย่อยไม่หมด เป็นเหตุให้เกิดการหมักหมมของจุลินทรีย์ และสารอาหารจะถูกย่อยสลายได้ก๊าซที่ส่งกลิ่นเหม็นโดยมีความชื้น และอุณหภูมิเป็นปัจจัยเสริมให้เกิดการเร่งในการหมัก ทำให้เกิดปัญหากลิ่นเหม็นรบกวนต่อผู้อยู่อาศัยข้างเคียง การเลี้ยงสุกรจึงมักถูกต่อต้านจากประชาชนที่อยู่รอบข้าง

1.3.3 ปัญหาการเกิดโรค

น้ำเสียจากฟาร์มสุกรจะเป็นแหล่งแพร่กระจายของเชื้อโรคต่าง ๆ ที่อาจมาติดคนหรือสัตว์เลี้ยงอื่น ๆ เช่น โรคระบาดทางเดินอาหาร พยาธิบางชนิด และพาหะนำโรค เช่น แมลงวัน แมลงหวี่ และยุง เป็นต้น

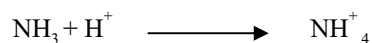
ซึ่งในปัจจุบันมีจำนวนฟาร์มสุกรทั้งหมดของประเทศ จำนวน 7,288 ฟาร์ม เมื่อทำการจำแนกตามขนาดของฟาร์มที่กำหนด กล่าวได้ว่า ฟาร์มขนาดเล็กจะมีสัดส่วนมากที่สุด ประมาณร้อยละ 86 ส่วนฟาร์มขนาดกลาง และขนาดใหญ่จะมีสัดส่วนของสุกรมากที่สุด คือ ร้อยละ 43 ส่วนฟาร์มขนาดกลาง และขนาดเล็ก มีสัดส่วนของสุกรเท่ากับร้อยละ 39 และ 18 ตามลำดับ

2. แอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia Nitrogen)

สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน เช่น โปรตีน สิ่งขับถ่ายจากมนุษย์และสัตว์ จากน้ำทิ้งจากอาคารบ้านเรือน แหล่งชุมชน ภาคเกษตรกรรม การปศุสัตว์ และ อุตสาหกรรมบางชนิด จะสามารถเปลี่ยนรูปไปเป็น แอมโมเนีย และแอมโมเนียมไอออนได้

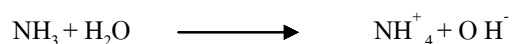
สารประกอบไนโตรเจนในบรรยากาศ สามารถแปรสภาพเป็นสารประกอบไนเตรท ไนไตรท์ และแอมโมเนีย สามารถเกิดขึ้นได้ตามแหล่งน้ำทั่วไป จะรวมกลุ่มเป็นโปรตีนในพืช และสัตว์ (อุษา และคณะ, 2543)

จากกระบวนการ ammonification สารประกอบโปรตีนจะถูกจุลินทรีย์ย่อยสลาย (Microbial Activity) เป็นแอมโมเนีย แอมโมเนียในแหล่งน้ำสามารถรวมตัวกับไฮโดรเจนไอออนได้ดังนี้



กระบวนการ ammonification สามารถเกิดได้ทั้งสภาวะที่ใช้แก๊สออกซิเจน (aerobic conditions) หรือสภาวะที่ไม่ใช้แก๊สออกซิเจน (anaerobic conditions)

สารละลายแอมโมเนีย ($\text{NH}_3\text{-N}$) จะแตกตัวเป็น 2 รูป คือ Un-ionized (NH_3) และ Ionized (NH_4^+) ดังสมการ



รูป un-ionized ammonia (NH_3) จะเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ ส่วนรูป ionized ammonia จะไม่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ ปริมาณของ un-ionized ammonia (NH_3) จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อ pH เพิ่มขึ้น ค่าของแอมโมเนียที่มีในแหล่งน้ำโดยไม่มีพิษแก่สัตว์น้ำ ไม่ควรเกิน 0.02 mg/L ในรูปของ un-ionized ammonia (EPA, 1972) และตามปกติในแหล่งน้ำทั่วไปจะมีแอมโมเนียประมาณ 0.001- 0.009 mg/L ในรูป Total ammonia ($\text{NH}_3\text{-N}$) (อุษา และคณะ, 2543)

2.1 การกำจัดไนโตรเจน

ธาตุไนโตรเจนเป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพวก Protista และพืชทั่วไป ธาตุไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารหลักที่สำคัญที่สุดธาตุหนึ่งต่อการเจริญเติบโตของพวกจุลินทรีย์ต่าง ๆ แต่ถ้ามีไนโตรเจนมากเกินไปในแม่น้ำลำคลองหรือบ่อน้ำทั่วไป ก็จะทำให้เกิดปัญหาขึ้นคือ จะมีการเติบโตของสาหร่ายมาก (Algal Bloom) ในแม่น้ำลำคลองนั้น ๆ ได้ จึงจำเป็นต้องควบคุมปริมาณของไนโตรเจนในน้ำให้เหมาะสม ดังนั้นถ้ามีความเข้มข้นของสารไนโตรเจนมากในบ่อน้ำใช้ทั่วไปตามชนบทแสดงว่าอาจมีสิ่งปนเปื้อนจากอุจจาระหรือปัสสาวะไหลลงในบ่อน้ำนี้

ไนโตรเจนที่อยู่ในธรรมชาติจะอยู่ในรูปร่างต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ (สงกรานต์, 2545)

- 1) ไนโตรเจน (N_2)
- 2) NH_3 , NH_4^+ และ NO_3^-
- 3) สารอินทรีย์ไนโตรเจน (Organic Nitrogen)
 - 3.1) สารที่สามารถละลายน้ำได้ (Amino Acids, Urea ฯลฯ)
 - 3.2) พวกแบคทีเรีย, Phytoplankton และ Zooplankton

สำหรับกระบวนการเปลี่ยนแปลงรูปไนโตรเจนได้เกิดขึ้นในธรรมชาติและโดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพ

$$TKN = (NH_3-N) + (\text{ไนโตรเจน})$$

$$TN = \text{ค่าของไนโตรเจนทั้งหมด} = TKN + (NO_2^-N) + (NO_3^-N)$$

การบำบัดไนโตรเจนออกจากน้ำเสีย สามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการทางชีววิทยาหรือ ฟิสิกส์เคมี เนื่องจากไนโตรเจนในน้ำเสียจะอยู่ในรูปของแอมโมเนีย หรืออินทรีย์ไนโตรเจน ทั้งรูปของสารละลาย และอนุภาค (Metcalf & Eddy, 1991) ซึ่งการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยกระบวนการทางชีววิทยามีข้อได้เปรียบในเชิงเศรษฐศาสตร์ ไนโตรเจนทั้งหมดจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจนโดยผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) (สุชาติ, 2538)

ในการกำจัดไนโตรเจน สารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในน้ำเสียทั้ง 4 ชนิดคือ แอมโมเนียไนโตรเจน (NH_3-N), ไนเตรทไนโตรเจน (NO_3-N), ไนไตรท์ไนโตรเจน (NO_2-N) และสารอินทรีย์ไนโตรเจน (Organic Nitrogen) ไนโตรเจนรูปแบบต่าง ๆ เหล่านี้มีอินทรีย์ไนโตรเจนที่ถูกรีดิวซ์มากที่สุดโดยอาศัยปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) ทำให้เปลี่ยนรูปไปเป็นแอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งแอมโมเนียไนโตรเจนที่เกิดขึ้นนี้มักถูกกำจัดโดยใช้กลไกทางชีววิทยา 2 ทางคือ กลไก Assimilation หมายถึง การที่แบคทีเรียใช้แอมโมเนียไนโตรเจน (NH_3-N) ในการสร้างเซลล์ และกลไกที่สองคือปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) (สงกรานต์, 2545)

1) กลไกการดูดซึมไนโตรเจน (Assimilation) เป็นปฏิกิริยาการกำจัดสารแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเสียโดยอาศัยกลไกการดูดซึมเอาไนโตรเจนในน้ำเข้าสู่เซลล์จุลินทรีย์ ซึ่งไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบของจุลินทรีย์ประมาณ 12.5% ของน้ำหนักแห้ง ดังนั้นของแข็งระเหยง่าย (Volatile Solid) ที่เกิดขึ้นและถูกกำจัดออกจากน้ำเสียในรูปของสลัดจ์ส่วนเกิน (Excess Sludge) จะมีไนโตรเจนประกอบอยู่ประมาณ 12.5 % ซึ่งปริมาณของไนโตรเจนที่ถูกกำจัดออกโดยกลไกนี้ จะถูกจำกัดโดยการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

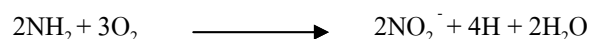
2) ไนตริฟิเคชัน (Nitrification) แบคทีเรียพวก Nitrosomonas และ Nitrobacter จะมีส่วนสำคัญในกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ซึ่งจุลินทรีย์ทั้ง 2 ชนิดนี้จะจัดอยู่ในพวก Autotrophic Bacteria เป็นแบคทีเรียที่อาศัยพลังงานในการเจริญเติบโตจากกระบวนการออกซิเดชัน (oxidation) ของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนรวมทั้งสารอินทรีย์อื่น ๆ ลักษณะที่เด่นชัดของจุลินทรีย์กลุ่มนี้คือ จะใช้สารอินทรีย์คาร์บอน (คาร์บอนไดออกไซด์) ในการสังเคราะห์สารอินทรีย์ด้วย โดยแบคทีเรียแต่ละชนิดจะมีข้อจำกัดในการออกซิไดส์สารประกอบไนโตรเจนไม่เหมือนกัน ดังนี้คือ

Nitrosomonas จะออกซิไดส์แอมโมเนียให้กลายเป็นไนไตรท์ แต่จะไม่สามารถออกซิไดส์ต่อไปเป็นไนเตรทได้อีก

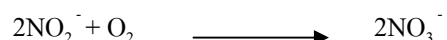
Nitrobacter จะออกซิไดส์ไนไตรท์ได้เป็นไนเตรทเท่านั้น

ดังนั้นกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) จะเกิดได้สมบูรณ์เมื่อมีการทำงานของแบคทีเรียทั้งสองชนิดร่วมกันเป็นลำดับ ตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ดังนี้

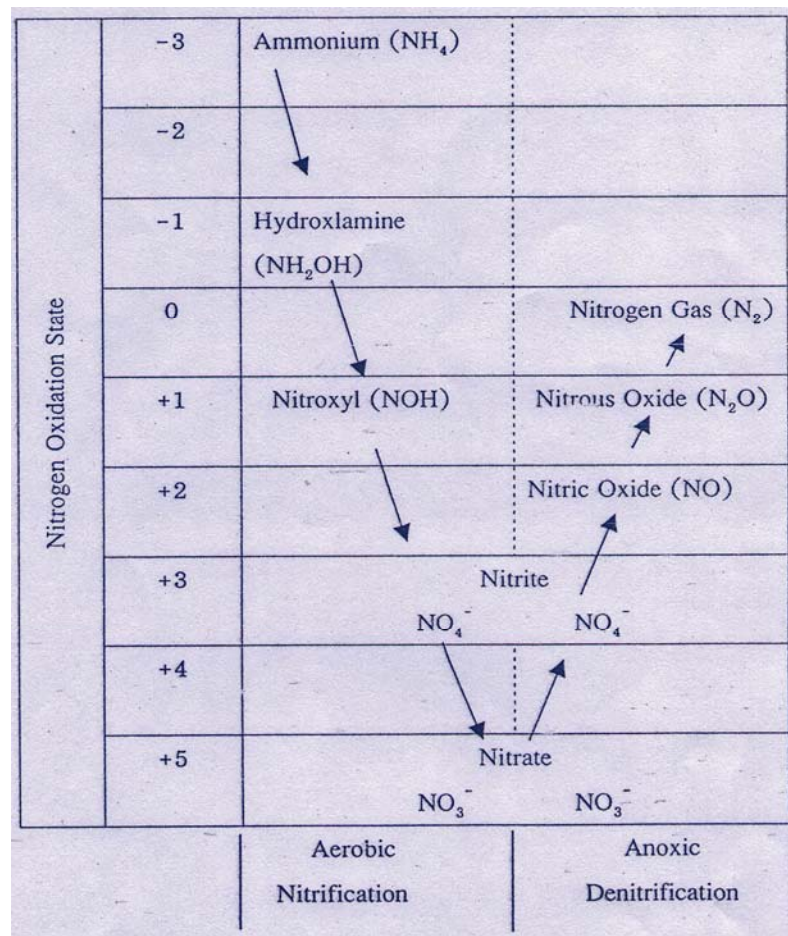
ออกซิเดชันของแอมโมเนียไปเป็นไนไตรท์ โดยแบคทีเรีย Nitrosomonas



ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไนไตรท์ไปเป็นไนเตรท โดยแบคทีเรียพวก Nitrobacter



3) ดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) เกิดเนื่องจากแบคทีเรียพวก *Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Archromobacter* และ *Bacillus* โดยแบคทีเรียเหล่านี้จะใช้ออกซิเจนในสารประกอบไนเตรท และไนไตรท์ในการหายใจภายใต้สภาวะแอนออกซิก (Anoxic Condition) ซึ่งมีไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Electro Acceptor) และแหล่งคาร์บอน (เมทธานอล, กลูโคส หรือสารอินทรีย์อื่น ๆ) เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron Donor) โดยดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) จะประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ขั้นที่ 1 ไนเตรทจะถูกรีดิวซ์ได้เป็นไนไตรท์ และขั้นที่ 2 ไนไตรท์จะเปลี่ยนไปเป็นก๊าซไนโตรเจน กระบวนการทั้งสองขั้นตอนอาจเรียกรวมกันว่า “Dissimilation” การเปลี่ยนรูปต่างๆ ของไนโตรเจนในกระบวนการไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การเปลี่ยนรูปต่างๆ ของไนโตรเจนในกระบวนการไนตริฟิเคชันและ ดีไนตริฟิเคชัน

ที่มา : Porntaveewat (1986)

2.2 ความเป็นพิษของแอมโมเนีย

2.2.1 ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ

1) ความเป็นพิษเฉียบพลัน (acute toxicity) จะเป็นผลให้ปลาตายทันที ซึ่งปลาต่างชนิดกันจะมีความทนทานต่อความเป็นพิษของแอมโมเนียได้ต่างกัน โดยพบว่าในปลา *Ictalurus punctatus* จะมีความเป็นพิษของความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ทำให้ปลาตาย 50 เปอร์เซ็นต์ (LC_{50}) ในระยะเวลา 96 ชั่วโมง เท่ากับ 3.8 มก./ล. ส่วนปลา *Clarias batrachus* จะมีความเป็นพิษของความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ทำให้ปลาตาย 50 เปอร์เซ็นต์ (LC_{50}) ในระยะเวลา 48 ชั่วโมง เท่ากับ 3.5 มก./ล. เป็นต้น (ธีรพงศ์, 2528)

2) ความเป็นพิษในระดับที่ไม่ทำให้ปลาตาย (Sublethal Toxicity) แอมโมเนียในระดับความเข้มข้นต่ำ ๆ แม้จะไม่ทำให้ปลาตายแต่ก็มีผลกระทบต่อกระบวนการต่าง ๆ อันจะทำให้เกิดการยับยั้งการเจริญเติบโต ปลาไม่สามารถขับถ่ายแอมโมเนียออกจากกระแสเลือดได้เป็นผลเสียต่อปฏิกิริยาชีวเคมีต่าง ๆ ทำให้ความต้องการออกซิเจนเพิ่มขึ้น เป็นอันตรายต่อเหงือก และลดความสามารถของเลือดในการขนถ่ายออกซิเจน ปลาจะอ่อนแอและเป็นโรคร่าย (มันสิน และไพพรรณ, 2539) ความทนทานของสัตว์น้ำต่อแอมโมเนียจะแตกต่างกันตามชนิด ความสามารถทางสรีระของสัตว์ และปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม พบว่าสถานะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และค่าพีเอช เท่ากับ 7 ความเข้มข้นของแอมโมเนียทั้งหมดที่มีปริมาณเกิน 4.4 มก./ล. จะก่อให้เกิดอันตรายต่อการเจริญเติบโตของปลาได้ (มันสิน และไพพรรณ, 2539) ซึ่งความเข้มข้นเพียงประมาณ 0.025 มก./ล. ก็สามารถส่งผลต่อการเจริญเติบโตของปลาได้

ในแหล่งน้ำถึงแม้ว่าจะมีความเข้มข้นของแอมโมเนียต่ำ แต่สามารถทำให้เกิดอันตรายต่อสัตว์น้ำได้ รวมทั้งก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น อัตราการเจริญเติบโต ปริมาณออกซิเจน และการเกิดโรคต่าง ๆ ต่อสัตว์น้ำ (Aiyuk. และคณะ, 2004)

2.2.2 ความเป็นพิษต่อสุขภาพมนุษย์

1) พิษแบบเฉียบพลัน (โศรดา, 2544)

ก) กรณีหายใจเข้าไปโดยตรงที่ระดับความเข้มข้น 5,000- 10,000 ส่วนต่ออากาศ 1 ล้านหรืออัตราผสมกับอากาศ 0.5- 1% จะทำให้เกิดอาการหายใจขัด อาจทำให้เสียชีวิตได้ทันที

ข) กรณีกระเด็นเข้าตาจะเกิดการระคายเคืองแสบตาอย่างรุนแรง ถึงขั้นทำให้ตาบอดบางส่วนหรือตาบอดทั้งหมด

ค) กรณีแอมโมเนียเหลวสัมผัสผิวหนังโดยตรงเป็นระยะเวลาหนึ่ง จะทำให้ผิวหนังไหม้และเซลล์เนื้อเยื่อตายเพราะเย็นจัด

ง) กรณีรับประทานเข้าไปจะกัดทำลายเยื่อภายในปากและระบบทางเดินอาหาร จะทำให้ปวดท้องอย่างรุนแรง คลื่นไส้ อาเจียน และหมดสติในที่สุด

2) พิษแบบเรื้อรัง

หากร่างกายได้รับก๊าซแอมโมเนียอยู่เสมออาจเนื่องมาจากการทำงานเป็นระยะเวลานาน ๆ ในบรรยากาศที่มีแอมโมเนียผสม จะทำให้เกิดอาการระคายเคืองเรื้อรังของตา จมูก และระบบทางเดินหายใจ (โศรดา, 2544)

3. ซีโอไลต์ (Zeolite)

ซีโอไลต์ คือ สารประกอบอนินทรีย์ (กลุ่มอะลูมิโนซิลิเกต) ซึ่งรู้จักกันครั้งแรกในปี ค.ศ. 1756 โดย Boron Cronstedt เขาพบว่าเมื่อให้ความร้อนกับสารที่เป็นผลึกชนิดหนึ่งแล้วนำไปใส่ในน้ำจะให้ฟองคล้ายน้ำเดือดจึงให้ชื่อว่า Zeolite ซึ่งมาจากภาษากรีก 2 คำ คือ Zeo = boil และ lite = stone

ปี ค.ศ. 1840 A. Damour สังเกตว่าผลึกของซีโอไลต์ที่มีน้ำผลึก (Hydrated Zeolite) สามารถสูญเสียผลึก (Dehydration) ทำให้ได้โครงสร้างที่มีรูพรุนคล้ายฟองน้ำ (Spongy-Framework) ซึ่งสามารถดูดซับอัลกอฮอล์ เบนซีน คลอโรฟอร์ม คาร์บอนไดซัลไฟด์ และปรอทได้

ปี ค.ศ. 1845 H.S. Thompson ได้ทดลองพบว่าดินสามารถดูดซับเกลือแอมโมเนียมได้ เมื่อเทสารละลายของเกลือแอมโมเนียมลงบนดิน และกรองจะได้สารละลาย (Filtrate) ของคลอไรด์ผ่านลงมาส่วนเกลือแอมโมเนียมถูกดินดูดซับไว้ ต่อมา J.T Way ได้แสดงให้เห็นว่าซิลิเกตที่มีน้ำผลึก (Hydrated Silicates) ในดินนี้เป็นตัวทำให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้น

ปี ค.ศ. 1909 F. Grandjean ได้ทดลองการดูดซับแก๊สของซีโอไลต์ชนิดหนึ่ง คือ Chabazite ดูดซับแอมโมเนีย อากาศ ไฮโดรเจน คาร์บอนไดซัลไฟด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ไอโอดีน และโบรมีน และที่อุณหภูมิสูง แม้แต่ไอปรอทก็ถูกดูดซับได้

ปี ค.ศ. 1933 Dent Smith ได้ตรวจสอบโครงสร้างของซีโอไลต์ที่ชื่อ Chabazite

ปี ค.ศ. 1948 Union Carbide Corporation ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับซีโอไลต์ซึ่งนับเป็นอุตสาหกรรมแห่งแรก และสังเคราะห์ซีโอไลต์เอขึ้นในปี ค.ศ. 1956 โดย Reed และ Breck

ปี ค.ศ. 1956 ได้มีรายงานเกี่ยวกับโครงสร้างที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมของ Feujasite (ซึ่งเกิดจากธรรมชาติ) และซีโอไลต์เอ (ที่สังเคราะห์ขึ้น)

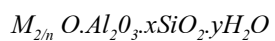
ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1948 จนถึงปี ค.ศ. 1972 พบว่ามีผลงานวิจัยเกี่ยวกับด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของซีโอไลต์เอ เกิดขึ้นมากกว่า 7,000 เรื่องและเอกสารสิทธิบัตรประมาณ 2,000 ฉบับ แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของซีโอไลต์ในการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ มากขึ้น (อุษาและคณะ, 2543)

3.1 โครงสร้างของซีโอไลต์

ซีโอไลต์เป็นแร่ที่ประกอบด้วย ผลึกของอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีน้ำ ผลึกของโลหะอัลคาไลน์ หรือ โลหะอัลคาไลต์เอิร์ธ ซึ่งโดยมากจะเป็นโลหะโซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม สตรอนเทียม และแบเรียม เป็นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นตาข่าย 3 มิติ ของอะลูมิเนียมออกซิเจน เตตระฮีดรอล (AlO_4) และซิลิกอนออกซิเจนเตตระฮีดรอล (SiO_4) ซึ่งประกอบกันเป็นอะลูมิโน

ซึ่กเกิด โดยการเชื่อมตู่ของออกซิเจนอะตอมอย่างไม่รู้จบ (อุษาและคณะ, 2543) ดังภาพที่ 2

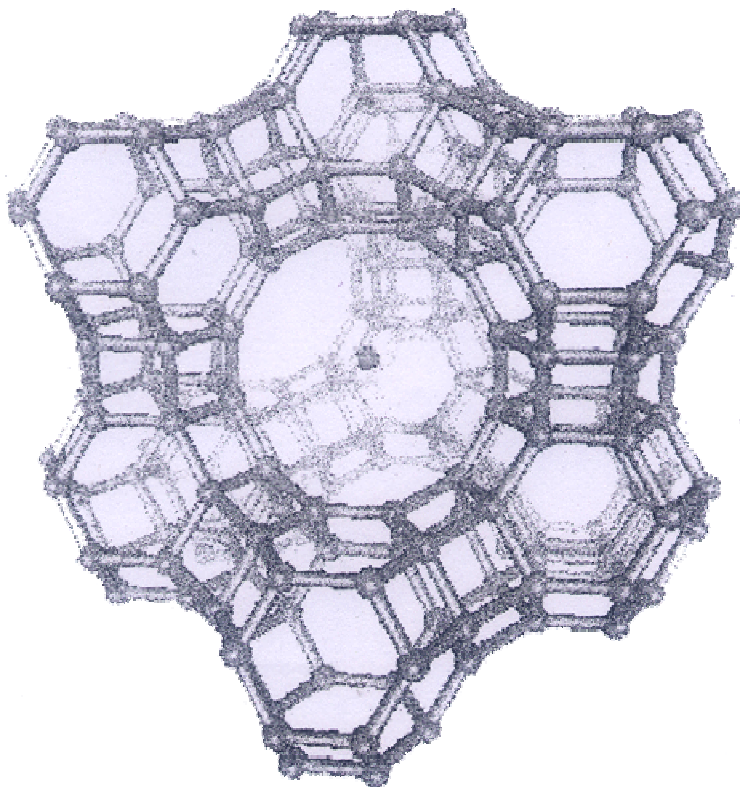
สูตรอย่างง่ายของซีโอไลต์เป็นดังนี้



n คือ วาเลนซ์ของแคตไอออน (M) โดยมากเท่ากับ 1 และ 2 ของโลหะอัลคาไลน์ และอัลคาไลน์เอิร์ธตามลำดับ

x คือ จำนวนโมลของ SiO_2 โดยมากจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2

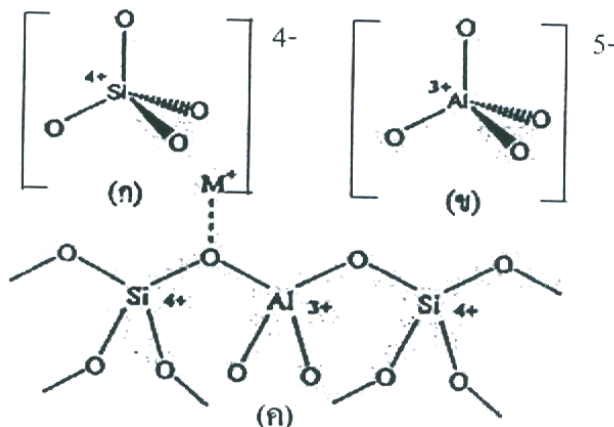
y คือ จำนวนโมลของน้ำที่อยู่ในช่องว่างของผลึกซีโอไลต์



ภาพที่ 2 ตัวอย่างโครงสร้างโมเลกุลซีโอไลต์

ที่มา : อุษาและคณะ (2543)

บางครั้งเรียกโครงสร้างของซีโอไลต์ที่มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่หน้าว่าเป็น TO_4 โดย T ย่อมาจาก Tetrahedral Metal แทนด้วยซิลิกอน หรืออะลูมิเนียม ส่วนอะตอมของออกซิเจนจะสร้างพันธะอยู่ล้อมรอบอะตอมของซิลิกอน หรืออะลูมิเนียม ซึ่งจะใช้อะตอมของออกซิเจนร่วมกัน ภายในโครงสร้างโดยทั่วไปจะเป็นโครงสร้างเปิด ภายในมีโมเลกุลของน้ำ ไอออนบวกของหมู่ I และหมู่ II อยู่ข้างใน ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 โครงสร้างทรงสี่หน้าของ (ก) $[\text{SiO}_4]^{4-}$ (ข) $[\text{AlO}_4]^{5-}$ (ค) การเชื่อมต่อกันในผลึกซีโอไลต์
ที่มา : Szostak (1998)

3.2 คุณสมบัติซีโอไลต์

จากโครงสร้างซีโอไลต์ที่เป็นแบบเปิด ประกอบด้วย Channels และ Interconnected Void จำนวนมาก ซึ่งมีแคทไอออน และโมเลกุลของน้ำเกาะอยู่ภายใน โดยสามารถแลกเปลี่ยนกับแคทไอออนอื่นได้ ก็มียุสมบัติเป็น Ion Exchanger นำไปใช้ในขบวนการ Water Softening และ water treatment นอกจากนี้โลหะอื่น ๆ เช่น ตะกั่ว ปรอท แคดเมียม ซิลเวอร์ไอออน ก็สามารถแลกเปลี่ยนได้เช่นกัน ยังมีคุณสมบัติเป็น Reversible Dehydration ซึ่งเป็น Molecular Sieve ที่ทำให้มีคุณสมบัติต่างจากการดูดซับอื่น และยังแสดงคุณสมบัติเป็นสารดูดซับที่ดี สามารถแยกแก๊ส และไอของผสม เช่น แอมโมเนีย ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ ไดออกไซด์ได้ด้วย เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลที่แตกต่างกัน ดังนั้นจะมีคุณสมบัติทางเคมี และฟิสิกส์แตกต่างกัน โครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์จะมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

- 1) High degree of hydration
- 2) Low density and large void volume when dehydrated
- 3) Stability of crystal structure
- 4) Cation exchanger properties
- 5) Uniform molecular sized channels
- 6) Various physical properties
- 7) Adsorption of gas and vapour
- 8) Catalytic properties

ซีโอไลต์เป็นแร่ที่มีคุณสมบัติพิเศษเฉพาะตัวที่เด่นชัด ไม่ว่าจะเป็นทางกายภาพ หรือทางเคมี คุณสมบัติดังกล่าวเกิดจากการต่อเรียงตัวของโครงสร้างทางแร่ในรูปวงแหวน ทำให้เกิดช่องว่างภายในจำนวนมาก ซึ่งมีขนาดที่พอเหมาะแก่การดูดซับอนุภาคต่าง ๆ ตลอดจนโมเลกุลของสารอินทรีย์และน้ำ นอกจากนี้การที่ Al^{3+} เข้าแทนที่ Si^{4+} ทำให้มีประจุบวกเหลือตกค้างอยู่ในหน่วยของเตตระฮีดรอล นี่ก็ต่อแหล่งที่มาของ CEC (Cation Exchange Capacity) ในแร่ซีโอไลต์ ซึ่งวัดความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของแร่ชนิดนี้จะมีค่าสูงกว่าแร่ดินเหนียวที่สำคัญ ๆ ที่พบในดิน ไม่ว่าจะเป็น Vermiculite และ Smectite หลายเท่า ด้วยเหตุผลดังกล่าว ปัจจุบันจึงมีการนำเอาซีโอไลต์มาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางทั้งในด้านอุตสาหกรรม เกษตรกรรม ตลอดจนเพื่อการอนุรักษ์ดิน และน้ำ ซึ่งเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่นับวันมีแต่จะเสื่อมโทรม (ปรีดา และคณะ, 2535)

ตารางที่ 4 Cation Exchange Properties ของแร่ซีโอไลต์ที่สำคัญบางชนิดที่พบในดิน

ชนิดซีโอไลต์	CEC Meq/100g	Void Volume, %	Exchange Selectivities
Clinoptilolite	200	34	$Cs^+ > K^+ = NH_4^+ > Sr^{2+} = Ba^{2+} > Na^+$
Analcime	460	18	Complication by ion- sieving
Chabazite	420	47	$Cs^+ > K^+ > NH_4^+ > Na^+ = Ba^{2+} > Sr^{2+}$
Modenite	220	28	$Cs^+ > K^+ > NH_4^+ > Na^+ > Ba^{2+}$
Phillipsite	380	31	$Ba^{2+} > Cs^+ = K^+ > Na^+$

ที่มา : ปรีดา และคณะ (2535) ดัดแปลงจาก Ming (1989)

3.2.1 คุณสมบัติทางเคมี

ซีโอไลต์มีคุณสมบัติทางเคมีที่พึงประสงค์อยู่หลายด้าน เริ่มด้วยมีค่า CEC อยู่ระหว่าง 100- 300 meq/100g และค่าดังกล่าวอาจเพิ่มสูงถึง 600 meq/100g ในซีโอไลต์ที่เป็นสารสังเคราะห์ นอกจากนี้ ตัวแร่ซีโอไลต์มีพื้นที่ผิวสูงมาก จึงสามารถดูดซับธาตุต่าง ๆ ได้หลายชนิด เช่น K, Ca, Mg, Na, Ba, ตลอดจนโลหะหนัก และสารกัมมันตรังสี เช่น Ti, Rb, Pb, Cs เป็นต้น อีกทั้งสามารถแลกเปลี่ยนธาตุประจุบวกดังกล่าวได้อีกด้วย คุณสมบัติที่เด่นอีกประการหนึ่งคือ ซีโอไลต์ เมื่อเอาน้ำออก (Dehydrated) สามารถดูดซับเอาโมเลกุลสารอินทรีย์- อนินทรีย์ ได้อีกหลายชนิด ซึ่งส่วนใหญ่มักเป็นสารพิษหรือก๊าซพิษ ตัวอย่างเช่น แอลกอฮอล์ แอมโมเนีย ไนโตรสออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และอื่น ๆ โดยโมเลกุลของสารเหล่านี้จะเข้าไปแทรกอยู่แทนที่โมเลกุลเดิมของน้ำนั่นเอง

3.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

ซีโอไลต์เป็นแร่โปร่ง จึงมีค่า Bulk Density เฉลี่ยประมาณ 2- 2.3 g/ cm³ ยกเว้นชนิดที่มีแบเรียมอยู่มาก ๆ จะยิ่งโปร่งมากขึ้นไปอีก คือ 2.5- 2.8 g/ cm³ นอกจากนี้ซีโอไลต์มีโพรงภายในค่อนข้างมาก จึงมีพื้นที่ผิวสูงตามไปด้วย โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 750- 880 m²/ g ส่วนความสามารถในการดูดซับน้ำก็สูงเช่นกัน แต่ขึ้นอยู่กับชนิดของซีโอไลต์เป็นหลัก ปกติ น้ำในโมเลกุลของซีโอไลต์จะระเหยออกไปเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ถึงแม้ว่าจะสูญเสีย น้ำไป แต่โครงสร้างของซีโอไลต์จะมีรูปร่างเหมือนเดิม และสามารถดูดซับน้ำหรือสารอินทรีย์- อนินทรีย์ ตลอดจนธาตุต่าง ๆ เข้าแทนที่ในโมเลกุลของน้ำในผลึกได้โดย (คณัย, 2540) อ้างจาก Petuinkin, 1995 ได้สรุปลักษณะพึงประสงค์ของซีโอไลต์ ไว้ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ลักษณะที่พึงประสงค์ของซีโอไลต์

คุณสมบัติ	ลักษณะมาตรฐาน
ลักษณะภายนอก	เป็นก้อนแน่น ไม่มีกลิ่น มีสีเดียวกับหินที่เป็นแหล่งกำเนิด
มีสารซีโอไลต์ (แยกโดยวิธีเอ็กซ์-เรย์)	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 60
ความสามารถแลกเปลี่ยนอออน (meq/g)	1.85
ความชื้น	ไม่เกินร้อยละ 9
อัตราส่วนของ Si: Al	ไม่เกิน 6
ความหนาแน่นโดยประมาณ	1,390 กก./ลบ.ม.
ขนาดช่องว่างโมเลกุลเกินกว่า	ร้อยละ 15
พื้นที่ในช่องว่างระหว่างโมเลกุลประมาณ	40 ตร.ม./ กรัม

ที่มา : ดนัย (2540) อ้างจาก Petuinkin (1995)

3.3 ประโยชน์ของซีโอไลต์

การนำเอาซีโอไลต์ที่พบในธรรมชาติและที่ได้จากการสังเคราะห์มาใช้ประโยชน์นั้น จะได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเมื่อไม่นานมานี้โดยเริ่มเป็นครั้งแรกในวงการด้านอุตสาหกรรมและได้แผ่ขยายออกไปสู่ด้านเกษตรกรรม ซีโอไลต์ตระกูลคลินอพิดิไลต์เป็นตระกูลที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในประเทศไทย โดยนิยมใช้ดูดแอมโมเนียและไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้ง เป็นต้น ประโยชน์ของซีโอไลต์ในด้านอุตสาหกรรมและทางด้านเกษตรกรรมมีดังนี้

3.3.1 ด้านอุตสาหกรรม

ส่วนใหญ่จะใช้สารซีโอไลต์นี้เพื่อดูดซับความชื้น ฟอกก๊าซ หรือสารละลายต่าง ๆ ให้มีความบริสุทธิ์ตลอดจนใช้เป็นสารเจือปนในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ ยาง พลาสติก รวมทั้งวัสดุก่อสร้างนาาชนิด นอกจากนี้กระบวนการผลิตผงซักฟอก และน้ำยาล้างทำความสะอาดในปัจจุบันได้มีการนำเอาซีโอไลต์นี้เข้าทดแทนฟอสเฟต ส่วนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีสารเคมีเจือปน ไม่ว่าจะเป็นฟีนอล เบ็นโซไฟริน โลหะหนักต่าง ๆ รวมทั้งสาร

กัมมันตรังสี สามารถใช้สารซีโอไลต์เป็นตัวกรองเอากากของสารพิษเหล่านี้ออกจากน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ อนึ่งสารซีโอไลต์นี้ยังสามารถดูดซับก๊าซพิษหรือสารที่มีกลิ่นไม่พึงประสงค์ได้เป็นอย่างดี

3.3.2 ด้านเกษตรกรรม

ซีโอไลต์มีศักยภาพในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ซึ่งเป็นธาตุอาหารของพืชได้หลายชนิด รวมทั้งมีความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารพืช จึงได้มีการคิดค้นทดลองนำเอาสารตัวนี้มาผลิตปุ๋ยที่ปลดปล่อยธาตุอาหารให้กับพืชอย่างช้า ๆ (Slow release fertilizers) โดยเฉพาะอย่างยิ่งปุ๋ยไนโตรเจนที่เมื่อใส่ลงในดินแล้วปกติจะสูญหายไปจากดินได้ง่าย โดยในแวดวงการเลี้ยงสัตว์ได้มีการทดลองนำเอาสารซีโอไลต์มาเติมในสูตรอาหารเป็นการเพิ่มสารจำพวกแร่ธาตุที่สัตว์ต้องการ ทำให้เพิ่มการเจริญเติบโต ไม่ว่าจะเป็น โคนม โคนเนื้อ หมู แกะ เป็ดและไก่เป็นต้น

ตารางที่ 6 การใช้งานของซีโอไลต์ธรรมชาติ

การใช้งาน	ลักษณะ ผลิตภัณฑ์	อัตราการใช้	ผลที่ได้รับ
ผสมปุ๋ยอินทรีย์	ผง	ร้อยละ 5- 10 โดย น้ำหนัก	ลดกลิ่น ดูดแอมโมเนียเพื่อรักษา ระดับไนโตรเจน และคายธาตุอาหาร อย่างช้า ๆ ลดความร้อนระอุ
ผสมดินปลูกพืช	ผง เม็ด ก้อน	ร้อยละ 2- 10 โดย น้ำหนัก	เพิ่มการดูดซึมแก๊สของดิน ป้องกันการสูญเสียธาตุอาหารทำให้ พืชโตขึ้น (Ming, 1989)
ผสมอาหารสัตว์	ผง	ร้อยละ 2-4 โดย น้ำหนัก	ลดกลิ่นของมูลสัตว์ ลดก๊าซใน กระเพาะอาหาร ดูดซับไนโตรเจนไว้ ให้เป็นปุ๋ยอย่างดีของพืช
ปูพื้นคอกสัตว์	เม็ด	0.2- 2 กก.ต่อตาราง เมตร	ลดกลิ่นแอมโมเนีย ทำให้สัตว์หายใจ สะดวก ลดความชื้น จากมูลสัตว์

ตารางที่ 6 การใช้งานของซีโอไลต์ธรรมชาติ (ต่อ)

การใช้งาน	ลักษณะ ผลิตภัณฑ์	อัตราการใช้	ผลที่ได้รับ
กำจัดน้ำเสีย	ผงและเม็ด	25-100 กรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร	กำจัดโลหะหนัก เช่นปรอท แคดเมียม ลดบีโอดี ลดสารประกอบ ไนโตรเจน (Marton และ Marculescu, 1985; Kotyakhov, 1992)
อุตสาหกรรม	ผงและเม็ด		ผลิตปุ๋ยละลายช้า (Limpadanai, 1996) และเป็นสารกรองน้ำ อุตสาหกรรมเครื่องเย็น

ที่มา : คณัย (2540)

3.3.3 ประโยชน์อื่น ๆ

ซีโอไลต์สามารถนำไปใช้ได้เช่นเดียวกับแร่เพอร์โลต์ในการทำซีเมนต์และคอนกรีตชนิดเบา เมื่อนำซีโอไลต์ชนิด Clinoptilolite มาเผาที่อุณหภูมิ 1,200- 1,400 องศาเซลเซียส จะได้วัสดุที่มีความหนาแน่น 0.8 กรัม/ซม³ และมีความพรุนมากกว่า 65% ถึงแม้ว่าการเผาซีโอไลต์จะใช้อุณหภูมิสูงกว่าเพอร์โลต์ (เพอร์โลต์เผาที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส) แต่มีความแข็งแรงมากกว่า และยังมีความทนทานต่อการสึกกร่อนมากกว่าด้วย

ซึ่งจากโครงสร้างของซีโอไลต์ที่เป็นรูพรุนสม่ำเสมอ มีพื้นที่ผิวสูงมาก มีความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation Exchange Capacity หรือ CEC) ประมาณ 100- 300 meq/ 100g และสามารถแลกเปลี่ยน Na^+ ของซีโอไลต์กับ NH_4^+ ได้ดีโดย NH_4^+ จะรวมตัวกับโครงสร้างของซีโอไลต์ในขณะที่ปล่อย Na^+ ออก โมเลกุลของสารซีโอไลต์เกาะกันหลวมมาก ซึ่งเป็นคุณสมบัติพิเศษที่สามารถดูดซับแคตไอออนเข้าไปในตัวได้มากเพราะมีช่องว่างระหว่างโมเลกุล (Molecule cavity) มาก

3.4 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (Adsorption) ที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดน้ำเสียอาจมีอยู่ด้วยกัน 3 ลักษณะ ดังนี้คือ

- 1) การดูดซับแบบแลกเปลี่ยนประจุ (Exchange Adsorption) การดูดซับแบบนี้อาศัยการดูดซับด้วยไฟฟ้าสถิตบริเวณผิว
- 2) การดูดซับแบบเคมี (Chemical Adsorption) การดูดซับแบบนี้อาศัยการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่อกัน ทำให้โมเลกุลของสารเคมีที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่บริเวณผิว
- 3) การดูดซับแบบกายภาพ (Physical Adsorption) การดูดซับแบบนี้อาศัยการเกิดการดูดซับด้วยแรงประเภท Van der Waals ซึ่งไม่ยึดติดแน่นแบบ 2 แบบแรก มักจะเหมาะสมกับสภาวะอุณหภูมิต่ำ ๆ

3.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (ปัญญาและวัลลพ, 2536)

- 1) อุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูงการดูดซับจะน้อยลง
- 2) ความดัน การดูดซับจะเพิ่มขึ้นถ้าเพิ่มความดันน้อย
- 3) สถานะของระบบ มีผลต่อการดูดซับ เช่น ตัวถูกดูดซับตัวหนึ่งมีความสามารถในการดูดซับในสถานะก๊าซได้ดี แต่อาจมีความสามารถในการดูดซับในของเหลวได้ไม่ดี
- 4) ขนาดของอนุภาค อัตราการดูดซับขึ้นอยู่กับผิวหน้าของตัวดูดซับและความเร็วในการแพร่กระจายของก๊าซเข้าไปในอนุภาค
- 5) ความสามารถในการดูดซับ (Degree of Activation)
- 6) สารปนเปื้อน (Contaminate) ซึ่งอาจสะสมอยู่ในผงถ่านในระหว่างการดูดซับ หรือระหว่างการปรับสภาพใหม่ (Regenerate)

3.4.2 ขั้นตอนที่เกิดขึ้นในระหว่างการดูดซับ

ขั้นตอนในการดูดซับมี 3 ขั้นตอนตามลำดับ (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2541)

ดังนี้

- 1) การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารใด ๆ (adsorbate) เข้าหาตัวดูดซับ (adsorbent)
- 2) Film diffusion คือเมื่อโมเลกุลของสารเข้ามาถึงตัวดูดซับซึ่งตามปกติจะมีฟิล์มของน้ำห่อหุ้มโดยรอบคล้ายเยื่อบาง ๆ ซึ่งโมเลกุลต้องแทรกตัวผ่านเยื่อของน้ำให้ได้ จึงจะเข้าไปถึงบริเวณผิวของตัวดูดซับ
- 3) Pore diffusion ในโมเลกุลของสารจะฟุ้งกระจายเข้าสู่โพรงหรือช่องว่างภายในของตัวดูดซับและเกิดการดูดซับในโพรงหรือช่องว่างระหว่างโมเลกุลของสารกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

ในการดูดซับของซีโอไลต์นั้นเกิดจากโครงสร้างของซีโอไลต์มีลักษณะเป็นรูพรุนสม่ำเสมอ ดังนั้นเมื่อดื่มน้ำออกจากซีโอไลต์ โดยอบที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส โมเลกุลของน้ำจะระเหยออกไปหมด แต่ไม่ได้ทำให้โครงสร้างของซีโอไลต์เปลี่ยนแปลงไปแต่อย่างใด จึงทำให้ซีโอไลต์สามารถดูดซับธาตุ น้ำ สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์เข้าแทนที่โมเลกุลของน้ำที่ระเหยไปได้ (พงศธร, 2535) โดยมีปัจจัยต่าง ๆ ที่กำหนดความสามารถในการดูดซับของสารซีโอไลต์แคทไอออน (दनัย, 2540) ดังนี้คือ

- 1) ลักษณะโครงสร้างของโมเลกุลคือขนาดและรูปร่างของช่องว่างโมเลกุล
- 2) ขนาดและลักษณะของไอออนที่ซีโอไลต์จะดูดได้
- 3) ความหนาแน่นของประจุในช่องว่างระหว่างโมเลกุล
- 4) ความหนาแน่นของประจุของแคทไอออนที่ต้องดูด
- 5) ส่วนประกอบและความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าในสารละลายตัวกลาง

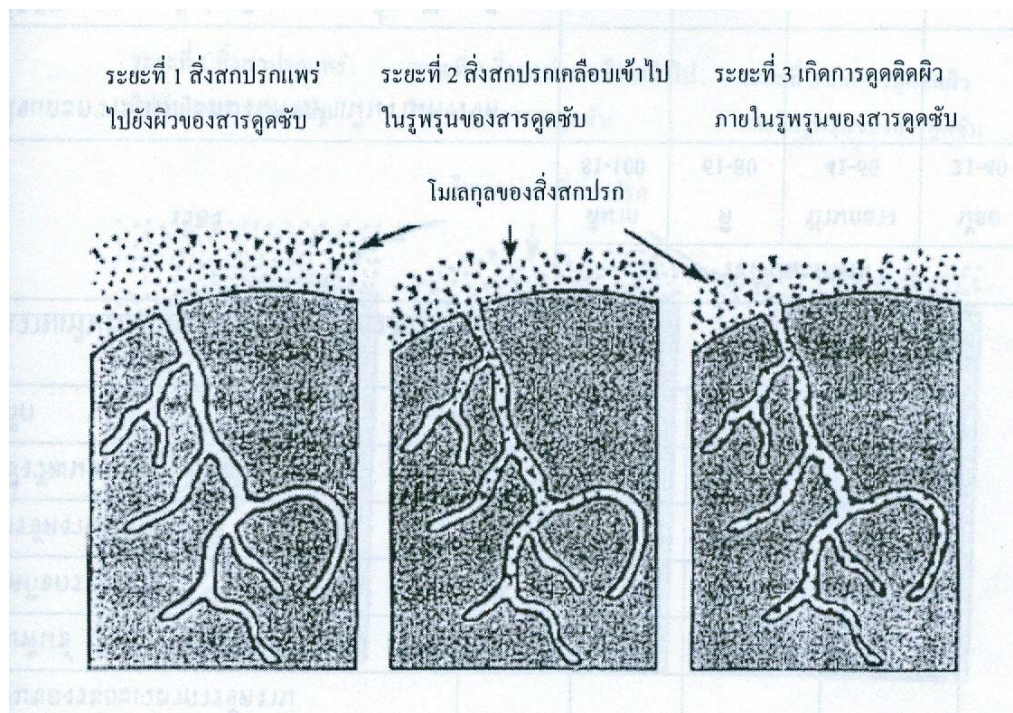
3.4.3 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ (ภาพที่ 4)

ก) การแพร่ภายนอก (external diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

ข) การแพร่ผ่านภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างตัวดูดซับเพื่อให้เกิดการดูดซับ

ค) ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายติดติดผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย



ภาพที่ 4 กลไกการดูดซับของสารดูดซับ
ที่มา: สาธิตา และฤดิรัตน์ (2546)

3.4.4 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล

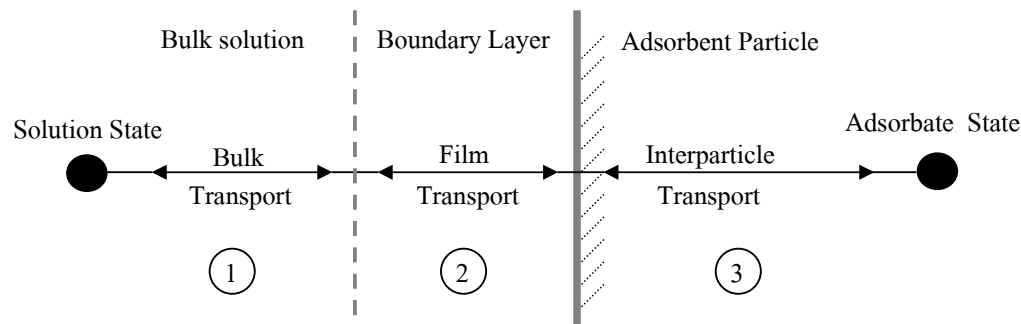
อัตราการดูดซับมีความสำคัญ อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุลซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังนี้ (ภาพที่ 5)

ก) การขนส่งอนุภาค (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบาง ๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

ข) การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบาง ๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง

ค) การขนส่งภายในอนุภาค (interparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายในขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน

การยึดติดของตัวดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้น ซึ่งอาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพหรือทางเคมี หรือทั้งสองแบบ



ภาพที่ 5 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: Eckenfelder (1989)

3.5 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

การแลกเปลี่ยนไอออนเป็นการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของไอออนในน้ำอย่างต่อเนื่องกัน 2 ประการดังนี้

- 1) การกำจัดไอออนต่างๆ ออกจากน้ำ เช่น Ca^{+2} , Mg^{+2} , SO_4^{+2} , Cl^-
- 2) ทำให้ไอออนต่างๆ มีความเข้มข้นสูงมาก ๆ เนื่องจากไอออนที่ถูกกำจัดจะหลุดออกไปกับสารรีเจนเนอแรนต์ (regenerant) ซึ่งสารรีเจนเนอแรนต์มีปริมาตรต่ำกว่าปริมาตรของสารละลายซึ่งเป็นที่อยู่เดิมของไอออน ความเข้มข้นใหม่ของไอออนจึงสูงมาก

3.5.1 ชนิดของซีโอไลต์

ซีโอไลต์ (Zeolite) เป็นสารประกอบที่มีความสามารถแลกเปลี่ยน Na^+ ที่อยู่ในตัวกับไอออนบวกที่อยู่ในน้ำหลายชนิด เช่น Alkaline earth ions, NH_4^+ และไอออนที่มีประจุ +2 บางตัว ซีโอไลต์แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

- 1) ซีโอไลต์ธรรมชาติ (natural zeolite) เป็นซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีน้ำหนักเบา เป็นแร่ที่มีความนุ่ม มีสีน้ำตาล น้ำตาลเหลือง หรือสีเขียวจาง มีลักษณะคล้ายขอล็ก เกิดขึ้นโดยกระบวนการ hyderthermal ของสารละลายได้ทั่วโลกที่มีองค์ประกอบของอะลูมินา (alumina) ซิลิกา (silica) และสภาวะเป็นด่างอย่างแรง (โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), โซเดียม

คาร์บอเนต (Na_2CO_3) ที่เกิดจากการชะล้างของน้ำฝนผ่านชั้นหินลงมา ภายใต้อุณหภูมิ 70- 350 องศาเซลเซียส และความดันสูงเป็นเวลานานจนค่อย ๆ ก่อตัวเป็นโครงสร้างซีโอไลต์ ส่วนมาก ซีโอไลต์ชนิดนี้จะพบในบริเวณที่เป็นหินภูเขาไฟ ใต้พื้นมหาสมุทร บริเวณน้ำพุร้อน ธารน้ำจาก แหล่งภูเขาไฟ หรือพื้นผิวดินบางแห่ง ซีโอไลต์ธรรมชาติมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) 24.9 ตารางเมตรต่อกรัม ความหนาแน่น (bulk density) 55 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต และขนาดรูพรุน (pore diameter) $1000 \text{ \AA}$ (ZEO, 2003) อ้างอิงจาก ประภาวิชฌ์ (2546) ซีโอไลต์ธรรมชาติ ได้แก่ green sand หรือ glauconite พบมากในรัฐนิวเจอร์ซีย์ สหรัฐอเมริกา มีน้ำอยู่ประมาณ 10% ซีโอไลต์ธรรมชาติมีประมาณ 40 ชนิด ดังตารางที่ 7

2) ซีโอไลต์สังเคราะห์ (synthetic zeolite) เป็นสารประกอบหลายชนิดรวมกัน ที่สังเคราะห์โดยการเลียนแบบกระบวนการ hydrothermal ที่เกิดในธรรมชาติ ซึ่งเป็นวิธีการ สังเคราะห์พื้นฐานที่ยังคงใช้กันอยู่จนถึงปัจจุบัน โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง (100 – 200 องศาเซลเซียส) และภายใต้ความดันสูงการทำปฏิกิริยานี้จะถูกทิ้งไว้ตามระยะเวลา ความดัน และอุณหภูมิ ที่กำหนดภายใต้ปริมาณน้ำที่มากเกินไป อย่างไรก็ตามได้มีวิธีการใหม่ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่ ใช้อุณหภูมิต่ำ ซึ่งซีโอไลต์สามารถเกิดขึ้นตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิน้ำเดือด ตัวอย่าง เช่น Zeolite A , Zeolite X และ Zeolite Y ทั้งนี้อาจมีการดัดแปลงวิธีการเพื่อให้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้น มีสมบัติเฉพาะในการใช้งานหรือให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นตามต้องการ ซึ่งมากกว่า 150 ชนิดที่ สังเคราะห์ได้จากห้องปฏิบัติการ ซีโอไลต์แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ และเคมีที่แตกต่าง กัน ซึ่งในการนำมาใช้ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติด้วย (Mumpton and Fishman, 1977) ซีโอไลต์ สังเคราะห์ ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต และอลูมิเนียมซิลเฟต หรือโซเดียมอะลูมิเนต

ตารางที่ 7 ซีโอไลต์ที่ค้นพบในธรรมชาติ

ซีโอไลต์	ปีค.ศ.ที่พบ	ซีโอไลต์	ปีค.ศ.ที่พบ
Stilbite	1456	Clinoptilolite	1890
Natrolite	1758	Offretite	1890
Chabazite	1772	Erionite	1890
Harmotome	1775	Kehoeite	1893
Amalcime	1784	Gonnerdite	1896
Laumonlite	1785	Dachiadite	1905
Thomsonite	1801	Stellerite	1909
Scolecite	1801	Ferrierite	1918
Heulandite	1801	Viseite	1942
Gmelinite	1807	Yugawaralite	1952
Mesolite	1813	Wairakite	1955
Gismondine	1816	Bikitaite	1957
Brewsterite	1822	Paulingite	1960
Epistilbite	1823	Garronite	1962
Philipsite	1824	Mazzite	1972
Levynite	1825	Barrerite	1974
Herschelite	1825	Cowlesite	1975
Edingtonite	1825	Merlinoite	1976
Faujasite	1842	Svetlozarite	1976
Mordenite	1864	Amicite	1779

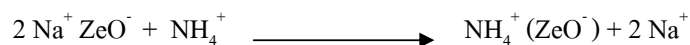
ที่มา : Clifton (1987)

ในการเกิด Cation exchange ในซีโอไลต์นั้นมีการค้นพบคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของซีโอไลต์มานานแล้ว ซีโอไลต์สามารถแลกเปลี่ยนแคตไอออนได้ดีเนื่องจากโครงสร้างมีลักษณะเป็น 3 มิติ ทำให้เกิดโพรงที่แคตไอออนเข้าไปอยู่ด้วยโดยไม่เกิดการบวมหรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง โดยในการเกิด Cation exchange ของซีโอไลต์ขึ้นอยู่กับ

- 1) ธรรมชาติของแคตไอออน เช่น ขนาดและประจุของแคตไอออน
- 2) อุณหภูมิ
- 3) ความเข้มข้นของแคตไอออนในสารละลาย
- 4) ตัวทำละลาย
- 5) ลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์
- 6) pH ของสารละลายที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนแคตไอออน
- 7) เวลาที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน

ในระบบการแลกเปลี่ยนไอออนจะใช้หลักการแลกเปลี่ยนประจุของสารปนเปื้อนที่มีอยู่ในน้ำเสีย เช่น แยก NH_4^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , SO_4^{+2} , Cu^{+2} , CrO_4^{+2} , Zn^{+2} , Ni^{+2} เป็นต้น ซึ่งโดยมากมักจะมีมากในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางชนิด โดยอาศัย สารที่เติมลงในถังแลกเปลี่ยนประจุ เช่น NaCl หรือ HCl หรือ NaOH เป็นต้น

ถ้าต้องการแยก NH_4^+ ออกจากน้ำเสีย อาจใช้สาร Zeolite เติมลงในถังแลกเปลี่ยนประจุ ซึ่งการแลกเปลี่ยนประจุของซีโอไลต์ในน้ำเสียนั้นจะใช้ซีโอไลต์ที่มีสมบัติแลกเปลี่ยน Na^+ ได้ หรือเขียนโดยทั่วไปเป็น $\text{Na}^+ \text{ZeO}^-$ รูปแบบการแลกเปลี่ยน NH_4^+ กับ Na^+ ของซีโอไลต์เขียนเป็นสมการได้ดังนี้



3.5.2 การฟื้นฟูสภาพ (Regeneration)

1) วิธีการรีเจนเนอเรต แบ่งตามทิศทางการไหลมี 2 วิธี คือ

ก) วิธีแบบที่สารรีเจนเนอเรนต์ไหลทิศทางเดียวกับน้ำเสีย (cocurrent operation) เป็นวิธีพื้นฐานโดยผ่านสารที่รีเจนเนอเรนต์ไหลทิศทางเดียวกับน้ำที่ต้องการบำบัด โดยผ่านเข้าด้านบนและไหลออกด้านล่างของคอลัมน์ เป็นวิธีที่ง่ายเหมาะสำหรับระบบที่การรั่วไหลของไอออนไม่สำคัญมากและสามารถรีเจนเนอเรตได้ง่าย แต่วิธีนี้ต้องใช้สารเคมีมาก ความเข้มข้นสูง และใช้เวลานาน รวมทั้งเกิดปัญหาจากการรั่วไหลของไอออน (leakage) ซึ่งเกิดจากไอออนที่รีเจนเนอเรตไม่หมด เคลื่อนลงสู่ด้านล่างของคอลัมน์ และหลุดออกมาเมื่อทำการผ่านน้ำเสียในการทำงานรอบต่อไป ทำให้น้ำที่ได้ไม่บริสุทธิ์

ข) วิธีแบบที่สารรีเจนเนอเรนต์ไหลทิศทางตรงข้าม (counter-current operation) วิธีนี้สารรีเจนเนอเรนต์จะไหลสวนทิศทางกับการไหลของน้ำที่ต้องการบำบัด ซึ่งจะเกิดการรีเจนเนอเรตอย่างสมบูรณ์ มีการรั่วไหลของไอออนที่ไม่ต้องการน้อย และใช้สารเคมีอย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าโดยสารรีเจนเนอเรนต์น้อยกว่าแบบไหลทิศทางเดียวกันถึงร้อยละ 50 เหมาะสำหรับระบบที่ต้องการความบริสุทธิ์ของน้ำสูง ลดการใช้สารเคมีและมีของเสียปริมาณน้อย วิธีนี้สามารถออกแบบให้มีการทำงานแบบต่อเนื่องได้ (continuous countercurrent) โดยใช้คอลัมน์หลายๆ ชุด ต้นทุนการก่อสร้างแพงกว่า เพราะต้องใช้ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ แต่ลดแรงงาน และใช้สารเคมีสำหรับรีเจนเนอเรตอย่างมีประสิทธิภาพ

2) อายุการใช้งานของ Ion Exchange

อายุการใช้งานของ Ion Exchange ขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำที่ใช้และการล้างคืนประจุ น้ำที่มีธาตุเหล็ก และแมงกานีสสูงจะเกิดการ fouling (ทำให้ปนเปื้อนหรือสกปรก) ใน cation exchange และการล้างคืนประจุต้องมีประสิทธิภาพ มิฉะนั้นอายุการใช้งานของ Cation exchange จะสั้น การใช้ H_2SO_4 ล้างไฮโดรเจน Cation exchange อาจทำให้เกิดการ fouling จากเกลือ $CaSO_4$ ที่เกิดมาจากการล้าง ซึ่งเมื่อ ion exchange ถูกเคลือบด้วย $CaSO_4$ แล้วก็จะไม่สามารถล้างคืนประจุให้มีประสิทธิภาพได้ จำเป็นต้องทิ้ง น้ำที่ไม่สะอาดมีพวกแบคทีเรียเจือปนจะทำลายคุณภาพของ ion exchange เช่นเดียวกัน น้ำที่ผ่านการฆ่าเชื้อโรคโดยการใช้คลอรีน ถ้ามีคลอรีนเหลือมากกว่า 0.5 มก./ล. ก็จะทำลายคุณภาพและประสิทธิภาพของ ion exchange เช่นเดียวกัน โดยทั่วไป

ถ้าน้ำใช้มีคุณภาพดี อายุของ cation exchange จะอยู่ประมาณ 5- 10 ปี ส่วน anion exchange จะอยู่ประมาณ 3- 6 ปี ในระหว่างการใช้งาน ion exchange ส่วนหนึ่งจะแตกหัก และบางส่วนจะสูญเสียไป ในระหว่างการใช้งานกลับคืนนั้นจึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบและเพิ่ม ion exchange เพื่อให้มีจำนวนคงที่ (ณรงค์, 2540)

3.6 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ คือ กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสาร ณ จุดสมดุลที่อุณหภูมิคงที่อุณหภูมิหนึ่ง ดังนั้นแนวทางในการศึกษาไอโซเทอร์ม จึงต้องทำการทดลองเพื่อหาปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ เพื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองนี้ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นที่จุดสมดุลของสารที่อุณหภูมิคงที่อุณหภูมิหนึ่ง (นิพัทธา, 2548)

นักวิทยาศาสตร์ได้พยายามที่จะอธิบายรูปแบบต่าง ๆ ของไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยการสร้างแบบจำลองของการดูดซับในลักษณะต่าง ๆ และในปัจจุบันได้มีแบบจำลองหลายรูปแบบ ดังนี้

3.6.1 สมการ Langmuir

เป็นสมการของ Langmuir สำหรับระบบดูดซับโดยสมการนี้มีเงื่อนไขว่า การดูดซับจะเกิดเฉพาะผิวชั้นเดียว และ โมเลกุลของสารดูดซับ (Adsorbate) ไม่มีการเคลื่อนที่อิสระบนผิวของการดูดซับ (Adsorbent)

$$q = (q_m k_A C) / (1 + K_A C) \quad \text{-----} \quad (1)$$

เมื่อ q = ปริมาณของสารดูดซับ / ปริมาณของตัวดูดซับ

q_m = ปริมาณของสารดูดซับ / ปริมาณของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล

K_A = ค่าคงที่ของการดูดซับ (ลิตรของตัวถูกดูดซับ / มิลลิกรัมของตัวดูดซับ)

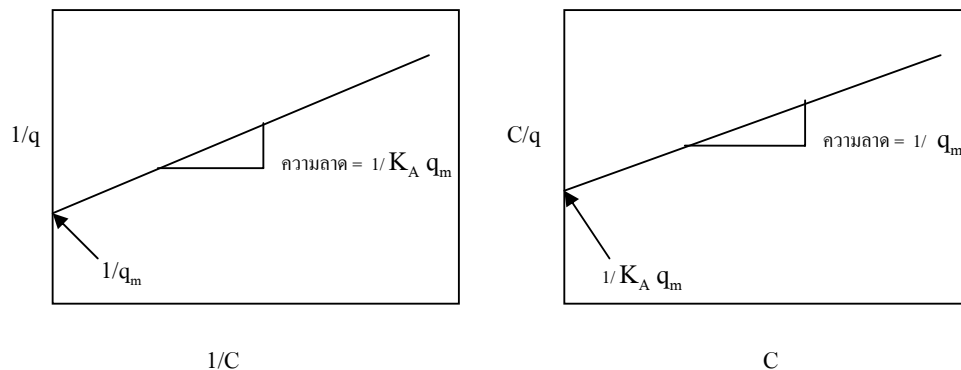
C = ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม / ลิตร)

เพื่อให้สามารถคำนวณหาค่า q_m และ K_A ได้ด้วยกราฟ จึงจำเป็นต้องจัดรูปแบบสมการได้ดังนี้

$$1/q = 1/q_m + (1/K_A q_m) 1/C \quad \text{-----} \quad (2)$$

$$C/q = C/q_m + 1/K_A q_m \quad \text{-----} \quad (3)$$

จากสมการที่ (2) และ (3) สามารถเขียนกราฟได้ดังนี้



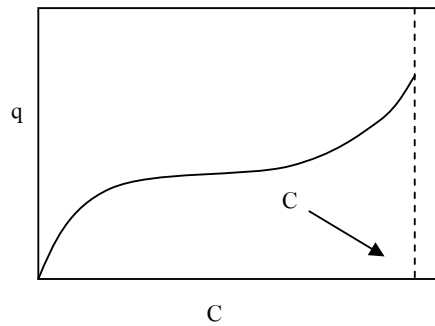
3.6.2 สมการ Brunauer – Emmett – Teller (BET)

เป็นสมการของ BET สำหรับระบบดูดซับ โดยสมการนี้มีเงื่อนไขว่าโมเลกุลของสารถูกดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อิสระบนผิว และการดูดซับมีระดับคงที่สำหรับทุก ๆ โมเลกุลมีสมการดังนี้

$$q = \frac{q_m K_B C}{(C_s - C) [1 + (K_B - 1) (C / C_s)]} \quad \text{-----} \quad (4)$$

โดยที่ C_s = ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารถูกดูดซับ ณ ทุก ๆ ชั้น (มิลลิลิตร/ ลิตร)
สามารถอ่านค่าได้จากกราฟ ดังนี้

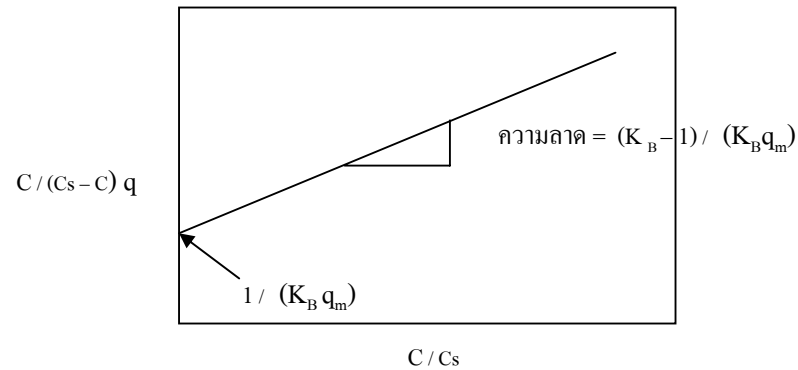
K_B = ค่าคงที่ของการดูดซับซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานในการเกิด Adsorption



เพื่อให้สามารถคำนวณหาค่า K_B และ q_m ได้ด้วยวิธีกราฟ จึงจำเป็นต้องจัดรูปแบบสมการให้เป็น

$$C / (C_s - C) q = 1 / K_B q_m + (K_B - 1) / (K_B q_m) \times (C) / (C_s) \text{ ----- (5)}$$

จากสมการสามารถเขียนกราฟได้ดังนี้



3.6.3 สมการของ Freundlich

สมการของ Freundlich สำหรับระบบดูดซับเป็นสมการที่นิยมใช้กันมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้กับสารละลายที่ค่อนข้างเจือจาง และมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ สมมติฐานของสมการนี้คือ บริเวณดูดติดผิวมีหลายโมเลกุล มีจำนวนพื้นที่ที่ไม่แน่นอน และพลังงานการดูดติดผิวในแต่ละบริเวณมีค่าไม่เท่ากัน

$$q = K_F C^{1/n}$$

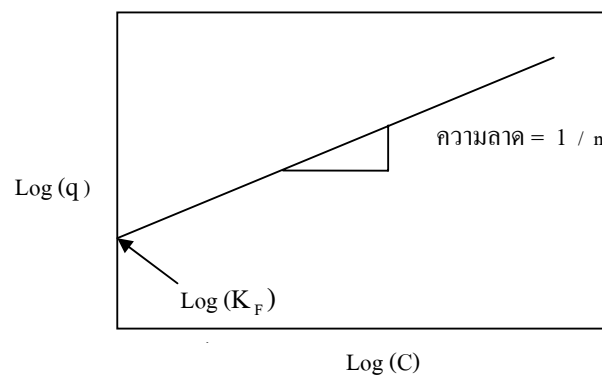
เมื่อ q = ปริมาณของสารดูดซับ / ปริมาณของตัวดูดซับ

K_F = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ

C = ความเข้มข้นของน้ำมันเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$1/n$ = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

เพื่อให้สามารถคำนวณค่าได้ด้วยวิธีกราฟ จึงจำเป็นต้องใช้ Logarithm มาจัดรูปแบบให้เป็นสมการ และสามารถเขียนกราฟ ได้ดังนี้

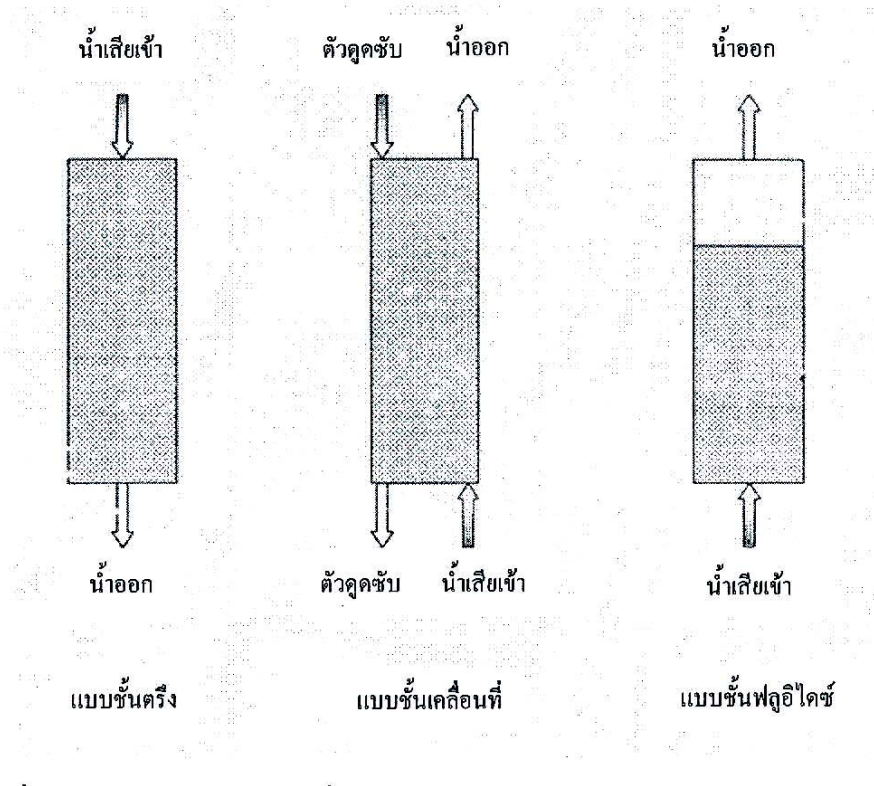


ซึ่งค่าคงที่ $1/n$ และ K_F จะแสดงถึงแนวโน้มของประสิทธิภาพในการดูดซับว่ามีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อค่าคงที่เพิ่มมากขึ้น และค่า $n = 1$ แสดงถึงการดูดซับที่เป็นสมการเส้นตรง, $n > 1$ แสดงถึงการดูดซับที่ดี (Favourable adsorption) และ $n < 1$ แสดงถึงการดูดซับที่ไม่ดี (Unfavourable adsorption) (Mihelcic, 1999)

4. แบบจำลองคลองวนเวียน (Oxidation Ditch Model)

แบบจำลองคลองวนเวียน (Oxidation Ditch Model) หมายถึง แบบระบบบำบัดน้ำเสียจำลองที่ได้ออกแบบขึ้นให้มีการหมุนเวียนน้ำเสียไหลเข้า-ออก (inlet-outlet) ภายในแบบจำลองจะใช้บรรจุสารดูดซับ (adsorbent) ไว้เพื่อใช้ในการดูดซับและแลกเปลี่ยนไอออนกับสารละลายน้ำเสีย ซึ่งเป็นระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง

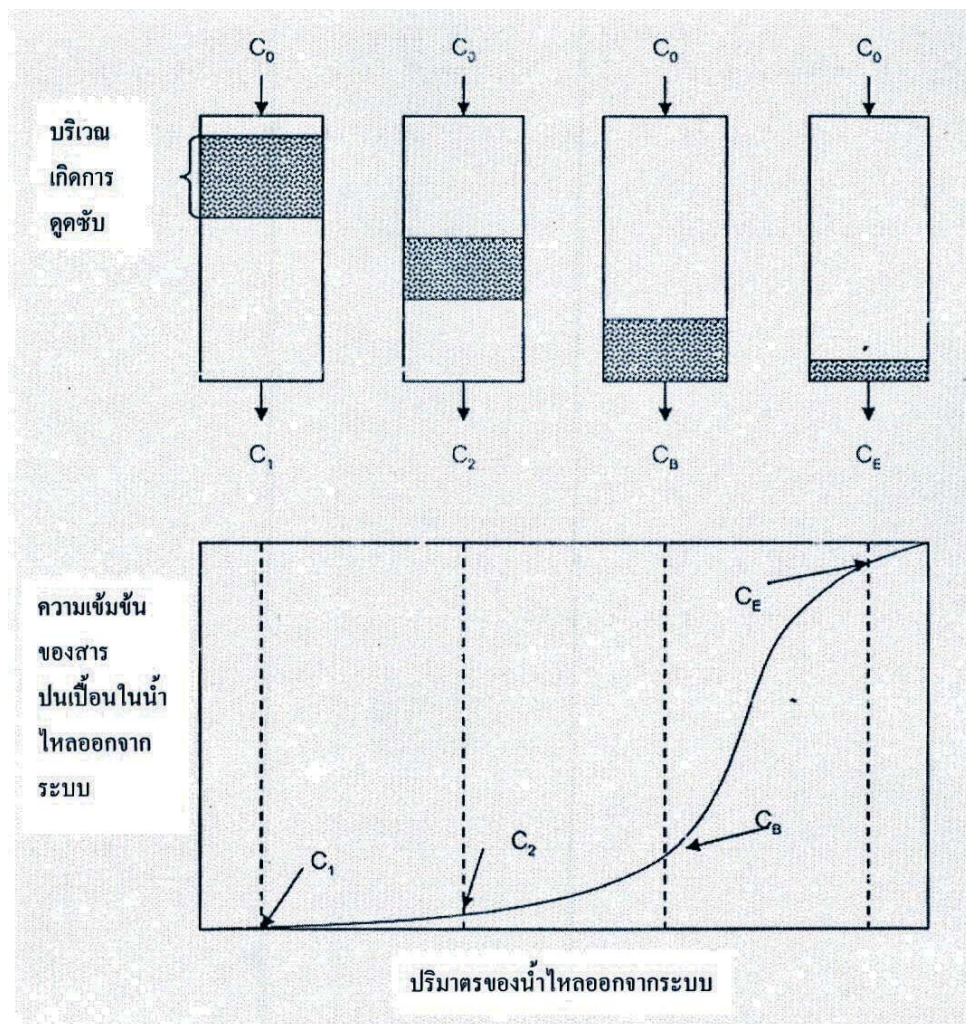
4.1 ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง (Column) เป็นระบบที่นิยมใช้กันมากกว่าระบบแบบครั้งคราว (Batch) ระบบแบบไหลต่อเนื่องนิยมใช้กับปริมาณน้ำเสียมาก ๆ ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่องมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ คือ แบบชั้นตรึง (fixed bed) แบบชั้นเคลื่อนที่ (moving bed) และแบบฟลูอิดाइซ์ (fluidized bed) ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง
ที่มา: กิตตินันท์ (2546)

4.1.1 แบบชั้นตรึง (fixed bed) ระบบดูดซับแบบนี้โดยผ่านน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของโลหะไอออนเริ่มต้นเท่ากับ C_0 ให้ไหลลงผ่านชั้นตัวดูดซับที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ กระบวนการดูดซับเริ่มเกิดขึ้นบริเวณส่วนบนของระบบ แล้วบริเวณการดูดซับค่อย ๆ เคลื่อนลงจนถึงส่วนล่างของชั้นจนกระทั่งหมดสภาพการดูดซับที่ส่วนกันของชั้น ดังแสดงผลการดูดซับไว้ในภาพที่ 7 ณ จุด C_B คือจุดที่การดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพ เรียกว่า จุดเริ่มหมดสภาพ (breakpoint) และหลังจากจุดนี้ต่อไปเป็นเส้นโค้งสูงขึ้นคือ การดูดซับค่อย ๆ หมดสภาพจนไม่สามารถดูดซับไอออนในน้ำเสียได้อีก เรียกเส้นโค้งนี้ว่า breakthrough curve จนถึง ณ จุด C_E ซึ่งเป็นจุดที่เรียกว่า

จุดหมดสภาพ (exhaustion point) ค่า C_1 คือความเข้มข้นของไอออนในน้ำเสียที่ออกจากระบบในระยะแรก C_2 คือ ความเข้มข้นของไอออนต่าง ๆ ในน้ำเสียที่ออกจากระบบในระยะที่สอง



ภาพที่ 7 ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่องในชั้นตรึง

ที่มา: กิตตินันท์ (2546)

การทำงานของระบบการดูดซับด้วยสารดูดซับในระบบแบบต่อเนื่อง จะเป็นไปตามสมการของ Adam และ Bohart คือ

$$T = \frac{N_0}{C_0 V} \left[h - \frac{V}{KN} \left[\ln \frac{C_0}{C_B} - 1 \right] \right]$$

T = break point time หรือ service time (hr)

V = ความเร็วในการไหลของน้ำที่ผ่านชั้นตัวดูดซับ (ft/sec)

K = ค่าคงที่ของอัตราการดูดซับ ($\text{ft}^3/\text{lb-hr}$)

N_0 = ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ (lb/ft^3)

C_0 = ความเข้มข้นของไอออนที่จะถูกดูดซับในน้ำที่เข้าสู่ระบบ (mg/L)

C_B = ความเข้มข้นของไอออนที่จะถูกดูดซับในน้ำที่ออกจากระบบ (mg/L)

4.1.2 แบบชั้นเคลื่อนที่ (moving bed) ระบบดูดซับแบบนี้ใช้น้ำเสียไหลขึ้นพร้อมกับมีการเปลี่ยนสิ่งดูดซับจากบริเวณส่วนก้นของถัง ซึ่งจะหมดสภาพก่อน ระบบนี้มักมีประสิทธิภาพค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่ไม่นิยมใช้การบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากต้องควบคุมดูแลการเคลื่อนย้ายสิ่งดูดซับออกอย่างสม่ำเสมอทั่วหน้าตัดของถัง ระบบนี้มีใช้กันในงานแยกก๊าซไฮโดรคาร์บอนของโรงงานปิโตรเลียม

4.1.3 แบบชั้นฟลูอิดไคซ์ (fluidized bed) ระบบดูดซับแบบนี้ใช้น้ำเสียไหลขึ้นด้วยความเร็วสูงมากพอให้สิ่งดูดซับเกิดการแขวนลอยในระบบได้ แต่ต้องไม่ทำให้สิ่งดูดซับลอยขึ้นมากจนหลุดออกจากชั้นดูดซับ ในการควบคุมระบบให้ได้ผลอย่างสม่ำเสมอควรมีการเติมสิ่งดูดซับใหม่เข้าจากด้านบนของถัง และถ่ายสิ่งดูดซับเก่าออกจากด้านล่างของถัง ระบบนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงกว่าระบบแบบชั้นตรึง แต่มีข้อดีที่ระบบสามารถรับปริมาณน้ำเสียไหลเข้าได้ค่อนข้างมากกว่า และสามารถเลือกใช้สิ่งดูดซับที่มีขนาดเล็ก ๆ ได้ โดยปราศจากปัญหาสูญเสียความดันสูงเกินไปในระบบ (กิตตินันท์, 2546)

4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อเวลาการใช้งาน (service time) ของสารดูดซับ

4.2.1 ความลึกของชั้นสารดูดซับ โดยเวลาการใช้งานของสารดูดซับมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มความลึกของชั้นสารดูดซับ และลดลงเมื่อความลึกของชั้นสารดูดซับลดลง

4.2.2 พื้นที่ผิวจำเพาะของสารดูดซับ (specific surface area) สารดูดซับซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากเวลาการใช้งานจะมีแนวโน้มมากกว่าสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย

4.2.3 อัตราการบำบัด (Hydraulic Loading Rate, HLR) คือ อัตราที่ของไหลหนึ่งหน่วยปริมาตรเคลื่อนที่ผ่านหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์สารดูดซับ มีค่าอยู่ในช่วง 2- 10 แกลลอน

ก่อนที่ต่อตารางฟูต จะส่งผลต่อเวลาการใช้งานของสารดูดซับคือ ที่อัตราการบำบัดสูงจะมีเวลาการใช้งานน้อยกว่าที่อัตราการบำบัดต่ำ

4.2.4 ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้ากระบวนการดูดซับจะส่งผลต่อเวลาการใช้งานโดยที่ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้ากระบวนการดูดซับสูง ทำให้เวลาการใช้งานน้อยกว่าที่ความเข้มข้นของน้ำเสียต่ำ (พรรณราย, 2546)

4.3 ทฤษฎีการกรอง

กระบวนการกรองน้ำเป็นขั้นตอนหนึ่งในการทำมาสะอาดน้ำ โดยการผ่านน้ำสู่ตัวกรองที่มีรูพรุนเพื่อกำจัดสารแขวนลอยต่าง ๆ ออกไป ด้วยกลไกทางกายภาพ และเคมี ทำให้น้ำที่ผ่านกระบวนการกรองนี้มีความสะอาดตามต้องการ โดยการกรองจะเกิดขึ้นเมื่อมีกลไกการกรองน้ำดังต่อไปนี้

4.3.1 กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าหาสารกรอง (transport mechanism)

ในการกรองผ่านชั้นสารกรอง สารแขวนลอยเคลื่อนที่เข้าหาสารกรองได้ 2 วิธี วิธีแรก เป็นการเคลื่อนที่ตามธรรมชาติของสารที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน และเป็นการเคลื่อนที่ในระดับโมเลกุลที่เกิดจากการแพร่กระจายแบบบราวเนียน (Brownian diffusion) วิธีที่สองเป็นการเคลื่อนที่ตามเส้นทางการไหลของน้ำ สารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน จะวิ่งเบียดเข้าหาสารกรอง (interception) ในขณะที่ผ่านช่องว่างขนาดเล็ก นอกจากนี้สารแขวนลอยขนาดใหญ่ยังอาจตกตะกอน (sedimentation) ในทิศทางที่เคลื่อนที่เข้าหาสารกรองได้ ขนาด และการกระจายขนาด (size distribution) ของสารแขวนลอยมีความสำคัญต่อกลไกเคลื่อนย้ายอย่างมาก

4.3.2 กลไกจับสารแขวนลอย (attachment mechanism)

สารแขวนลอยขนาดใหญ่อาจตกตะกอน และเกาะติดอยู่บนสารกรอง หรืออาจตกค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างสารกรอง ทำให้สามารถกรองออกจากรูได้ อย่างไรก็ตามปรากฏว่าเครื่องกรองสามารถกำจัดคอลลอยด์ขนาดเล็กออกจากรูได้ด้วย ซึ่งกลไกทางกายภาพเพียงลำพังไม่น่ากระทำได้ ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการกรองน้ำต้องอาศัยกลไกแบบที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย กลไกดังกล่าวคือ การดูดติดผิว (adsorption) และทำลายประจุไฟฟ้าของ

คอลลอยด์สามารถเกาะจับอยู่บนสารกรอง หรือบนสิ่งอื่นที่จับบนสารกรองอยู่ก่อนแล้ว อย่างไรก็ตาม สารกรองและคอลลอยด์ก็มีประจุบทั้งคู่ จึงต้องมีการทำลายประจุไฟฟ้าของสารตัวใดตัวหนึ่งก่อน หรือของทั้งคู่ เพื่อไม่ให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุเดียวกัน ในกรณีของการกรองน้ำ คอลลอยด์ในน้ำเคลื่อนที่ผ่านชั้นกรองซึ่งอยู่กับที่ ทำให้สามารถทำลายประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ก่อนผ่านเข้าชั้นกรองได้ หรือถ้าเปลี่ยนประจุของคอลลอยด์ให้เป็นประจุบวกก่อนผ่านเข้าชั้นกรอง ก็จะได้ผลในการกรองมากยิ่งขึ้น เพราะการที่สารกรองและคอลลอยด์มีประจุต่างกัน เป็นการส่งเสริมการดูดติดผิวให้เกิดขึ้นอย่างเหนียวแน่น ในบางครั้งคอลลอยด์ต่าง ๆ อาจรวมกันเป็นฟล็อก ทำให้มีขนาดใหญ่มากจนสามารถตกตะกอนเป็นสารกรอง หรือติดค้างอยู่ในระหว่างช่องว่าง (ฉัตรสินี, 2545)

5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุชาดา (2546) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียในน้ำเสียจากตู้เลี้ยงปลาโดยการกรองด้วยหินภูเขาไฟโดยปรับพีเอช และขึ้นความสูงของซีโอไลต์ให้เหมาะสม พบว่าที่ระดับความสูงของหินภูเขาไฟที่สูงกว่าจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียได้มากขึ้น และในทุก ๆ อัตราการกรอง ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียได้มากกว่า 95.0 เปอร์เซ็นต์

Aiyuk et al. (2004) ศึกษาการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนจากน้ำเสียชุมชนโดยใช้คลินอพิไทโลไลต์ ซึ่งเป็นซีโอไลต์ตามธรรมชาติ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนขึ้นอยู่กับอัตราการไหล โดยประสิทธิภาพจะลดลง 95- 47% ตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น

วิทยา (2544) ได้ศึกษาการใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติ อันได้แก่ Clinoptilolite, Smectite และ Pumice เพื่อการกำจัดไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมไนโตรเจน และเจดัลท์ไนโตรเจน ในน้ำเสียฟาร์มสุกร โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุและกระบวนการดูดซับ โดยใช้รูปแบบการทดลองในห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษาพบว่า Clinoptilolite สามารถทำงานในช่วง pH ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาคือ 3.0- 8.0 จะเหมาะสมที่สุดในการกำจัดไนโตรเจน แต่การเพิ่มขึ้นของเวลาในการทำปฏิกิริยาจะช่วยลดแอมโมเนียมไนโตรเจนได้น้อยมาก และได้เลือก Clinoptilolite มากำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำเสียฟาร์มสุกร พบว่า ในกรณีที่ปรับ pH เป็น 6.0 พบว่าสามารถลดแอมโมเนียมไนโตรเจน และทีเคเอ็น ได้ 91.48% และ 87.70 % ตามลำดับ และเมื่อไม่ปรับ pH (pH 7.4) พบว่าสามารถลดสารดังกล่าวได้ 93.00% และ 90.27% ตามลำดับ

บุญมาส (2542) ศึกษาการกำจัดแอมโมเนียและฟอสเฟตในน้ำทิ้งชุมชน โดยการแลกเปลี่ยนไอออน พบว่าที่พีเอชต่างกันมีผลให้ความสามารถในการกำจัดแอมโมเนีย และฟอสเฟตต่างกัน โดยที่พีเอช 7 มีประสิทธิภาพดีที่สุด คือ ร้อยละ 96.08 และ 95.26 ตามลำดับ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นและอัตราการไหลของน้ำทิ้งเข้าคอลัมน์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียและฟอสเฟตจะลดลง และเรซินใหม่และเรซินที่ผ่านการคืนสภาพแล้ว จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย และฟอสเฟตไม่ต่างกัน (อ้างอิงจาก จีรศักดิ์, 2547)

ทัศนีย์ และคณะ (2540) ได้ศึกษาการใช้ซีโอไลต์เปรียบเทียบกับวัสดุอื่น ๆ ในระบบชั้นดินก่อกองน้ำเสียจากห้องสุขาบริเวณโรงอาหารกลางมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ผลการทดลองพบว่า การใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติในระบบชั้นดินก่อกองน้ำ เพื่อบำบัดน้ำเสียจากห้องสุขามีประสิทธิภาพในการลดค่าบีโอดี ซีโอดี ในโตรเจนทั้งหมด และ แอมโมเนียในโตรเจนได้ร้อยละ 94.7, 92.3, 99.3 และ 99.8 ตามลำดับ โดยมีปริมาณการรับค่าภาระเท่ากับ 432.2 ลิตร/ ตร.ม./ วัน แต่สามารถลดปริมาณของแข็งแขวนลอยได้เพียงร้อยละ 76.6 เท่านั้น

Kithome et al. (1999) ได้ศึกษาผลของ pH ที่มีต่อการ Adsorption โดยใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติ คือ Clinoptilolite ผลการศึกษาพบว่าแร่ซีโอไลต์มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุได้สูง และมีพื้นที่ผิวมาก จึงนำเอาคุณสมบัตินี้มาใช้ประโยชน์เพื่อที่จะจับแอมโมเนียมไอออนไม่ให้สลายไปกับกำมะถันทำปุ๋ยคอก ทำการศึกษาผลที่ pH 4, 5, 6 และ 7 โดยนำข้อมูลมาใช้กับแบบจำลองของ Langmuri Freundlich และ Tem Rin Isotermis แบบจำลองเหล่านี้สามารถอธิบายข้อมูลในการทดลองนี้ได้โดยจัดสมการในรูปของ pH ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าจำนวนแอมโมเนียมไอออนที่ถูกดูดซับ จะเพิ่มขึ้นตาม pH จากแบบจำลอง one- surface ของ Langmuri อธิบายได้ว่าความสามารถในการถูกดูดซับของแอมโมเนียมไอออนโดยซีโอไลต์จะเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นกับ pH ซึ่งถ้าสามารถดูดซับแอมโมเนียมไอออนได้มากก็จะเป็นการช่วยลดการสูญเสียไนโตรเจนที่ระเหยไปในกระบวนการทำปุ๋ยหมัก

Qasim (1999) กล่าวว่าเมื่อน้ำเสียไหลผ่านชั้นของ Clinoptilolite ซึ่งเป็นซีโอไลต์ชนิดหนึ่ง จะจับเอาแอมโมเนียมไอออน และไอออนตัวอื่น ๆ เช่น โพแทสเซียม ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของ Clinoptilolite กับแอมโมเนียมไอออน จะมีค่าระหว่าง 0.14- 0.38 meq/g เมื่อใช้ซีโอไลต์จนอิ่มตัวแล้ว สามารถ regenerate ด้วย lime slury ที่มี Sodium Chloride

Booker et al. (1996) ได้ศึกษาการกำจัดแอมโมเนีย โดยการดูดซับของออสเตรเลียน ซีโอไลต์ โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์ สามารถลดปริมาณแอมโมเนียไอออนจาก 25- 50 mg/L จนถึงระดับต่ำกว่า 1 mg/ L และประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียจะแปรผกผันกับอัตราการไหล

Booker et al. (1996) ได้ใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติของประเทศออสเตรเลีย (Natural Australian Zeolite) ในการกำจัดแอมโมเนีย โดยทำการทดลองใน pilot scale ผลการทดลองพบว่าสามารถลดแอมโมเนียไอออนในน้ำทิ้งจาก 25- 50 มิลลิกรัม $\text{NH}_4\text{-N}$ / ลิตร ภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสม ความสามารถในการดูดซับอยู่ที่ประมาณ 4.5 มิลลิกรัม $\text{NH}_4\text{-N}$ / ลิตร ของซีโอไลต์

Ames (1987) and Mercer (1970) กล่าวว่าเมื่อน้ำเสียไหลผ่านชั้นของ Clinoptilolite มีคุณสมบัติอย่างดียิ่งในการกำจัดแอมโมเนียไอออนของน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการบำบัด (Municipal Sewage Treatment Effluent) และมีการนำกระบวนการนี้มาใช้อย่างแพร่หลายกับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมในสหรัฐอเมริกา

Peter and Base (1995) ได้ศึกษาการขยายพันธุ์ของปลา Trout โดยการนำกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้ Clinoptilolite ควบคุมปริมาณแอมโมเนียในการหมุนเวียนน้ำในบ่อพักปลา จะให้ผลดีกว่าเมื่อใช้วิธีการควบคุมแอมโมเนียโดยการออกซิไดซ์โดยแบคทีเรีย (Bacterial Oxidation Method)

Torii (1974) ใช้ Clinoptilolite โรยลงบนคอกที่ใช้เลี้ยงสุกรเพื่อดูดซับปัสสาวะ และของเหลวต่าง ๆ ที่พื้นคอก ทำให้พื้นคอกแห้งสะอาด และกลิ่นลดลง Nishimaru (1973) อ้างโดย Mumpton และ Fishman (1977) การใช้ Mordenite ซึ่งเป็นซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหนึ่งใส่ลงในน้ำเสียซึ่งเป็นของเหลวจากฟาร์มสุกร ทำให้ปริมาณสารแขวนลอยลดลง ปริมาณแอมโมเนียไอออน ค่าบีโอดี และซีโอดีมีค่าลดลง (พงศธร, 2537)

Mercer (1970) รายงานการใช้ Clinoptilolite ในการกำจัดแอมโมเนียในน้ำเสียด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนประจุ โดยสามารถกำจัดแอมโมเนียได้ถึงร้อยละ 93- 99 จากน้ำที่ออกมาจากระบบบำบัดขั้นที่ 2 (Clarified Secondary effluent) ที่มีแอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ 10- 19 mg/L ซึ่งในการทดลองทั้งน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง และสามารถที่จะ regenerate ด้วยของผสมระหว่าง NaCl CaCl_2 – CaCO_3 จากนั้นใช้วิธี Air Stripping เพื่อดูดซับแอมโมเนียออกไป

อุปกรณ์และวิธีการ

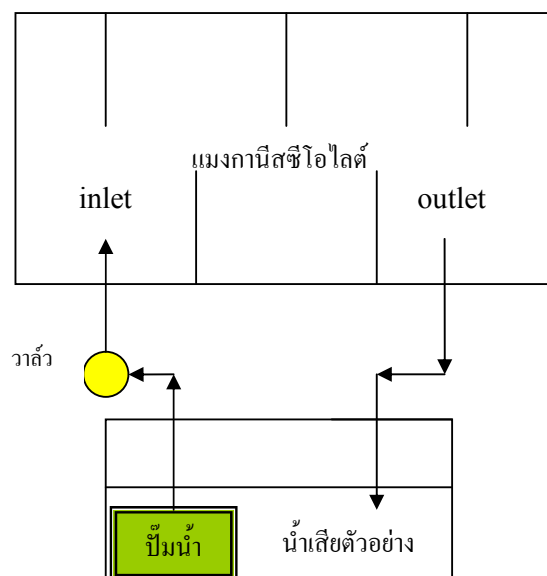
อุปกรณ์

1. แบบจำลองคลองวนเวียนที่บรรจุแมงกานีสไฮดรอกไซด์แบบเม็ด
2. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Spectrophotometer Shimadzu UV-1700)
3. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter YSI model 100)
4. เครื่องชั่งไฟฟ้าแบบละเอียด
5. นาฬิกาจับเวลา
6. ถังเก็บตัวอย่างน้ำเสีย
7. เครื่องแก้วสำหรับการวิเคราะห์
8. เครื่องดูดสุญญากาศพร้อมอุปกรณ์การกรอง
9. กระดาษกรอง
10. ตะแกรงร่อนขนาดตาขนาดต่าง ๆ
11. เครื่องปั้มน้ำ
12. Water Bath
13. Oven สำหรับอบสารเคมี
14. เครื่องเขย่าหลอดทดลอง (Vortex)
15. ถังไฟเบอร์กลาสขนาด 60- 100 ลิตร
16. สารเคมี
 - 16.1 Phenol
 - 16.2 Sodium nitroprusside
 - 16.3 Potassium carbonate (K_2CO_3)
 - 16.4 di-Sodium hydrogen phosphate (Na_2HPO_4)
 - 16.5 Antiformin
 - 16.6 Sodium chloride (NaCl)
 - 16.7 Ammonium sulfate ($(NH_4)_2SO_4$)
 - 16.8 Manganese Zeolite
 - 16.9 Sodium chloride

วิธีการ

1. ขั้นตอนเตรียมการทดลอง

1.1 สร้างแบบจำลองคลองวนเวียน (Oxidation ditch model) จำนวน 3 ชุด (ภาพที่ 9) แบบจำลองคลองวนเวียนในงานวิจัยนี้เป็นระบบจำลองที่ได้ออกแบบขึ้นให้มีการหมุนเวียนน้ำเสียเข้า-ออก(inlet-outlet) ภายในแบบจำลองบรรจุไฮโดรไลต์แบบเม็ดไว้เพื่อใช้ในการดูดซับและแลกเปลี่ยนไอออนกับแอมโมเนียไนโตรเจน ใช้โดยใช้ปั๊มน้ำเป็นแรงดันน้ำเสียตัวอย่างเข้าสู่ระบบและมีวาล์วปรับระดับอัตราการไหล ดังภาพที่ 8 แสดงผังแบบจำลองคลองวนเวียน สำหรับในการใช้แบบจำลองนี้ เพื่อเป็นการให้น้ำเสียสามารถสัมผัสกับเม็ดของแมงกานีสไฮโดรไลต์ที่บรรจุไว้ภายในได้ดีและทั่วถึง เป็นการป้องกันการอุดตันของระบบทางเดินน้ำเสีย และสามารถนำแบบจำลองคลองวนเวียนนี้ไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติได้ทันที



ภาพที่ 8 ผังแบบจำลองคลองวนเวียน



ภาพที่ 9 แบบจำลองคลองวนเวียนขนาด 33,663 ลบ.ชม. (Oxidation Ditch Model)

1.2 เก็บตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อฝังฟาร์มสุกรและไก่ (Oxidation pond) ซึ่งเป็นบ่อบำบัดบ่อสุดท้ายก่อนที่จะปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ



ภาพที่ 10 โรงเลี้ยงสุกร



ภาพที่ 11 โรงเลี้ยงไก่



ภาพที่ 12 บ่อเกรอะสำหรับพักน้ำเสีย



ภาพที่ 13 บ่อฝั่ง (Oxidation Pond)



ภาพที่ 14 ลักษณะน้ำเสียจากบ่อฝั่งฟาร์มสุกรและไก่

2. การทำการทดลอง

2.1 การทดลองการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ด้วยเมกกานีสซีโอไลต์ขนาดเล็ก (ขนาด 1.5 - 5.0 มิลลิเมตร)



ภาพที่ 15 เมกกานีสซีโอไลต์ขนาดเล็ก (ขนาด 1.5 – 5.0 มิลลิเมตร)

การทดลองที่ 2.1.1 ทดสอบอัตราการไหลที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนด้วยเมกกานีสซีโอไลต์ขนาดเล็ก

ทำการทดลองโดยใช้เครื่องปั้มน้ำดูดน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ ปริมาตรทั้งหมด 12 ลิตร ผ่านระบบแบบจำลองคลองวนเวียนที่มีเมกกานีสซีโอไลต์ขนาดเล็กบรรจุเต็มพื้นที่ของระดับความสูงที่ 0.5 ของความสูงแบบจำลอง ปรับอัตราการไหลด้วยระบบวาล์ว ให้มีอัตราการไหลที่ 20, 40, 60 และ 80 ลิตรต่อชั่วโมง ใช้เวลาทดสอบ 60 นาที เมื่อน้ำเสียไหลวนเวียนอยู่ในแบบจำลองครบระยะเวลาที่กำหนดแล้ว ทำการตรวจสอบการลดลงของแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำตัวอย่าง

การทดลองที่ 2.1.2 ทดสอบระยะเวลาการสัมผัสของน้ำเสียกับเมงกานีสซีโอไลด์ที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนด้วยเมงกานีสซีโอไลด์ลักษณะ

ทำการทดลองโดยใช้เครื่องปั้มน้ำคูดน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ ปริมาตร 12 ลิตร ผ่านระบบแบบจำลองคลองวนเวียนที่มีเมงกานีสซีโอไลด์ลักษณะบรรจุเต็มพื้นที่ของระดับความสูงที่ 0.5 ของแบบจำลองสูงจำลอง ปรับอัตราการไหลด้วยระบบวาล์ว ให้มีอัตราการไหลเท่ากับระดับที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 2.1.1 ใช้เวลาทดสอบที่ 30, 60 และ 120 นาที เมื่อน้ำเสียไหลวนเวียนอยู่ในแบบจำลองครบระยะเวลาที่กำหนดแล้ว ทำการตรวจสอบการลดลงของแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำตัวอย่าง

การทดลองที่ 2.1.3 ทดสอบหาปริมาณเมงกานีสซีโอไลด์ลักษณะที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน

ทำการทดลองโดยใช้เครื่องปั้มน้ำคูดน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ ปริมาตร 12 ลิตร ผ่านระบบแบบจำลองคลองวนเวียนที่มีเมงกานีสซีโอไลด์ลักษณะบรรจุเต็มพื้นที่ของระดับความสูงที่แตกต่างกัน คือที่ 0.25, 0.5 และ 0.75 ของความสูงแบบจำลอง ใช้อัตราการไหลและระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 2.1.1 และ 2.1.2 เมื่อน้ำเสียไหลวนเวียนอยู่ในแบบจำลองครบระยะเวลาที่กำหนดแล้ว ทำการตรวจสอบการลดลงของแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำตัวอย่าง

ทำการตรวจสอบปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสียทุกครั้งก่อนผ่านระบบแบบจำลองคลองวนเวียนในการทดลองที่ 2.1.1 ถึง 2.1.3 และทำการทดลองชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ

2.2 การทดลองการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกร และไก่ ด้วย เมงกานีสซีโอไลต์กำหนดขนาด (ขนาด 1.5 มิลลิเมตร)



ภาพที่ 16 เมงกานีสซีโอไลต์กำหนดขนาด (ขนาด 1.5 มิลลิเมตร)

การทดลองที่ 2.2.1 ทดสอบอัตราการไหลที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน
ด้วยเมงกานีสซีโอไลต์กำหนดขนาด

ทำการทดลองโดยใช้เครื่องปั้มน้ำคูดน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ ปริมาตร 12 ลิตร ผ่านระบบ
แบบจำลองคลองวนเวียนที่มีเมงกานีสซีโอไลต์กำหนดขนาดบรรจุเต็มพื้นที่ของระดับความสูงที่
0.5 ของความสูงแบบจำลอง ปรับอัตราการไหลด้วยระบบวาล์ว ให้มีอัตราการไหลที่ 20, 40, 60
และ 80 ลิตรต่อชั่วโมง ใช้เวลาทดสอบ 60 นาที เมื่อน้ำเสียไหลวนเวียนอยู่ในแบบจำลองครบ
ระยะเวลาที่กำหนดแล้ว ทำการตรวจสอบการลดลงของแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำตัวอย่าง

การทดลองที่ 2.2.2 ทดสอบระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสมของน้ำเสียในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนด้วยเมงกานีสซัลไฟด์กำหนดขนาด

ทำการทดลองโดยใช้เครื่องปั้มน้ำคูดน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ ปริมาตร 12 ลิตร ผ่านระบบแบบจำลองคลองวนเวียนที่มีเมงกานีสซัลไฟด์กำหนดขนาดบรรจุเต็มพื้นที่ของระดับความสูงที่ 0.5 ของความสูงแบบจำลองปรับอัตราการไหลด้วยระบบวาล์ว ให้มีอัตราการไหลเท่ากับระดับที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 2.2.1 ใช้เวลาทดสอบที่ 30, 60 และ 120 นาที เมื่อน้ำเสียไหลวนเวียนอยู่ในแบบจำลองครบระยะเวลาที่กำหนดแล้ว ทำการตรวจสอบการลดลงของแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำตัวอย่าง

การทดลองที่ 2.2.3 ทดสอบหาปริมาณเมงกานีสซัลไฟด์กำหนดขนาดที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน

ทำการทดลองโดยใช้เครื่องปั้มน้ำคูดน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ ปริมาตร 12 ลิตรผ่านระบบแบบจำลองคลองวนเวียนที่มีเมงกานีสซัลไฟด์กำหนดขนาดบรรจุเต็มพื้นที่ ของระดับความสูงแตกต่างกัน 3 ระดับ คือที่ 0.25, 0.5 และ 0.75 ของความสูงแบบจำลอง ใช้อัตราการไหลและระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 2.2.1 และ 2.2.2 เมื่อน้ำเสียไหลวนเวียนอยู่ในแบบจำลองครบระยะเวลาที่กำหนดแล้ว ทำการตรวจสอบการลดลงของแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำตัวอย่าง

ทำการตรวจสอบปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสียทุกครั้งก่อนผ่านระบบแบบจำลองคลองวนเวียนในการทดลองที่ 2.2.1 ถึง 2.2.3 และทำการทดลอง 3 ซ้ำ ในแต่ละชุดการทดลอง

การทดลองที่ 2.3 ทำการทดลองการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจน ด้วยเมงกานีสซีโอไลต์ ในแบบจำลองคลองวนเวียนแบบต่อเนื่อง โดยนำปัจจัยที่มีความเหมาะสมที่สุดในการกำจัด แอมโมเนียในโตรเจน ซึ่งได้จากการทดลองที่ 2.1 และ การทดลองที่ 2.2 มาใช้ในการทดลองนี้

นำน้ำเสียฟาร์มสุกร และไก่ มาไหลผ่านแบบจำลองคลองวนเวียนที่บรรจุเมงกานีส ซีโอไลต์ชนิดที่เหมาะสม ในระดับความสูงหรือปริมาณที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 2.1 และ 2.2 รวมทั้งใช้อัตราการไหล และระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 2.1 และ 2.2 เช่นกัน โดยไม่มีการเปลี่ยนเมงกานีสซีโอไลต์ในแบบจำลอง ปล่อยน้ำเสียผ่านแบบจำลอง แบบต่อเนื่อง และไม่ให้น้ำเสียที่ผ่านคลองวนเวียนแล้ว ไหลกลับลงถึงน้ำเสียเริ่มต้น คอยเติมน้ำเสีย ในถึงน้ำเสียเริ่มต้นตลอดเวลาเพื่อไม่ให้ขาดระยะการไหล ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านแบบจำลอง ทุก ๆ 30 นาที เพื่อตรวจสอบการลดลงของแอมโมเนียในโตรเจนของน้ำตัวอย่าง และเมื่อเมงกานีส ซีโอไลต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนลดลงจนถึงขีดต่ำสุด (ต่ำกว่าร้อยละ 10 โดย ประมาณ) จะทำการฟื้นฟูสภาพหรือรีเจนเนอเรต (regenerate) เมงกานีสซีโอไลต์ด้วยการนำไป แช่ในสารละลายเกลือแกง (NaCl) 25 กรัมต่อลิตร ทิ้งไว้ 30 นาที นำเมงกานีสซีโอไลต์ที่ผ่านการ ฟื้นฟูสภาพ (regenerated) แล้ว มาทำการทดสอบการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนแบบต่อเนื่องอีกครั้ง ทำการทดลองจนกระทั่งเมงกานีสซีโอไลต์หมดประสิทธิภาพการใช้งานอีกต่อไป

ทำการตรวจสอบปริมาณแอมโมเนียในโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสียทุกครั้งก่อนผ่านระบบ แบบจำลองคลองวนเวียน ในการทดลองที่ 2.1 ถึง 2.3 ทำการทดลองชุดการทดลองละ 3 ชั่วโมง และได้ เก็บตัวอย่างสารละลายเกลือแกง (NaCl) ที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ (regenerate) เมงกานีสซีโอไลต์แล้ว มาตรวจสอบปริมาณแอมโมเนียในโตรเจน ทุกครั้ง

2.4 การวิเคราะห์ค่าไอโซเทอร์มการดูดซับ (Adsorption Isoterm) ในการกำจัด แอมโมเนียในโตรเจน ด้วยเมงกานีสซีโอไลต์ชนิดที่เหมาะสมในแบบจำลองคลองวนเวียน ได้นำ อัตราการไหล และระยะ เวลาการสัมผัสที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 2.1 และ 2.2 มาใช้ในการ ทดสอบ และทำการวิเคราะห์ค่าไอโซเทอร์มการดูดซับจากการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนจากน้ำ เสียฟาร์มสุกรและไก่ จากปริมาณเมงกานีสซีโอไลต์ที่บรรจุ ในแบบจำลองคลองวนเวียนที่ แตกต่างกัน คือที่ระดับความสูง 0.25, 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.75 ของความสูงแบบจำลองคลองวนเวียน

3. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

การวิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia-N) ด้วยวิธี Modified Indophenol (ประยุกต์จากวิธีฟินเนต) (Nimura, 1973) วิธีการวิเคราะห์ดังนี้

1. ผสมสารละลาย Phenol และ Sodium nitroprusside ในอัตราส่วน 50: 1 (สารละลาย-a)
2. ผสมสารละลาย Potassium carbonate และ Antiformin ในอัตราส่วน 100: 5 (สารละลาย-b)
3. นำตัวอย่างมา 10 ml เติมสารละลาย -a 1 ml และสารละลาย -b 2 ml
4. ทิ้งไว้ 30 นาที
5. แช่ใน Water Bath (ที่ 75 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 30 นาที เขย่าตลอดเวลา
6. ลดอุณหภูมิในน้ำไหล
7. ถ้าเกิดตะกอนทิ้งให้ตกตะกอนก่อนด้วย Centrifuge หรือทิ้งค้างคืน
8. นำไปวัดค่า Extinction of Supernatant ที่ Wavelength 625.00 millimicron (553- 677 millimicron) ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Spectrophotometer Shimadzu UV-1700) (ภาพที่ 17)
9. วิเคราะห์ค่าที่ได้จาก Standard Curve

เตรียมสารละลายมาตรฐาน (Ammonia-Nitrogen Standard Solution) เพื่อใช้สร้างเส้นกราฟมาตรฐาน โดยอบแห้ง $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ที่อุณหภูมิ 105- 110 องศาเซลเซียส ชั่งสาร 4.720 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปราศจากไอออน ปริมาตรให้เป็น 1,000 มล. (ความเข้มข้น 1,000 ppm) เก็บไว้ในตู้เย็น เลือกใช้ความเข้มข้นระดับต่าง ๆ คือ 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 ppm ตามลำดับ



ภาพที่ 17 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Spectrophotometer Shimadzu UV-1700)

วิธีวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$)

$$\text{ประสิทธิภาพในการกำจัด } \text{NH}_3\text{-N } (\%) = \frac{A - B}{A} \times 100$$

A = ปริมาณ $\text{NH}_3\text{-N}$ ในน้ำเสียก่อนผ่านแบบจำลองคลองวนเวียน (มิลลิกรัม/ลิตร)

B = ปริมาณ $\text{NH}_3\text{-N}$ ในน้ำเสีย หลังผ่านแบบจำลองคลองวนเวียน (มิลลิกรัม/ลิตร)

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลทางสถิติด้วย One- Way Analysis of Variance ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างชุดข้อมูลด้วยวิธี Duncan's และทำการวิเคราะห์ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเพื่อใช้อธิบายลักษณะทั่วไปของข้อมูลแบบ CRD (Completely Randomize Design)

5. ระยะเวลาและสถานที่ทำการวิจัย

ทำการวิจัยตั้งแต่เดือนกรกฎาคม 2550 ถึง เดือนมกราคม 2552 รวมระยะเวลาทำการวิจัย และวิเคราะห์ผล 1 ปี 7 เดือน โดยทำการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง ที่ห้องปฏิบัติการของ ภาควิชาชีววิทยาประมง และภาควิชาการจัดการประมง คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ด้วย เมงกานีสซีโอไลต์ในแบบจำลองคลองวนเวียนขนาด 34,633 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยทำการทดลอง แบบเป็นขั้นตอนต่อเนื่อง เพื่อศึกษาความสามารถและผลของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อัตราการ ไหลน้ำเสีย ระยะเวลาการสัมผัสของเมงกานีสซีโอไลต์กับน้ำเสีย ขนาด และปริมาณของเมงกานีส ซีโอไลต์ ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจน ซึ่งได้ผลการทดลอง ดังนี้

1. ผลการทดลอง ในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ ด้วยเมงกานีส ซีโอไลต์ลักษณะขนาด (ขนาด 1.5 - 5.0 มิลลิเมตร)

1.1 การทดสอบอัตราการไหลที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วยเมงกานีส ซีโอไลต์ในแบบจำลองคลองวนเวียน ด้วยเมงกานีสซีโอไลต์ลักษณะขนาด

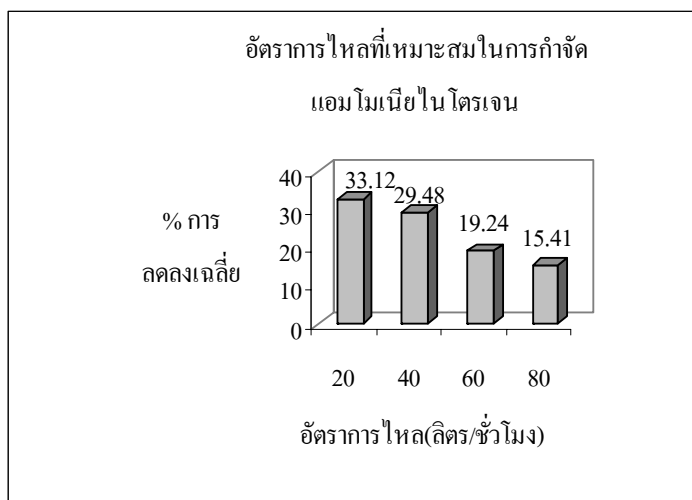
จากการทำการทดสอบอัตราการไหลที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วย เมงกานีสซีโอไลต์ลักษณะขนาดในแบบจำลองคลองวนเวียนโดยใช้เครื่องปั้มน้ำคู่น้ำเสียจากฟาร์ม สุกร และไก่ มีปริมาตรทั้งหมด 12 ลิตร ผ่านระบบแบบจำลองคลองวนเวียนที่บรรจุเมงกานีส ซีโอไลต์ที่ระดับความสูง 0.5 ของความสูงแบบจำลอง ปรับอัตราการไหลด้วยระบบวาล์วให้มีอัตรา การไหลที่ 20, 40, 60 และ 80 ลิตรต่อชั่วโมง ใช้เวลาทดสอบ 60 นาที ผลการตรวจสอบการลดลงของ แอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสียตัวอย่าง พบว่า เมงกานีสซีโอไลต์สามารถกำจัดแอมโมเนีย ในโตรเจนที่อัตราการไหลดังกล่าว ได้เฉลี่ยร้อยละ 33.12, 29.48, 19.24 และ 15.41 ตามลำดับ ดัง ตารางที่ 8 โดยที่อัตราการไหลที่ 20 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่ช้าที่สุดของการทดลอง เป็นอัตราการไหลที่ให้ประสิทธิภาพและเหมาะสมที่สุดในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วย เมงกานีสซีโอไลต์ลักษณะขนาดในแบบจำลองคลองวนเวียน ทั้งนี้สอดคล้องกับ Aiyuk. และ คณะ (2004) ซึ่งได้ศึกษาการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนจากน้ำเสียชุมชนโดยการใช้ซีโอไลต์ตาม ธรรมชาติชนิด Clinoptilolite พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนจะขึ้นอยู่กับ อัตราการไหล อัตราการไหลต่ำจะมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่าอัตราการไหลสูง โดย ประสิทธิภาพจะลดลง 95- 47% ตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกับ มั่นสิน (2527) ที่กล่าวว่า ใน อัตราการไหลช้า การแลกเปลี่ยนไอออนจะมีประสิทธิภาพดีกว่าอัตราการไหลเร็ว แต่ต้องไม่ต่ำกว่า 1-2 gpm/ ft³ และสอดคล้องกับ Qasim (1999) และ พงศธร (2535) ที่พบว่า เมื่อน้ำเสียไหลผ่านชั้น ของ Clinoptilolite ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของ Clinoptilolite กับแอมโมเนียจะมีค่า

ระหว่าง 0.14-0.38 meq/g โดยเมื่อปริมาณของน้ำไหลผ่านเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจะลดลง เนื่องจากมีสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์เข้ามาแทนที่ในรูพรุนของซีโอไลต์มากขึ้น นอกจากนี้ ยังสอดคล้องกับ Arrak et al (2006) ซึ่งได้ศึกษาการใช้ซีโอไลต์ร่วมกับทรายไม่กวดขนาดในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสียจากฟาร์มสุกร โดยให้น้ำไหลผ่านคอลัมน์ และได้สรุปผลการศึกษาไว้ว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนในแต่ละคอลัมน์ เมื่อมีปริมาณน้ำเสียไหลผ่านคอลัมน์มากขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนจะลดลงในทุก ๆ คอลัมน์

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วยเมงกานีสซีโอไลต์
ลดขนาดในแบบจำลองคลองวนเวียน ที่อัตราการไหลของน้ำเสียในระดับต่าง ๆ

อัตราการไหลของ น้ำเสีย (ลิตร/ชั่วโมง)	ค่าแอมโมเนียในโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$)				
	ซ้ำที่	ความเข้มข้นหลังผ่าน แบบจำลอง (มก./ล.)	ความเข้มข้นที่ ลดลง (มก./ล.)	ลดลง ร้อยละ	ลดลงเฉลี่ยร้อยละ
20	1	13.09	6.91	34.53 ^a	33.12 ^a
	2	13.61	6.39	31.95 ^a	
	3	13.43	6.57	32.87 ^a	ค่า S.D. = 1.31
40	1	14.21	5.79	28.95 ^b	29.48 ^b
	2	14.11	5.89	29.45 ^b	
	3	13.99	6.01	30.05 ^b	ค่า S.D. = 0.55
60	1	16.19	3.81	19.05 ^c	19.24 ^c
	2	16.02	3.98	19.89 ^c	
	3	16.24	3.76	18.79 ^c	ค่า S.D. = 0.57
80	1	17.05	2.95	14.73 ^d	15.41 ^d
	2	16.65	3.35	16.74 ^d	
	3	17.05	2.95	14.76 ^d	ค่า S.D. = 1.15

หมายเหตุ : ค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียในโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 20.0 มก./ล.
ค่าพืชน้ำเสียเท่ากับ 7.85 ที่อุณหภูมิห้อง ค่า S.D. = Standard Deviation (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)
ค่า ^a, ^b, ^c และ ^d แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ P value < 0.05



ภาพที่ 18 ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วยเมกกานีสซีโอไลต์คละขนาด ที่อัตราการไหลของน้ำเสียในระดับต่าง ๆ

1.2 ผลการทดสอบระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วยเมกกานีสซีโอไลต์ในแบบจำลองคลองวนเวียนด้วยเมกกานีสซีโอไลต์คละขนาด

ผลการทดสอบระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจน ด้วยเมกกานีสซีโอไลต์คละขนาดในแบบจำลองคลองวนเวียน ซึ่งทำการทดลองโดยใช้เครื่องปั้มน้ำดูดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรและไก่ ปริมาตรทั้งหมด 12 ลิตร ผ่านระบบแบบจำลองคลองวนเวียนที่มีเมกกานีสซีโอไลต์บรรจุที่ระดับความสูง 0.5 ของความสูงแบบจำลอง ปรับอัตราการไหลด้วยระบบวาล์วให้มีอัตราการไหลเท่ากับระดับที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 2.1.1 คือ 20 ลิตร/ ชั่วโมง พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการสัมผัสระหว่างสารแลกเปลี่ยนไอออน (เมกกานีสซีโอไลต์) กับสารละลาย (น้ำเสีย) ที่ช่วงเวลาที่สัมผัสนานจะทำให้ความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนได้ดีกว่าช่วงเวลาที่สัมผัสเร็ว ดังผลการทดสอบที่ 30, 60 และ 120 นาที สามารถกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนจากค่าเริ่มต้นได้เฉลี่ยร้อยละ 15.39, 27.56 และ 39.54 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 9 โดยระยะเวลาสัมผัสที่ 120 นาที เป็นระยะเวลาสัมผัสที่ให้ประสิทธิภาพและความเหมาะสมที่สุดในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนจากน้ำเสียจากฟาร์มสุกรและไก่

จากการทดลองชี้ให้เห็นว่า ช่วงเวลาที่ใช้ในการสัมผัสนาน จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนดีกว่าระยะเวลาในการสัมผัสเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากการแลกเปลี่ยนไอออนจะเกิดขึ้นบริเวณโพรงของซีโอไลต์ การเพิ่มระยะเวลาสัมผัสเป็น การทำให้สารละลายน้ำเสียสามารถ

ผ่านเข้าไปยังบริเวณพื้นที่แลกเปลี่ยนไอออนได้อย่างทั่วถึง และมีระยะเวลาสัมผัสเพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ ขณะที่ระยะเวลาสัมผัสเร็วสารละลายไม่สามารถทำปฏิกิริยากับซีโอไลต์ได้อย่างทั่วถึงและนานพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนเกิดได้อย่างสมบูรณ์ ขณะที่ระยะเวลาสัมผัสที่สั้น สารละลายไม่สามารถทำปฏิกิริยากับซีโอไลต์ได้อย่างทั่วถึงและนานพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนเกิดได้อย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม เมื่อปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนเมื่อเกิดขึ้นสมบูรณ์แล้ว การเพิ่มระยะเวลาการสัมผัส จะไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างซีโอไลต์กับแอมโมเนียเพิ่มขึ้น (มณีวรรณ, 2550)

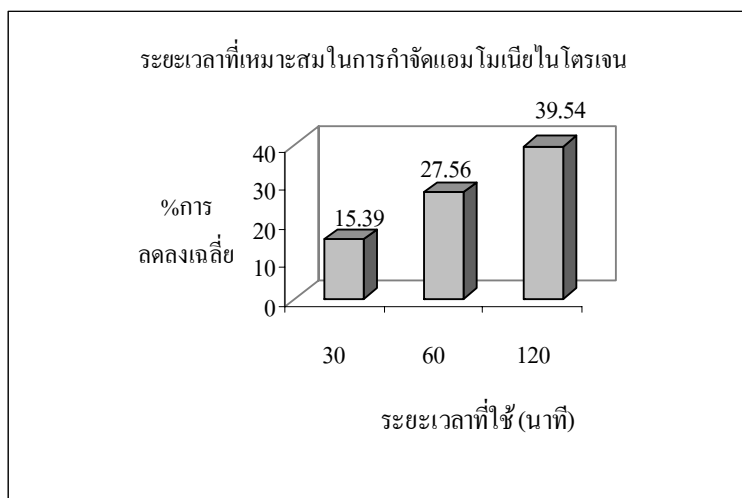
ตารางที่ 9 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วยเมงกานีสซีโอไลต์
ลดขนาดในแบบจำลองคลองวนเวียน ที่ช่วงระยะเวลาการสัมผัสต่าง ๆ

ช่วงเวลาที่ใช้ทดสอบ (นาท)	ค่าแอมโมเนียในโตรเจน (NH ₃ -N)				
	ซ้ำที่	ความเข้มข้นหลัง ผ่านแบบจำลอง (มก./ล.)	ความเข้มข้น ที่ลดลง (มก./ล.)	ลดลง ร้อยละ	ลดลงเฉลี่ยร้อยละ
30	1	17.46	3.17	15.36 ^a	15.39 ^a
	2	17.24	3.38	16.41 ^a	
	3	17.65	2.97	14.42 ^a	ค่าS.D. = 0.99
60	1	14.79	5.83	28.28 ^b	27.56 ^b
	2	15.03	5.60	27.13 ^b	
	3	15.00	5.63	27.28 ^b	ค่าS.D. = 0.63
120	1	12.23	8.40	40.70 ^c	39.54 ^c
	2	13.03	7.59	36.82 ^c	
	3	12.15	8.48	41.11 ^c	ค่าS.D. = 2.37

หมายเหตุ : ค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียในโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 20.63 มก./ล.

ค่าเพอซน้ำเสียเท่ากับ 7.88 ที่อุณหภูมิห้อง ค่า S.D. = Standard Deviation (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

ค่า^{a, b} และ^c แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ P value<0.05



ภาพที่ 19 ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วยแมงกานีสซัลไฟด์คละขนาด
ในช่วงระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ

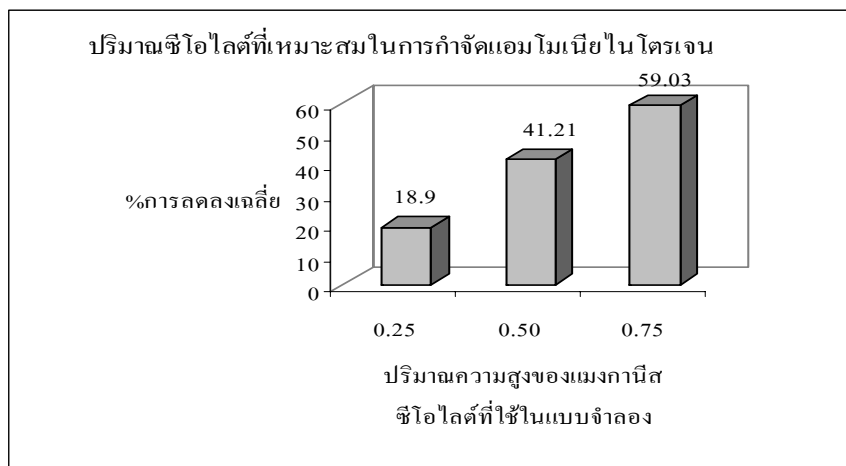
1.3 ผลการทดสอบปริมาณแมงกานีสซัลไฟด์คละขนาดที่เหมาะสมในการกำจัด แอมโมเนียในโตรเจนในแบบจำลองคลองวนเวียน

จากการทดสอบหาปริมาณแมงกานีสซัลไฟด์คละขนาดที่เหมาะสมในการกำจัด
แอมโมเนียในโตรเจนในแบบจำลองคลองวนเวียน พบว่าปริมาณแมงกานีสซัลไฟด์คละขนาดที่ใช้
ในการทดสอบที่ความสูง 0.25, 0.5 และ 0.75 ของความสูงแบบจำลอง ให้ผลการกำจัดแอมโมเนีย
ในโตรเจนจากตัวอย่างน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ ได้เฉลี่ยร้อยละ 18.90, 41.25 และ 59.03 ตามลำดับ
ดังแสดงในตารางที่ 10 โดยปริมาณแมงกานีสซัลไฟด์คละขนาดบรรจุที่ระดับความสูง 0.75 ของ
ความสูงแบบจำลอง หรือมีปริมาตรแมงกานีสซัลไฟด์เท่ากับ 25,224.75 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งเป็น
ปริมาณที่มากที่สุดของการทดลอง นับเป็นปริมาณของแมงกานีสซัลไฟด์ที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด
และเหมาะสมที่สุดในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนในแบบจำลองคลองวนเวียน ดังนั้น จึงเห็นว่า
ปริมาณแมงกานีสซัลไฟด์ที่ใช้ยังมีปริมาณมากเท่าใด จะยังสามารถกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนได้
มากขึ้นตามลำดับ เนื่องจากจะทำให้มีพื้นที่ในการดูดซับเพิ่มขึ้นขณะที่ปริมาตรน้ำเสียคงที่ ทั้งนี้ ผล
การศึกษาสอดคล้องกับ อุษา และคณะ (2543) และมณีวรรณ (2550) ที่พบว่าปริมาณซีโอไลต์ที่
เพิ่มขึ้น จะเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อความสามารถในการกำจัดแอมโมเนีย และยังสอดคล้องกับ วิทยา
(2544) ที่พบว่าความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจน จะสูงขึ้นตามปริมาณซีโอไลต์ที่
เพิ่มขึ้นเช่นกัน

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนด้วยเมกกานีสซีโอไลต์
 ระยะเวลาในปริมาณที่แตกต่างกันในแบบจำลองคลองวนเวียน

ปริมาณความสูงของ เมกกานีส ซีโอไลต์ที่ใช้ใน แบบจำลอง	ค่าแอมโมเนียไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$)				
	ซ้ำ ที่	ความเข้มข้นหลัง ผ่านแบบจำลอง (มก./ล.)	ความเข้มข้น ที่ลดลง (มก./ล.)	ลดลง ร้อยละ	ลดลงเฉลี่ยร้อยละ
0.25	1	17.14	3.62	17.45 ^a	18.90 ^a
(ปริมาณ 8,408.25 ลบ. ชม.)	2	16.82	3.94	18.96 ^a	
	3	16.55	4.21	20.30 ^a	ค่าS.D. = 1.43
0.5	1	12.06	8.70	41.93 ^b	41.21 ^b
(ปริมาณ 16,816.50 ลบ. ชม.)	2	12.22	8.54	41.14 ^b	
	3	12.34	8.42	40.56 ^b	ค่าS.D. = 0.69
0.75	1	9.00	11.75	56.59 ^c	59.03 ^c
(ปริมาณ 25,224.75 ลบ. ชม.)	2	8.16	12.60	60.69 ^c	
	3	8.34	12.42	59.82 ^c	ค่าS.D. = 2.16

หมายเหตุ : ค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 20.76 มก./ล.
 ค่าพีเอชน้ำเสียเท่ากับ 7.90 ที่อุณหภูมิห้อง ค่าS.D. = Standard Deviation (ส่วนเบี่ยงเบน
 มาตรฐาน)
 ค่า^a, ^b และ ^c แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ P value<0.05



ภาพที่ 20 ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจน ด้วยแมงกานีสซีโอไลต์ละขนาดในปริมาณต่าง ๆ

หมายเหตุ : 0.25 = 8,408.25 ลบ.ซม., 0.5 = 16,816.50 ลบ.ซม., 0.75 = 25,224.75 ลบ.ซม.

และจากการนำข้อมูลร้อยละการลดลงของแอมโมเนียในโตรเจนในการทดลองที่ 1.1 ถึง 1.3 มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) ด้วยวิธี One-Way ANOVA พบว่า ปริมาณการลดลงของแอมโมเนียในโตรเจนในแต่ละอัตราการไหล แต่ละระยะเวลาในการสัมผัส และแต่ละปริมาณของแมงกานีสซีโอไลต์ที่ใช้ มีผลในการลดความเข้มข้นของแอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสียแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \text{ value} < 0.05$)

2. ผลทดสอบการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ ด้วยแมงกานีสซีโอไลต์กำหนดขนาด (ขนาด 1.5 มิลลิเมตร)

2.1 การทดสอบอัตราการไหลที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจน ด้วยแมงกานีสซีโอไลต์กำหนดขนาดในแบบจำลองคลองวนเวียน

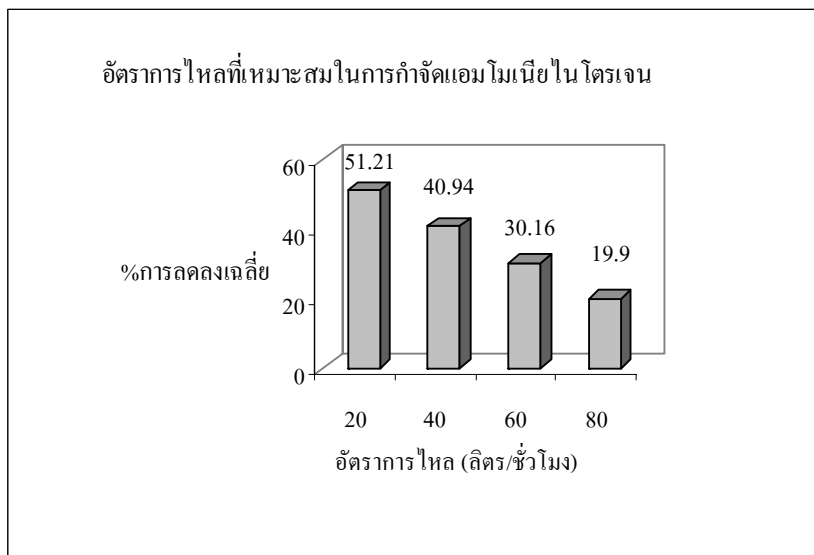
จากการทดสอบอัตราการไหลที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วยแมงกานีสซีโอไลต์กำหนดขนาด (1.5 มิลลิเมตร) ในแบบจำลองคลองวนเวียนโดยใช้เครื่องปั้มน้ำดูดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร และไก่ ปริมาตรทั้งหมด 12 ลิตร ผ่านระบบแบบจำลองคลองวนเวียนที่บรรจุแมงกานีสซีโอไลต์ในระดับความสูงที่ 0.5 ของความสูงแบบจำลอง ปรับอัตราการไหลด้วยระบบวาล์วให้มีอัตราการไหลที่ 20, 40, 60 และ 80 ลิตรต่อชั่วโมง ใช้เวลาทดสอบ 60 นาที ผลการตรวจสอบความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสียตัวอย่าง พบว่า ที่อัตราการ

ไหลที่ 20 ลิตรต่อชั่วโมง เป็นอัตราการไหลที่ให้ประสิทธิภาพมากและเหมาะสมที่สุดในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจน โดยสามารถกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนได้เฉลี่ยร้อยละ 51.21 ดังตารางที่ 11 นอกจากนี้ยังพบว่าในทุกๆระดับอัตราการไหล การใช้เมงกานีสซีโอไลต์กำหนดขนาด จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนสูงกว่าการใช้เมงกานีสซีโอไลต์คละขนาด กล่าวคือที่อัตราการไหล 20, 40, 60 และ 80 ลิตรต่อชั่วโมง สามารถกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนได้เฉลี่ยร้อยละ 51.21, 40.94, 30.16 และ 19.90 ตามลำดับ ทั้งนี้วิเคราะห์ว่า การใช้เมงกานีสซีโอไลต์กำหนดขนาด จะทำให้เกิดช่องว่างที่น้ำเสียสามารถไหลซึมเข้าสัมผัสกับผิวเมงกานีสซีโอไลต์ได้ทั่วถึงมากกว่าชนิดคละขนาด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ มณีวรรณ (2550) ที่ทำการศึกษ้อัตราการไหลที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมฟอกหนังด้วยการไหลผ่านคอลัมน์ โดยบรรจุ ซีโอไลต์ขนาดเล็กกว่า 1.40 ซึ่งเป็นขนาดซีโอไลต์ที่มีความเหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนได้ดีที่สุดลงในคอลัมน์โพลีเอทิลีนทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว (พื้นที่ผิวเท่ากับ 11.0 ตร.ซม.) สูง 50 ซม. จำนวน 4 คอลัมน์ ปริมาณซีโอไลต์คอลัมน์ละ 350.0 กรัม น้ำน้ำเสียซึ่งมีปริมาณแอมโมเนียในโตรเจนเริ่มต้น 148.0 มก./ล. ไหลผ่านคอลัมน์ จากด้านบนลงล่าง (down flow) และปรับอัตราการไหลที่กำหนด คือ 2.8 มล.หรือ 0.254 ซม./นาทิจ, 5.0 มล.หรือ 0.454 ซม./นาทิจ, 11.0 มล.หรือ 1.00 ซม./นาทิจ และ 25.0 มล.หรือ 2.27 ซม./นาทิจ ตามลำดับ มีจำนวนชั่วโมงการทดลองละ 3 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า อัตราการไหลที่กำหนด คือ 2.8, 5.0, 11.0 และ 25.0 มล./นาทิจ ตามลำดับ สามารถกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน มีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นแอมโมเนียในโตรเจนจากน้ำเสียตัวอย่างเริ่มต้นที่เฉลี่ยร้อยละ 50.00, 50.22, 46.39 และ 31.53 ตามลำดับ โดยอัตราการไหลช้าจะมีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นแอมโมเนียในโตรเจนได้ดีกว่าอัตราการไหลเร็ว และอัตราการไหลที่ 25.0 มล./นาทิจ มีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนได้น้อยที่สุด และตรงกับการศึกษาของ Booker et al. (1996) ที่ได้ศึกษาการกำจัดแอมโมเนียโดยการดูดซับของออสเตเลียนซีโอไลต์ด้วยการทดลองแบบคอลัมน์ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียจะแปรผกผันกับอัตราการไหล

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนด้วยเมกกานีสซีโอไลต์ กำหนดขนาด (1.5 มิลลิเมตร) ในแบบจำลองคลองวนเวียน ที่อัตราการไหลของน้ำเสีย ในระดับต่าง ๆ

อัตราการไหลของ น้ำเสีย (ลิตร/ชั่วโมง)	ค่าแอมโมเนียไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$)				
	ซ้ำที่	ความเข้มข้นหลังผ่าน แบบจำลอง (มก./ล.)	ความเข้มข้นที่ ลดลง (มก./ล.)	ลดลง ร้อยละ	ลดลงเฉลี่ยร้อยละ
20	1	11.15	13.52	54.80 ^a	51.21 ^a ค่าS.D. = 4.89
	2	13.41	11.26	45.64 ^a	
	3	11.55	13.12	53.18 ^a	
40	1	13.89	10.78	43.69 ^b	40.94 ^b ค่าS.D. = 2.45
	2	15.05	9.62	38.99 ^b	
	3	14.77	9.90	40.13 ^b	
60	1	17.76	6.91	28.00 ^c	30.16 ^c ค่าS.D. = 2.68
	2	17.44	7.23	29.31 ^c	
	3	16.49	8.18	33.16 ^c	
80	1	20.50	4.17	16.78 ^d	19.90 ^d ค่าS.D. = 2.71
	2	19.32	5.35	21.68 ^d	
	3	19.43	5.24	21.24 ^d	

หมายเหตุ : ค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 24.67 มก./ล. ค่าพีเอชน้ำเสียเท่ากับ 8.90 ที่อุณหภูมิห้อง ค่าS.D. = Standard Deviation (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)
ค่า^{a, b, c} และ^d แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ P value<0.05



ภาพที่ 21 ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วยแมงกานีสไฮดรอกไซด์กำหนดขนาดในแบบจำลองคลองวนเวียนที่อัตราการไหลของน้ำเสียในระดับต่าง ๆ

2.2 ผลการทดสอบระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วยแมงกานีสไฮดรอกไซด์กำหนดขนาดในแบบจำลองคลองวนเวียน

การทดสอบระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจน ด้วยแมงกานีสไฮดรอกไซด์กำหนดขนาดในแบบจำลองคลองวนเวียน ทำการทดลองโดยการใช้เครื่องปั้มน้ำดูดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร และไก่ ปริมาตรทั้งหมด 12 ลิตร ผ่านระบบแบบจำลองคลองวนเวียนที่บรรจุแมงกานีสไฮดรอกไซด์ที่ระดับความสูง 0.5 ของความสูงแบบจำลอง และปรับอัตราการไหลด้วยระบบวาล์วให้มีอัตราการไหลเท่ากับระดับที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 2.2.1 คือที่ 20 ลิตร/ชั่วโมง พบว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการสัมผัสระหว่างสารแลกเปลี่ยนไอออน (แมงกานีสไฮดรอกไซด์) กับสารละลาย (น้ำเสีย) ที่ช่วงเวลาสัมผัสานจะทำให้ความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนได้ดีกว่าช่วงเวลาสัมผัสที่สั้นกว่า ดังจากผลการทดสอบช่วงเวลาสัมผัสที่ 30, 60 และ 120 นาที พบว่าแมงกานีสไฮดรอกไซด์สามารถทำให้แอมโมเนียในโตรเจนลดลงได้เฉลี่ยร้อยละ 18.20, 49.37 และ 59.63 ตามลำดับ ดังตารางที่ 12 ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับ มณีวรรณ (2550) ซึ่งได้ศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้ไฮดรอกไซด์ขนาด 1.40 มม. บรรจุในขวดรูปชมพู่ปริมาณขวดละ 50 กรัม เติมน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกหนังซึ่งมีปริมาณแอมโมเนียในโตรเจนเริ่มต้น 179.0 มก./ล. ที่ปริมาตร 50 มล. นำไปเข้าด้วยเครื่องเข้า

ใช้อัตราเร็วรอบของเครื่องเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที มีเวลาสัมผัสระหว่างซีโอไลต์กับน้ำเสีย 6 ระดับ คือ 15, 30, 60, 90, 150 และ 180 นาที ผลการทดลองพบว่า สามารถลดความเข้มข้นแอมโมเนียในโตรเจนจากตัวอย่างน้ำเสียเริ่มต้น ที่เฉลี่ยร้อยละ 32.21, 38.54, 39.85, 43.94, 44.13 และ 45.25 ตามลำดับ โดยช่วงเวลาสัมผัสที่ให้ผลในการกำจัดดีที่สุดจะอยู่ที่ 90 นาที และหลังจากนั้น ระยะเวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้น จะไม่ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยน อีออนได้เกิดขึ้นสมบูรณ์แล้ว

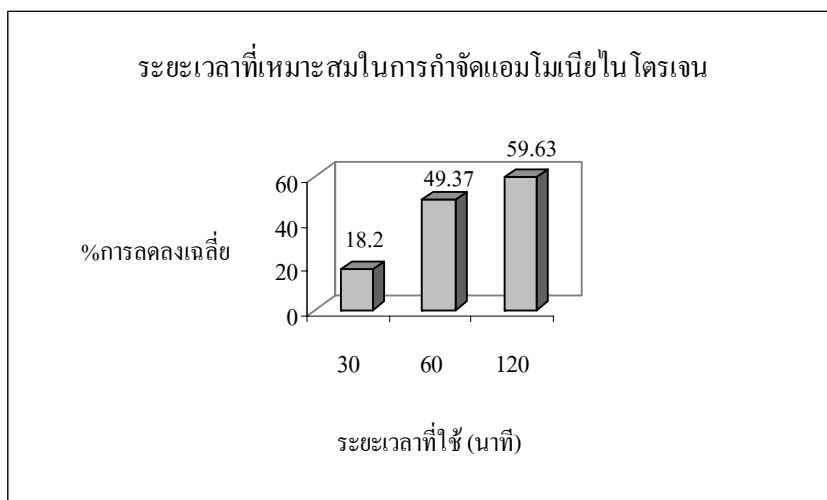
นอกจากนี้ จากผลการทดลองในข้อ 2.2 นี้ ยังพบว่า การใช้แมงกานีสซีโอไลต์กำหนดขนาด จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงกว่าการใช้แมงกานีสซีโอไลต์ขนาดในทุกระดับของช่วง ระยะเวลาการสัมผัส อันเป็นลักษณะเดียวกับที่พบในการทดลองที่ 2.1

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วยแมงกานีสซีโอไลต์ กำหนดขนาด (1.5 มิลลิเมตร) ในแบบจำลองคลองวนเวียน ที่ระยะเวลาการสัมผัสต่าง ๆ

ช่วงเวลาที่ใช้ทดสอบ (นาที)	ค่าแอมโมเนียในโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$)				
	ซ้ำที่	ความเข้มข้นหลังผ่าน แบบจำลอง (มก./ล.)	ความเข้มข้นที่ ลดลง (มก./ล.)	ลดลง ร้อยละ	ลดลงเฉลี่ยร้อยละ
30	1	18.96	5.33	21.94 ^a	18.20 ^a
	2	20.90	3.39	13.96 ^a	
	3	19.75	4.54	18.69 ^a	ค่า S.D. = 4.01
60	1	11.02	13.27	54.63 ^b	49.37 ^b
	2	13.42	10.87	44.75 ^b	
	3	12.45	11.84	48.74 ^b	ค่า S.D. = 4.97
120	1	10.43	13.86	57.06 ^c	59.63 ^c
	2	9.34	14.95	61.55 ^c	
	3	9.65	14.64	60.27 ^c	ค่า S.D. = 2.31

หมายเหตุ : ค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียในโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 24.29 มก./ล. ค่าพีเอชน้ำเสียเท่ากับ 8.78 ที่อุณหภูมิห้อง ค่า S.D. = Standard Deviation (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

ค่า^{a, b} และ ^c แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ P value < 0.05



ภาพที่ 22 ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วยแมงกานีสซัลไฟด์กำหนดขนาดที่ระยะเวลาการสัมผัสต่าง ๆ

2.3 ผลการทดสอบปริมาณแมงกานีสซัลไฟด์กำหนดขนาดที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนในแบบจำลองคลองวนเวียน

จากการทดสอบหาปริมาณแมงกานีสซัลไฟด์กำหนดขนาดที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนในแบบจำลองคลองวนเวียน พบว่า ปริมาณแมงกานีสซัลไฟด์ที่ใช้ในการทดสอบที่ 0.25, 0.5 และ 0.75 ของระดับความสูงแบบจำลอง สามารถกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนจากตัวอย่างน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ โดยทำให้แอมโมเนียในโตรเจนลดลงจากค่าเริ่มต้นเฉลี่ยร้อยละ 23.67, 48.32 และ 78.21 ตามลำดับ ดังตารางที่ 13 โดยปริมาณแมงกานีสซัลไฟด์กำหนดขนาดที่ระดับความสูง 0.75 ของความสูงแบบจำลอง หรือมีปริมาตรเท่ากับ 25,224.75 ลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นปริมาณของแมงกานีสซัลไฟด์ที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนมากที่สุด โดยสามารถกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนได้ถึงร้อยละ 78.21

นอกจากนี้ การใช้แมงกานีสซัลไฟด์กำหนดขนาด จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงกว่าการใช้แมงกานีสซัลไฟด์คละขนาดในทุกะดับของปริมาณแมงกานีสซัลไฟด์ที่ใช้เช่นเดียวกับผลการทดลองที่ 2.1 และ 2.2 กล่าวคือ ที่ปริมาณแมงกานีสซัลไฟด์ที่ 0.25, 0.5 และ 0.75 ของระดับความสูงแบบจำลอง แมงกานีสซัลไฟด์ชนิดกำหนดขนาดสามารถกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนได้เฉลี่ยร้อยละ 23.67, 48.32, และ 78.21 ตามลำดับ

และจากการนำข้อมูลร้อยละการลดลงของแอมโมเนียในโตรเจนในการทดลองที่ 2.1 ถึง 2.3 มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) ด้วยวิธี One-Way ANOVA พบว่า ปริมาณการลดลงของแอมโมเนียในโตรเจนในแต่ละอัตราการใช้ แต่ระยะเวลาในการสัมผัส และแต่ละปริมาณของแมงกานีสซีโอไลต์ที่ใช้ มีผลในการลดความเข้มข้นของแอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสียแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \text{ value} < 0.05$)

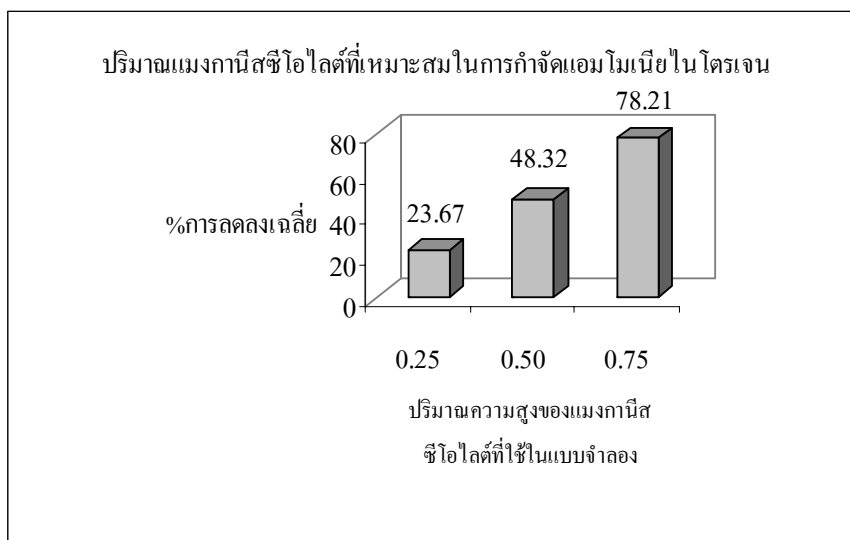
ตารางที่ 13 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วยแมงกานีสซีโอไลต์ กำหนดขนาด (1.5 มิลลิเมตร) ในปริมาณที่แตกต่างกันในแบบจำลองคลองวนเวียน

ปริมาณความสูงของ แมงกานีส ซีโอไลต์ที่ใช้ในแบบจำลอง	ค่าแอมโมเนียในโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$)				
	ซ้ำที่	ความเข้มข้นหลังผ่าน แบบจำลอง (มก./ล.)	ความเข้มข้นที่ ลดลง (มก./ล.)	ลดลง ร้อยละ	ลดลงเฉลี่ยร้อยละ
0.25 (ปริมาณ 8,408.25 ลบ.ซม.)	1	17.59	5.11	22.51 ^a	23.67 ^a ค่าS.D. = 3.35
	2	17.92	4.78	21.05 ^a	
	3	16.47	6.23	27.44 ^a	
0.5 (ปริมาณ 16,816.50 ลบ.ซม.)	1	9.32	13.38	58.94 ^b	48.32 ^b ค่าS.D. = 9.44
	2	13.42	9.28	40.88 ^b	
	3	12.45	10.25	45.15 ^b	
0.75 (ปริมาณ 25,224.75 ลบ.ซม.)	1	5.43	17.27	76.08 ^c	78.21 ^c ค่าS.D. = 2.69
	2	4.26	18.44	81.23 ^c	
	3	5.14	17.55	77.31 ^c	

หมายเหตุ : ค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียในโตรเจนในตัวอย่างน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 22.70 มก./ล.

ค่าพีเอชเท่ากับ 8.65 ที่อุณหภูมิห้อง ค่าS.D. = Standard Deviation (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

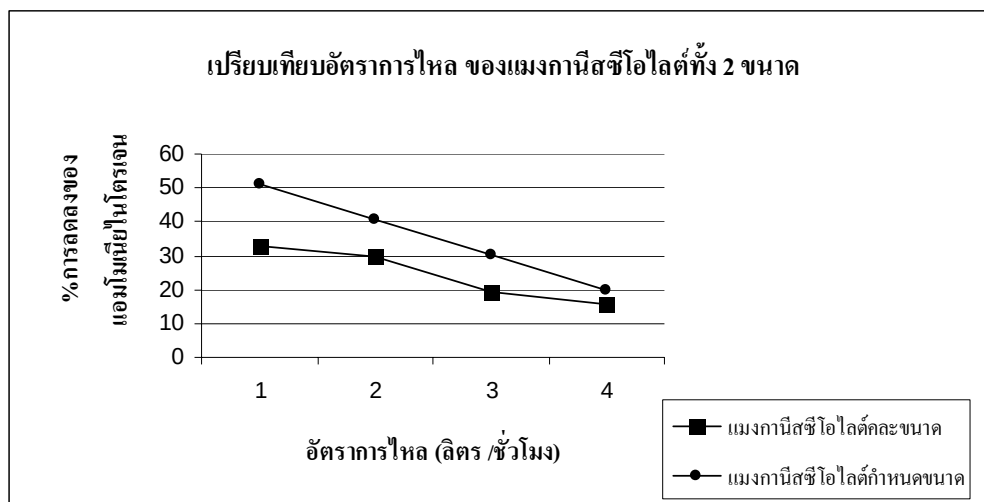
ค่า^{a, b} และ ^c แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P \text{ value} < 0.05$



ภาพที่ 23 ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนด้วยแมงกานีสซีโอไลต์กำหนดขนาดในปริมาณที่แตกต่างกัน

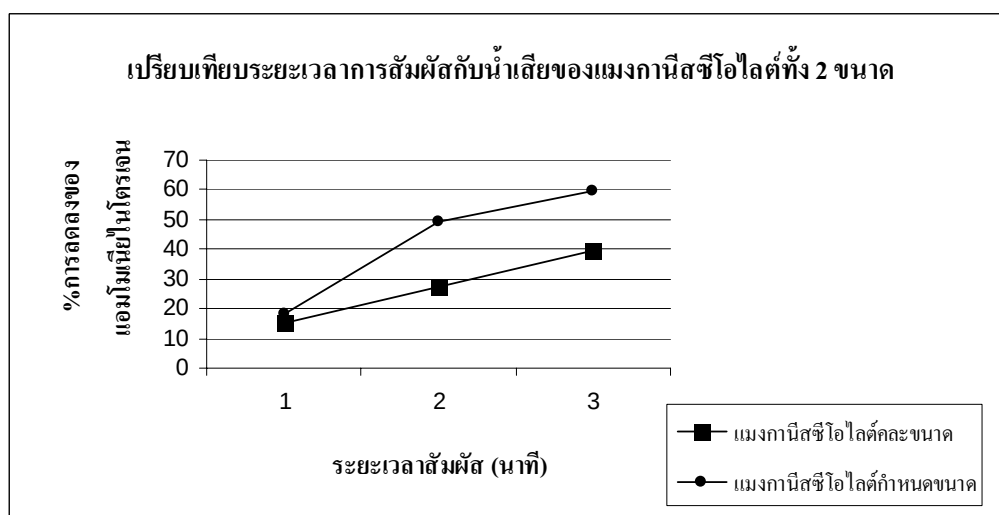
หมายเหตุ : 0.25 = 8,408.25 ลบ.ซม., 0.5 = 16,816.50 ลบ.ซม., 0.75 = 25,224.75 ลบ.ซม.

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ และความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนด้วยแมงกานีสซีโอไลต์ ทั้ง 2 ขนาดแล้ว พบว่า ในสภาพแวดล้อมการทดลองที่ใกล้เคียงกัน การใช้แมงกานีสซีโอไลต์กำหนดขนาด (1.50 มม.) มีความสามารถและประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ สูงกว่าการใช้แมงกานีสซีโอไลต์คละขนาด (1.50- 5.0 มม.) ในทุกตัวแปรของการทดลอง นั่นคือ อัตราการไหลของน้ำเสีย ระยะเวลาที่ใช้ในการสัมผัสระหว่างน้ำเสียกับแมงกานีสซีโอไลต์ และ ปริมาณแมงกานีสซีโอไลต์ที่ใช้ ดังแสดงการเปรียบเทียบไว้ในภาพที่ 24 ภาพที่ 25 และ ภาพที่ 26 ทั้งนี้วิเคราะห์ว่า เป็นผลมาจากการใช้ซีโอไลต์แบบกำหนดขนาด จะทำให้มีช่องว่างในระหว่างเม็ดซีโอไลต์ มากกว่าในซีโอไลต์คละขนาดที่อาจมีการอุดตันเกิดขึ้นได้ และมีผลให้น้ำเสียสามารถสัมผัสกับผิวซีโอไลต์ได้มากกว่า



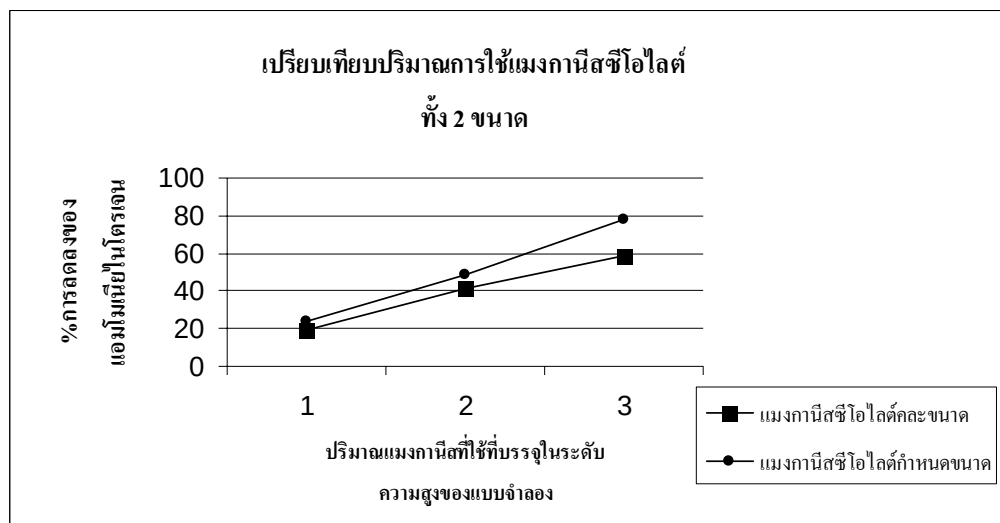
ภาพที่ 24 เปรียบเทียบร้อยละการลดลงเฉลี่ยของแอมโมเนียไนโตรเจนจากการทดสอบอัตราการไหลของเมงกานีสซีโอไลต์ชนิดขนาดและชนิดกำหนดขนาดที่อัตราการไหลต่าง ๆ

หมายเหตุ : 1 = 20, 2 = 40, 3 = 60, 4 = 80



ภาพที่ 25 เปรียบเทียบร้อยละการลดลงเฉลี่ยของแอมโมเนียไนโตรเจนจากการทดสอบระยะเวลาในการสัมผัสของเมงกานีสซีโอไลต์ชนิดขนาดและชนิดกำหนดขนาด ที่ระยะเวลาการสัมผัสต่าง ๆ

หมายเหตุ : 1 = 30, 2 = 60, 3 = 120



ภาพที่ 26 เปรียบเทียบร้อยละการลดลงเฉลี่ยของแอมโมเนียไนโตรเจนจากการทดสอบปริมาณการใช้ของแมงกานีสไฮดรอกไซด์ชนิดคละขนาดและชนิดกำหนดขนาด ที่ปริมาณการใช้แมงกานีสไฮดรอกไซด์ต่าง ๆ

หมายเหตุ : 1 = 0.25 , 2 = 0.5 , 3 = 0.75

3. ผลการทดลองการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนด้วยแมงกานีสไฮดรอกไซด์จากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ด้วยแมงกานีสไฮดรอกไซด์ ในแบบจำลองคลองวนเวียนแบบต่อเนื่อง และการนำกลับมาใช้ใหม่ (regeneration)

ในการทดสอบความสามารถ และประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนของแมงกานีสไฮดรอกไซด์ในแบบจำลองคลองวนเวียนแบบต่อเนื่อง และทำการฟื้นฟูสภาพหรือรีเจนเนอเรตแมงกานีสไฮดรอกไซด์เพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่ ดำเนินการโดยใช้แมงกานีสไฮดรอกไซด์กำหนดขนาด (ขนาด 1.50 มม.) ซึ่งเป็นซีโอไลต์ที่พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนสูงกว่าแบบคละขนาด (1.50- 5.0 มม.) มีปริมาณที่ใช้เท่ากับ 25,224.75 ลูกบาศก์เซนติเมตร และใช้อัตราการไหลของน้ำเสียที่ 20 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีค่าปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 25.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า pH เท่ากับ 8.92 ที่อุณหภูมิห้อง ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านแบบจำลองคลองวนเวียนทุก 30 นาที นำมาตรวจสอบการลดลงของปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเสีย

3.1 ผลการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วยเมกกานีสซีโอไลต์ในแบบจำลองคลองวนเวียนแบบต่อเนื่อง ในการใช้งานครั้งที่ 1

ผลการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วยเมกกานีสซีโอไลต์ในแบบจำลองคลองวนเวียนแบบต่อเนื่อง ในการใช้งานครั้งที่ 1 โดยใช้เมกกานีสซีโอไลต์กำหนดขนาดที่ยังไม่ผ่านการฟื้นฟูสภาพซึ่งมีประสิทธิภาพในการใช้งาน 100 เปอร์เซ็นต์ พบว่าที่ เวลา 30, 60 และ 90 นาที สามารถกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนได้ลดลงเฉลี่ยร้อยละ 54.92, 24.42 และ 6.15 ตามลำดับ ดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ผลการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนแบบต่อเนื่อง ครั้งที่ 1

การใช้งาน เมกกานีสซีโอไลต์ ครั้งที่	เมื่อเวลา ผ่านไป (นาที)	ค่าแอมโมเนียในโตรเจน (NH ₃ -N)				
		ความเข้มข้น ซ้ำที่	ความเข้มข้น หลังผ่าน แบบจำลอง (มก./ล.)	ความเข้มข้น ที่ลดลง (มก./ล.)	ลดลง ร้อยละ	ลดลงเฉลี่ย ร้อยละ
1	30	1	10.91	14.19	56.53 ^a	54.92 ^a
		2	11.46	13.64	54.34 ^a	
		3	11.57	13.53	53.90 ^a	ค่าS.D. = 1.40
	60	1	18.88	6.22	24.78 ^b	24.42 ^b
		2	18.90	6.20	24.70 ^b	
		3	19.13	5.97	23.78 ^b	ค่าS.D. = 0.55
	90	1	23.28	1.82	7.25 ^c	6.15 ^c
		2	23.44	1.66	6.61 ^c	
		3	23.95	1.15	4.58 ^c	ค่าS.D. = 1.39

หมายเหตุ : ค่าS.D. = Standard Deviation (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

ค่า^{a, b} และ ^c แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ P value < 0.05

เมื่อนำข้อมูลร้อยละการลดลงของแอมโมเนียในโตรเจนในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนในแบบจำลองแบบต่อเนื่องมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) ด้วยวิธี One-Way ANOVA พบว่าที่ระยะเวลาในการสัมผัสที่ 30, 60 และ 90 นาที มีผลต่อการลดความเข้มข้นของแอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสียด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \text{ value} < 0.05$)

3.2 ผลการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วยเมมกานีสซีโอไลต์ในแบบจำลองคลองวนเวียนแบบต่อเนื่อง ในการใช้งานครั้งที่ 2 (ผ่านการ Regenerate ครั้งที่ 1)

ผลการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วยเมมกานีสซีโอไลต์ในแบบจำลองคลองวนเวียนแบบต่อเนื่อง โดยการนำเอาเมมกานีสซีโอไลต์ที่ผ่านการใช้งานครั้งที่ 1 มาทำการฟื้นฟูสภาพ (regenerate) ด้วยการนำไปแช่ในสารละลายเกลือแกง (NaCl) 25 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 30 นาที ในการใช้งานครั้งที่ 2 (ผ่านการ Regenerate ครั้งที่ 1) พบว่า ที่เวลา 30, 60 และ 90 นาที เมมกานีสซีโอไลต์ฟื้นฟูสภาพ สามารถกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนได้ลดลงเฉลี่ยร้อยละ 52.95, 22.46 และ 4.87 ตามลำดับ ดังตารางที่ 15 ซึ่งแสดงว่า การนำเมมกานีสซีโอไลต์ซึ่งผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1 มาแล้ว จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจน ได้ใกล้เคียงกับการใช้เมมกานีสซีโอไลต์ชุดเริ่มต้น โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนที่ 30 นาทีแรกของการใช้งานครั้งที่ 2 ลดลงจากครั้งแรกเพียงร้อยละ 1.97 เท่านั้น ทั้งนี้ ผลที่ได้ตรงกับผลการทดลองของ มณีวรรณ (2550) ที่ใช้เมมกานีสซีโอไลต์ขนาดเล็กกว่า 1.40 มม. มาทำการดูดซับและแลกเปลี่ยนไอออนกับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกหนัง มีปริมาณแอมโมเนียในโตรเจนเริ่มต้นที่ 137.0 มก./ล. โดยนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่อัตราความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที มีเวลาสัมผัสนาน 2 ชั่วโมง ทำการใช้งานทั้งหมด 3 ครั้งแบบต่อเนื่อง โดยนำเมมกานีสซีโอไลต์ที่ผ่านการใช้งานแต่ละครั้ง ไปฟื้นฟูสภาพด้วยเกลือแกง ที่ความเข้มข้นของ NaCl 25 กรัม/ลิตร เป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงนำมาทำการดูดซับและแลกเปลี่ยนไอออนกับน้ำเสียในครั้งต่อไป และพบว่า เมมกานีสซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1 สามารถให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจน ได้ใกล้เคียงกับเมมกานีสซีโอไลต์ที่ยังไม่ผ่านฟื้นฟูสภาพมาก่อนเช่นกัน โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดลดลงร้อยละ 1.98 เท่านั้น

ตารางที่ 15 ผลการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนแบบต่อเนื่องครั้งที่ 2 (ผ่านการ Regenerated ครั้งที่ 1)

การใช้งาน แมงกานีสซีโอไลต์ ครั้งที่	เมื่อเวลา ผ่านไป (นาท)	ค่าแอมโมเนียไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$)				
		ซ้ำที่	ความเข้มข้น	ความเข้มข้น	ลดลง ร้อยละ	ลดลงเฉลี่ย ร้อยละ
			หลังผ่าน แบบจำลอง (มก./ล.)	ที่ลดลง (มก./ล.)		
2 (ผ่านการ Regenerated ครั้งที่ 1)	30	1	11.73	13.37	53.27 ^a	52.95 ^a
		2	11.69	13.41	53.43 ^a	
		3	12.01	13.09	52.15 ^a	ค่าS.D. = 0.69
	60	1	19.51	5.59	22.28 ^b	22.46 ^b
		2	19.48	5.62	22.32 ^b	
		3	19.40	5.70	22.78 ^b	ค่าS.D. = 0.27
	90	1	24.19	0.91	3.63 ^c	4.87 ^c
		2	23.99	1.11	4.42 ^c	
		3	23.45	1.65	6.57 ^c	ค่าS.D. = 1.52

หมายเหตุ : ค่าS.D. = Standard Deviation (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

ค่า^{a, b} และ ^c แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ P value < 0.05

เมื่อนำข้อมูลร้อยละการลดลงของแอมโมเนียไนโตรเจนด้วยการกำจัดของแมงกานีสซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1 มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) ด้วยวิธี One-Way ANOVA พบว่า ที่ระยะเวลาในการสัมผัสที่ 30, 60 และ 90 นาที มีผลต่อการลดความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเสีย แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P value < 0.05)

3.3 ผลการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนด้วยเมงกานีสซีโอไลต์ในแบบจำลองคลองวนเวียนแบบต่อเนื่องในการใช้งานครั้งที่ 3 (ผ่านการ Regenerate ครั้งที่ 2)

ผลการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนด้วยเมงกานีสซีโอไลต์ในแบบจำลองคลองวนเวียนแบบต่อเนื่อง ในการใช้งานครั้งที่ 3 พบว่า ที่เวลา 30, 60 และ 90 นาที เมงกานีสซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2 สามารถกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้เฉลี่ยร้อยละ 31.13, 12.47 และ 2.57 ตามลำดับ ดังตารางที่ 16 แสดงว่า ในการใช้เมงกานีสซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพมาแล้ว 2 ครั้ง จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน ลดลงต่ำกว่าการใช้งานเมงกานีสซีโอไลต์ที่ยังไม่ผ่านการฟื้นฟูสภาพค่อนข้างมาก โดยในระยะเวลา 30 นาทีแรกของการใช้งาน จะมีประสิทธิภาพลดลงจากชุดเริ่มต้นถึงร้อยละ 23.79

ตารางที่ 16 ผลการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนแบบต่อเนื่องครั้งที่ 3 (ผ่านการ Regenerated ครั้งที่ 2)

การใช้งาน เมงกานีสซีโอไลต์ ครั้งที่	เมื่อเวลา ผ่านไป (นาที)	ค่าแอมโมเนียไนโตรเจน (NH ₃ -N)				
		ซ้ำที่	ความเข้มข้น หลังผ่าน	ความเข้มข้น ที่ลดลง	ลดลง	ลดลงเฉลี่ย
			แบบจำลอง (มก./ล.)	(มก./ล.)	ร้อยละ	ร้อยละ
3 (ผ่าน Regenerated ครั้งที่ 2)	30	1	16.80	8.30	33.07 ^a	31.13 ^a
		2	17.34	7.76	30.92 ^a	
		3	17.72	7.38	29.40 ^a	ค่า S.D. = 1.84
	60	1	21.84	3.26	12.99 ^b	12.47 ^b
		2	21.99	3.11	12.39 ^b	
		3	22.08	3.02	12.03 ^b	ค่า S.D. = 0.48
	90	1	24.70	0.40	1.59 ^c	2.57 ^c
		2	24.71	0.39	1.55 ^c	
		3	23.95	1.15	4.58 ^c	ค่า S.D. = 1.73

หมายเหตุ : ค่า S.D. = Standard Deviation (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

ค่า^{a, b} และ^c แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ P value < 0.05

เมื่อนำข้อมูลร้อยละการลดลงของแอมโมเนียในโตรเจนจากการกำจัดของแอมกานีสซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2 มาวิเคราะห์ความแปรปรวน(Analysis of variance) ด้วยวิธี One-Way ANOVA พบว่าที่ระยะเวลาในการสัมผัสที่ 30, 60 และ 90 นาที มีผลต่อการลดความเข้มข้นของแอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสียด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \text{ value} < 0.05$)

3.4 ผลการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วยแอมกานีสซีโอไลต์ในแบบจำลองคลองวนเวียนแบบต่อเนื่องในการใช้งานครั้งที่ 4 (ผ่านการ Regenerate ครั้งที่ 3)

ในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วยแอมกานีสซีโอไลต์ในแบบจำลองคลองวนเวียนแบบต่อเนื่อง การใช้งานครั้งที่ 4 พบว่า ที่เวลา 30, 60 และ 90 นาที แอมกานีสซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้ว 3 ครั้ง สามารถกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนได้เฉลี่ยร้อยละ 19.27, 6.50 และ 0.97 ตามลำดับ ดังตารางที่ 17 แสดง ในการใช้แอมกานีสซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3 นี้ ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจน ลดลงต่ำกว่าประสิทธิภาพของการใช้งานแอมกานีสซีโอไลต์ที่ยังไม่ผ่านการฟื้นฟูสภาพถึงร้อยละ 35.65 (ที่เวลา 30 นาที) ดังนั้น จึงสามารถกล่าวได้ว่า แอมกานีสซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพในครั้งที่ 3 นี้ ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนได้อีกต่อไป เพราะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ต่ำมาก

ตารางที่ 17 ผลการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนแบบต่อเนื่องครั้งที่ 4 (ผ่านการ Regenerated ครั้งที่ 3)

การใช้งาน แมงกานีสซีโอไลต์ ครั้งที่	เมื่อเวลา ผ่านไป (นาท)	ค่าแอมโมเนียไนโตรเจน (NH ₃ -N)				
		ความเข้มข้น ซ้ำที่	ความเข้มข้น หลังผ่าน แบบจำลอง (มก./ล.)	ความเข้มข้น ที่ลดลง (มก./ล.)	ลดลง ร้อยละ	ลดลงเฉลี่ย ร้อยละ
4 (ผ่าน Regenerated ครั้งที่ 3)	30	1	19.92	5.18	20.64 ^a	19.27 ^a
		2	20.81	4.29	17.09 ^a	
		3	20.06	5.04	20.08 ^a	ค่าS.D. = 1.92
	60	1	23.12	1.98	7.89 ^b	6.50 ^b
		2	23.64	1.46	5.82 ^b	
		3	23.65	1.45	5.78 ^b	ค่าS.D. = 1.20
	90	1	24.95	0.15	0.60 ^c	0.97 ^c
		2	24.96	0.14	0.55 ^c	
		3	24.66	0.44	1.75 ^c	ค่าS.D. = 0.67

หมายเหตุ : ค่าS.D. = Standard Deviation (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

ค่า^{a, b} และ^c แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ P value < 0.05

เมื่อนำข้อมูลร้อยละการลดลงของแอมโมเนียไนโตรเจนจากการกำจัดด้วยแมงกานีสซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3 มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) ด้วยวิธี One-Way ANOVA พบว่า ที่ระยะเวลาในการสัมผัสที่ 30, 60 และ 90 นาที มีผลต่อการลดความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเสียด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P value < 0.05) เช่นกัน

ผลการทดลองจึงชี้ให้เห็นว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนของแมงกานีสซีโอไลต์ จะลดลงตามจำนวนครั้งของการฟื้นฟูสภาพ กล่าวคือ ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนจากการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1, 2 และ 3 ที่เวลา 30 นาที มีค่าเท่ากับร้อยละ 52.95, 31.13 และ 19.27 ตามลำดับ ดังภาพที่ 25 ทั้งนี้ ในการใช้งานของแมงกานีสซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งแรก จะมีความเหมาะสมและให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการนำกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากพบมีประสิทธิภาพในการกำจัดใกล้เคียงกับการใช้แมงกานีสซีโอไลต์ที่ยังไม่ผ่านใช้งานมาก่อน ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Ahmet et al. (2002) ที่ทำการศึกษาการกำจัดแอมโมเนียมที่ละลายในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้ซีโอไลต์ และพบว่า การฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ครั้งแรกให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนดีกว่าในการฟื้นฟูสภาพในครั้งที่ 2 และ 3 โดยใช้สารรีเจนเนอเรนต์ที่ 20 กรัมต่อลิตรของโซเดียมคลอไรด์

ซึ่งจากการนำข้อมูลร้อยละการลดลงของแอมโมเนียในโตรเจนด้วยการกำจัดของแมงกานีสซีโอไลต์ที่ไม่ผ่านและผ่านการฟื้นฟูสภาพ จากการใช้งานทั้งหมด 4 ครั้ง มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) ด้วยวิธี One-Way ANOVA พบว่า ที่ระยะเวลาการไหลผ่าน 30 นาที ค่าการกำจัดที่ได้ใช้งานแมงกานีสซีโอไลต์ครั้งที่ 1 ไม่แตกต่างจากค่าที่ได้จากการใช้งานครั้งที่ 2 (แมงกานีสซีโอไลต์ผ่านการฟื้นฟูสภาพ 1 ครั้ง) แต่แตกต่างจากค่าที่ได้จากการใช้งานครั้งที่ 3 และ 4 (แมงกานีส ซีโอไลต์ผ่านการฟื้นฟูสภาพ 2 และ 3 ครั้ง ตามลำดับ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \text{ value} < 0.05$)

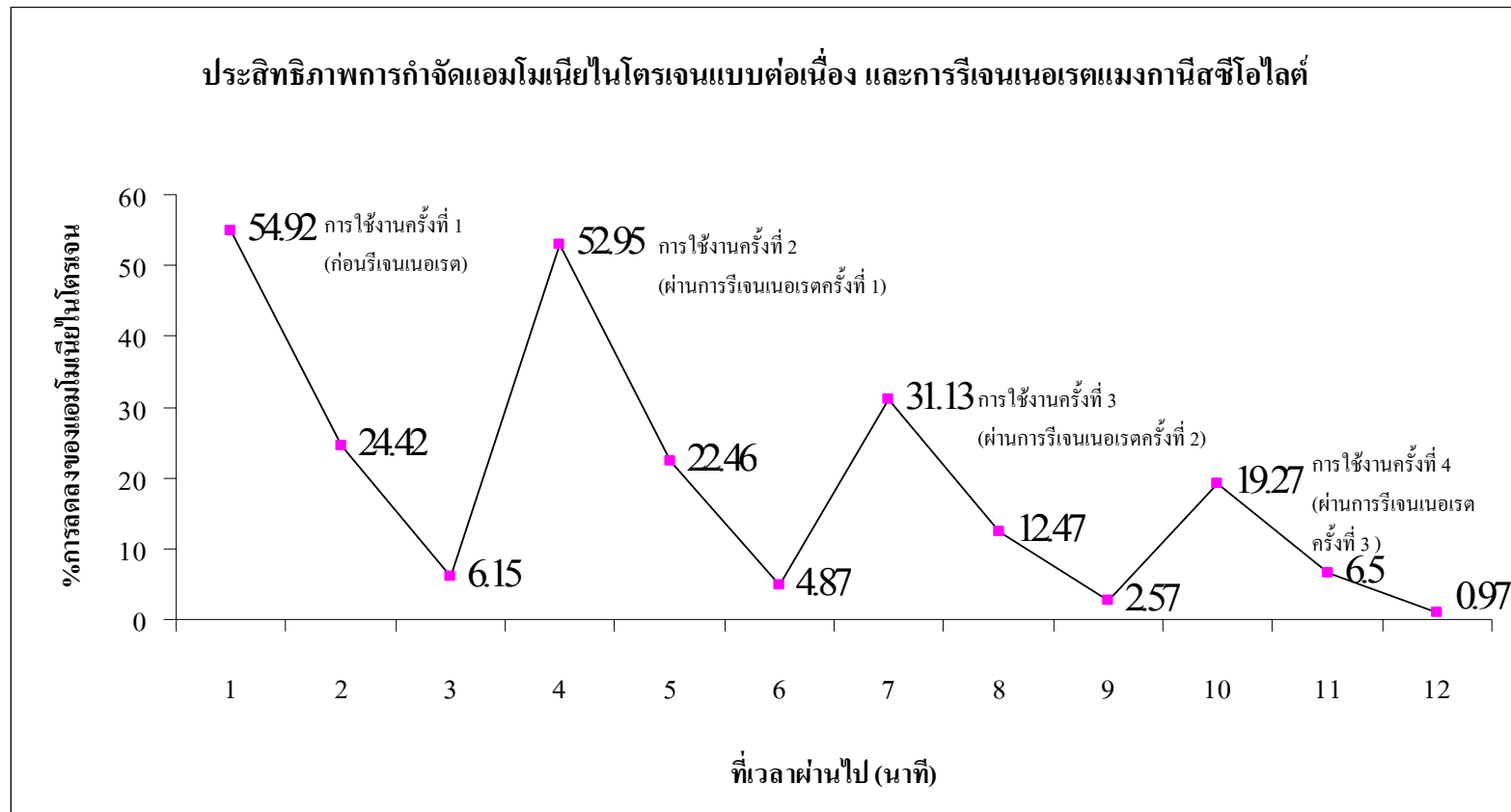
สาเหตุที่ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนของแมงกานีสซีโอไลต์ ลดลงตามเวลาและจำนวนครั้งการใช้งานที่เพิ่มขึ้นนั้น สืบเนื่องจากแมงกานีสซีโอไลต์จะมีขีดจำกัดของการแลกเปลี่ยนไอออนในระดับหนึ่ง โดยมีผลมาจากสภาพพื้นที่รูพรุน และแรงอิเล็กโตรสแตติก (electrostatic force) บนผิวของซีโอไลต์ ในการใช้งานซีโอไลต์ครั้งแรก พื้นที่รูพรุนของซีโอไลต์มีพื้นที่มาก ไอออนมีความเป็นอิสระในการทำปฏิกิริยา และมีแรงอิเล็กโตรสแตติกสูงกว่า จึงทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นได้ดี แตกต่างจากครั้งหลัง ๆ ซึ่งเหลือพื้นที่สำหรับการแลกเปลี่ยนไอออนน้อย และมีแรงอิเล็กโตรสแตติกต่ำ ทำให้ประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นแอมโมเนียในโตรเจนต่ำลง และเมื่อซีโอไลต์ กับน้ำเสียทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนจนกระทั่งอิ่มตัว จะไม่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนต่อไปได้อีก ดังนั้น จึงต้องทำการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยประยุกต์หลักการหลักการฟื้นฟูสภาพตามลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์ กล่าวคือ ประจุบวกของ NH_4^+ ที่เกาะกับซีโอไลต์อยู่อย่างหลวม ๆ พร้อมทั้งจะแลกเปลี่ยนประจุอื่นเมื่ออยู่ในสารละลายได้

ซึ่งเมื่อซีโอไลต์เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับสารรีเจนเนอเรนต์ที่มีไอออนสภาพเช่นเดียวกับไอออนเริ่มต้นแล้ว ประจุของไอออนของซีโอไลต์สามารถกลับมาอยู่ในรูปของไอออนเดิมได้นอกจากนี้ระดับความเข้มข้นของสารรีเจนเนอเรนต์ จะมีความสำคัญต่ออำนาจในการฟื้นฟูสภาพของสารแลกเปลี่ยนไอออน คือสารละลาย NaCl ต้องมี Na^+ สูงกว่าแอมโมเนียมไอออนที่เกาะติดกับฟล็อกซีโอไลต์ โดยที่ NH_4^+ จะถูกกำจัดออกมากับน้ำทิ้ง และ Na^+ จะเข้าไปแทนที่ NH_4^+ (มณีวรรณ, 2550)

เนื่องจากการฟื้นฟูสภาพเมแกนีสซีโอไลต์ในครั้งหลัง ๆ จะไม่ทำให้ประจุของไอออนเมแกนีสซีโอไลต์สามารถกลับมาอยู่ในรูปไอออนเดิมได้อย่างเต็มที่ มีสาเหตุมาจากการรีเจนเนอเรต์ด้วยสารละลาย NaCl 25 % ทิ้งไว้ 30 นาที โดยใช้อุณหภูมิห้องนั้นไม่สามารถที่จะคายการดูดซับ NH_4^+ ที่เข้าไปเกาะติดอยู่ภายในบริเวณโพรงของเมแกนีสซีโอไลต์ได้ทั้งหมด ซึ่ง NH_4^+ ที่หลุดออกมาพร้อมกับสารรีเจนเนอเรนต์จะเป็น NH_4^+ ที่ส่วนใหญ่อยู่บริเวณภายนอกโพรงของเมแกนีสซีโอไลต์ และเกาะติดอยู่กับผิวภายนอกเป็นส่วนใหญ่ ส่วน NH_4^+ ที่อยู่ในโพรงบางส่วนหลุดออกมาไม่หมด จึงเป็นสาเหตุให้ประจุของเมแกนีสซีโอไลต์ไม่สามารถกลับมาอยู่ในรูปเดิมได้ทั้งหมด ซึ่งในการฟื้นฟูสภาพ ซีโอไลต์นั้น หากต้องการให้ NH_4^+ หลุดออกมาจากโพรงซีโอไลต์มากขึ้นจำเป็นต้องเพิ่มอุณหภูมิเพื่อช่วยในการคายการดูดซับ ดังมีผู้ศึกษาในเรื่องการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ไว้ ได้แก่ สุภาภรณ์ (2548) ได้ทำการศึกษาในเรื่อง การพัฒนากระบวนการสำหรับฟื้นฟูโมเลกุลาร์ซีฟใช้แล้ว และทำการฟื้นฟูสภาพโมเลกุลาร์ซีฟ PCL-100 ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลคล้ายซีโอไลต์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300-400 องศาเซลเซียส พบว่าสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกถึง 3 ครั้งซึ่งในการกลับมาใช้ใหม่ในครั้งที่ 1 ให้ร้อยละในการกำจัดคลอรีนออกจาก เฮกเซนได้ 93-95%, ในการนำกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 2 ให้ร้อยละในการกำจัดได้ 83-87% และ ในการนำกลับมาใช้ใหม่ในครั้งที่ 3 ให้ร้อยละในการกำจัดได้ 66-67% ขณะที่ สิริพันธ์ (2550) ได้ศึกษาการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ใช้แล้วและนำกลับมาใช้ใหม่ในการกำจัดซีโอดี และสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม โดยการนำสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 % มารีเจนเนอเรต์แต่ไม่ได้เพิ่มอุณหภูมิ พบว่าการนำซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้วมาใช้งานใหม่ ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีได้ต่ำโดยให้ร้อยละในการกำจัดเพียง 7.94 เท่านั้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดค่าซีโอดีที่ถูกดูดซับไว้บนซีโอไลต์ได้เพียงบางส่วน บางส่วนที่ไม่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนออกมาได้ เนื่องมาจากสารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนของซีโอไลต์ไม่สามารถคายการดูดซับออกมาจากการฟื้นฟูสภาพได้ทั้งหมด แต่อย่างไรก็ตามการให้อุณหภูมิที่สูงมากเพื่อใช้ในการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์

จะทำให้โครงสร้างผลึกของซีโอไลต์เสียหาย ดังผลการทดลองของ เลิศ (2545) ได้ศึกษาการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ชนิดเอกซ์ที่ใช้แล้วสำหรับการดูดซับเอทีลิน ไกลคอล โดยทำการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ชนิดเอกซ์โดยการเผาภายใต้บรรยากาศความเข้มข้นของออกซิเจนที่ต่างกันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า สภาพการเผาที่ความเข้มข้นของออกซิเจนสูง ๆ ทำให้ค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของซีโอไลต์ลดลง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้อย่างรุนแรงมีผลทำให้โครงสร้างของซีโอไลต์เสียหาย

ดังนั้นในการให้อุณหภูมิสูงเพื่อช่วยคายการดูดซับในการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์นั้นต้องศึกษาถึงระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมด้วย ซึ่งจะทำให้โครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ไม่เสียหาย อีกทั้งเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ เพื่อที่จะทำให้ซีโอไลต์สามารถนำกลับมาใช้งานในการดูดซับ และแลกเปลี่ยนไอออนได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด



ภาพที่ 27 ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนในแบบจำลองคลองวนเวียนแบบต่อเนื่อง และการฟื้นฟูสภาพเมกานีสซีโอไลต์

หมายเหตุ : ที่แกน X ตัวเลข 1, 4, 7 และ 10 = 30 นาที, ตัวเลข 2, 5, 8 และ 11 = 60 นาที, ตัวเลข 3, 6, 9 และ 12 = 90 นาที

3.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียในโตรเจนที่เหลืออยู่ในสารฟื้นฟูสภาพ (regenerant)

จากการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียในโตรเจนที่เหลืออยู่ในสารฟื้นฟูสภาพ (regenerant) โดยการนำสารละลาย 25 % NaCl จากการนำไปใช้ฟื้นฟูสภาพมาทำการกรองด้วยกระดาษกรอง และนำมาวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียในโตรเจน พบว่าในสารรีเจนเนอแรนต์จากการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเฉลี่ยของปริมาณแอมโมเนียในโตรเจนอยู่เท่ากับ 19.24, 15.06 และ 10.67 มก./ล. ตามลำดับ โดยคิดเป็นร้อยละของปริมาณแอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสียเริ่มต้น เท่ากับ ร้อยละ 76.65, 60.0 และ 42.51 ตามลำดับ ดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียในโตรเจนที่เหลืออยู่ในสารฟื้นฟูสภาพ

การฟื้นฟูสภาพ เมกานีสซีโอไลด์ ครั้งที่	ซ้ำที่	ปริมาณแอมโมเนีย ในโตรเจน (มก./ ล.)	ค่าเฉลี่ย	คิดเป็นร้อยละของ ปริมาณแอมโมเนีย ในโตรเจนเริ่มต้น
1	1	19.40	19.24 ค่าS.D. = 0.36	76.65
	2	19.50		
	3	18.83		
2	1	14.80	15.06 ค่าS.D. = 0.36	60.00
	2	15.47		
	3	14.90		
3	1	11.03	10.67 ค่าS.D. = 0.53	42.51
	2	10.06		
	3	10.94		

หมายเหตุ : ค่าS.D. = Standard Deviation (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

ปริมาณแอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสียเริ่มต้น 25.10 มิลลิกรัมต่อลิตร

4. ผลการวิเคราะห์ค่าไอโซเทอร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) ด้วยแมงกานีสซัลไฟด์จากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ ในแบบจำลองคลองวนเวียนแบบต่อเนื่อง

ทำการทดสอบการดูดซับแอมโมเนียไนโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ ปริมาณ 12,000 มิลลิลิตร (12 ลิตร) โดยใช้วิธีการที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 2.1 และ 2.2 นั่นคือการใช้แมงกานีสซัลไฟด์กำหนดขนาด (1.50 มม.) บรรจุในแบบจำลองคลองวนเวียนที่ระดับความสูง 0.25 (หรือ 8,408.25 g), 0.4 (หรือ 13,453.20 g), 0.5 (หรือ 16,816.50 g), 0.6 (หรือ 20,179.80 g) และ 0.75 (หรือ 25,224.75 g) ของความสูงแบบจำลองคลองวนเวียน และใช้อัตราการไหลที่เหมาะสมคือที่ 20 ลิตรต่อชั่วโมง มีระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสมคือที่ 120 นาที ความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเสียเริ่มต้น เท่ากับ 22.70 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ผลการวิเคราะห์ค่าไอโซเทอร์มการดูดซับดังนี้

M (g)	V (L)	C_o (mg)	C_e (mg/L)	Q (mg/g)
8,408.25	12.000	272.400	17.3200	0.2888
13,453.20	12.000	272.400	10.0000	0.1857
16,816.50	12.000	272.400	8.2000	0.1495
20,179.80	12.000	272.400	6.7000	0.1253
25,224.75	12.000	272.400	4.9500	0.1009

M = ปริมาณแมงกานีสซัลไฟด์ที่ใช้ (g)

V = ปริมาตรของน้ำเสียฟาร์มสุกร และไก่ที่ใช้ (L)

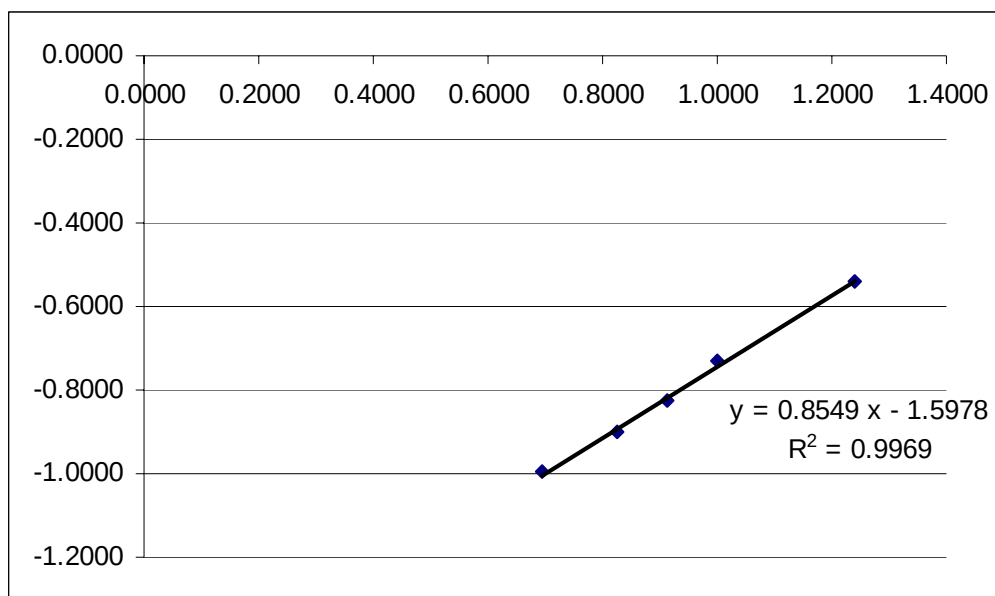
C_o = ความเข้มข้นเริ่มต้นทั้งหมดของแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเสียที่ใช้ (mg)

C_e = ความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเสีย ภายหลังการดูดซับ (mg/L)

q = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (mg/g) หรือเรียกว่า ความจุของการดูดซับ (adsorption capacity)

q	C _e	1/C _e	1/q	Log C _e	Log q
0.2888	17.3200	0.0577	3.4630	1.2385	-0.5394
0.1857	10.0000	0.1000	5.3862	1.0000	-0.7313
0.1495	8.2000	0.1000	6.6869	0.9138	-0.8252
0.1253	6.7000	0.1220	7.9789	0.8261	-0.9019
0.1009	4.9500	0.1493	9.9084	0.6946	-0.9960

ในการวิเคราะห์หาไอโซเทอร์มการดูดซับของแมงกานีสซีโอไซด์ ในการดูดซับแอมโมเนีย ในโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ พบว่า สอดคล้องกับ สมการในการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isoterm) เนื่องจากสมการความสัมพันธ์ระหว่าง Log q และ Log C_e มี ลักษณะเส้นกราฟเป็นเส้นตรง โดยสามารถแสดงได้ดังนี้



ภาพที่ 28 Freundlich Adsorption Isoterm ของแอมโมเนียใน โตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่

$$\text{สมการฟรุนดลิช} \quad \text{Log } q = \text{Log } K + 1/n \text{ Log } C_e \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{แทนค่าสมการจากกราฟจะได้} \quad \text{Log } q = -1.5978 + 0.8549 \text{ Log } C_e \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$R^2 = 0.9969$$

$$y = 0.8549x - 1.5978$$

$$\text{Log } K = -1.5978$$

$$1/n = 0.8549$$

$$n = 1.1697$$

โดยเขียนให้อยู่ในรูปสมการฟรุนดลิช คือ $\text{Log } q = -1.5978 + 0.8549 \text{ Log } C_e$ มีค่า $R^2 = 0.9969$ แสดงว่า บริเวณดูดติดผิวมีหลายโมเลกุล บริเวณดูดติดผิวมีพื้นที่ไม่แน่นอน และ พลังงานการดูดติดผิวในแต่ละบริเวณมีค่าไม่เท่ากัน และเมงกานีสซีโอไลต์มีความจุในการดูดซับ แอมโมเนียในโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกร และไก่ในทุกปริมาณความสูงที่ใช้ในแบบจำลองคลอง วนเวียน โดย มีค่า $1/n = 0.8549$ ใกล้เคียง 1 แสดงถึงความจุของการดูดซับที่คงที่ และเป็นเส้นตรง (ปิยะ, 2545) และ (นิพัทธา, 2548) สามารถกล่าวได้ว่าเมงกานีสซีโอไลต์จะสามารถใช้ดูดซับ แอมโมเนียในโตรเจนได้ดีเมื่อความเข้มข้นของปริมาณแอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสียฟาร์มสุกร และไก่มีค่าสูง และความ สามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียในโตรเจน ในสารละลายน้ำเสียมีค่าต่ำ

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาความสามารถ และปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ด้วยเมมกานีสซีโอไลต์ในแบบจำลองคลองวนเวียน ขนาดความจุ 33,633 ลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. ในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ ด้วยเมมกานีสซีโอไลต์ ระยะเวลา 1.5 – 5.0 มม. ปริมาณ 25,224.75 ลบ.ซม./ปริมาณน้ำเสีย 12 ลิตร ที่อัตราการไหล 20 ล./ชั่วโมง ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างน้ำเสียกับเมมกานีสซีโอไลต์ 120 นาที ค่าพีเอชน้ำเสีย 7.90 ที่อุณหภูมิห้อง สามารถกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนได้เฉลี่ยสูงที่สุด คือที่ร้อยละ 59

2. ในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ ด้วยเมมกานีสซีโอไลต์ กำหนดขนาด 1.50 มม. ปริมาณ 25,224.75 ลบ.ซม./ปริมาณน้ำเสีย 12 ลิตร ที่อัตราการไหล 20 ล./ชั่วโมง ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างน้ำเสียกับเมมกานีสซีโอไลต์ 120 นาที ค่าพีเอชน้ำเสีย 8.65 ที่อุณหภูมิห้อง สามารถกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนได้เฉลี่ยสูงที่สุด คือที่ร้อยละ 78

3. จากการเปรียบเทียบความสามารถ และประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนจากผลการทดลองทั้งสองชุดการทดลอง พบว่า ในสภาพแวดล้อมและปัจจัยอื่นที่เหมือนกัน การใช้เมมกานีสซีโอไลต์กำหนดขนาด (1.50 มม.) จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนได้ดีกว่าแบบขนาด (1.5- 5.0 มม.)

4. ในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ด้วยเมมกานีสซีโอไลต์ กำหนดขนาด (1.50 มม.) ในแบบจำลองคลองวนเวียนแบบต่อเนื่อง สรุปได้ว่า ในการใช้งานครั้งที่ 1 โดยใช้เมมกานีสซีโอไลต์ที่ยังไม่ผ่านการฟื้นฟูสภาพซึ่งมีประสิทธิภาพในการใช้งาน 100 เปอร์เซ็นต์ พบว่าที่ เวลาสัมผัส 30, 60 และ 90 นาที สามารถกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนได้ลดลงเฉลี่ยร้อยละ 54.92, 24.42 และ 6.15 ตามลำดับ และหลังจากการใช้งานเมมกานีสซีโอไลต์ครั้งที่ 1 แล้ว สามารถนำเมมกานีสซีโอไลต์มาผ่านการฟื้นฟูสภาพ (regenerated) และนำมาใช้ใหม่ได้อีก 2 ครั้ง (สามารถใช้งานได้ทั้งหมด 3 ครั้ง) ซึ่งสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และเป็น

การลงทุนที่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อม โดยเมงกานีสซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1 จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนดีกว่าเมงกานีสซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2 หลังจากนั้น เมงกานีสซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3 จะไม่สามารถนำมาใช้ในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้อีกต่อไป เพราะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ต่ำมาก

5. ในการวิเคราะห์หาไอโซเทอรั่มการดูดซับของเมงกานีสซีโอไลต์ในการดูดซับแอมโมเนียไนโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ พบว่า มีความสอดคล้องกับ สมการในการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isoterm) เนื่องจากสมการความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q$ และ $\log C_e$ มีลักษณะเส้นกราฟเป็นเส้นตรง โดยมีค่า $R^2 = 0.9969$

ข้อเสนอแนะ

1. ในการศึกษาความสามารถและประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ด้วยเมมเบรนซีโอไลต์ในแบบจำลองคลองวนเวียน พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียได้ไม่เต็มที่เท่าที่ควร เนื่องจากในน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่มีการปนเปื้อนของ Ca^{2+} ในน้ำค่อนข้างสูง ซึ่งมาจากการใช้ CaCO_3 ในการปูพื้นเพื่อทำความสะอาดคอกสุกร นอกจากนี้ยังมีการปนเปื้อน K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} ที่มาจากแหล่งน้ำธรรมชาติ มีผลทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของ NH_4^+ ลดต่ำลง เนื่องจาก Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , Mg^{2+} และสารอินทรีย์อื่น ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย จะแย่งกันแลกเปลี่ยนไอออน และจับติดผิวและรูพรุนของเมมเบรนซีโอไลต์ จึงควรหาวิธีการกำจัด Ca^{2+} และสารอินทรีย์อื่น ๆ ที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียก่อน ซึ่งอาจใช้วิธีการตกตะกอนสารดังกล่าวข้างต้นทางเคมี ก่อนนำมากำจัดแอมโมเนียด้วยเมมเบรนซีโอไลต์ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพการกำจัด NH_4^+ ได้สูงขึ้น

2. จากผลการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนที่เหลืออยู่ในสารฟื้นฟูสภาพ (regenerant) พบว่าในสารรีเจนเนอแรนต์จากการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1 และ 2 มีค่าเฉลี่ยของปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในปริมาณที่สูง คือเท่ากับร้อยละ 76.65 และ 60.0 ตามลำดับ ของปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนเริ่มต้นก่อนการกำจัด ดังนั้น ในการกำจัดสารรีเจนเนอแรนต์ควรระวังการปนเปื้อนสารแอมโมเนียกลับลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติด้วย

3. ในการศึกษาเรื่องการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ในครั้งต่อ ๆ ไป ควรทำการศึกษาเรื่องการเพิ่มอุณหภูมิในการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) ด้วย เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ได้อย่างเต็มที่

4. ในการใช้งานซีโอไลต์ชนิดที่มีการเคลือบสารเมมเบรนที่ผิวของซีโอไลต์ เมื่อนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียควรมีการวัดปริมาณเมมเบรนของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยการใช้ซีโอไลต์ชนิดที่มีการเคลือบผิวด้วยเมมเบรนด้วย หากพบว่าปริมาณเมมเบรนที่สลายปนมาในน้ำปริมาณสูง ควรนำน้ำที่ผ่านการบำบัดนั้นไปทำการตกตะกอนทางเคมี เพื่อกำจัดเอาสารเมมเบรนที่สลายออกก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติด้วย

5. การกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วยแมงกานีสซีโอไลต์ในระบบคลองวนเวียนจากการศึกษา^{นี้} สามารถนำข้อมูลไปปรับใช้กับบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดที่เป็นระบบปิดได้ ซึ่งจะช่วยให้กระบวนการเลี้ยงสัตว์น้ำสอดคล้องกับนโยบาย Good Aquaculture Practice (GAP) ยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วยแมงกานีสซีโอไลต์จากงานวิจัยนี้ไม่สามารถที่จะนำไปใช้ได้กับบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่เป็นน้ำเค็ม

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2542. การพัฒนาและถ่ายทอดเทคโนโลยีการจัดการน้ำเสียจากฟาร์มสุกร. กรมทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

_____. 2542. การศึกษาความเหมาะสมของการกำหนดค่ามาตรฐานและวิธีตรวจวัดกลิ่นจากฟาร์มสุกร. กรมทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

กรมโรงงาน กระทรวงอุตสาหกรรม. 2541. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมสำหรับโรงงานฆ่าสัตว์ปีก. กรมทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

กันตริย์ ศรีพงษ์พันธ์. 2547. มลพิษทางน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 3, โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์, นครปฐม.

กิตตินันท์ คงสืบชาติ. 2546. ดินเผาดูดซับดินเหนียวขี้เลื่อยเพื่อการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ฉัตรลีนี สุรเสน. 2545. การกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยการกรองด้วยเปลือกไข่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ชลทิศ แก้วสี และ วีระมนต์ สายทอง. 2538. การบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรด้วย EM: รายงานโครงการนักศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ณรงค์ วุทธเสถียร. 2540. การปรับสภาพน้ำสำหรับอุตสาหกรรม. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

ดนัย ลิ้มปณัณ. 2540. ซีโอไลต์ธรรมชาติ: สารมหัศจรรย์. วารสารวิชาการAPHIL. 37- 43.

ทัศนีย์ อัดตะนันท์, ประไพ อิศระ, บัญญัติ เศรษฐดี และสมชาย กริฑาภิรมย์. 2540. การศึกษาเปรียบเทียบซีโอไลต์กับวัสดุอื่น ๆ ในระบบชั้นดินก่อดินที่ใช้บำบัดน้ำเสียจากห้องสุขา. วารสารดิน และปุ๋ย, จ. 19. 76- 84.

ธีรพงศ์ ไกรนรา. 2528. ผลกระทบของแอมโมเนียต่อปลาอุกด้าน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิพัทธา ชาติธานี. 2548. ประสิทธิภาพของซีโอไลต์ในการกำจัดน้ำมันเบนซิน และดีเซล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

บุญมาส มุ่งธัญญา. 2542. การกำจัดแอมโมเนีย และฟอสเฟตในน้ำทิ้งชุมชนโดยการแลกเปลี่ยนไอออน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประภารัชกรณ์ สาธิตคุณ. 2546. การกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานสีออกโดยใช้ซีโอไลต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปริดา พากเพียร, สุรสิทธิ์ อรรถจารุสิทธิ์, ไพโรจน์ โสมนัส, พิชิต พงษ์สกุล. 2535. แนวทางการใช้ซีโอไลต์เพื่อลดปัญหามลพิษและเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร ,วารสารดินและปุ๋ย จ. 14: 337- 341.

ปัญญา ศรีพระราม และวัลลพ จิงสง่า. 2536. การนำถ่านกัมมันต์มาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดแบบตะกอนเร่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ปิยะ ปลูกิณทร์. 2545. การกำจัดแคดเมียมออกจากน้ำโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

พงศธร อุณจิตต์วรรณะ. 2535. การใช้ซีโอไลต์ปรับปรุงน้ำเสียและของเสียจากฟาร์ม. วารสารสุทธศาสตร์. 47- 51.

พงศ์ธร อุ๋นจิตต์วรรณะ. 2535. การใช้ซีโอไลต์ปรับปรุงน้ำเสียและของเสียจากฟาร์ม. **สุกาสาน** 18 (72) : 47- 52.

พรรณราย รุญเจริญ. 2546. การกำจัดแคดเมียมในสารละลายโดยใช้เพอร์ไลต์เป็นสารดูดซับ. **วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.**

พัฒนา มุลพฤษ. 2539. **อนามัยสิ่งแวดล้อม**. หจก. เอ็น.เอส.แอล พรินติ้ง, กรุงเทพฯ.

มันสิน ตันทุลเวศม์ และมันรักษ์ ตันทุลเวศม์. 2527. **วิศวกรรมการประปา เล่ม 2**. ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

มันสิน ตันทุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา. 2539. **การจัดการคุณภาพน้ำ และการบำบัดน้ำเสีย บ่อเลี้ยงปลา และสัตว์น้ำอื่น ๆ**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.

มณีวรรณ เกตะวันดี. 2550. **การกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมฟอกหนังด้วยเมมเบรนซีโอไลต์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิทยา เทียมสุข. 2544. **การกำจัดไนโตรเจนในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยซีโอไลต์**. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สงกรานต์ พละเสน. 2545. **ประสิทธิภาพของระบบเอสบีอาร์ร่วมกับซีโอไลต์ในการบำบัดน้ำเสีย จากฟาร์มสุกร**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สมร มุตตามระ. 2541. **เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสีย(ขั้นสูง)**. พิมพ์ครั้งที่ 1, กรมส่งเสริมคุณภาพ สิ่งแวดล้อม กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ.

สาธิตา แสงสัมฤทธิ์ และฤติรัตน์ ภาววงษ์ศักดิ์. 2546. **การบำบัด Cd (II) และ Ni (II) จากน้ำเสีย สังกะหรณ์โดยใช้ตะกอนและน้ำชะตะกอนจากโรงกรองน้ำ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี.

- สิรินันท์ กันศิริ. 2550. การกำจัดซีโอไลต์ในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำลอยหิน.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุชาดา ขางเอน. 2546. การกำจัดแอมโมเนียในน้ำเสียจากตู้เลี้ยงปลาโดยการกรองด้วยหินภูเขาไฟ.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุชาติ เหลืองประเสริฐ. 2538. การศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงนมมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์โดย
ระบบเอสบีอาร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุภากรณ์ คางคำ. 2548. การพัฒนากระบวนการสำหรับการฟื้นฟูสภาพโมเลกุลาร์ซีพีใช้แล้ว.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- โสธดา ขุนโหร. 2544. แอมโมเนียกับอุตสาหกรรม. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ, ฉ. 157 ปีที่
49. น. 13.
- อุษา อ้นทอง, นินนาท โชติบริบูรณ์, ธัญญา พันฤทธิคำ. 2543. การบำบัดแอมโมเนียในน้ำทิ้งจาก
โรงงานอุตสาหกรรมอาหารทะเลแช่แข็งในจังหวัดสงขลา ด้วยซีโอไลต์. ภาควิชาเคมี และ
ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ.
- Ahmet, D., Ahmet, G. and Eyyup, D. 2002. **Ammonium removal from aqueous solution by
ion-exchang using packed bed natural zeolite.** Yildiz Technical University,
Department of Environmental Engineering, Turkey.
- Aiyuk.S. A.Van Haandel W. Verstrate. 2004. **Environmental Technology:** Remove of
Amonium Nitrogen from Pretreated Domestic Sewage Using A Natural Ion Exchanger.
25: 1321- 1330.
- Ames LL. 1987. **Zeolite Removal of Ammonium Ions from Agricultural and Other
Wastewater.** Proc. 1-3th Pacific Industrial Waste Conf. Washington St. University. 132-
152.

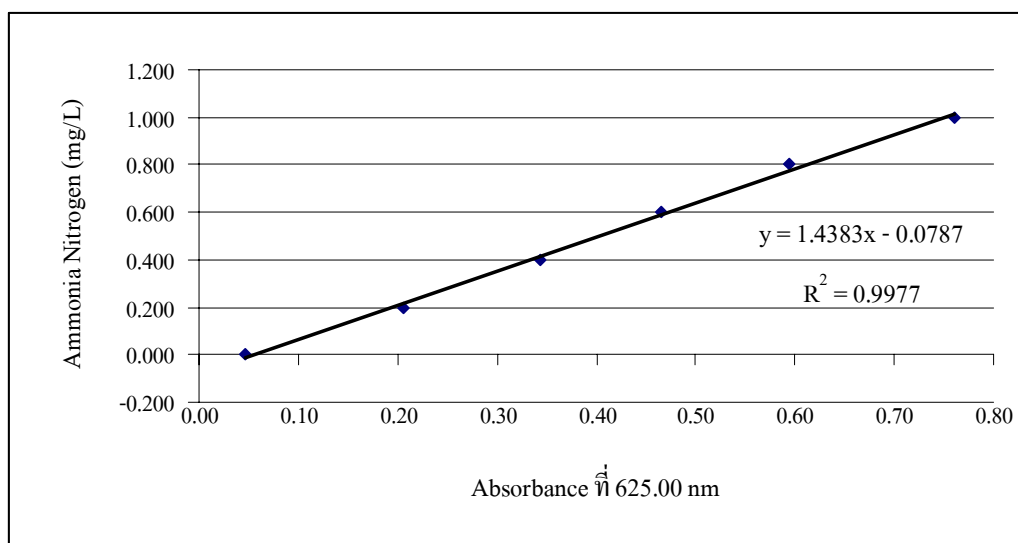
- Arrak Damrongsat, Kannitha Krongthamchat and Somchai Dararat. 2006. Using Zeolite and Ungraded Sand to Remove Ammonia Nitrogen From Swine Weastwater. **KKU Res J** 11 (4) : Oct.- Dec.
- Booker NA. 1996. Ammonia Removal from Sewage Using Natural Australian Zeolite. **Water Science and Technology Journal**; 34: 17- 24.
- Booker NA, Cooney EL and Priestley AJ. 1996. Ammonia Removal from Sewage Using Natural Australian Zeolite. **Wat Sci Tech** ; 34: 17- 24.
- Clifton, R.A. 1987. **Natural and Synathetic Zeolite**. U.S. Government printing office, Division of Industral Minerals, Bureau of Mines, Washington, D.C. p 122 .
- Eckenfelder, W.W., Jr. 1989. **Industral Water Pollution Control**. 2nd ed (n.p.), McGraw- Hill Inc.
- Kithome. 1999. Effect of pH on Ammonium Adsorption by Natural Zeolite. Clinoptilolite. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**; 30: 9-10.
- Mercer. 1970. Amonia Removal from Secondary Effluent by Selective Ion Exchange. **Water Pollution Control Part 2**.
- Metcalf & Eddy. 1991. **Wastewater Engineering(treatment disposal reuse)**. 3rd ed. Singapore: Mc Graw-Hill Inc.
- Mihelcic, S. 1999. **Comparison of Emulsion Oil Removal Efficiency in Gas Station Wastewater with Difference Adsorbents**. M.Sc. Environmental Sanitation. Mahidol University.Bangkok.

- Mumpton, F.A. and P.H. Fisman. 1977. The application of natural zeolites in animal science and aquaculture. **J. Animal Science**. 15 (5) : 1188- 1202.
- Nimura, Yoshihachiro. 1973. A direct estimation of microgram amounts of ammonia in water without salt- error. **Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.** 39, 1315- 1321.
- Peter, Base. 1995. Clinotilolite- a physico- chemical approach to ammonia removal in hatchery and aquaculture water reuse systems. **Fishery and Marine Service, Tech Rept**, 535: 12.
- Pornraveewat I. 1986. **Sequencing batch for domestic wastewater**. Master Thesis in Environmental Technology Faculty of Graduate studies Mahidol University. Bangkok.
- Qasim SR. 1999. **WasteWater Treatment Plants planning, design and operation 2rd ed.** PA.
- Sheng H.L. and Chang L.W. 1996. Ammonia Removal from Aqueous Solution by Ion Exchange. Ind Eng. **Chem Res.** 35(4): 553-558.
- Szostak, R. 1998. **Molecular Sieves Principle of Synthesis and Identification**. 3st ed., Norstrand Reinhold., Inc., New York.
- Torii, K. 1974. Utilization of Nature Zeolites in Japan. Cited by F.A. Mumpton and P.H. Fishman. The Application of Natural Zeolites in Animal Science and Aquaculture. **J. Animal Science**. 45(5) : 1188- 1202.

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 ค่ามาตรฐานแอมโมเนียไนโตรเจน

Ammonia nitrogen (mg/L)	Absorbance ที่ 625.00 nm
0.000	0.05
0.200	0.21
0.400	0.34
0.600	0.47
0.800	0.59
1.000	0.76



ภาพผนวกที่ 1 กราฟมาตรฐานแอมโมเนียไนโตรเจน

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายศัลป์ชัย มณีชัย
วัน เดือน ปี ที่เกิด	9 สิงหาคม พ.ศ. 2514
สถานที่เกิด	จังหวัดชัยนาท
ประวัติการศึกษา	ศษ.บ.(มัธยมศึกษา-วิทยาศาสตร์) มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช พ.ศ. 2542
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	พนักงานวิทยาศาสตร์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ภาควิชาชีววิทยาประมง คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนสนับสนุนงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อการตีพิมพ์ ในวารสารระดับชาติและระดับนานาชาติ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2550