

การกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลสังเคราะห์ด้วยไคโตซานเมมเบรน
รัตนา สนั่นเมือง*, ยุทธพงษ์ อุคเน่น และ วิภารัตน์ เชื้อชวด

Removal of Iron in Synthetic Ground Water by Chitosan Membrane

Ratana Sananmuang*, Yuthapong Udnan and Wipharat Chuachwad

*ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก 65000

*Corresponding author. E-mail : ratanas@nu.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลสังเคราะห์ด้วยไคโตซานเมมเบรน ผลการศึกษาพบว่าไคโตซานเมมเบรนสามารถดูดซับที่อุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส) และที่ 40 องศาเซลเซียส ได้ดีที่พีเอช 2.5 - 7.0 (75.21– 100.00 %) สำหรับสมมูลในการดูดซับนั้นเกิดขึ้นตั้งแต่ชั่วโมงแรกจนกระทั่งชั่วโมงที่ 16 โดยสามารถดูดซับเหล็กได้ 72.33 - 97.61 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้น ของสารละลายเหล็กนั้น พบว่าไคโตซานเมมเบรนมีความสามารถในการดูดซับเหล็กเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเหล็กสูงขึ้นโดยประสิทธิภาพของการดูดซับที่ดีจะอยู่ในช่วงความเข้มข้น 0.5 – 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าการดูดซับอยู่ในช่วง 69.20 - 96.61 % ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับพบว่าสอดคล้องกับสมการฟรุนดลิช ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นการดูดซับแบบต่อเนื่อง โดยมีค่าคงที่ K_f ในสมการฟรุนดลิชเท่ากับ 19.05 ซึ่งมีค่าสูง แสดงถึงความจุในการดูดซับ ของไคโตซานเมมเบรน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงด้วย

คำสำคัญ: ไคโตซาน, เมมเบรน, เหล็ก, น้ำบาดาล, การดูดซับ

Abstract

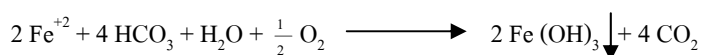
This study aims to investigate the efficiency of chitosan membrane for removal Iron in synthetic ground water. The results revealed that chitosan membrane could adsorb Iron from 75.21 to 100% at pH 2.5-7.0 and room temperature (28 °C) and 40 °C. The adsorption equilibrium occurred

at the first hour until the sixteenth hours with the range of 72.33-97.61%. Also, the adsorption was increased with the increasing of solution's concentration at the range of 0.5-5.0 mg/L. Based on the isotherm study; the adsorption was fitted to the Freundlich model with a high K_f (19.05). Therefore, this chitosan membrane showed high efficiency for Iron adsorption.

Keywords: Chitosan, Membrane, Iron, Ground Water, Adsorption

บทนำ

เหล็กเป็นโลหะที่กระจายตัวอยู่ทั่วไปที่ผิวโลก มีอยู่ที่ผิวน้ำและน้ำบาดาลในรูปของสารละลายและตะกอน ซึ่งถ้าหากมีเหล็กปนเปื้อนมากกว่า 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร จะปรากฏตะกอนสีน้ำตาลเข้มลอยอยู่ที่ผิวน้ำ ด้วยเหตุนี้คุณภาพน้ำดื่มที่ทางสำนักงานสิ่งแวดล้อมภาค 3 ได้พยายามแก้ไขปัญหา ได้แก่การปนเปื้อนของเหล็ก ซึ่งในจังหวัดพิษณุโลกและพิจิตรมีปริมาณเหล็กในน้ำดื่มตั้งแต่ร้อยละมากถึง 1.89 และ 0.07-2.04 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ศูนย์อนามัยสิ่งแวดล้อม, 2545) ทำให้น้ำมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลแดงไม่น่าอุปโภคและบริโภค รวมทั้งเกิดกลิ่นเฉพาะ (กลิ่นสนิมเหล็ก) น้ำที่มีเหล็กมากมักจะมีสีแดงขุ่น น่ารังเกียจ นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดคราบสนิมเคลือบตามเครื่องสุขภัณฑ์และอื่นๆ และมักตกตะกอนอุดตันตามช่องว่างของท่อกรู ท่อกรอง เหล็กที่ละลายอยู่ในน้ำบาดาล มีอยู่ 2 แบบ คือ Fe^{+2} (ferrous) และ Fe^{+3} (ferric) โดย Fe^{+2} สามารถละลายน้ำได้และไม่คงที่ (unstable) เมื่อถูกอากาศจะเปลี่ยนไปเป็นรูปของ Fe^{+3} ซึ่งไม่สามารถละลายน้ำได้ และจะตกเป็นตะกอน ในตอนแรกน้ำจะใส แต่เมื่อทิ้งไว้สักครู่จะกลายเป็นสีน้ำตาลขุ่น และมีตะกอนของสนิมเหล็กนอนก้น ดังปฏิกิริยา (ทวิศักดิ์ ะมิงวงศ์, 2546)



การกำจัดโลหะในน้ำมีเทคนิคแตกต่างกันมากมาย ได้แก่ การตกตะกอนด้วยสารเคมี การกรองด้วยตัวกรอง การแลกเปลี่ยน อีออนด้วยเรซินและการดูดซับด้วยวัสดุดูดซับ เป็นต้น สำหรับเทคนิคการดูดซับนั้นเป็นที่สนใจอย่างมากในการหาวัสดุดูดซับธรรมชาติ เช่น ไคโตซาน ซึ่งเป็นวัสดุดูดซับชนิดหนึ่งที่ยิมนำมาใช้ในการดูดซับโลหะเป็นอย่างมาก (Krajewska, 2005) แต่ในปัจจุบันนักวิจัยพยายามค้นคว้าเทคนิคที่เหมาะสมเพื่อนำปรับปรุงไคโตซาน ให้มีประสิทธิภาพและราคาไม่แพง ดังนั้นในการเตรียมไคโตซานให้เป็นเยื่อบาง (membrane) จึงเป็นอีกหนึ่งวิธีในการปรับปรุงไคโตซานให้สามารถนำไปใช้งานได้ง่าย และสะดวกต่อการกำจัดทิ้งหลังจากดูดซับแล้ว (วรารุณี พุทธิให้, 2546)

ดังนั้นในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำดังกล่าว เพื่อให้ได้น้ำอุปโภคบริโภคที่มีเหล็กอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานขององค์การอนามัยโลก (เหล็กไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร) (Chapman, 1986) โดยใช้เทคนิคการดูดซับด้วยไคโตซานเมมเบรนจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่ง

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมสารละลายเหล็กมาตรฐาน 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำได้โดยการชั่ง $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 4.8400 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วเติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ จำนวน 1 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร สำหรับการเตรียมไคโตซานเมมเบรนนั้น (Steenkamp *et al.*, 2002) ทำได้โดยชั่งไคโตซาน (Chitosan FW=161, medium molecular weight, sigma-aldrich, U.S.A.) 20.00 กรัม เติมกรดอะซิติก (1% v/v) จำนวน 1000 มิลลิลิตร กวนจนไคโตซานละลายหมด ปิเปตสารละลายไคโตซาน 10 มิลลิลิตร ลงใน polystyrene petridish ทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง เทสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 นอร์มัล ลงใน polystyrene petridish จนท่วมไคโตซานเมมเบรน ทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำกลั่น ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ได้ไคโตซานเมมเบรนสำหรับการทดลองต่อไป

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายเหล็ก ได้แก่ การศึกษาพีเอช เวลาที่การดูดซับเข้าสู่สมดุล (equilibrium adsorption) และความเข้มข้นซึ่งศึกษาด้วยไอโซเทอม (adsorption isotherm) ในการศึกษาพีเอชนั้นทำได้โดยนำไคโตซานเมมเบรนที่เตรียมได้มา 1 แผ่น (0.172 กรัม) ตัดให้มีขนาด 2x2 ตารางเซนติเมตร ใส่ลงบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร เติมสารละลายเหล็กมาตรฐานเข้มข้น 3.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 20 มิลลิลิตร ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5 และ 7.0 (โดยใช้กรดไนตริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์) กวนสารละลายเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส, อุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส กรองสารละลาย และนำมาวัดปริมาณความเข้มข้นของสารละลายเหล็กที่เหลืออยู่ด้วยเทคนิค Flame Atomic Adsorption Spectroscopy (FAAS) (ที่ความยาวคลื่น 372.0 นาโนเมตร) สำหรับการศึกษเวลาที่การดูดซับเข้าสู่สมดุล ทำเช่นเดียวกับการทดลองข้างต้นแต่ปรับค่าพีเอชที่เหมาะสมตามผลที่ได้จากการทดลอง และทำการกวนสารละลายเป็นเวลา 5, 10, 15, 30, 45 นาที และ 1-16 ชั่วโมง (แต่ละช่วงเวลาดังกล่าว 1 ชั่วโมง) ที่อุณหภูมิที่เหมาะสมตามผลที่ได้จากการทดลองข้างต้นเช่นเดียวกัน ส่วนการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ ให้ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองข้างต้น แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเหล็กเป็น 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 และ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยปรับค่าพีเอชของสารละลายและตั้งค่าอุณหภูมิในการกวนสารละลายที่เหมาะสมตามผลที่ได้จากการทดลองข้างต้น นำ

สารละลายที่ได้มาวัดปริมาณความเข้มข้นของสารละลายเหล็กที่เหลืออยู่ด้วยเทคนิค FAAS นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟตามสมการแลงเมียร์และฟรุนดลิช (Iqbal and Ashiq, 2006) ดังแสดงในสมการ (1) และ (2) ตามลำดับ

สมการแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm)

$$\frac{Ce}{qe} = \frac{Ce}{X_m} + \frac{1}{KX_m} \dots\dots\dots(1)$$

- เมื่อ X_m = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- qe = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- Ce = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลือหลังจากการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- K = ค่าคงที่สมดุลในการดูดซับ

สมการฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm)

$$\log qe = \log K_f + \left(\frac{1}{n}\right) \log Ce \dots\dots\dots(2)$$

- เมื่อ Ce = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลือหลังจากการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- qe = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- K_f, n = ค่าคงที่สมดุลในการดูดซับ

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการศึกษาลักษณะภายนอกของแผ่นไคโตซานเมมเบรน พบว่ามีลักษณะเป็นแผ่นบางใส พื้นผิวเรียบ และมีความโปร่งแสง เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 8.3 ± 0.7 เซนติเมตร และน้ำหนักเฉลี่ยต่อแผ่นเท่ากับ 0.172 ± 0.005 กรัม ดังรูป 1 ส่วนลักษณะพื้นผิวของไคโตซานเมมเบรน ซึ่งตรวจสอบด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope (SEM)) ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง (ภายใน) พบว่าผิวด้านหน้าของไคโตซานเมมเบรนจะเรียบ และมีบางส่วนที่นูนขึ้นมาจากพื้นผิว ซึ่งเนื่องมาจากในขณะที่เตรียมไคโตซานเมมเบรนมีฟองอากาศเกิดขึ้น ดังแสดงในรูป 2 (ก) ส่วนพื้นผิวด้านข้าง (ตัดขวางภายในแผ่น) ของไคโตซานเมมเบรนนั้นมีลักษณะเป็นชั้นต่อเนื่องกันหลายๆ ชั้น ดังแสดงในรูป 2 (ข)

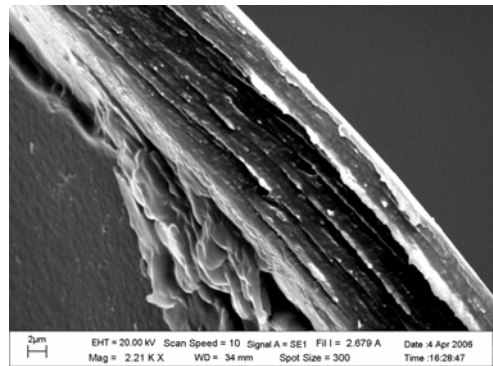
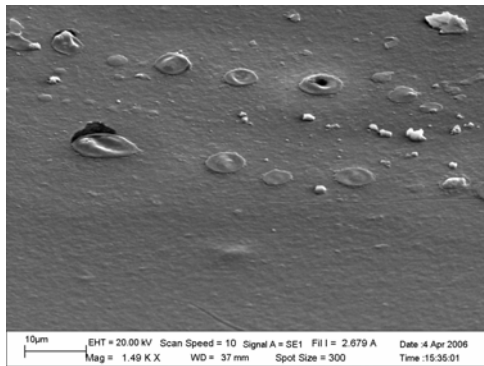
สำหรับผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับสารละลายเหล็กด้วยไคโตซานเมมเบรน พบว่าที่พีเอช 2.5-6.5 ไคโตซานเมมเบรนสามารถดูดซับเหล็กได้ดีที่อุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าการดูดซับประมาณ 99.34-100 % และที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสนั้น มีค่าการดูดซับที่ต่ำเพียงช่วงพีเอช 2.5-4.0 เท่านั้น หลังจากพีเอช 4.0

แล้วค่าการดูดซับลดลงเรื่อยๆอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้อาจมาจากสาเหตุของการควบคุมอุณหภูมิซึ่งในระดับต่ำกว่าอุณหภูมิห้องทำได้ค่อนข้างยากเมื่อทำการทดลองแบบ Batch ประกอบกับอาจจะเกิดข้อผิดพลาดเกี่ยวกับความสม่ำเสมอของการคนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก (magnetic bar) บนแผ่นให้ความร้อน ดังนั้นโอกาสที่สารที่ถูกดูดซับจะเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับของตัวดูดซับจึงไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในรูป 3 นอกจากนี้หลังการดูดซับที่พีเอชต่างๆ แล้วไคโตซานเมมเบรนยังสามารถคงสภาพเป็นแผ่นได้เช่นเดิม

จากการวัดค่าพีเอชและอุณหภูมิของน้ำผิวดินตามธรรมชาติพบว่ามีความค่าช่วง 6.0 – 8.0 และ 25-28 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งเป็นช่วงเดียวกับอุณหภูมิห้องที่ทำการทดลอง ดังนั้นเพื่อให้สอดคล้องกับสภาพน้ำธรรมชาติ ในการศึกษาเวลาที่เข้าสู่ภาวะสมดุล ผู้วิจัยจึงเลือกที่พีเอช 6 และอุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส) เพื่อศึกษาในขั้นตอนอื่นต่อไป สำหรับผลการศึกษาเวลาที่การดูดซับเข้าสู่สมดุลนั้น พบว่าไคโตซานเมมเบรนมีความสามารถในการดูดซับดี (72.33 -97.61 %) โดยสมดุลของการดูดซับเกิดขึ้นตั้งแต่ชั่วโมงแรกและเกิดขึ้นค่อนข้างสม่ำเสมอเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูป 4 ส่วนผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นต่อการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส) นั้นพบว่าไคโตซานเมมเบรนดูดซับเหล็กในสารละลายได้ดีขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น (รูป 5 และ ตารางที่ 1) และจากการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ สามารถนำมาสร้างกราฟตามสมการแลงเมียร์และฟรุนดลิช เพื่อหาค่า R^2 และค่าคงที่สมดุลของการดูดซับได้ (ตารางที่ 2) ซึ่งพบว่า การดูดซับเหล็กในสารละลายด้วยไคโตซานเมมเบรน สอดคล้องกับสมการ ฟรุนดลิช ($R^2 = 0.6127$) แสดงให้เห็นว่าเป็นการดูดซับแบบต่อเนื่อง (สุริดา โขภคชัยวัฒน์, 2544; Iqbal and Ashiq, 2006) แต่อย่างไรก็ตามค่า R^2 ที่ได้ยังมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา (รัตนานันเมือง และ นิตยา ชานูน, 2550) ทั้งนี้ อาจจะเป็นเพราะในการเตรียมไคโตซานเมมเบรนนั้น มีฟองอากาศอยู่ภายใน (รูป 2ก) จึงอาจจะเกิดข้อผิดพลาดในการดูดซับในแต่ละชุดการทดลองได้



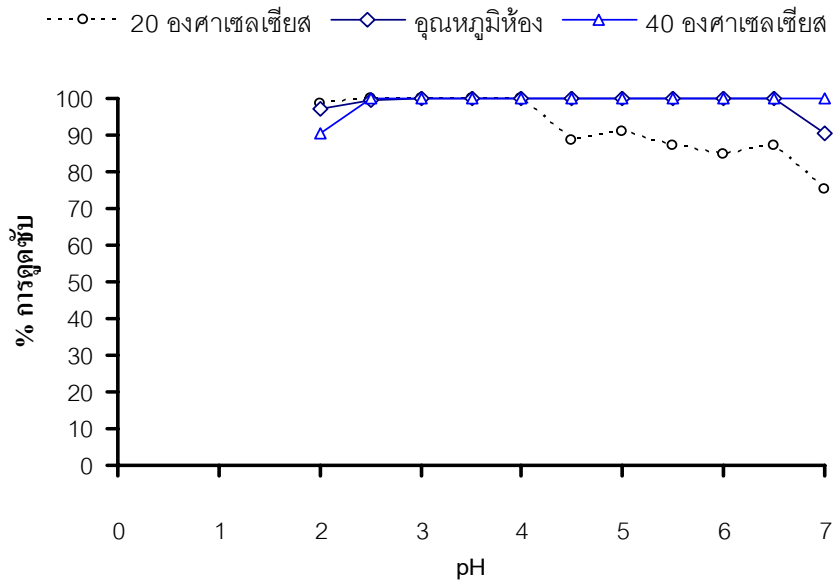
รูป 1 ภาพถ่ายของไคโตซานเมมเบรน



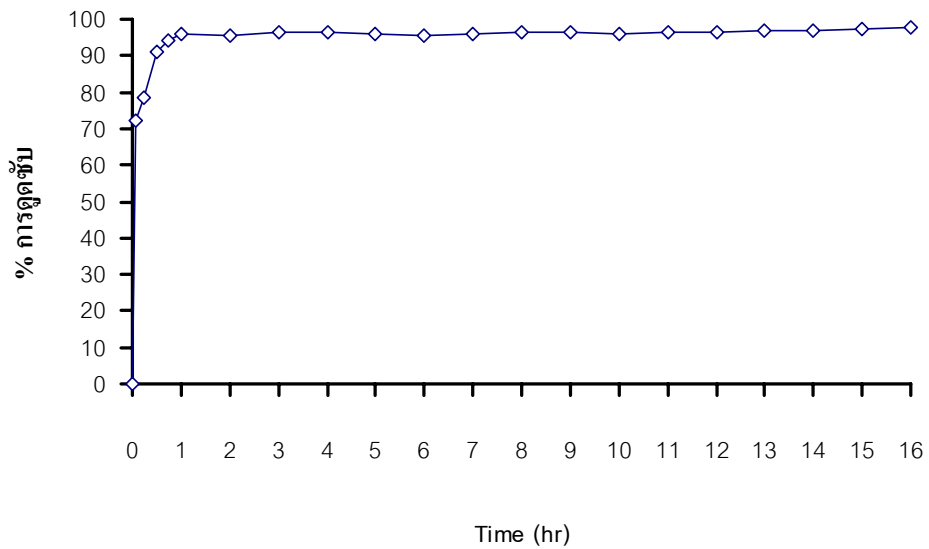
(ก) ด้านหน้า (กำลังขยายประมาณ 1,500 เท่า)

(ข) ด้านข้าง (กำลังขยายประมาณ 2,200 เท่า)

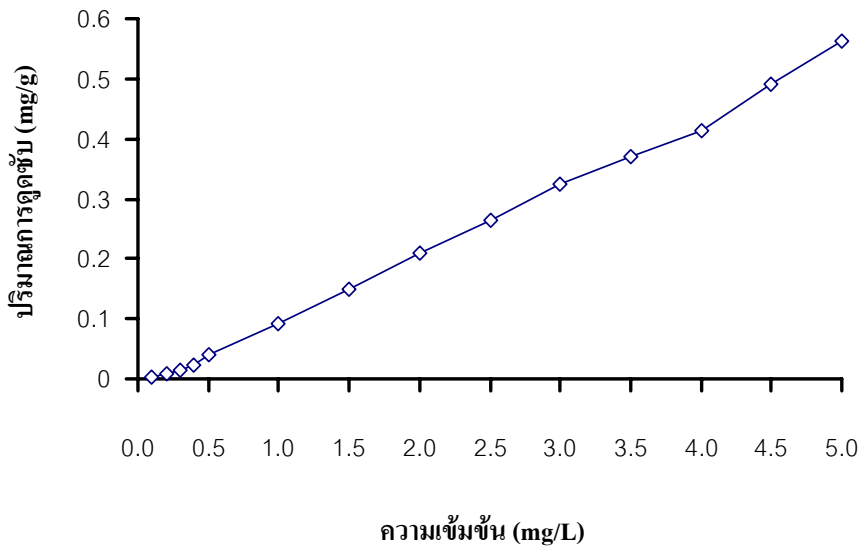
รูป 2 ภาพถ่าย SEM ลักษณะพื้นผิวของไคโตซานเมมเบรน



รูป 3 ผลของพีเอชต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับเหล็กด้วยไคโตซานเมมเบรน



รูป 4 ผลของเวลาต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับเหล็กด้วยไคโตซานเมมเบรน ที่ pH 6 และอุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส)



รูป 5 ผลของความเข้มข้นต่อปริมาณการดูดซับเหล็กด้วยไคโตซานเมมเบรนที่ pH 6, อุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส) และเวลาในการดูดซับ 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพการดูดซับเหล็กที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0	1.5
% การดูดซับ	19.33±0.01	38.00±0.01	38.44±0.06	49.25±0.05	69.20±0.03	79.43±0.04	84.78±0.04
ปริมาณการดูดซับ (mg/g)	0.002±0.001	0.009±0.001	0.013±0.008	0.023±0.006	0.040±0.003	0.092±0.004	0.148±0.005

ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
% การดูดซับ	89.87±0.07	91.28±0.02	92.77±0.01	91.16±0.19	88.70±0.06	93.61±0.15	96.61±0.02
ปริมาณการดูดซับ (mg/g)	0.209±0.008	0.265±0.002	0.324±0.001	0.371±0.022	0.413±0.007	0.490±0.017	0.562±0.002

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ Langmuir และ Freundlich adsorption isotherm ของการดูดซับเหล็กด้วยไคโตซาน เมมเบรนที่พีเอช 6 , อุณหภูมิห้อง และเวลา 1 ชั่วโมง

ตัวดูดซับ	Langmuir constants			Freundlich constants		
	X_m	K	R^2	K_f	n	R^2
ไคโตซานเมมเบรน	-0.0156	-3.2047	0.3393	19.0546	0.2999	0.6127

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการดูดซับเหล็ก (Fe^{3+}) ในสารละลาย ด้วยไคโตซานเมมเบรน พบว่าสามารถดูดซับที่อุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียสได้ดีมากที่สุดที่ พีเอช 2.5-7.0 โดยมีค่าการดูดซับเป็น 75.21– 100.00 เปอร์เซ็นต์ สำหรับที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสนั้น การดูดซับที่พีเอชมากกว่า 4 มีค่าแปรปรวนในทางลดลง อาจเนื่องมาจากข้อผิดพลาดบางประการในการทดลอง สมดุลในการดูดซับนั้นเกิดขึ้นตั้งแต่ชั่วโมงแรกและเกิดขึ้นค่อนข้างสม่ำเสมอเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น และประสิทธิภาพการดูดซับอยู่ในช่วง 72.33-97.61 เปอร์เซ็นต์ ส่วนผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นต่อการดูดซับ พบว่าไคโตซานเมมเบรนมีความสามารถในการดูดซับเหล็กเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเหล็กสูงขึ้น โดยประสิทธิภาพของการดูดซับที่อยู่ในช่วงความเข้มข้น 0.5 – 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าการดูดซับเป็น 69.20 - 96.61 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบการคำนวณด้วยสมการแลงเมียร์และสมการฟรุนดลิช พบว่าการดูดซับเหล็กด้วยไคโตซานเมมเบรน สอดคล้องกับสมการ ฟรุนดลิช แสดงให้เห็นว่าเป็นการดูดซับแบบต่อเนื่อง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่มอบทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- ทวีศักดิ์ ระมิงค์วงศ์. (2546). น้ำบาดาล (Ground water). ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- รัตนา สนั่นเมือง และนิตยา ชาอุ่น. (2550). การกำจัดสีรีแอกทีฟจากสารละลายโดยการดูดซับด้วย ถ่านกัมมันต์เตรียมจากเปลือกมังคุดและเมล็ดมะขาม. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ สิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 6. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.

- วราวุฒิ พุทธิให้. (2546). การเตรียมและศึกษาลักษณะของเยื่อบางไคโตซานและเยื่อประกอบโพลีเออร์ซัลโฟน/ไคโตซาน เพื่อทำเป็นเยื่อกรองระดับอัลตรา. วิทยานิพนธ์ วท.ม. (ฟิสิกส์), มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ศูนย์อนามัยสิ่งแวดล้อม. (2545). กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข
- สุธิดา โชคชัยวัฒน์. (2544). การกำจัดโครเมียม (VI) ที่ค้างเหลือในน้ำเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดีโดยกระบวนการดูดซับ. วิทยานิพนธ์ วศ.ม., มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Chapman, D. V. (1986). The distribution of metals in sewage sludge and their fate after dumping at sea. *The Science of The Total Environment*, 48, 1-11.
- Iqbal, M. & Ashiq, M.N. (2006). Adsorption of dyes from aqueous solution on activated charcoal. *Journal of Hazardous Materials*, 139, 57-66.
- Krajewska, B. (2005). Membrane-based processes performed with use of chitin/chitosan materials. *Separation Purification Technology*, 41, 305-312.
- Steenkamp, G. C., Keizer, K., Neomagus, H. W. J. P. and Krieg, H. M. (2002). Copper(II) removal from polluted water with alumina/chitosan composite membranes. *Journal of Membrane science*, 197, 147-156.