

การดูดซับกรดฮิวมิกด้วยเม็ดดูดซับจากตะกอนโรงผลิตน้ำประปา

Humic Acid Adsorption by Adsorbent Granule Derived From Sludge of Water Supply Production

สุภาวดี น้อยน้ำใส¹ และ สร้อยดาว วินิจนันท์^{2*}

Supawadee Noinumsai¹ and Soydoa Vinitnantharat^{2*}

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม พิษณุโลก

²สายวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

¹Environmental Science Programme, Faculty of Science and Technology, Pibulsongkarm Rajabhat University, Phitsanulok

²Division of Environmental Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi

Received : 28 October 2016

Accepted : 25 April 2017

Published online : 19 May 2017

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการนำตะกอนจากการผลิตน้ำประปา มาผลิตเป็นเม็ดดูดซับเพื่อใช้บำบัดกรดฮิวมิก โดยการปรับปรุงเม็ดดูดซับด้วยการผสมตะกอนกับถ่านกัมมันต์ ในอัตราส่วน 99:1 การเคลือบด้วยไคโตซาน และการเคลือบด้วยสารลดแรงตึงผิวประจุบวก ผลการศึกษาพบว่า การปรับปรุงเม็ดตะกอนทุกวิธี ทำให้พื้นที่ผิวลดลง แต่ทำให้ขนาดและปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้น เม็ดตะกอนที่ดูดซับกรดฮิวมิกได้ดีที่สุดคือเม็ดตะกอนผสมถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารลดแรงตึงผิว โดยมีค่าการดูดซับสูงสุดตามแบบจำลองแลงเมียร์เท่ากับ 11.338 ฮาเซน/ต่อกรัม เม็ดดูดซับปริมาณ 30 กรัมต่อลิตร มาใช้ในการบำบัดน้ำในธรรมชาติได้ โดยทำให้ค่าสีของน้ำลดลงจาก 40 และ 30 ฮาเซนได้เหลือ 0.5 และ 0.45 ฮาเซน ตามลำดับ

คำสำคัญ : กรดฮิวมิก กากตะกอน การดูดซับ คุณภาพน้ำ

Abstract

This research aims to use sludge from water supply production as an adsorbent granule for humic acid treatment by improving adsorbent granule. The adsorbent granules were improved by mixing with activated carbon at the ratio sludge : activated carbon of 99:1, coating with chitosan and coating with cationic surfactant. Results revealed that all improved adsorbent granules had lower surface areas but higher pore size and pore volume. The highest humic acid adsorption capacity was found at the adsorbent granule mixed with activated carbon and coated with surfactant. The maximum adsorption capacity of 11.338 Hazen/g was found for Langmuir model. This adsorbent at the dosage of 30 g/L could adsorb color in natural water from 40 and 30 Hazen to 0.5 and 0.45 Hazen, respectively.

Keywords : adsorption, humic acid, sludge, water Quality

*Corresponding author. E-mail : soydoa.vin@kmutt.ac.th

บทนำ

กรดฮิวมิก (Humic Acid) เป็นองค์ประกอบย่อยของ สารฮิวมิก (Humic Substances) ที่เกิดจากการย่อยสลายของพืชทำให้น้ำมีสีเหลืองไปจนถึงสีน้ำตาลเข้ม กรดฮิวมิกที่ความเข้มข้นสูงมีผลยับยั้งต่อการเจริญของสาหร่ายและไรแดง ที่ความเข้มข้นสูง โดยกรดฮิวมิกมีผลต่อการส่งผ่านของแสงสำหรับการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย และมีผลต่อเอนไซม์ภายในเซลล์ของไรแดง (Vinitnantharat *et al.*, 2008) นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัววัดคุณภาพของน้ำดิบ เพื่อนำมาใช้ในการผลิตน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค โดยองค์การอนามัยโลก (WHO, 2011) ได้ตั้งเกณฑ์ของสีตามธรรมชาติเพื่อการบริโภคไว้ที่ 15 หน่วยสี ที่เรียกว่าหน่วยฮาเซน (Hazen Unit) ซึ่งหากน้ำมีกรดฮิวมิกสูง และเมื่อต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน จะทำให้ค่าความต้องการคลอรีน (chlorine demand) ในการฆ่าเชื้อโรคเพิ่มขึ้น นอกจากนี้สารประกอบของคลอรีนกับกรดอินทรีย์ยังทำให้เกิดสารก่อมะเร็งจำพวกไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethane) ได้ ปัจจุบันได้มีการศึกษาการลดสีของน้ำอยู่หลายวิธี เช่น การกรองด้วยแผ่นเยื่อ (Lowe & Hossain, 2008) การใช้โอโซน (Seredynska-Sobecka *et al.*, 2006) การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Duan *et al.*, 2003) และการแลกเปลี่ยนไอออน (Brattebo *et al.*, 1987) เป็นต้น แต่วิธีที่กล่าวแล้วข้างต้นมีความยุ่งยากและเสียค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นวิธีการดูดซับด้วยวัสดุดูดซับจึงเป็นวิธีที่น่าสนใจ เพราะมีขั้นตอนไม่ยุ่งยาก อีกทั้งการดูดซับไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นเดิมไปเป็นสารอื่น ที่อาจเป็นอันตรายมากกว่าสารตั้งต้นเดิมอีกด้วย วัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงและเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลายคือ ถ่านกัมมันต์ ซึ่งเหมาะสมในการบำบัดสารอินทรีย์ได้ดี แต่ก็ยังคงมีราคาแพง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการใช้ประโยชน์จากตะกอนที่เกิดขึ้นจากโรงผลิตน้ำประปาที่มีอยู่จำนวนมากและราคาถูก โดยโรงผลิตน้ำประปาในกรุงเทพมหานคร มีตะกอนเกิดขึ้น 40-50 ตันต่อสัปดาห์ แต่เนื่องจากตะกอนส่วนใหญ่จะเป็นอนุภาคดินขนาดเล็ก การนำมาใช้เป็นสารดูดซับโดยตรง จะทำให้แยกออกจากน้ำที่บำบัดแล้วได้ยาก หากทำให้เป็นเม็ดแล้ว จะจมตัวได้เร็ว จึงแยกสารดูดซับออกจากน้ำที่บำบัดแล้วได้ง่าย และเพื่อให้เม็ดดูดซับที่ทำจากตะกอนสามารถดูดซับกรดฮิวมิกได้ดี งานวิจัยนี้จึงมีการปรับปรุงสมบัติด้านความพรุน และประจุที่พื้นผิว เนื่องจากกรดฮิวมิกเป็นโมเลกุลใหญ่ และมีส่วนที่ทำปฏิกิริยาได้ เรียกว่า Reactive groups หรือ Functional groups อยู่หลายส่วนได้แก่ ส่วนที่เป็นหมู่ฟีนอล (Phenolic groups) หมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxylic group) หมู่ไฮดรอกซี (Hydroxyl group) และหมู่คีโตน (Ketone group) ซึ่งมีประจุพื้นผิวเป็นลบ นอกจากนี้ได้พบว่ามีการนำไคโตซาน (Chitosan) มาใช้ ซึ่งไคโตซานมีหมู่อะมิโนที่เป็นประจุบวก เพื่อใช้ในการบำบัดกรดฮิวมิก เช่น การเคลือบด้วยไคโตซานบนถ่านกัมมันต์ (Rattanasirisophon, 2003) การใช้ไคโตซานร่วมกับวัสดุนาโน (Zulfikar *et al.*, 2016) และการใช้สารลดแรงตึงผิวประจุบวก (Cationic Surfactant) (Mohammadi *et al.*, 2012) เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการเตรียมเม็ดดูดซับจากตะกอนโรงผลิตน้ำประปา และถ่านกัมมันต์เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับกรดฮิวมิกในน้ำ นอกจากนี้ยังทำการปรับปรุงพื้นผิวของเม็ดดูดซับด้วยไคโตซาน และสารลดแรงตึงผิวประจุบวก

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมวัสดุและสารละลายที่ใช้

1.1 การเตรียมตะกอนโรงผลิตน้ำประปา ทำโดยนำตะกอนจากโรงกรองน้ำที่ได้รับความอนุเคราะห์จากโรงผลิตน้ำบางเขน การประสานครหลวง มาตากให้แห้งแล้วบดให้เป็นผง แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30 เพื่อแยกตะกอนที่มีขนาดใหญ่และสิ่งเจือปนอื่น ๆ ออกก่อน

1.2 ถ่านกัมมันต์ เป็นถ่านที่ผลิตในท้องตลาดทั่วไป (Commercial grade) เป็นชนิดผง (Powder)

1.3 สารละลายโคโตซาน ทำโดยใช้โคโตซานแผ่น (Flake) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เอส เค โปรพิซเซอริง จำกัด มีค่าระดับของการเกิดปฏิกิริยาอะซิทธิลเลชันร้อยละ 90 นำมาทำให้อยู่ในรูปสารละลาย โดยชั่งโคโตซาน 1.5 กรัม ละลายในสารละลายกรดอะซิทธิลเข้มข้นร้อยละ 1 (โดยปริมาตร) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

1.4 สารละลายลดแรงตึงผิวประจุบวก ความเข้มข้น 0.37 มิลลิโมลต่อลิตร ใช้ TDMA-Br, Tetradecyltrimethyl ammonium bromide ($[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{13}](\text{CH}_3)_3\text{N}^+ \text{Br}^-$) ผลิตโดยบริษัท Sigma ที่มีความบริสุทธิ์เท่ากับร้อยละ 99 โดยชั่ง TDMA-Br 1.2447 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน (Deionized Water) และปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตรในขวดวัดปริมาตร ขนาด 1 ลิตร จากนั้นจึงปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายให้ได้ 7.00-7.10 ด้วย กรด HCl เข้มข้น 0.1 นอร์มอล

1.5 สารละลายกรดฮิวมิก 500 หน่วยฮาเซน เตรียมตามวิธีของ Kam and Gregory (2001) โดยชั่งกรดฮิวมิก 0.5000 กรัม ละลายในโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 นอร์มอล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร เขย่าให้เข้ากันแล้วกรองผ่านกระดาษ Whatman No.1 จากนั้นไปเตรียมน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนมีปริมาตรเท่ากับ 1 ลิตร ในขวดวัดปริมาตร จะได้สารละลายกรดฮิวมิกที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีความเข้มข้นหน่วยฮาเซนเท่ากับ 500 หน่วยฮาเซน (Hazen unit) การวิเคราะห์หาปริมาณทำได้โดยการตรวจวัด ด้วยการถ่ายภาพมาตรฐานที่ใช้กรดฮิวมิกที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน วัดความเข้มของสีด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร

2. การเตรียมเม็ดดูดซับ

การเตรียมเม็ดดูดซับเพื่อศึกษาความสามารถในการบำบัดสีจากกรดฮิวมิก ประกอบไปด้วย 6 ชนิดได้แก่

- S หมายถึง เม็ดดูดซับทำจากตะกอนไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว
- SC หมายถึง เม็ดดูดซับทำจากตะกอนปรับปรุงพื้นผิวด้วยโคโตซาน
- ST หมายถึง เม็ดดูดซับทำจากตะกอนปรับปรุงพื้นผิวด้วย TDMA-Br
- SA หมายถึง เม็ดดูดซับทำจากตะกอนผสมถ่านกัมมันต์ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว
- SAC หมายถึง เม็ดดูดซับทำจากตะกอนผสมถ่านกัมมันต์ปรับปรุงพื้นผิวด้วยโคโตซาน
- SAT หมายถึง เม็ดดูดซับทำจากตะกอนผสมถ่านกัมมันต์ปรับปรุงพื้นผิวด้วย TDMA-Br

2.1 เม็ดดูดซับทำจากตะกอนไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว (S) เตรียมโดยนำผงตะกอนมาปรับให้มีความชื้นโดยประมาณร้อยละ 35 แล้วตัดให้เป็นเม็ดขนาด 2.0-2.5 มิลลิเมตร ภายหลังจากตัดให้ได้ตามขนาดที่ต้องการแล้ว นำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ส่วนเม็ดดูดซับที่ใส่ถ่านกัมมันต์ (SA) เตรียมโดยนำผงตะกอนมาผสมกับผงถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วนตะกอน : ถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 99:1 โดยน้ำหนัก ผสมให้เข้ากันและปรับให้มีความชื้นโดยประมาณร้อยละ 35 แล้วตัดให้เป็นเม็ดนำก่อนจึงนำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วเก็บไว้ในโถดูดความชื้น (desiccator) เพื่อใช้ทำการทดลองในขั้นต่อไป

2.2 เม็ดดูดซับที่เคลือบด้วยโคโตซาน (SC, SAC) เตรียมโดยนำเม็ดดูดซับในข้อ 2.1 มาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นแยกน้ำออก แล้วผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง นำวัสดุดูดซับที่ผึ่งให้แห้งแล้วปริมาณ 5 ส่วน ใสในภาชนะที่บรรจุสารละลายโคโตซานที่เตรียมไว้ 1 ส่วน โดยน้ำหนัก แล้วนำภาชนะไปเขย่าในเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองวัสดุดูดซับออก แล้วผึ่ง

ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง นำวัสดุดูดซับมาล้างกรดส่วนเกินออกด้วยน้ำปราศจากไอออน เพื่อปรับสภาพให้เป็นกลาง (neutralization) จนกระทั่งค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำไม่เปลี่ยนแปลง แยกตะกอนวัสดุดูดซับที่เคลือบแล้วออก นำไปผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง แล้วเก็บไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อใช้ทำการทดลองในขั้นต่อไป

2.3 เม็ดดูดซับที่เคลือบด้วยสารลดแรงตึงผิวประจุบวก (ST, SAT) เตรียมโดยนำวัสดุดูดซับในข้อ 2.1 ปริมาณ 1 กรัม ใส่ลงในสารละลาย TDMA-Br ที่เตรียมไว้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ในขวดแก้วแล้วนำภาชนะไปเขย่าในเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองวัสดุดูดซับออก แล้วผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง นำวัสดุดูดซับมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน จนกระทั่งค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของน้ำไม่เปลี่ยนแปลง แยกตะกอนวัสดุดูดซับที่เคลือบแล้วออก นำไปผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง แล้วเก็บไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อใช้ทำการทดลองในขั้นต่อไป

3. การทดสอบสมบัติของเม็ดดูดซับ

3.1 วิเคราะห์องค์ประกอบของวัสดุดูดซับก่อนเผาด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) ซึ่งทำการวิเคราะห์ที่คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยชั่งน้ำหนักวัสดุดูดซับที่จะวิเคราะห์ประมาณ 10 กรัม แล้วนำไปอัดลงใน Sample pan เพื่อเตรียมนำไปวิเคราะห์ (การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของวัสดุดูดซับโดยใช้ความต่างศักย์ในการวิเคราะห์ ให้ลำแสงผ่านสารตัวอย่างโดยตรง ไม่ผ่านตัวกรอง)

3.2 วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน และขนาดรูพรุนของวัสดุดูดซับ โดยอาศัยการวัดจากปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของวัสดุดูดซับด้วยเครื่องวัดพื้นที่ผิว The Brunauer Emmett Teller (BET)

3.3 การศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH of solution, pH_{so}) โดยนำตัวอย่างวัสดุดูดซับใส่ลงในขวดที่มีน้ำกลั่น อัตราส่วนตัวอย่างวัสดุดูดซับต่อน้ำกลั่นร้อยละ 10 โดยชั่งน้ำหนักต่อปริมาตรปิดฝาให้สนิทและนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (Shaker) ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นำสารละลายมาวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งเพื่อยืนยันผลการทดลอง

3.4 การศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (pH of zero point of change, pH_{zpc}) โดยใช้วิธี pH Drift Method โดยชั่งน้ำหนักเม็ดดูดซับในอัตราส่วนต่าง ๆ ปริมาณ 0.15 กรัม ใส่ลงในขวดแก้วที่มีสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.01 นอร์มอล ปริมาตร 50 มิลลิลิตร จำนวนตัวอย่างละ 6 ชุดการทดลอง ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นทั้ง 6 ชุดการทดลองให้เป็น 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 9.0 และ 10.0 ตามลำดับ ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 นอร์มอลแล้วปิดฝาขวดแก้วให้สนิท นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง และนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (แกน x) และค่าความเป็นกรด-ด่างสุดท้าย (แกน y) ค่า pH_{zpc} หาได้จากกราฟที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เริ่มต้นเท่ากับค่าความเป็นกรด-ด่างสุดท้าย หรือจุดที่เส้นกราฟตัดสมการเส้นตรง $X = Y$

4. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ

การศึกษากาลไคและประสิทธิภาพในการดูดซับทำการศึกษาแบบกะ (Batch experiment) โดยทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ทุกการทดลองทำซ้ำ 3 ครั้ง

4.1 การศึกษาระยะเวลาสมดุล ทำโดยนำวัสดุดูดซับปริมาณ 1.000-3.000 กรัม ใส่ลงในขวดแก้วทดลองปริมาตร 500 มิลลิลิตร ที่มีสารละลายกรดฮิวมิกที่มีความเข้มข้นหน่วยสี 100 Hazen ปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 แล้วเก็บสารละลายตัวอย่างที่

ระยะเวลาต่าง ๆ จนกระทั่งไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสีในสารละลาย นำตัวอย่างที่เก็บที่เวลาต่าง ๆ ที่ได้มาปั่นเหวี่ยง (centrifuge) ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที เพื่อแยกสารละลายออกจากวัสดุดูดซับ แล้วหาความเข้มข้นของสีที่เหลืออยู่ในสารละลาย คำนวณหาปริมาณสีที่ถูกดูดซับได้ (Q) ดังสมการที่ (1)

$$Q = \frac{(C_0 - C_t)V}{W} \quad (1)$$

โดย C_0 และ C_t คือความเข้มข้นของตัวถูกละลายเริ่มต้นและที่เวลาใดๆ

V คือ ปริมาตรของสารละลาย

W คือ น้ำหนักของตัวถูกละลาย

4.2 การศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับ ทำโดยใช้เม็ดดูดซับปริมาณ 3.000 กรัม ใส่ลงขวดแก้วทดลองปริมาตร 500 มิลลิลิตร ที่มีสารละลายกรดฮิวมิกที่มีความเข้มข้นหน่วยสี 100 Hazen ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จนกระทั่งครบระยะเวลาที่สมดุลของการดูดซับในข้อ 4.1 แยกสารละลายออกด้วยการปั่นเหวี่ยง ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที แล้วหาความเข้มข้นของสีที่เหลือในสารละลาย

4.3 การหาค่าไอโซเทอมของการดูดซับ โดยเลือกระยะเวลาที่สมดุลของการดูดซับในข้อ 4.1 มาทำการศึกษาค่าไอโซเทอม โดยการแปรผันปริมาณเม็ดดูดซับ ในการดูดซับกรดฮิวมิกที่มีความเข้มข้นหน่วยสี 100 Hazen ปริมาตร 500 มิลลิลิตร โดยนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จนถึงสภาวะสมดุลที่หาได้ จากนั้นแยกสารละลายออกด้วยการปั่นเหวี่ยง ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที หาความเข้มข้นของสีที่เหลือในสารละลายที่ระยะเวลาสมดุลของการดูดซับ (C_e) เพื่อนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Q_e และ C_e ตามแบบจำลองของฟรุนดลิคซ์ (Freundlich) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/Q_e$ และ $1/C_e$ ตามแบบจำลองของแลงเมียร์ (Langmuir) ดังสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ

$$Q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (0 < 1/n < 1) \quad (2)$$

$$\frac{1}{Q_e} = \frac{1}{K_{ads} Q^0 C_e} + \frac{1}{Q^0} \quad (3)$$

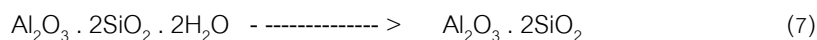
โดย K_F คือค่าคงที่ของ ฟรุนดลิคซ์ และ $1/n$ คือค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับความเข้มข้นหน่วยเป็นลิตรต่อกรัม

Q^0 คือปริมาณสีที่ดูดซับได้สูงสุดต่อน้ำหนักของวัสดุดูดซับ

K_{ads} คือค่าคงที่การกระจายตัวของสารดูดซับ (adsorption distribution constant)

K_L คือค่าคงที่ของแลงเมียร์ มีค่าเท่ากับ $K_{ads} Q^0$

ไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเม็ดตะกอน จะเกิดขึ้นเดียวกันกับการบั่นดินและเผาดินของการทำเครื่องปั้นดินเผา ผลึกของน้ำในโครงสร้างของเม็ดดูดซับที่ได้ จะเกิดการสลายตัวออกหมดดังสมการที่ (7) Wu & Liu (2012) รายงานว่า การให้อุณหภูมิกับดินแดง (Red mud) จะทำให้ gibbsite (Al(OH)₃) เปลี่ยนเป็นน้ำ และ Al₂O₃ ที่อุณหภูมิระหว่าง 300-500 องศาเซลเซียส และ Calcite (CaCO₃) จะเปลี่ยนเป็น CaO และ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่อุณหภูมิระหว่าง 600-800 องศาเซลเซียส



ผลการศึกษาค่า pH_{zpc} และ pH_{sol} แสดงในตารางที่ 2 โดยค่าความเป็นกรด-ด่างที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 7.00 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่า pH_{sol} พบว่าไม่แตกต่างจากเริ่มต้นมากนัก จากองค์ประกอบของตะกอนพบว่ามี CaO และ MgO ซึ่งโดยทั่วไปเมื่อ CaO และ MgO รวมกับน้ำแล้วจะเกิดเป็น Ca(OH)₂ และ Mg(OH)₂ ซึ่งมีสมบัติเป็นเบส แต่ปริมาณของ CaO และ MgO ในองค์ประกอบมีอยู่น้อยจึงไม่มีผลทำให้ค่า pH_{sol} สูงขึ้น ประกอบกับ Ca(OH)₂ ยังเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานอีกด้วย จึงไม่เหลือ Ca(OH)₂ อิสระได้ สำหรับการปรับปรุงผิววัสดุดูดซับด้วยการเคลือบไคโตซาน และ TDMA-Br พบว่าค่า pH_{sol} มีค่าลดลง ทั้งเม็ดตะกอนที่ผสม และไม่ผสมถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้เนื่องจาก ประจุบวกของไคโตซาน และ TDMA-Br ไปทำปฏิกิริยากับพื้นผิวส่วนออกไซด์ต่างๆ ของเม็ดดูดซับ ทำให้อยู่ในรูปของไฮดรอกซิล (OH⁻) ได้น้อย สำหรับเม็ดดูดซับที่เตรียมได้ทั้ง 6 ชนิด พบว่ามีค่า pH_{zpc} ต่ำกว่าค่า pH_{sol} เพียงเล็กน้อย ซึ่งมีเพียงเม็ดตะกอนดูดซับที่ทำด้วยตะกอนผสมถ่านกัมมันต์ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว (SA) เท่านั้นที่มีค่า pH_{zpc} เท่ากับ pH_{sol} โดยมีความเท่ากับ 7.00 ซึ่งแสดงว่าพื้นผิวของ SA มีประจุบวกและประจุลบเท่ากัน (≡SOH²⁺ ≡ SO⁻ เมื่อ S ได้แก่ Fe, Si, Al หรือโลหะอื่นๆ) การที่ pH_{sol} มีค่าน้อยกว่าค่า pH_{zpc} จะทำให้เม็ดดูดซับที่เตรียมได้มีประจุรวมเป็นบวก จึงสามารถดูดซับประจุลบ (anion) ได้ดี

ตารางที่ 2 ค่าความเป็นกรด-ด่างของเม็ดดูดซับต่างๆ

ชนิดของวัสดุดูดซับ	ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลาย (pH _{sol})	ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (pH _{zpc})	ผลต่างของ pH _{zpc} และ pH _{sol}
S	7.10	6.97	0.13
SC	6.78	6.60	0.18
ST	6.62	6.60	0.02
SA	7.00	7.00	0.00
SAC	6.84	6.70	0.14
SAT	7.02	6.91	0.11

การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีในขั้นตอนการเตรียมเม็ดดูดซับ จึงมีผลต่อโครงสร้างทางกายภาพของเม็ดดูดซับที่ใช้ในการศึกษาด้วย โดยการศึกษาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุน ของเม็ดดูดซับ ได้เลือกมาเพียง 5 ชนิด เนื่องจากการเคลือบด้วยไคโตซานมีขั้นตอนที่ยุ้งยากกว่าการเคลือบด้วย TDMA-Br และผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างพบว่า การเคลือบด้วยไคโตซานให้ค่า pH_{sol} สูงกว่าการเคลือบด้วย TDMA-Br เล็กน้อย ดังนั้น จึงเลือกใช้เม็ดดูดซับเฉพาะที่ทำจากตะกอนผสมกับถ่านกัมมันต์เคลือบ TDMA-Br มาเท่านั้น ผลการศึกษาพบว่า การปรับปรุงเม็ดตะกอนทุกวิธีทำให้ค่าพื้นที่ผิวของเม็ดดูดซับลดลงดังตารางที่ 3 เนื่องจากภายหลังจากการเผามีการระเหยของน้ำออก ทำให้มีรูพรุนเป็นจำนวนมาก เมื่อทำการเคลือบ จึงทำให้ไคโตซาน หรือ TDMA-Br ไปปิดบังรูพรุนดังกล่าว และการผสมตะกอนกับถ่านกัมมันต์ไม่ได้ทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น แต่มีพื้นที่ผิวมากกว่าการเคลือบด้วยไคโตซานและ TDMA-Br เนื่องจากพื้นที่ผิวบางส่วนของเม็ดตะกอนไม่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน และถ่านกัมมันต์มีรูพรุนอยู่แล้ว นอกจากนี้ยังพบว่าเม็ดวัสดุดูดซับที่ปรับปรุงพื้นผิวทุกอันมีปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.2-8.5 และร้อยละ 10.7-48.6 ตามลำดับ เนื่องจากสารละลายไคโตซานมีประจุเป็นบวกของหมู่อะมิโน และมีความเป็นกรดเล็กน้อยเนื่องจากละลายในกรดอะซิติก เมื่อนำมาเคลือบจึงทำปฏิกิริยากับพื้นผิวออกไซด์ที่เป็นประจุลบของเม็ดวัสดุดูดซับ ทำให้เกิดเป็นโพรงขนาดใหญ่ขึ้นกว่าเดิม เช่นเดียวกันกับการใช้ TDMA-Br ซึ่งมีส่วนหัวเป็นประจุบวก ($[(CH_3(CH_2)_{13})(CH_3)_3N^+ Br^-]$) จึงไปทำปฏิกิริยากับพื้นผิวออกไซด์ของเม็ดตะกอนได้เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของเม็ดวัสดุดูดซับต่าง ๆ

วัสดุดูดซับ	BET surface area (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุน (cc/g)	ขนาดรูพรุน (Å)
S	52.74	0.094	71.37
SC	39.34	0.099	100.66
ST	37.31	0.099	106.06
SA	40.64	0.102	100.73
SAT	48.87	0.097	79.00

โดยทั่วไปการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายที่มีสารลดแรงตึงผิวมักจะศึกษาค่า CMC (Critical micelle concentration) ซึ่งเป็นความเข้มข้นของสารละลายที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของระบบอย่างทันทีทันใด โดยปกติจะเกิดการรวมตัวกันของโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวเรียกว่าไมเซลล์ (Micelle) ซึ่งอาจเป็นทรงกลม แผ่น หรือรูปทรงอื่นๆ ได้ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ TDMA-Br ความเข้มข้น 0.37 mM จึงเกิดลักษณะทางกายภาพที่เป็น Admicelle อย่างไรก็ตาม Br⁻ ซึ่งเป็น anionic counter ion จะแข่งขันบริเวณที่เป็นประจุลบของเม็ดตะกอนวัสดุดูดซับเช่นกัน พันธะที่เกิดขึ้นของ counter ion กับสารลดแรงตึงผิว และพันธะของพื้นผิวเม็ดตะกอนกับสารลดแรงตึงผิว ส่วนหนึ่งจึงเป็นพันธะไฮโดรเจน (Cocke *et al.*, 2002) สำหรับการดูดซับของไคโตซานบนพื้นผิวเม็ดดูดซับ สามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจาก ไคโตซานมีหมู่อะมิโน (-NH₂) ซึ่งเป็นประจุบวก ทั้งนี้การดูดซับของไคโตซานกับประจุลบของเม็ดตะกอน จะเกิดการแข่งขันกันกับ H⁺ จากกรดอะซิติกในสารละลายได้ Tiraferri *et al.* (2014) รายงานว่าในสภาวะที่เป็นกรดอ่อนๆ ไคโตซานจะดูดซับกับซิลิกาด้วยแรง

Electrostatic attraction และจะดูดซับเป็นชั้นบางๆ แต่เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นกลางจะเกิดการรวมกันเป็นก้อนใหญ่ขึ้น และปริมาณการดูดซับจะสูงสุดเมื่อใกล้กับค่า pK_a (6.8)

2. ระยะเวลาดูดซับและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

การศึกษาความสามารถในการดูดซับสีจากกรดฮิวมิกของเม็ดดูดซับ โดยการใช้ความเข้มข้นสี 100 Hazen ปริมาณเม็ดดูดซับร้อยละ 3 สรุปผลการศึกษาดังตารางที่ 4 พบว่าเม็ดตะกอนผสมถ่านกัมมันต์และเคลือบไคโตซานมีระยะเวลาสมดุลของการดูดซับสีเท่ากับ 60 ชั่วโมง และเม็ดตะกอนที่เคลือบด้วย TDMA-Br ทั้งผสมและไม่ผสมถ่านกัมมันต์มีระยะเวลาสมดุลของการดูดซับสีเท่ากับ 72 ชั่วโมง และเม็ดตะกอนไม่เคลือบมีระยะเวลาสมดุลของการดูดซับสีนานที่สุดที่ 80 ชั่วโมง เนื่องจากกรดฮิวมิกมีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ จึงใช้เวลาในการดูดซับนาน เนื่องจากขนาดรูพรุนของวัสดุดูดซับมีค่าประมาณ 7-10 นาโนเมตร จึงจัดเป็นวัสดุดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง ส่วนถ่านกัมมันต์ (AC) มีระยะเวลาสมดุลที่เร็วที่สุด เนื่องจากถ่านกัมมันต์ (AC) มีโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่กว่าวัสดุดูดซับอื่น ๆ จึงส่งผลทำให้โมเลกุลสีที่มีขนาดใหญ่สามารถเข้าสู่รูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ง่ายและรวดเร็วกว่าวัสดุดูดซับอื่น ๆ

ตารางที่ 4 ความสามารถในการดูดซับของเม็ดดูดซับ 5 ชนิด ที่ระยะเวลาสมดุล

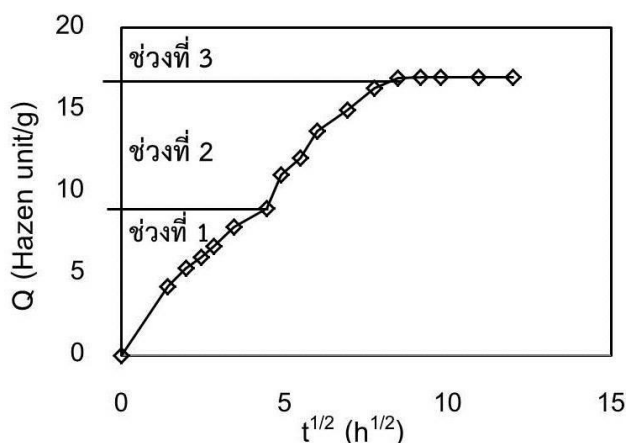
ความสามารถในการดูดซับ	S	SA	SC	ST	SAT
ระยะเวลาสมดุล (ชั่วโมง)	80	60	60	72	72
% ประสิทธิภาพในการบำบัด	51.10	54.10	59.81	74.11	80.11
ปริมาณที่ดูดซับได้ (Hazen /g)	17.00	18.00	19.90	24.70	26.70

เมื่อพิจารณา ค่า pH_{zpc} ของวัสดุดูดซับที่ทำจากกากตะกอนโรงผลิตน้ำประปา (S) พบว่าค่า pH_{zpc} เท่ากับ 6.97 ซึ่งมีค่าต่ำกว่า pH_{sol} ($pH=7.10$) ทำให้พื้นผิวของวัสดุดูดซับมีประจุเป็นลบเล็กน้อย เมื่อนำมาดูดซับโมเลกุลสีหรือกรดฮิวมิกที่ประกอบด้วยหมู่ Carboxylic (-RCOOH) และ Phenolic (-OH) ซึ่ง หมู่ Carboxylic (-RCOOH) จะเป็นประจุลบ และ Phenolic (-OH) จะเป็นประจุลบที่ pH_{sol} เท่ากับ 7.10 และเมื่อพิจารณาค่า pK_a ของทั้งหมู่ Carboxylic (-RCOOH) ($pK_a = 3-8$) และ Phenolic (-OH) ($pK_a = 9$) (Zhang & Bai, 2003) ประกอบ จึงทำให้มีการดูดซับได้เล็กน้อย แต่ในการทดลองนี้ได้ควบคุมค่า pH_{sol} เท่ากับ 7 ดังนั้นการดูดซับจึงขึ้นอยู่กับหมู่ Carboxylic (-RCOOH) เพียงอย่างเดียว จึงทำให้การดูดซับสีโดยเม็ดดูดซับ S เกิดขึ้นได้ยาก และขนาดรูพรุนยังเล็กกว่าเม็ดดูดซับที่ปรับปรุงพื้นผิว ซึ่งมีรูพรุนขนาดใหญ่กว่า และการเคลือบด้วยไคโตซานหรือ TDMA-Br ยังทำให้มีประจุบวกเพิ่มอีกด้วย

การศึกษาชั้นของการเกิดปฏิกิริยา สามารถหาได้จากสมการที่ (8)

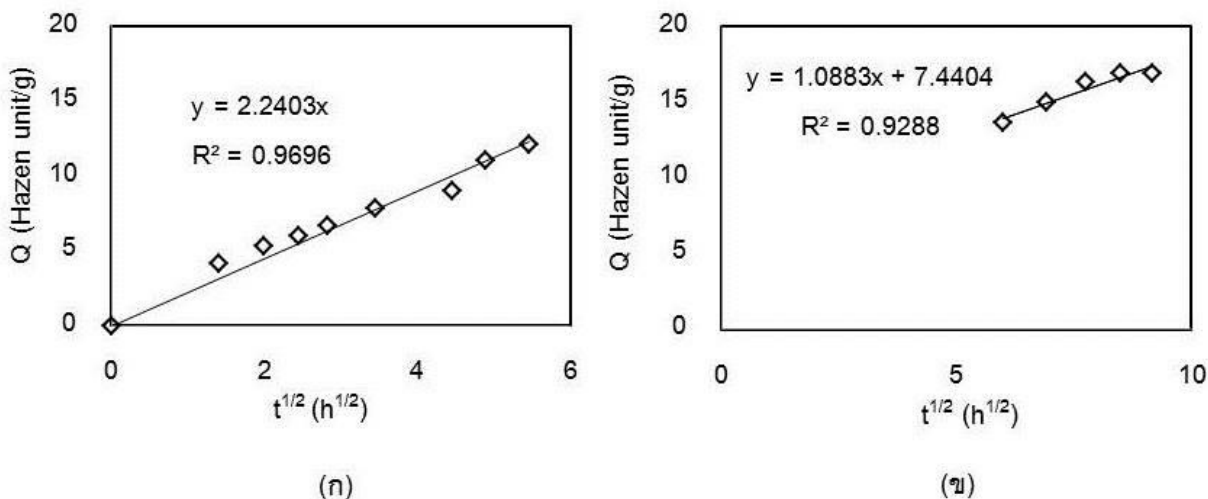
$$Q = kt^{1/2} \tag{8}$$

โดยค่า k คือค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา หาได้จากการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมิลลิกรัมของสารที่ถูกดูดซับต่อกรัมของวัสดุดูดซับ (Q) กับรากที่สองของเวลา ($t^{1/2}$) จากนั้นหาช่วงที่การดูดซับยังไม่เข้าสู่สมดุลนั้นว่าช่วงใดมีค่าความชันหรืออัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำสุด ซึ่งจะเป็นช่วงที่เป็นขั้นกำหนดอัตราของปฏิกิริยา โดยทั่วไปจากการศึกษาระยะเวลาสมดุลของการดูดซับจะสามารถแบ่งช่วงของการดูดซับออกได้เป็นสามช่วง ดังภาพที่ 1 โดยในช่วงที่ 1 จะเป็นผลของการดูดซับในชั้น แพร์ชั้นฟิล์ม (Film diffusion) และ การแพร่ภายในอนุภาค (Intraparticle diffusion) ส่วนในช่วงที่ 2 มักจะเกิดจากเพียงขั้นการแพร่ภายในอนุภาค เพียงขั้นเดียว และในช่วงที่ 3 เป็นช่วงที่การดูดซับ (Adsorption) เท่ากับการคายซับหรือถึงระยะเวลาสมดุลแล้ว



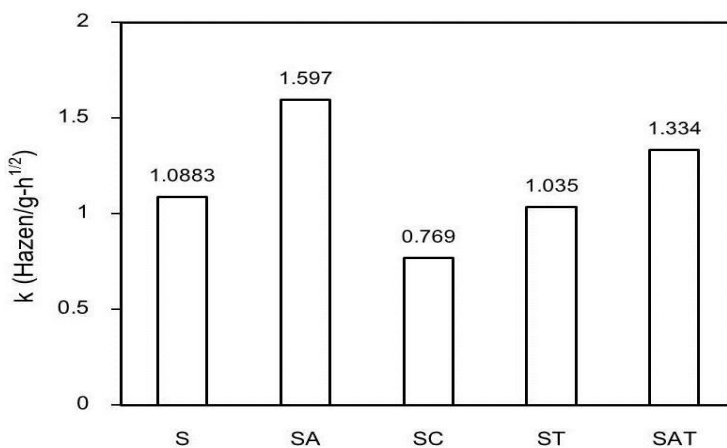
ภาพที่ 1 ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับจนถึงสมดุลของการดูดซับ

ดังนั้นหากแบ่งกราฟออกมาเป็น 2 ช่วง เพื่อหาค่าความชันของกราฟในช่วงที่ 1 และ 2 ดังภาพที่ 2 (ก) และ (ข) ผลการศึกษาพบว่าค่าความชันในช่วงที่ 2 ของการดูดซับมีค่าความชันต่ำกว่าค่าความชันในช่วงแรกหรือมีอัตราการดูดซับต่ำสุด ดังนั้นขั้นของการแพร่ภายในอนุภาค จึงเป็นขั้นของการเกิดปฏิกิริยา สำหรับเม็ดวัสดุดูดซับอื่นๆ ก็มีผลการศึกษาในทำนองเดียวกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกหาค่า k เฉพาะช่วงการแพร่ภายในอนุภาคเพียงอย่างเดียวมาศึกษา โดยผลวิเคราะห์เปรียบเทียบค่า k ของกรดฮิวมิกแสดงในภาพที่ 3 โดยเม็ดดูดซับผสมถ่านกัมมันต์และเคลือบ TDMA-Br (SAT) มีการดูดซับค่อนข้างสูง แสดงถึงการเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยถ่านกัมมันต์และการเคลือบ TDMA เชื้อต่อการดูดซับ



ภาพที่ 2 สมการเส้นตรงของการดูดซับกับรากที่สองของเวลา

(ก) ช่วงที่ 1 (ข) ช่วงที่ 2

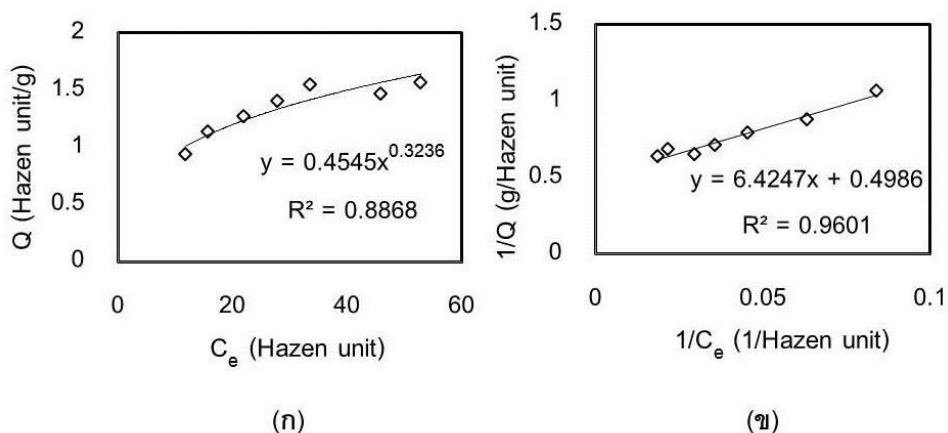


ภาพที่ 3 ค่าคงที่ของการดูดซับกรดฮิวมิกในช่วงการแพร่ภายในอนุภาค

3. ความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิก

การศึกษาความสามารถในการดูดซับได้ใช้แบบจำลองของฟรอนดลิช และแลงเมียร์ มาทำการศึกษา ตัวอย่างเช่น การดูดซับด้วยเม็ดดูดซับ S ดังภาพที่ 4 โดยค่า K_f ได้จากจุดตัดบนแกน y (intercept = K_f) และค่า $1/n$ เป็นค่ายกกำลังของสมการ power ส่วนการหาค่าคงที่ของแลงเมียร์ ค่า Q^0 หาได้จากจุดตัด (intercept = $1/Q^0$) และค่า K_{ads} หาได้จากความชัน รูปค่าคงที่การดูดซับของเม็ดดูดซับต่างๆ ได้ดังตารางที่ 5 จากผลการศึกษาพบว่า ค่า R^2 ของแบบจำลองที่ได้จากการดูดซับสีของเม็ดวัสดุต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน จึงต้องใช้ข้อมูล SSE ในการพิจารณาว่าแบบจำลองใดมีความเหมาะสมในการอธิบายการดูดซับมากกว่า โดยค่า SSE ต่ำ แสดงว่ามีค่าผิดพลาดจากแบบจำลองน้อย ดังนั้นวัสดุดูดซับ S SA และ SC จึงเหมาะกับแบบจำลองแลงเมียร์มากกว่าฟรอนดลิช กล่าวคือ การดูดซับสีเป็นการดูดซับบนพื้นผิวดูดซับแบบชั้นเดียว อย่างไรก็ตาม

การทดสอบด้วย SSE ยังคงพบว่า การเคลือบด้วย TDMA ของเม็ดวัสดุดูดซับทั้งไม่ผสมถ่านกัมมันต์และผสมถ่าน (SA, SAT) สามารถอธิบายได้ทั้งแบบจำลองแลงเมียร์ และ ฟรอนดลิคซ์ แสดงว่าบนพื้นผิวของ SA และ SAT มีการดูดซับบางตำแหน่งเป็นแบบชั้นเดียว และบางตำแหน่งเป็นแบบหลายชั้น ซึ่งมีสมมติฐานดังภาพที่ 5



ภาพที่ 4 ไอโซเทอมของการดูดซับสีด้วยเม็ดตะกอน (S)

(ก) ฟรอนดลิคซ์ (ข) แลงเมียร์

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับกรดฮิวมิกของเม็ดวัสดุดูดซับต่างๆ

Adsorbent	แบบจำลองแลงเมียร์				แบบจำลองฟรอนดลิคซ์			
	Q^0 (Hazen unit/g)	K_{ads} (L/Hazen unit)	R^2	SSE	K_f (Hazen unit/g)	$1/n$ (L/Hazen unit)	R^2	SSE
S	2.0056	0.0776	0.9601	0.0023	0.0732	0.5938	0.9692	0.6592
SA	2.5025	0.0667	0.9913	0.0013	0.3816	0.4311	0.9881	0.5528
SC	2.6497	0.0520	0.9926	0.0016	0.2661	0.5295	0.9928	1.8000
ST	8.9847	0.0156	0.9996	0.0001	0.1995	0.7902	0.9984	0.0003
SAT	11.3379	0.0146	0.9995	0.0008	0.2144	0.8296	0.9989	0.0001

ภาพที่ 5 (ก) แสดงตัวอย่างการดูดซับในลักษณะที่เป็นแบบชั้นเดียวหรือ monolayer ตามแบบจำลองของแลงเมียร์ ซึ่งจะเกิดการดูดซับที่พื้นผิวเม็ดวัสดุดูดซับเพียงชั้นเดียว ส่วนภาพที่ 5 (ข) เป็นตัวอย่างการดูดซับในลักษณะที่เกิดขึ้นได้หลายชั้น เนื่องจากโมเลกุลของ TDMA-Br มีส่วนที่ไม่มีขั้ว หรือส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic part) และส่วนที่มีขั้ว หรือส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic part) ที่เป็นประจุบวก ส่วนที่เป็นประจุบวกจึงสามารถทำปฏิกิริยากับประจุลบของโบรไมด์ไอออนและส่วนที่เป็น กลุ่ม Carboxylic ของกรดฮิวมิกได้ ตามหลัก like dissolve like ในทำนองเดียวกันส่วนที่ไม่ชอบน้ำ จึงสามารถตรึงโมเลกุลของกรดฮิวมิกได้ ซึ่งลักษณะดังกล่าวเรียกว่า การแบ่งส่วน (partition) โดย Ko et al. (1998) ได้รายงานการเกิด

ปริมาณของวัสดุดูดซับที่ต้องใช้ตามสมการของแบบจำลองฟรุนดลิชส์ ตัวอย่างเช่น การดูดซับสีของ SAT มีค่า K_1 และ $1/n$ เท่ากับ 0.2144 และ 0.8296 ตามลำดับ และค่าที่ต้องการคือ 5 Hazen unit (C_0)

$$\begin{aligned} \text{จาก ปริมาณของสีที่ถูกดูดซับได้ต่อกรัมของ SAT (Q)} &= KC_0^{1/n} \\ (C_0 - C_e)/g &= 0.2144(5)^{0.8296} \\ \text{สำหรับแหล่งน้ำใกล้สวนธนบุรีรมย์, (40-5)/g} &= 0.815 \\ \text{ปริมาณของ SAT ที่ต้องใช้ (g)} &= 35/0.815 \\ &= 42.95 \text{ กรัมต่อลิตร} \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกันจะต้องใช้ปริมาณ SAT สำหรับการดูดซับสีสำหรับบึงในสวนธนบุรีรมย์ เท่ากับ 30.67 กรัมต่อลิตร จากการคำนวณจึงได้เลือกใช้ปริมาณวัสดุดูดซับที่ 30 กรัมต่อลิตร มาทำการศึกษา ผลการศึกษา พบว่าการบำบัดคุณภาพน้ำ โดยใช้ปริมาณ SAT 30 กรัมต่อลิตรแบบกะ (Batch) สามารถบำบัดคุณภาพน้ำจากคลองใกล้สวนธนบุรีรมย์ และบึงในสวนธนบุรีรมย์ ได้เหลือ 0.50 และ 0.45 ฮาเซน ตามลำดับ อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงการนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อลดค่าใช้จ่ายหากนำมาใช้ประโยชน์จริง เนื่องจากกรดฮิวมิกเมื่อถูกดูดซับบนเม็ดดูดซับแล้ว อาจปลดปล่อยออกจากเม็ดดูดซับได้อีกเมื่อสัมผัสกับน้ำหรือในสารละลายดินได้ ซึ่งนอกจากจะนำเม็ดดูดซับกลับมาใช้ใหม่แล้ว ยังสามารถใช้ประโยชน์จากกรดฮิวมิกที่ปลดปล่อยออกมาได้อีกด้วย โดย Khaled & Fawy (2011) รายงานว่ากรดฮิวมิกสามารถใช้ปรับปรุงดินเค็ม ช่วยทำให้พืชเจริญเติบโตได้ดี และช่วยให้พืชตั้งธาตุอาหารไปใช้ได้ดีขึ้น นอกจากนี้สารลดแรงตึงผิว เป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ โดยทั่วไปสารลดแรงประจุบวกสามารถย่อยสลายได้ในดิน ในสภาวะที่มีออกซิเจนได้ร้อยละ 50 ภายใน 3-8 วัน แต่ในสภาวะที่ไร้ออกซิเจนจะย่อยสลายได้ช้า (Ying, 2006) จะเห็นได้ว่าเม็ดดูดซับดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้จริง โดยควรมีการศึกษากการปลดปล่อยกรดฮิวมิก และปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่เคลือบจากเม็ดดูดซับที่ใช้งานแล้ว รวมถึงความเป็นพิษต่อพืชและสิ่งมีชีวิตในน้ำและในดินต่อไป

สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา เป็นตะกอนที่มีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ ที่เหมาะสมสามารถนำมาขึ้นรูปให้เป็นเม็ด เพื่อผลิตเป็นสารดูดซับสำหรับใช้ในงานสิ่งแวดล้อมได้
2. เม็ดดูดซับจากตะกอนผสมถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วน ตะกอน:ถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 99:1 ที่เคลือบด้วย TDMA-Br (SAT) เป็นเม็ดตะกอนที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับกรดฮิวมิกสูงสุด โดยขึ้นการแพร่ภายในอนุภาค เป็นขั้นกำหนดอัตราการดูดซับ โดยมีอัตราเร็วเท่ากับ $1.334 \text{ Hazen /g-h}^{1/2}$
3. เม็ดดูดซับสามารถกำจัดสีจากกรดฮิวมิกในน้ำได้ เนื่องจากปฏิกิริยาที่พื้นผิวที่หมู่ฟังก์ชันของกรดอะซิดิกของกรดฮิวมิก ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนลบ และแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต นอกจากนี้การเคลือบด้วย TDMA-Br ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ เนื่องจากมีการเกิดการแบ่งส่วนของกรดฮิวมิกในส่วนที่ไม่เกี่ยวข้องกับสารลดแรงตึงผิวอีกด้วย
4. ควรทำการศึกษาการปลดปล่อยกรดฮิวมิกและสารลดแรงตึงผิวจากเม็ดดูดซับที่ทำการดูดซับแล้ว และศึกษาความเป็นพิษต่อพืชและสัตว์ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนแหล่งทุนจากทุนอุดหนุนวิจัย สำนักคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ และคณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี

เอกสารอ้างอิง

- Rattanasirisophon W. (2003) Use of Chitosan Coated-Granular Activated Carbon for the Removal of Color and Odor in Natural Water, Master Thesis, Environmental Technology, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 122 pages.
- Brattebo H., Odegaard H., & Halle O. (1987) Ion Exchange for the Removal of Humic Acids in Water Treatment. *Water Research*, 21(9), 1045-1052.
- Cocke D. L., Schennach R., & Yu, Z. (2002) The Surface Properties of Tetradecyl trimethylammonium Bromide Observed by Capillary Electrophoresis. *Journal of Chromatographic Science*, 40, 187-190.
- Duan J., Graham N.J., & Wilson F. (2003) Coagulation of Humic Acid by Ferric Chloride in Saline (Marine) Water Conditions. *Water Science and Technology*, 47(1), 41-48.
- Gregg, S.J., & Sing, K.S.W. (1982) Adsorption Surface Area and Porosity. 2nd ed., Academic Press Inc., London, 248-254.
- Ismail, H.A.H. (2013). Cement Kiln Dust Chemical Stabilization of Expansive Soil Exposed at El-Kawther Quarter, Sohag Region, Egypt. *International Journal of Geosciences*, 4 (10), DOI:10.4236/ijg.2013.410139
- Kam, S.K., & Gregory, J. (2001) The Interaction of Humic Substances with Cationic Polyelectrolytes. *Water Research*, 35(15), 3557-3566.
- Khaled H., Fawy H.A., (2011) Effect of Different Levels of Humic Acids on the Nutrient Content, Plant Growth, and Soil Properties Water Condition of Salinity. *Soil and Water Research*, 6(1), 21-29.
- Ko, S.O., Schlautman, M.A., & Carraway, E.R., (1998). Partitioning of Hydrophobic Organic Compounds to Sorbed Surfactants. 1. Experimental Studies. *Environmental Science and Technology*, 32(18), 2769-3136
- Lowe J. & Hossain Md. M., (2008) Application of Ultrafiltration Membranes for Removal of Humic Acid from Drinking Water. *Desalination*, 218, 343-354.
- Mohammadi A., Bina B., Ebrahimi A., Hajizadeh Y., Amin M.M., & Pourzamani H. (2012) Effectiveness of Nanozeolite Modified by Cationic Surfactant in the Removal of Disinfection By-product Precursors from Water Solution. *International Journal Environmental Health Engineering*, 1:3.
- Saad, R., Belkacemi, K., & Hamoudi, S.(2007) Adsorption of Phosphate and Nitrate Anions on Ammonium Functionalized MCM-48: Effects of Experimental Conditions. *Journal of Colloid and Interface Science* ,311, 375-381.

- Seredynska-Sobecka B., Tomaszewska M., & Morawski A.W.,(2006) Removal of Humic Acids by the Ozonation-Biofiltration Process. *Desalination*, 198(1-3), 265-273.
- Stumm, W., & Morgan, J.J., (1970) Aquatic Chemistry, "Regulation of the Chemical Composition of Natural Waters," in An Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters, John Wiley & Sons, Inc., New York, 872-934.
- Tirafferri, A., Maroni, P., Rodriguez, D.C., & Borkovec, M. (2014) Mechanism of Chitosan Adsorption on Silica from Aqueous Solutions. *Langmuir*, 30, 4980–4988.
- Vinitnantharat, S., Chatthe, W., & Pinitasakul, A. (2008) Toxicity of Reactive Red 141 and Basic Red 14 to Algae and Water Flea. *Water Science and Technology*, 58(6), 1193-1198.
- WHO. (2011). Guidelines for Drinking Water Quality. World Health Organization. 4th eds. 541 pages.
- Ying G-G., (2006) Fate, Behavior and Effects of Surfactants and Their Degradation Products in the Environment. *Environment International*, 32, 417-413.
- Zhang, X., & Bai, R. (2003) Mechanism and Kinetic of Humic Acid Adsorption onto Chitosan-Coated Granules. *Journal of Colloid and Interface Science*, 264, 30-38.
- Zufika M.A. (2016). Preparation of Fe₃O₄-chitosan Hybrid Nano-particles Used for Humic Acid Adsorption. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 6, 64-75.
- Wu, C-S, & Liu, D-Y.(2012) Mineral Phase and Physical Properties of Red Mud Calcined at Different Temperatures. *Journal of Nanomaterials*. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/628592>