

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยวัสดุดูดซับ

COMPARISON OF THE FLUORIDE ADSORPTION PERFORMANCE OF ADSORBENT

ปาจริย์ บุญทวี¹ วณิดา ชูอักษร ^{*2}Pajaree Boonthawee ¹, Wanida Chooaksorn ²^{1,2} คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์^{*} chooaksorn@hotmail.com (Corresponding Author)

บทคัดย่อ

การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการดูดซับฟลูออไรด์ของถ่านกัมมันต์ ไคโตซาน และถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน เป็นการทดลองดูดซับแบบแบทช์ ควบคุมความเป็นกรดต่าง 6.7 และความเข้มข้นของฟลูออไรด์ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยศึกษาระยะเวลาสมดุล จำนวนรอบสมดุลของการเขย่า ประสิทธิภาพการดูดซับและไอโซเทอมของการดูดซับ ที่อุณหภูมิห้อง ผลการศึกษา พบว่า ไคโตซานมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากที่สุด ที่ระยะเวลาการดูดซับ 20 นาที ลดฟลูออไรด์ได้ร้อยละ 50 ส่วนถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน มีประสิทธิภาพในการดูดซับร้อยละ 40 ไคโตซานมีจำนวนรอบสมดุลของการเขย่า คือ 100 รอบต่อนาที โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์ได้ถึงร้อยละ 70 ส่วนถ่านกัมมันต์ ส่วนถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน มีจำนวนรอบที่เหมาะสมคือ 0 รอบต่อนาที โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์ร้อยละ 40 ปริมาณของวัสดุดูดซับที่เหมาะสมของทั้ง 3 ชนิด คือ 5 กรัมต่อลิตร โดยไคโตซาน สามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้สูงที่สุดร้อยละ 80 ส่วนถ่านกัมมันต์และถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซานสามารถดูดซับได้ ร้อยละ 40 นอกจากนี้จากการศึกษาเปรียบเทียบไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงก์เมียร์ และฟรอนดิชของตัวดูดซับทุกชนิด พบว่า มีกลไกการดูดซับสอดคล้องกับสมการไอโซเทอมของฟรอนดิช โดยมีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.9887, 0.9860 และ 0.9889 ตามลำดับ

คำสำคัญ: ฟลูออไรด์, กระบวนการดูดซับ, ถ่านกัมมันต์, ไคโตซาน

ABSTRACT

The comparative in fluoride adsorption with activated carbon (AC), chitosan (CTS) and activated carbon coated chitosan (AC-CTS) were studied in batch experiment. The experiments were controlled pH 6.7 and 5.0 mg/l of initial concentration. The influence of various operational

วันที่รับบทความ 2 มีนาคม 2564

วันแก้ไขบทความ 19 มีนาคม 2564

วันตอบรับบทความ 29 มีนาคม 2564

parameters i.e., contact time, agitation speed, and effect of adsorbent dose were studied by a series of batch adsorption experiments at room temperature. The result showed that CTS had highest capacity in fluoride adsorption at 20 minutes which could be decreased fluoride to 50 percent. The removal was 40% in case of AC and AC-CTS. CTS could be seen that the maximum removal of 70% occurred at the speed of 100 rpm. At 0 rpm, AC and AC-CTS could be decreased fluoride to 40%. The response of adsorbent dose on fluoride removal was showed that highest capacity in fluoride adsorption in 5 g/L dosage. The removal at this dose was 80% in case of CTS and 40% for AC and AC-CTS, respectively. In addition, the study of comparing isotherm between Langmuir and Freundlich of all adsorbents showed that had fix well with Freundlich isotherm. The values of correlation coefficient for Freundlich isotherms were 0.9887, 0.9860 and 0.9889 for AC, CTS and AC-CTS, respectively.

Keywords: Fluoride, Adsorption, Activated carbon, Chitosan

1. บทนำ

สถานการณ์การปนเปื้อนของฟลูออไรด์ในน้ำบาดาลของประเทศไทยยังคงเป็นปัญหา จากรายงานผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำจากระบบประปาหมู่บ้าน พบว่า หลายพื้นที่คุณภาพน้ำไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำบริโภคในชนบท และคุณภาพน้ำประปาของกรมอนามัย โดยเฉพาะปริมาณของฟลูออไรด์ ซึ่งมีรายงานการเฝ้าระวังในน้ำบริโภคชุมชนของกรมอนามัยตั้งแต่ปี พ.ศ.2550 - พ.ศ.2556 ดำเนินการเก็บตัวอย่างน้ำจาก 1,912 ตำบล ใน 18 จังหวัดกระจายทั่วประเทศ จำนวน 30,213 ตัวอย่าง พบว่า ร้อยละ 14.6 มีฟลูออไรด์เกิน 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร และแหล่งน้ำบริโภคของชุมชนประมาณร้อยละ 3 มีฟลูออไรด์เกิน 2 มิลลิกรัมต่อลิตร [1] โดยหากได้รับฟลูออไรด์เกินมาตรฐานก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพฟันและกระดูก เช่น เกิดฟันตกกระ (Dental Fluorosis) และการผิดรูปของกระดูก (Skeletal Fluorosis) เป็นต้น จากปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้นจึงมีการศึกษาวิธีการกำจัดฟลูออไรด์ที่มีการปนเปื้อนในน้ำ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าฟลูออไรด์สามารถกำจัดได้หลายวิธี ได้แก่ กระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ (Reverse osmosis) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง แต่มีราคาแพงไม่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ในชนบท ในขณะที่กระบวนการดูดซับ (Adsorption) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการกำจัดฟลูออไรด์เนื่องจากมีราคาถูกและมีประสิทธิภาพสูงเช่นเดียวกัน โดยอาศัยวัสดุดูดซับ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) [2] ส่วนไคโตซาน (Chitosan) เป็นสารพอลิเมอร์ธรรมชาติที่สกัดได้จากเปลือกกุ้ง มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นไอออนบวกของหมู่เอมีน [3] ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนทำให้สามารถดูดซับฟลูออไรด์ที่เป็นประจุลบได้ดี [4] การนำถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ เพื่อหาวัสดุดูดซับที่เหมาะสมที่สุด ในการลดปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำ ทำให้สามารถนำวัสดุดูดซับดังกล่าวไปใช้กับแหล่งน้ำที่มีฟลูออไรด์ปริมาณสูงเกินมาตรฐาน และเพื่อลดความเสี่ยงอันตรายจากฟลูออไรด์ต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

น้ำบาดาล เป็นน้ำที่ถูกกักเก็บหรือสะสมอยู่ใต้ดิน อาจสะสมอยู่ตามรอยแตก รอยแยกของชั้นหิน หรือสะสมอยู่ในช่องว่างของเม็ดกรวด น้ำบาดาลอาจมีโอกาสปนเปื้อนจากฟลูออไรด์ เนื่องจากแร่ฟลูออไรด์ในธรรมชาติสามารถละลายน้ำได้ เมื่อน้ำใต้ดินไหลผ่านแหล่งแร่ฟลูออไรด์ ทำให้มีแร่ฟลูออไรด์เจือปนอยู่ในน้ำด้วย ฟลูออไรด์ที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร จะไม่มีผลต่อฟันและกระดูก แต่ถ้ามีมากเกินไปจะทำให้ฟันตกกระและเป็นจุดดำ [5] เมื่อร่างกายได้รับฟลูออไรด์เข้าสู่ร่างกายมากเกินไปติดต่อกันในระยะที่ร่างกายกำลังสร้างฟันอยู่ คือช่วงเวลาตั้งแต่แรกเกิดจนถึงอายุประมาณ 12 ปี จะเกิดความผิดปกติกับผิวเคลือบฟันของฟันแท้ เรียกว่า ฟันตกกระ การเกิดพิษของฟลูออไรด์ต่อกระดูกในระยะแรกๆ จะมีการปวดตามข้อ ไปจนถึงปวดหลัง นอกจากนี้ยังพบว่าในพื้นที่ที่ประชากรได้รับฟลูออไรด์มากเกินไป ส่งผลให้เด็ก ๆ มีระดับของ IQ โดยเฉลี่ยต่ำกว่าชุมชนที่ได้รับฟลูออไรด์ในปริมาณต่ำ [6] การกำจัดสามารถทำได้โดยกระบวนการดูดซับ ซึ่งถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับ สามารถกักเก็บโมเลกุลต่างๆ ในพื้นผิวภายในได้ จึงทำให้มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย [4] นอกจากนี้ไคโตซานซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นไอออนบวกของหมู่เอมีน จะสามารถดูดซับไอออนลบของฟลูออไรด์ ด้วยประจุที่ตรงกันข้ามกัน (Electrostatic attraction) ได้ [7] โดยจากการศึกษาการใช้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์แสดงพื้นที่เสี่ยงจากปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำบาดาลจังหวัดลำพูน พบพื้นที่ที่กำลังประสบปัญหาของพิษฟลูออไรด์ (Fluorosis) ของจังหวัดลำพูน ซึ่งมีสาเหตุมาจากการดื่มน้ำที่มีปริมาณฟลูออไรด์มากเกินไปมาตรฐานน้ำดื่มติดต่อกันเป็นเวลานาน ซึ่งสาเหตุที่น้ำบาดาลมีปริมาณฟลูออไรด์สูงเนื่องจากการปนเปื้อนของน้ำร้อนใต้ผิวดินที่แทรกซึมขึ้นมาเป็นครั้งคราวในช่วงเวลาที่เกิดแผ่นดินไหวตามแนวรอยเลื่อนย่อยที่ถูกปิดทับ ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับรอยเลื่อนใหญ่แม่ทา ทำให้สามารถนำมาใช้ในการวางแผนและแก้ไขปัญหาของพิษฟลูออไรด์ได้อย่างตรงจุด [8] และจากการวิเคราะห์ปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำบริโภคของจังหวัดพะเยาในปี พ.ศ.2554 มีตัวอย่างน้ำที่มีปริมาณเกินค่ามาตรฐานของกรมอนามัย จำนวน 36 ตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 27.90 ของจำนวนตัวอย่างที่ตรวจวิเคราะห์ [9] นอกจากนี้ จากการศึกษาการปรับปรุงวัสดุดูดซับจากตะกอนโรงผลิตน้ำประปาเพื่อกำจัดฟลูออไรด์ พบว่า วัสดุดูดซับจากโรงผลิตน้ำประปาที่เคลือบด้วยสารไคโตซานนั้นมีประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์ได้ดีกว่าวัสดุดูดซับที่ไม่ได้เคลือบด้วยสารไคโตซาน [4] และจากงานศึกษาวิจัยของมหาวิทยาลัยในประเทศอินเดีย พบว่า ร้อยละของการกำจัดฟลูออไรด์จะเพิ่มขึ้น เมื่อใช้เวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น และตัวดูดซับมีปริมาณที่มากขึ้นตามไปด้วย โดยถ่านกัมมันต์ ที่เตรียมจากการกระตุ้นของกรดไนตริก มีประสิทธิภาพพอที่จะสามารถดูดซับฟลูออไรด์ในน้ำได้ [10]

การศึกษาวิจัยเพื่อประเมินความสามารถของไคโตซานในน้ำยาบ้วนปากฟลูออไรด์ในการเพิ่มการคงอยู่ของฟลูออไรด์ในช่องปาก พบว่า ไคโตซานในน้ำยาบ้วนปากไม่มีผลต่อความคงอยู่ของฟลูออไรด์ในช่องปาก แต่มีผลต่อความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำลายในช่วงเวลาต่างๆ แสดงว่าไคโตซานสามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้ [11] และการศึกษาสมดุลของการดูดซับไอออนเงินโดยใช้ไคโตซานผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เรซิน พบว่า การเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับและความเข้มข้นของไอออนเงิน มีผลทำให้ร้อยละการดูดซับและความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น เพราะตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นและเกิดแรงผลักดันเพิ่มสูงขึ้น [12] สอดคล้องกับการศึกษาของ Chooaksorn et al [13] ซึ่งพบว่าการนำนาโนไคโตซานเคลือบบนผิวของถ่านกัมมันต์สามารถลดปริมาณของโครเมียมได้ดี โดยมีประสิทธิภาพสูงขึ้นถึง 2 เท่าเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีการเคลือบ หรือไคโตซาน รวมทั้งเมื่อนำนาโนไคโตซานมาเคลือบกับไส้กรองประเภทเซรามิคสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงได้มากกว่าการใช้ไคโตซานในการดูดซับ [14]

กระบวนการดูดซับจะอาศัยความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของสมดุลของมวลสาร ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับของเหลวกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับของแข็ง การวัดปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ โดยใช้ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ซึ่งในการวิเคราะห์การดูดซับมักนิยมใช้วิธีของ Langmuir Isotherm และวิธีของ Freundlich Isotherm โดยมีรายละเอียดดังนี้ [15]

1) Langmuir Isotherm จะใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) โดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน ซึ่งในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุกๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ และโมเลกุลที่จะถูกดูดซับจะไม่สามารถย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้ แต่สมการของแลงเมียร์มีข้อจำกัดของการใช้งาน คือ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อนๆ ที่สามารถผันกลับได้และจะใช้ได้ในกรณีที่ผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น ดังสมการที่ (1)

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

เมื่อ q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล

q_m คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (mg/g)

b คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (L/mg)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

2) Freundlich Isotherm มีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ) พื้นผิวและพลังงานมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลัง ใช้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ไอโซเทอมแบบฟรุนดิช เป็นไอโซเทอมที่พัฒนาจากไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ที่เกิดบนผิวหน้าไม่เป็นเนื้อเดียว (Heterogeneous) โดยการดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer) การดูดซับแบบฟรุนดิชสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2) โดยถ้าเส้นกราฟที่ได้มีค่าความชันมาก หรือค่า n น้อยแสดงว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูงๆ แต่เกิดขึ้นได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำ ค่า $1/n$ อธิบายถึงไอโซเทอมของการดูดซับ ถ้าเท่ากับ 1 ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง แต่ค่ามากกว่า 1 อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ และถ้าน้อยกว่า 1 อธิบายถึงปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad (2)$$

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล

K_F คือ ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g)

n คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

3. วิธีการวิจัย

3.1 การเตรียมวัสดุดูดซับ

3.1.1 นำถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon; AC) ล้างด้วยน้ำสะอาด จนน้ำเปลี่ยนจากสีดำเป็นสีใส ตากให้แห้ง เก็บไว้ในโถดูดความชื้น

3.1.2 นำเกล็ดไคโตซาน (Chitosan; CTS) (85% Deacetylation) ละลายในกรดอะซิติก ให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

3.1.3 การเคลือบวัสดุดูดซับถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน (Activated Carbon Coated Chitosan; AC-CTS) นำถ่านกัมมันต์แช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง และแช่ลงในสารละลายไคโตซานในอัตราส่วนของวัสดุดูดซับต่อสารไคโตซาน เท่ากับ 2:1 โดยน้ำหนัก เขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง แยกเอาส่วนของวัสดุดูดซับมาผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จนวัสดุดูดซับแห้งสนิท นำไปแช่ในน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) เพื่อล้างกรดส่วนเกินออก จนกระทั่งค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของน้ำไม่เปลี่ยนแปลงและนำวัสดุดูดซับมาผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

3.1.4 ตรวจสอบการเคลือบไคโตซานบนถ่านกัมมันต์โดยการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) (Hitachi Model S-3400N)

3.2 การเตรียมน้ำฟลูออไรด์สังเคราะห์

เตรียมน้ำฟลูออไรด์สังเคราะห์ ที่ความเข้มข้น 1, 3, 5, 10, 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จากสารละลายมาตรฐานฟลูออไรด์ความเข้มข้น (Sodium fluoride) และปรับค่า pH ที่ เท่ากับ 6.7 เพราะเป็นค่า pH ที่มีการดูดซึมของฟลูออไรด์สูงสุด [16]

3.3 ขั้นตอนการวิจัย

3.3.1 การศึกษาเวลาสมมูลในการดูดซับฟลูออไรด์ในน้ำ โดยกำหนดให้ปริมาณวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด (ถ่านกัมมันต์ ไคโตซาน และถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน) อย่างละ 1 กรัม ฟลูออไรด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 40 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ที่มีวัสดุดูดซับ เขย่า 50 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง กำหนดเวลาที่ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที

3.3.2 การศึกษาจำนวนรอบสมมูลในการดูดซับฟลูออไรด์ในน้ำ โดยกำหนดให้ปริมาณวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด (ถ่านกัมมันต์ ไคโตซาน และถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน) อย่างละ 1 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำเสีย 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 40 มิลลิลิตร และกำหนดเวลาสมมูลจากผลการศึกษาในข้อ 3.3.1 นำไปเขย่าโดยกำหนดที่ความเร็วรอบ 0, 50, 100 และ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง

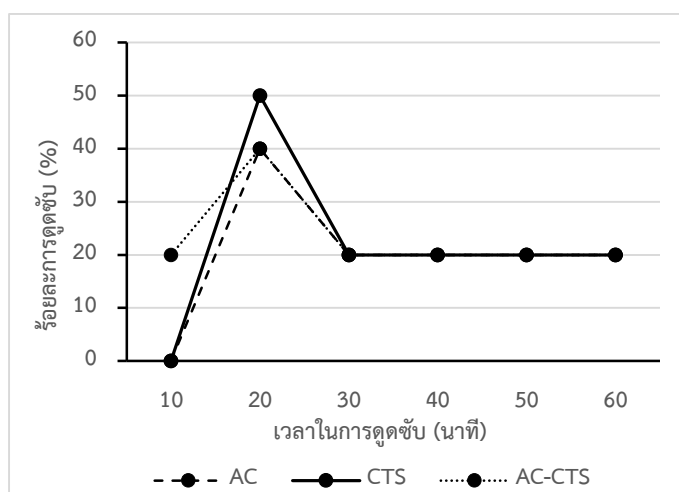
3.3.3 การศึกษาผลของปริมาณวัสดุดูดซับในการดูดซับฟลูออไรด์ โดยกำหนดให้ปริมาณวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด (ถ่านกัมมันต์ ไคโตซาน และถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน) มีปริมาณ 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 และ 5.0 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 40 มิลลิลิตร เทใส่ขวดรูปชมพู่ที่มีวัสดุดูดซับ กำหนดเวลา และรอบสมมูลจากผลการศึกษาในข้อ 3.3.1 และ 3.3.2 ตามลำดับ

3.3.4 การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับฟลูออไรด์ โดยฟลูออไรด์ในน้ำเสียความเข้มข้น 1, 3, 5, 10, 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 40 มิลลิลิตร และปรับ pH 6.7 น้ำหนักของวัสดุดูดซับ 1 กรัมต่อลิตร โดยใช้เวลาสมดุล และจำนวนรอบสมดุล ที่อุณหภูมิห้อง ในการวิเคราะห์การดูดซับใช้วิธีของ Langmuir Isotherm และวิธีของ Freundlich Isotherm

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับฟลูออไรด์

การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเกิดสมดุลของการดูดซับ พบว่า ระยะเวลา 20 นาที ปริมาณของฟลูออไรด์ลดลงมากที่สุด โดยไคโตซาน มีประสิทธิภาพในการลดฟลูออไรด์ร้อยละ 50 ส่วนถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน มีประสิทธิภาพร้อยละ 40 ซึ่งเป็นกลไกการแพร่ภายในของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับจึงเกิดการดูดซับขึ้น และหลังจากระยะเวลา 30 นาที (ภาพที่ 1) เป็นกลไกที่ตัวถูกดูดซับติดอยู่ที่ผิวของตัวดูดซับ [17] ทำให้ถ่านกัมมันต์ ไคโตซาน และถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน สามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้น้อยลงและคงที่ไปจนถึงเวลา 60 นาที เนื่องจากถ่านกัมมันต์ ไคโตซาน และถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน มีความพรุนแต่ผิวหน้ามีพื้นที่ผิวภายนอกต่ำทำให้การดูดซับเกิดขึ้นเร็วในตอนต้น และเกิดการอิ่มตัวอย่างรวดเร็วจึงทำให้ค่าการดูดซับคงที่และสามารถดูดซับย้อนกลับได้ [18] ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Poudyal and Babel [19] พบว่าการดูดซับคงที่ และลดลงเมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุล

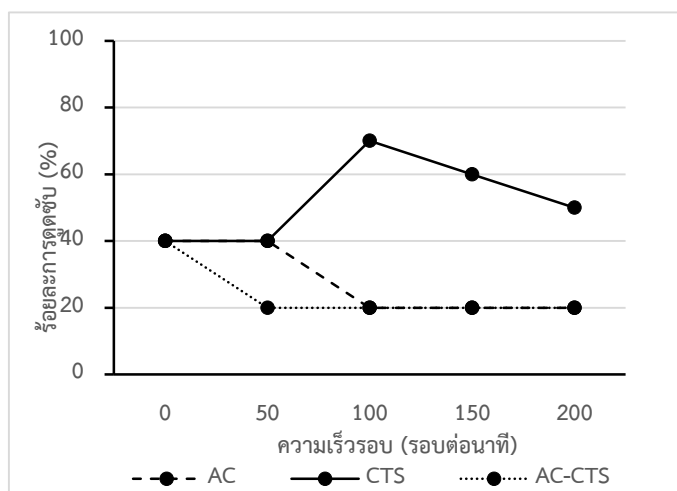


ภาพที่ 1 ร้อยละของการดูดซับฟลูออไรด์ที่ระยะเวลาต่างกัน

4.2 ผลการศึกษาจำนวนรอบสมดุลในการดูดซับฟลูออไรด์

การศึกษาน้ำวนรอบที่เหมาะสมสำหรับการเกิดสมดุลของการดูดซับ (ภาพที่ 2) พบว่า เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน ทำให้ปริมาณของฟลูออไรด์ลดลงมากที่สุดที่ 0 รอบต่อนาที โดยมีประสิทธิภาพในการลดร้อยละ 40 เพราะถ่านกัมมันต์มีจำนวนรูพรุนจำนวนมากแต่ไม่มีไอออนที่สามารถจับกับ

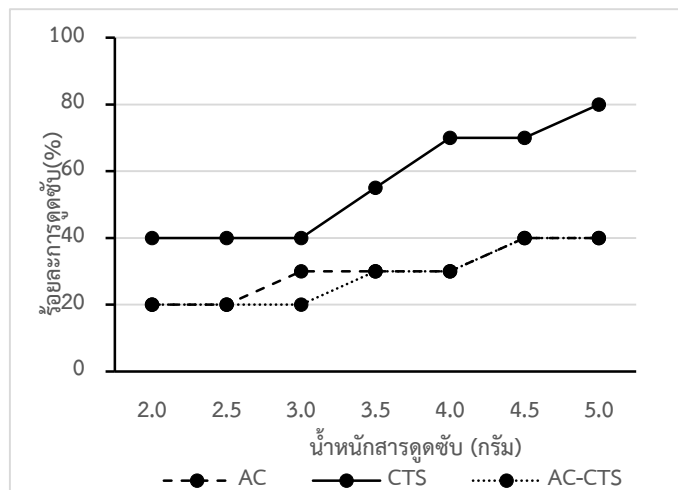
ไอออนลบของฟลูออไรด์ได้โดยตรงและอาศัยเพียงแรงดึงดูดจากกรุพุนในการดูดฟลูออไรด์เข้าไปในกรุพุนเท่านั้น เมื่อมีการเขย่าด้วยความเร็วต่างๆ จึงเป็นการกระตุ้นหรือช่วยให้ฟลูออไรด์หลุดออกมาจากกรุพุนของถ่านกัมมันต์ ส่วนถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซานนั้น เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีอะตอมอิสระจึงไปจับกับไนโตรเจนในหมู่เอมีนของไคโตซาน เมื่อเคลือบสารละลายไคโตซานจึงเป็นการปิดรูพุนของถ่านกัมมันต์และหมู่เอมีนกลายเป็นโมเลกุลที่ไม่มีประจุบวกจึงไม่สามารถจับกับฟลูออไรด์ที่เป็นไอออนลบได้ เมื่อมีการเขย่าจึงไม่มีผลต่อการดูดซับฟลูออไรด์ และไคโตซานมีปริมาณของฟลูออไรด์ลดลงมากที่สุดที่ 100 รอบต่อนาที โดยมีประสิทธิภาพร้อยละ 70 เนื่องจากไคโตซานมีหมู่เอมีนอยู่มากในสายโพลิเมอร์ เมื่ออยู่ในน้ำที่มีสภาวะที่เป็นกรดหมู่เอมีนจะกลายเป็นโมเลกุลที่มีขั้วและมีประจุบวก ทำให้สามารถจับกับไอออนลบของฟลูออไรด์ได้ดีเมื่อมีการเขย่าจึงไม่มีการหลุดของฟลูออไรด์และยังเป็นการกระตุ้นให้มีการดูดซับเพิ่มขึ้น [20]



ภาพที่ 2 ร้อยละของการดูดซับฟลูออไรด์จำนวนรอบการเขย่าต่างกัน

4.3 ผลการศึกษาผลของปริมาณของวัสดุดูดซับในการดูดซับฟลูออไรด์

การศึกษาค่าผลของปริมาณของวัสดุดูดซับ เพื่อหาร้อยละของการดูดซับฟลูออไรด์ (ภาพที่ 3) พบว่าน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน 5 กรัม สามารถดูดซับได้ ร้อยละ 40 เนื่องจากถ่านกัมมันต์จะอาศัยแรงดึงดูดจากกรุพุนเพื่อเพิ่มโอกาสให้ฟลูออไรด์หลุดเข้าไปเท่านั้น ส่วนถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน จะเกิดฟิล์มบางๆ ที่มาจากสารละลายไคโตซานปิดรูพุนของถ่านกัมมันต์และเมื่อไนโตรเจนของหมู่เอมีนจับกับถ่านกัมมันต์ จึงไม่มีการจับกับฟลูออไรด์ ทำให้วัสดุดูดซับ 2 ชนิดเสียประสิทธิภาพไป และไคโตซานที่มีน้ำหนักหนัก 5 กรัม สามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้สูงที่สุดร้อยละ 80 เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน จะเห็นว่าหมู่เอมีนอยู่เป็นจำนวนมาก เนื่องจากเกล็ดไคโตซานที่ใช้มี % Deacetylation สูงถึง 85% หมายความว่า จะมีการเพิ่มขึ้นของหมู่เอมีนของกลูโคซามีน (Glucosamine) ทำให้มีความสามารถในการรับโปรตอนจากสารละลายได้เพิ่มขึ้นเพราะไคโตซานมีประจุบวกเพิ่มมากขึ้น [21]



ภาพที่ 3 ร้อยละของการดูดซับฟลูออไรด์ที่ปริมาณตัวดูดซับต่างกัน

4.4 ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับฟลูออไรด์

4.4.1 ถ่านกัมมันต์

จากการศึกษา พบว่า สมการแลงเมียร์ไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์ มีค่าความเชื่อมั่น (R^2) ค่าปริมาณสูงสุดของสารถูกดูดซับแบบชั้นเดียว (Q_0) และค่าคงที่ของการดูดซับ (K_L) มีค่าเท่ากับ 0.9779, 3.49 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 0.08 ลิตรต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่า R^2 กับสมการฟรุนดลิชไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์ พบว่ามีค่า R^2 K_F และ $1/n$ เท่ากับ 0.9887, 0.22 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 1.77 ตามลำดับ ซึ่งในกรณีที่ค่า $1/n$ มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณที่ไม่จำกัดในการดูดซับ ดังนั้นการดูดซับของถ่านกัมมันต์สามารถอธิบายตามสมการฟรุนดลิชมากกว่าสมการแลงเมียร์ สอดคล้องกับการศึกษาของซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Poudyal and Babel [19]

4.4.2 ไคโตซาน

จากการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยไคโตซาน พบว่ามีค่า R^2 , Q_0 และ K_L เท่ากับ 0.9733, 4.24 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 0.06 ลิตรต่อกรัมตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากค่า R^2 นำมาเปรียบเทียบกับสมการฟรุนดลิชไอโซเทอมของไคโตซาน พบว่ามีค่า R^2 , K_F และ $1/n$ เท่ากับ 0.9860, 0.21 ลิตรต่อกรัม และ 1.69 ตามลำดับ ซึ่งในกรณีมีค่า $1/n$ มากกว่า 1 แสดงว่าปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณที่ไม่จำกัดในการดูดซับ ทำให้การดูดซับของไคโตซานสามารถอธิบายด้วยสมการฟรุนดลิชได้ดีกว่าสมการแลงเมียร์

4.4.3 ถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน

จากการศึกษา พบว่า มีค่า R^2 , Q_0 และ K_L มีค่าเท่ากับ 0.9784, 3.46 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 0.08 ลิตรต่อกรัมตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากค่า R^2 นำมาเปรียบเทียบกับสมการฟรุนดลิชไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน พบว่ามีค่า R^2 , K_F และ $1/n$ เท่ากับ 0.9889, 0.22 ลิตรต่อกรัม และ 1.77 ตามลำดับ ซึ่งในกรณีมีค่า $1/n$ มากกว่า 1 แสดงว่าปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณที่ไม่จำกัดในการดูดซับ ทำให้การดูดซับของไคโตซานสามารถอธิบายด้วยสมการฟรุนดลิชได้ดีกว่าสมการแลงเมียร์เนื่องจากสมการฟรุนดลิชสามารถอธิบายได้ว่า

เป็นการดูดซับที่พื้นที่ของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือมีพื้นผิวที่ขรุขระทำให้มีการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) [13, 17]

5. อภิปรายผลและข้อเสนอแนะการวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์ พบว่า ไคโตซานมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยระยะเวลาการดูดซับ 20 นาที มีประสิทธิภาพร้อยละ 50 แต่เมื่อระยะเวลานานขึ้น ตัวดูดซับทุกชนิดมีประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากกลไกที่ตัวดูดซับติดอยู่ที่ผิวของตัวดูดซับ [17] ความพรุนบริเวณผิวหน้ามีพื้นที่ผิวภายนอกต่ำทำให้การดูดซับเกิดขึ้นเร็วในตอนต้น และเกิดการอิ่มตัวอย่างรวดเร็วจึงทำให้ค่าการดูดซับคงที่และสามารถดูดซับย้อนกลับได้ [18] ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Poudyal and Babel [19] จำนวนรอบที่เหมาะสมคือ 100 รอบต่อนาที การเขย่าจึงไม่ผลต่อฟลูออไรด์และยังเป็นการกระตุ้นให้มีการดูดซับเพิ่มขึ้น [17] และปริมาณวัสดุดูดซับในการดูดซับมากที่สุด มีประสิทธิภาพในการดูดซับมากที่สุดเช่นเดียวกัน เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน มีหมู่เอมีนอยู่เป็นจำนวนมาก มีการเพิ่มขึ้นของหมู่เอมีนของกลูโคซามีน (glucosamine) ทำให้มีความสามารถในการรับโปรตรอนจากสารละลายได้เพิ่มขึ้นเพราะไคโตซานมีประจุบวกเพิ่มมากขึ้น [21] ส่วนไอโซเทอมของการดูดซับฟลูออไรด์ ตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิดสามารถอธิบายตามสมการฟรุนดลิชมากกว่าสมการแลงเมียร์ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Poudyal and Babel [16] เนื่องจากสมการฟรุนดลิชสามารถอธิบายได้ว่าเป็นการดูดซับที่พื้นที่ของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือมีพื้นผิวที่ขรุขระทำให้มีการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) [13, 17] จึงแสดงให้เห็นว่าการเคลือบด้วยสารละลายไคโตซานไม่มีผลต่อระยะเวลาสมดุล จำนวนรอบสมดุล และปริมาณของวัสดุดูดซับฟลูออไรด์ เนื่องจากฟิล์มบางที่เกิดจากการเคลือบด้วยสารละลายไคโตซานทำให้ปิดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ส่งผลให้วัสดุดูดซับเสียประสิทธิภาพ ดังนั้นการนำไคโตซานไปทดแทนวัสดุดูดซับชนิดอื่นที่มีราคาแพง จึงมีความเหมาะสม เพราะเป็นการลดต้นทุนในการบำบัดและนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ และที่สำคัญสามารถกำจัดฟลูออไรด์ที่ปนเปื้อนในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากไคโตซานเป็นวัสดุดูดซับที่ดีที่สุดและมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ จึงเหมาะสมในการนำไปใช้ในกระบวนการกรองเพื่อลดปริมาณของฟลูออไรด์เบื้องต้นในพื้นที่ที่ประสบปัญหาฟลูออไรด์เกินมาตรฐาน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมอนามัย. (2557). กรมอนามัยหนุน พื้นที่เสี่ยงฟลูออไรด์ในน้ำสูง เร่งส่งน้ำตรวจป้องกันฟันตกกระ ลดค่าใช้จ่าย ครอบฟันกว่า 10,000 บาทต่อคน. สืบค้น 30 มิถุนายน พ.ศ. 2563, จาก http://www.anamai.moph.go.th/ewt_news.php?nid=7341
- [2] สัมฤทธิ์ ไม้พวง. (2558). คาร์บอนกัมมันต์. พิมพ์ครั้งที่ 1. พิษณุโลก: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- [3] วรณิ ศรีนุตตระกูล. (2553). จากเปลือกกุ้งและกระดองปูสู่ไคโตซาน. สืบค้น 22 กุมภาพันธ์ 2563, จาก <http://www0.tint.or.th/>
- [4] ศรีวิไล โฆษิตชัยยงค์, สิริลักษณ์ เจียรกร และสร้อยดาว วินิจนันท์. (2551). การปรับปรุงวัสดุดูดซับจากตะกอนโรงผลิตน้ำประปาเพื่อกำจัดฟลูออไรด์. รายงานการประชุมวิชาการด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ. 31 สิงหาคม 2550 โรงแรมเดอะทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพมหานคร.

-
- [5] กรมทรัพยากรน้ำบาดาลกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2555). โครงการศึกษาเพิ่มประสิทธิภาพของระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล (รายงานฉบับสุดท้าย). สืบค้น 14 พฤษภาคม 2563, จาก www.dgr.go.th
- [6] กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. (ม.ป.ป.). แผนที่ฟลูออไรด์ในน้ำบาดาล. สืบค้น 11 เมษายน 2563, จาก [icoh.anamai.moph.go.th > article_20190226100753](http://icoh.anamai.moph.go.th/article_20190226100753)
- [7] ชนิสา หงสวรรณ. (2548). การดูดซับสีย้อมสีแอฟทีฟ และสีย้อมเบสิกโดยใช้กากตะกอนของเสีย. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2548.
- [8] จิราภรณ์ ผิดน้อย. (2540). การใช้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์แสดงพื้นที่เสี่ยงจากปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำบาดาลจังหวัดลำพูน (รายงานวิจัย). เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [9] สำนักงานสาธารณสุขจังหวัดพะเยา. (2554). ผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำบริโภค 2554.
- [10] Emmanuel, K.A., Ramaraju, K.A., Rambabu, G., Veerabhadra, A. (2008) Removal of Fluoride from Drinking Water with Activated Carbons Prepared from NHO_3 Activation-A Comparative Study. *Rasayan Journal of Chemistry*, 1(4), 802-818.
- [11] ณัฐิกา โภชนกุล, ปิยาภรณ์ คู่ศรีสมทรัพย์, พาติยะ หะยิอิสมาแอ, สกรรัตน์ เจียวีกัก, และเอกพงศ์ วาติมานนท์. (ม.ป.ป.). ผลของไคโตซานต่อการคงอยู่ของฟลูออไรด์ในช่องปาก (รายงานการวิจัย). สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [12] อุษณีย์ รักษ์ไชยวรรณ, ยุพดี กุลรัตน์กิตติวงศ์ และโกวิท ยะมะมงคล. (2557). สมดุลและจลศาสตร์การดูดซับไอออนเงินโดยไคโตซานผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เรซิน. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 9(2), 12-22.
- [13] Chooaksorn, W., Nitisoravut, R., Polprasert, C., Babel, S., Laohasurayotin, K., Kangwansupamonkon, W. (2016). Enhancement of Cr (VI) ion Removal Using Nanochitosan Coated on Bituminous Activated Carbon. *Water Environment Research*, 88(11), 2150-2158.
- [14] Chooaksorn, W., Nitisoravut, R. Development of New Hybrid Nanosorption/Ceramic Microfiltration for Cu (II) Removal. , 63 (2017), 135-144.
- [15] กิตติศักดิ์ เสพศิริสุข, วิทยา ปั่นสุวรรณ และนิพนธ์ ตังคณานุรักษ์. (2552). การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารพิษฟลูออโรโบลเอสเทอร์ในน้ำมันสบู่ดำโดยใช้เบนโทไนต์ชนิดต่างๆ.การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47: สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพมหานคร, 17-20 มีนาคม 2552, 327-334.
- [16] Kamble, S.P., Jagtap, S., Labhsetwar, N.K., Thakare, D., Godfrey, S., Devotta, S., Sadhana, S.R. (2007). Defluoridation of Drinking Water Using Chitin Chitosan and Lanthanum-Modified Chitosan. *Chemical Engineering Journal*, 129(1-3), 173-180.
- [17] ปราโมช เขียวชาญ. (ม.ป.ป.). การปรับปรุงคุณภาพน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม ตอนที่ 2 กระบวนการดูดซับ. สืบค้น 9 เมษายน 2563, จาก www.วารสารความปลอดภัยและสุขภาพ.com > 2436

-
- [18] นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และคณิดา ตั้งคณานุรักษ์. (2555). หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [19] Poudyal, M., Babel, S. (2015). Removal of Fluoride using Granular Activated Carbon and Domestic Sewage Sludge. Proceedings of the 4th International Conference on Informatics, Environment, Energy and Applications, Pattaya, 28 March 2015, 139-143.
- [20] Geethamani, C.K., Ramesh, S.T, Grandhimathi R. Nidheesh, P.V. (2013). Alkali-treated fly ash for the removal of fluoride from aqueous solutions. Desalination and Water Treatment, 52(19-21), 3466-3476.
- [21] Harikumar, P.S.P., Jaseela, C., Megha, T. (2012). Defluoridation of Water Using Biosorbents. Natural Science, 4(4),245-251.