



การสังเคราะห์ผงซิลิกาซีโรเจลและซีโอไลต์ Y จากเถ้าแกลบ เพื่อบำบัดมลสารในน้ำเสียชุมชน

Synthesis of Porous Silica Xerogel Powder and Zeolite Y from Rice Husk Ash for Pollutants Treatment in Municipal Wastewater

Chanon Dangsepon* Nipon Tungkananuruk and Kanita Tungkananuruk

ชานนท์ แดงสีพล* นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และ คณิตา ตั้งคณานุรักษ์

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน 10903

*E-mail : ball_loon_3-2@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการใช้ประโยชน์จากเถ้าแกลบมาสังเคราะห์เป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดมลสารในน้ำเสียชุมชน เถ้าแกลบดำถูกสกัดด้วยเบสและสังเคราะห์เป็นผงซิลิกาซีโรเจลโดยการเติมสารละลายแอมโมเนียซึ่งเป็นตัวยับยั้งการโพลีเมอไรเซชันของอนุภาคเจลโดยอาศัยกลไกการถ่ายโอนโปรตอนระหว่างลิทวีสเอซิดและลิทวีสเบส ผลการศึกษาพบว่าเถ้าแกลบดำให้ผลผลิตซิลิกาเฉลี่ย 30.71%w/w และมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 500 ไมครอนที่ประกอบด้วยเฮไลต์และสารอินทรีย์ตกค้าง/ความชื้น 9.51%w/w และ 0.41%w/w ตามลำดับ และมีความหนาแน่นของอนุภาคเท่ากับ 1.97 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Y จากผงซิลิกาซีโรเจลโดยใช้องค์ประกอบทางเคมีเริ่มต้น $\text{Na}_2\text{O} : \text{SiO}_2 : 0.2\text{Al}_2\text{O}_3 : 50\text{H}_2\text{O}$ จากการศึกษาแบบแบดซ์พบว่าซีโอไลต์ Y มีประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารในน้ำเสียชุมชนโดยรวมสูงกว่าผงซิลิกาซีโรเจล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง $\text{NH}_3\text{-N}$ แต่อย่างไรก็ดีเมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนของปริมาณตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับพบว่าวัสดุทั้ง 2 เป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการบำบัดมลสารในน้ำเสียชุมชนมากกว่าเถ้าลอยของถ่านหินลิกไนต์และถ่านไม้ไผ่

คำสำคัญ : ซิลิกาซีโรเจล; ซีโอไลต์; เถ้าแกลบ; น้ำเสียชุมชน

Abstract

This research aims to utilize rice husk ash as raw material for synthesizing adsorbents with potential of pollutants treatment in municipal wastewater. The carbonised rice husk ash was carried out via alkaline extraction followed by synthesis as porous silica xerogel powder via ammonia solution addition, polymerization inhibitor of silica gel particles via proton transfer mechanism between Lewis acid and base. The results showed that carbonised rice husk ash had average yield of silica was 30.71%w/w and particle size less than 500 microns with halite and organic residue/moisture 9.51% and 0.41%, respectively, and particle density was 1.97 g/cm³. Then, zeolite Y was synthesized from this porous silica xerogel powder at a suitable batch composition Na₂O : SiO₂ : 0.2Al₂O₃ : 50H₂O. From batch experiment, zeolite Y had more overall removal efficiency of pollutants in municipal wastewater than porous silica xerogel powder, especially in NH₃-N. However, the adsorbate/adsorbent ratios showed that both adsorbents had more potential for pollutants treatment in municipal wastewater than lignite fly ash and bamboo charcoal.

Keywords : Porous silica xerogel; Zeolite; Rice husk ash; Municipal wastewater

บทนำ

ในปัจจุบันแกลบข้าวเป็นของเสียเกษตรกรรมที่ถูกนำมาใช้ในการสกัดและสังเคราะห์ซิลิกาซีโรเจล (Silica xerogel) จำนวนมาก เพราะเนื่องจากแกลบข้าวเป็นแหล่งของซิลิกาอสัณฐานซึ่งมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีและมีความบริสุทธิ์ที่สูง นอกจากนี้ยังมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำเมื่อเทียบกับกระบวนการผลิตซิลิกาซีโรเจลทั่วไปที่ใช้สารตั้งต้นจากแร่ควอตซ์ ซึ่งต้องใช้พลังงานที่สูงในกระบวนการหลอมเพื่อเตรียมโซเดียมซิลิเกตโดยไม่สามารถใช้วิธีการละลายในต่างได้ [1, 2] อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีความพยายามในการสกัดและสังเคราะห์ซิลิกาซีโรเจลโดยกระบวนการต่างๆ ทั้งกระบวนการทางเคมี [3-5] และกระบวนการทางความร้อน [6-9] ซึ่งโดยทั่วไปซิลิกาซีโรเจลที่ได้จากการสกัดและสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางเคมีจะมีความพรุนที่สูงกว่าและมีพื้นที่ผิวประมาณ 100-250 m²/g [4, 5, 10] ทำให้วัสดุดังกล่าวมีความสามารถในการเป็นวัสดุดูดซับที่ดี แต่อย่างไรก็ดีปัญหาที่สำคัญในการสกัดและสังเคราะห์ซิลิกาซีโรเจลด้วยกระบวนการทางเคมี คือ ซิลิกาซีโรเจลที่ได้มักมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อน (Massive) [3, 5] ซึ่งต้องผ่านกระบวนการบดย่อยเพื่อให้มีขนาดเล็กก่อนนำไปใช้จริงในทางปฏิบัติ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้มีความพยายามในการ

สังเคราะห์ซิลิกาซีโรเจลในลักษณะที่เป็นผง โดยการใช้สารตัวเติมในการยับยั้งการโพลีเมอไรเซชันของอนุภาคเจลเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับมลสารในน้ำเสียชุมชน นอกจากนี้ในการศึกษารุ่นนี้ได้มีความพยายามในการนำผงซิลิกาซีโรเจลที่สังเคราะห์ได้ มาสังเคราะห์เป็นวัสดุดูดซับทุติยภูมิอื่นๆ เช่น ซีโอไลต์ Y เพื่อหาวัสดุดูดซับมลสารที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการนำมาใช้การบำบัดมลสารในน้ำเสียชุมชน

อุปกรณ์และวิธีการ

การสังเคราะห์ผงซิลิกาซีโรเจลจากแกลบ

วิธีการสกัดซิลิกาจากแกลบตามวิธีของ Kalapathy et al. (2000) [3] ซิลิกาที่สกัดได้จากแกลบ 100 กรัม ละลายใน 2.5 N NaOH จำนวน 800 มิลลิลิตร บนเครื่องให้ความร้อน และปรับ pH ของสารละลายให้เท่ากับ 2 ด้วย conc. HCl จากนั้นจึงปรับ pH ให้มีค่าประมาณ 8 ด้วย conc. NH₄OH อบที่อุณหภูมิ 80 °C จนกว่าซิลิกาเจลแห้งสนิท ล้างด้วยน้ำกลั่น 3 รอบ วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง XRF (X ray fluorescence spectrophotometer, Bruker AXS SRS 3400)

การสังเคราะห์ซีโอไลต์ Y

เตรียมสารละลายโซเดียมอะลูมิเนตและสารละลายโซเดียมซิลิเกต โดยละลายผงอะลูมิเนียม (99.5% Al) และผงซิลิกาซีโรเจลบนเครื่องให้ความร้อนตามลำดับ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และนำสารละลายทั้ง 2 ผสมกัน กวนอย่างแรงเป็นเวลา 15 นาที ถ่ายใส่ขวด PP ปิดฝา ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน ก่อนนำเข้าเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 1 วัน ทำการล้างและอบตะกอนให้แห้ง และวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะด้วยเครื่อง XRD (X-ray diffractometer, Model D8 Advance: Bruker AXS, Source CuK alpha) โดยมีองค์ประกอบทางเคมีเริ่มต้นในการสังเคราะห์ (Batch composition) ดังนี้



การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดมลสารในน้ำเสียชุมชนโดยใช้ซีโอไลต์ Y และผงซิลิกาซีโรเจลด้วยวิธีแบบแบตช์ (Batch method)

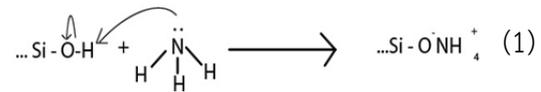
นำผงซิลิกาซีโรเจลและซีโอไลต์ Y ที่ได้จากการสังเคราะห์ 1 กรัม ลงในน้ำเสียชุมชนจากบ่อรวบรวมน้ำเสียมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าด้วยความเร็ว 200 rpm เป็นเวลา 60 นาที และทำการตรวจวัดพารามิเตอร์น้ำเสีย ได้แก่ $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ และ COD ตามวิธีมาตรฐานการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำและน้ำเสีย (Standard method for examination of water and wastewater) [4] โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้นของมลสารเท่ากับ 362.55, 30.91, 18.31 และ 192.00 mg/L ตามลำดับ และมีค่า pH เท่ากับ 7.6

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการสังเคราะห์ผงซิลิกาซีโรเจลจากเถ้าแกลบ

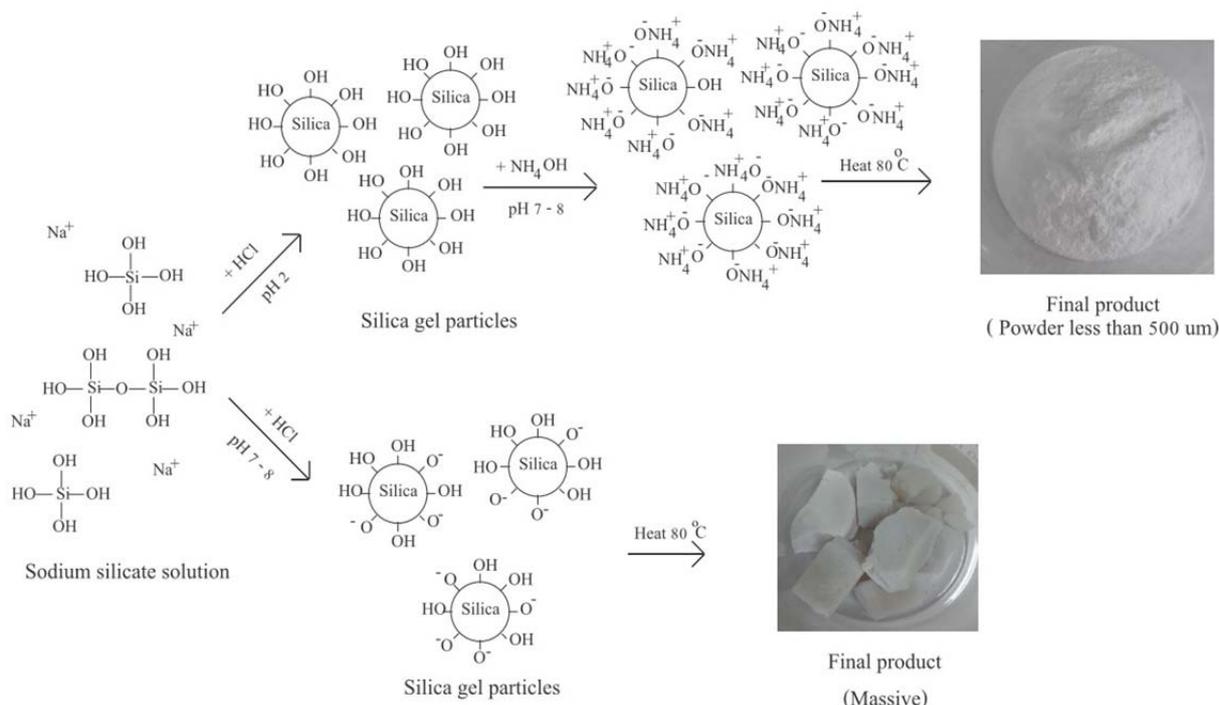
ผลการศึกษาพบว่าเถ้าแกลบดำ (Carbonised rice husk ash) 100 กรัม จะให้ผลผลิตซิลิกาเฉลี่ย (Silica yield) 30.71 กรัม หรือร้อยละ 30.71 โดยมวล เนื่องจากเถ้าแกลบดำมีปริมาณคาร์บอนเป็นจำนวนมากจึงทำให้ผลผลิตซิลิกาที่สกัดได้มีปริมาณค่อนข้างต่ำ นอกจากนี้จากการศึกษาพบว่าแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อการยับยั้งการโพลิเมอไรเซชันของอนุภาคเจลในสารละลาย

โดยอาศัยกลไกการถ่ายโอนโปรตอนระหว่างแอมโมเนียและหมู่ซิลานอล (Silanol group) บนพื้นผิวของอนุภาคเจล ซึ่งเป็นสารที่มีพฤติกรรมแบบลิวอิสเบส (Lewis base) และลิวอิสเอซิด (Lewis acid) ตามลำดับ ภายใต้สภาวะ pH เท่ากับ 2 (Isoelectric point of silanol group) ซึ่งเป็นสภาวะที่ซิลิกาเจลมีความหนืดต่ำสุด [11] ทำให้พื้นผิวของอนุภาคเจลเกิดการดูดซับแอมโมเนียดังปฏิกิริยาที่ (1) และรูปที่ 1



ทำให้เกิดการขัดขวางการโพลิเมอไรเซชันของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวอนุภาคเจล ส่งผลทำให้ได้ผลผลิตสุดท้ายที่มีลักษณะเป็นผง ตรงข้ามกับระบบซิลิกาเจลที่ไม่มีการเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งอนุภาคเจลจะเกิดการโพลิเมอไรเซชันโดยอาศัยหมู่ซิลานอลที่ไม่เกิดการแตกตัว (Si-OH) และหมู่ซิลานอลที่เกิดการแตกตัว (Si-O⁻) [11] มีอัตราการโพลิเมอไรเซชันสูงสุดที่ pH ประมาณ 8 [12] โดยมีไฮดรอกไซด์ไอออน (OH⁻) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ผลผลิตสุดท้ายมีลักษณะเป็นก้อนแข็ง (Massive) เมื่อผ่านการอบแห้ง

เมื่อทำการตรวจหาองค์ประกอบทางเคมีของผงซิลิกาซีโรเจลด้วยเทคนิค XRF ร่วมกับการทดสอบหาค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on ignition, LOI) โดยใช้วิธีมาตรฐาน ASTM D 7348 - 08 (Method B หรือ 950 °C) พบว่า ผงซิลิกาซีโรเจลมีปริมาณขององค์ประกอบที่เป็นโซเดียมและคลอรีนค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Kalapathy et al. (2000) [3] และ Kalapathy et al (2002) [14] (ตารางที่ 1 และ 2) ซึ่งบ่งชี้ถึงอิทธิพลของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อโครงสร้างของผงซิลิกาซีโรเจล ซึ่งโดยทั่วไปสารระเหยจะมีผลต่อวัสดุพูนที่ยังไม่เกิดการแข็งตัวเป็นโครงสร้างแข็งเกร็ง (Rigid structure) โดยทำให้เกิดพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและสมมาตรของนอกจากนี้ขนาดของอนุภาคก็มีผลต่อการดูดซับเช่นเดียวกัน โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีการคายซับ (Desorption) ที่ช้ากว่า อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า [15] รูปพูนที่ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น [13] จึงทำให้เกลือเกิดการดูดซับอยู่ในพื้นที่ผิวของ



รูปที่ 1 กลไกการก่อตัวของผงซิลิกาซีโรเจล

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาของผงซิลิกาซีโรเจล

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยมวล
SiO ₂	83.06
Na ₂ O	12.85
Cl	4.66
Loss on ignition (LOI)	0.41

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางแร่วิทยาของผงซิลิกาซีโรเจลจากการคำนวณโดยใช้ผลองค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางแร่วิทยา	ร้อยละโดยมวล
สารประกอบซิลิกาออสซิลาน (Sodium bearing silica)	90.08
เกลือเฮไลต์ (Halite)	9.51
สารอินทรีย์ตกค้างและความชื้น (Organic residue and moisture)	0.41

รูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) เพิ่มมากขึ้นทำให้การล้างเกลือไม่มีประสิทธิภาพมากพอในการกำจัดเกลือเหล่านี้ ออก [14] เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ผลผลิตซิลิกาที่ได้มีเกลือในปริมาณที่ค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามพบว่ามีซิลิกาซีโรเจลที่สังเคราะห์ขึ้นมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากเผา (LOI) ค่อนข้างต่ำ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 0.41 โดยมีมวล ซึ่งบ่งชี้ถึงปริมาณของน้ำและสารที่เผาไหม้ได้ในตัวอย่างที่ค่อนข้างต่ำ และมีความหนาแน่นของอนุภาคเท่ากับ 1.97 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งต่ำกว่าแก้วโซดาไลม์ (Soda lime glass) ทั่วไป บ่งชี้ถึงการมีรูพรุนในโครงสร้างของวัสดุ ทำให้มีความเป็นไปได้ในการนำวัสดุดังกล่าวมาใช้งานเป็นวัสดุดูดซับ

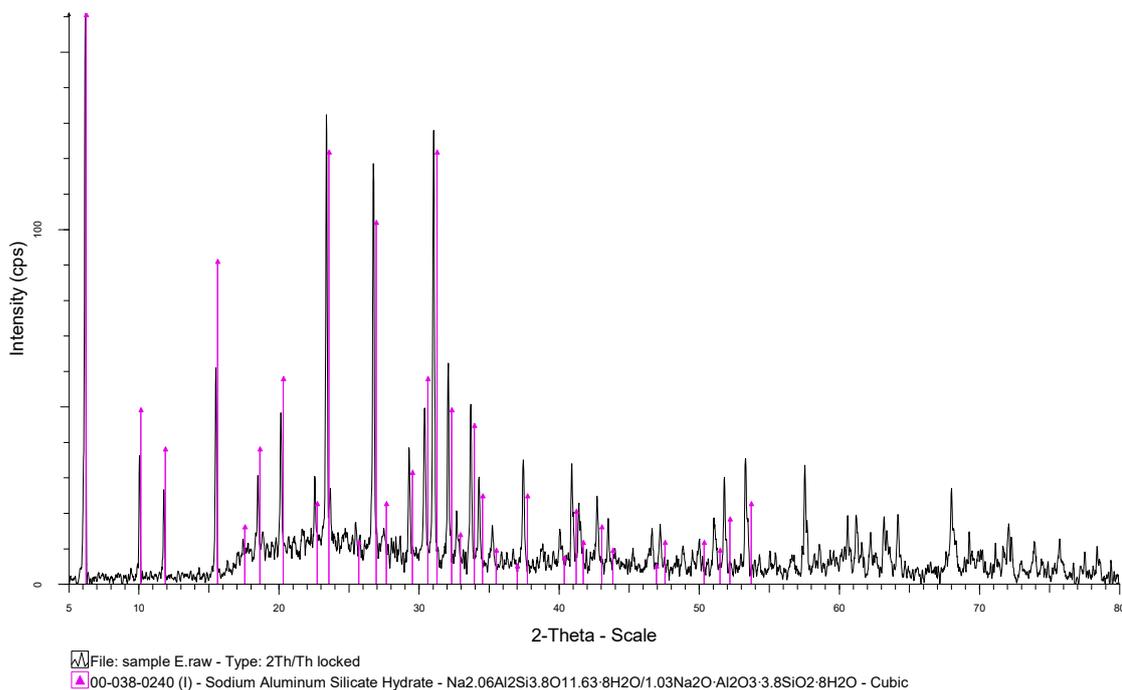
ผลการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Y

ผลการตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD และวิเคราะห์หาลักษณะเฉพาะโดยใช้โปรแกรมอีวา (Eva program) ดิฟแฟรคโตแกรม (Diffractogram) ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้สอดคล้องกับดิฟแฟรคโตแกรมของไฮเดรตซีโอไลต์ Y ของมาตรฐานอ้างอิง JCPDS (No. 00-038-0240 (I)) (รูปที่ 2) แต่อย่างไรก็ตามก็พบว่าการซีฟท์

(Shift) หรือเคลื่อนของค่า 2θ ไปทางซ้ายของดิฟแฟรคโตแกรมเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความบิดเบี้ยวของโครงสร้างผลึก ซึ่งเป็นผลมาจากมลทินในสารตั้งต้น นอกจากนี้ยังพบพีคที่มีช่วงกว้าง (Broad peak) ในดิฟแฟรคโตแกรมซึ่งบ่งชี้ถึงเฟสที่เป็นอสัญฐานบางส่วนที่อยู่ปะปนกับซีโอไลต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rahman et al. (2009) [16] ซึ่งพบว่าเป็นผลจากการสังเคราะห์ที่ไม่ใช้ซีดเจล (Seed gel) และจากการศึกษาพบว่าใน 1 แบตช์สังเคราะห์ (Batch synthesis) ให้ผลผลิตซีโอไลต์ประมาณ 67.68 กรัม

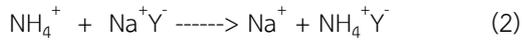
ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดมลสารในน้ำเสียชุมชนโดยใช้ซีโอไลต์ Y และผงซิลิกาซีโรเจลด้วยวิธีแบบแบตช์

ผลการศึกษาพบว่าซีโอไลต์ Y มีประสิทธิภาพในการกำจัด $\text{NH}_3\text{-N}$ และ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ได้สูงกว่าผงซิลิกาซีโรเจล โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัด $\text{NH}_3\text{-N}$ ที่สูงมาก (77.58%) เมื่อเทียบกับผงซิลิกาซีโรเจล (รูปที่ 3) ซึ่งบ่งชี้ถึงความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของซีโอไลต์ Y โดยอาศัยกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนร่วม (Counter ion)

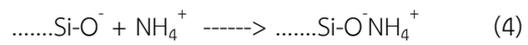
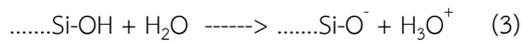


รูปที่ 2 ดิฟแฟรคโตแกรมของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้เทียบกับไฮเดรตซีโอไลต์ Y จากมาตรฐาน JCPDS (เส้นลูกศรแนวตั้ง)

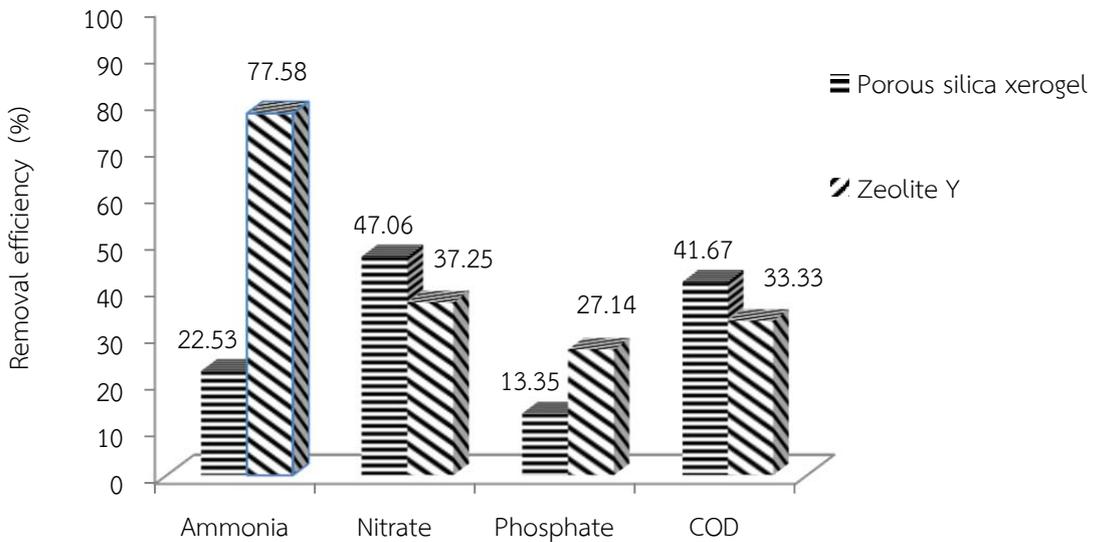
ที่มีหน้าที่ในการดักจับประจุลบส่วนเกินในโครงสร้างผลึกของวัสดุ ซึ่งประจุลบส่วนเกินดังกล่าวเกิดจากการแทนที่ของอลูมิเนียมในโครงสร้างเตตระไฮดรอนของซิลิกา (Silica tetrahedron) โดยสามารถแสดงกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดังปฏิกิริยาที่ (2)



ในทางกลับกัน กลไกการดูดซับแอมโมเนียของผงซิลิกาซีโรเจลเกิดขึ้นโดยอาศัยหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนพื้นผิวของอนุภาคเจล ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลดังกล่าวมีพฤติกรรมเป็นกรดอ่อนและสามารถแตกตัวได้บางส่วน เมื่ออยู่ในสารละลายที่มี pH มากกว่า 2 หรือจุดไอโซอิเล็กทริกของหมู่ไฮดรอกซิล โดยสามารถแสดงกลไกการดูดซับได้ดังปฏิกิริยาที่ (3) และ (4)



นอกจากนี้พบว่าผงซิลิกาซีโรเจลมีความสามารถในการดูดซับ NO_3^- -N และ COD สูงกว่าเล็กน้อย แต่มีความสามารถในการดูดซับ PO_4^{3-} -P ที่ต่ำกว่า ซึ่งบ่งชี้ถึงกลไกการดูดซับแบบหลายขั้นที่ซับซ้อนขึ้น และคุณสมบัติในการมีขั้วที่ต่ำกว่าจึงทำให้ดูดซับ COD ได้ดีกว่า [2] อย่างไรก็ตามจากการเปรียบเทียบอัตราส่วนของปริมาณตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (Adsorbent) พบว่าผงซิลิกาซีโรเจลและซีโอไลต์ Y เป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดมลสารในน้ำเสียชุมชนสูงกว่าถ่านลอยจากถ่านหินลิกไนต์และถ่านไม้ไผ่ (ตารางที่ 3) และจากการศึกษาพบว่าซีโอไลต์ Y ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอนุภาคที่เล็กมากซึ่งยากต่อการแยกวัสดุออกจากน้ำเสียจึงควรทำการขึ้นรูปวัสดุก่อนนำไปใช้งานจริงในทางปฏิบัติ เพื่อป้องกันการแขวนลอยของวัสดุในน้ำเสีย



รูปที่ 3 ประสิทธิภาพการบำบัดมลสารในน้ำเสียชุมชนด้วยผงซิลิกาซีโรเจล และซีโอไลต์ Y

ตารางที่ 3 อัตราส่วนของปริมาณตัวถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับของวัสดุชนิดต่างๆ

Sample	Adsorbed amount (mg/g)			
	NH ₃ -N	NO ₃ ⁻ -N	PO ₄ ³⁻ -P	COD
Silica xerogel powder ¹	8.17	1.45	0.24	8.00
Zeolite Y ¹	28.13	1.15	0.50	6.40
Bamboo charcoal [17]	0.33	-	0.23	3.20
Lignite fly ash [18]	0.76	-	0.39	1.92

¹ น้ำเสียเริ่มต้นมีปริมาณ NH₃-N NO₃⁻-N PO₄³⁻-P และ COD เท่ากับ 362.55, 30.91, 18.31 และ 192.00 mg/L ตามลำดับ pH = 7.6

สรุป

1. เถ้าแกลบดำ 100 กรัม ให้ผลผลิตซิลิกา 30.71 กรัมหรือร้อยละ 30.71 โดยมวล และเมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะของผลผลิตสุดท้ายที่ได้จากระบบที่ไม่มีการเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์และมีการเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์พบว่า แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์มีผลในการยับยั้งการโพลีเมอไรเซชันของอนุภาคเจลผ่านกลไกการถ่ายโอนโปรตอนระหว่างแอมโมเนียและหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของอนุภาคเจลทำให้ได้ผลผลิตสุดท้ายที่มีลักษณะเป็นผง และมีความหนาแน่นของอนุภาคต่ำกว่าแก้วโซดาไลม์ซึ่งบ่งชี้ถึงการมีรูพรุนในโครงสร้างของวัสดุ

2. ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของซีโอไลต์ Y พบว่า ดิฟแฟรกโตแกรมของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้สอดคล้องกับไฮเดรตซีโอไลต์ Y ของมาตรฐานอ้างอิง JCPDS (No. 00-038-0240 (I)) ร่วมกับเฟสที่เป็นอนุฐานปะปนอยู่บางส่วน

3. ซีโอไลต์ Y มีประสิทธิภาพในการบำบัดมลสารในน้ำเสียชุมชนโดยรวมมากกว่าผงซิลิกาซีโรเจล แต่อย่างไรก็ดีวัสดุทั้ง 2 ต่างเป็นวัสดุดูดซับมลสารในน้ำเสียชุมชนที่มีประสิทธิภาพ

4. ซีโอไลต์ Y ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอนุภาคที่เล็กมากซึ่งยากต่อการแยกวัสดุออกจากน้ำเสียจึงควรทำการขึ้นรูปวัสดุก่อนนำไปใช้งานจริงในทางปฏิบัติ เพื่อป้องกันการแขวนลอยของวัสดุในน้ำเสีย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Davidovits, J. 2008. Geopolymer: chemistry and application. 2nd ed, Institut Geopolymere, Sanit-Quentin.
- [2] Szostak, R. 1998. Molecular sieves. 2nd ed, Chapman & Hall, New York.
- [3] Kalapathy, U., Proctor, A. and Shultz, J. 2000. A simple method for production of pure silica from rice hull ash. Bioresource Technol. 73: 257-262.
- [4] Shelke, V. R., Bhagade, S. S. and Mandavgane, S. A. 2010. Mesoporous silica from rice husk ash. BCREC. 5(2): 63-67.
- [5] Kamath, S. R. and Proctor, A. 1998. Silica gel from rice hull ash: preparation and characterization. Cereal Chem. 75(4): 484-487.
- [6] Patil, R., Dongre, R. and Meshram, J. 2014. Preparation of silica powder from rice husk. ICAET-2014, 26-29.
- [7] Nagrale, S. D., Hajare, H. and Modak, P. R. 2012. Utilization of rice husk ash. IJERA. 2(4): 1-5.
- [8] Okutani, T. 2009. Utilization of silica in rice hulls as raw materials for silicon

- semiconductor. *Journal of metals, materials and minerals*. 19(2): 51-59.
- [9] Kapur, P. C. 1985. Production of reactive bio-silica from the combustion of rice husk in a tube-in-basket (TiB) burner. *Powder Technol.* 44: 63-67.
- [10] Ugheoke, I. B. and Mamat, O. 2012. A critical assessment and new research directions of rice husk silica processing methods and properties. *Maejo Int. J. Sci. Technol.* 6(3): 430-448.
- [11] Orlovic, A. M., Janackovic, D. T. and Skala, D. U. 2005. Aerogels in catalysis, pp.39-84. In Bevy L. P., ed. *New Developments in Catalysis Reseach*. NOVA, New York.
- [12] Plueddemann, E. P. 1991. *Silane Coupling Agent*. Plenum Press, New York.
- [13] Kepert, C. J. 2011. Metal – organic framework material, pp. 1 – 69. In Bruce, D. W., Hare, D. O. and Walton, R. I., eds. *Porous Materials*. A John Wiley and Son, Ltd, United Kingdom.
- [14] Kalapathy, U., Proctor, A. and Shultz, J. 2002. An improved method for production of silica from rice hull ash. *Bioresource Technol.* 85: 285-289.
- [15] Wang, H. and Shadman, F. 2013. Effect of particle size on the adsorption and desorption properties of oxide nanoparticle. *AIChE Journal*. 59(5): 1502-1510.
- [16] Rahman, M. N., Awang, M. B. and Yusof, A. M. 2012. Preparation, characterization and application of zeolite – Y (NaY) for water filtration. *Australian Journal of Basic and Applied Science*. 6(1): 50-54.
- [17] Kawkeaw, K. 2015. *Constructed Filter Tank with Bamboo Charcoal Adsorbent for Domestic Wastewater Treatment*. M.S.Thesis, Kasetsart University. (in Thai)
- [18] Kongkul, K. 2016. *Coagulation Capability of Lignite Fly Ash on Municipal Wastewater Treatment Comparing with Alum*. M.S.Thesis, Kasetsart University. (in Thai)