

การดูดซับทางชีวภาพของตะกั่วและทองแดงโดยชีวมวล ของสาหร่ายทะเลบางชนิด

ยุพดี ชัยสุขสันต์

Abstract

Chaisuksant, Y.

Biosorption of lead (II) and copper (II) by biomass of some marine algae
Songklanakar J. Sci. Technol., 2004, 26(5) : 727-740

Biosorption of heavy metal ions by algae is a potential technology for treating wastewater contaminated with heavy metals. Adsorption of lead (II) and copper (II) in aqueous solutions by some marine algae available in large quantities in Pattani Bay including *Gracilaria fisheri*, *Ulva reticulata* and *Chaetomorpha* sp. were investigated. The effect of pH on metal sorption of the algal biomass and the metal uptake capacity of the algal biomass comparing to that of synthetic adsorbents including activated carbon and silica gel were studied by using batch equilibrium experiments. Each dried adsorbent was stirred in metal ions solutions with different pH or different concentration at room temperature for 24 hours and the residual metal ions were analysed using atomic absorption spectrophotometer. The initial concentrations of lead and copper ions were 70 µg/l and 20 mg/l, respectively. It was found that the effect of pH on metal sorption was similar in each algal biomass. The metal uptake capacity increased as pH of the solution increased from 2.0 to 4.0 and reached a plateau at pH 5.0-7.0. The metal uptake capacities of each algal biomass were similar. At low concentrations of metal ions, the metal adsorption occurred rapidly while at higher metal concentration less metal adsorption by each algal biomass was observed. The metal adsorption of activated carbon and silica gel occurred gradually and was less than those of algal biomass. The equilibrium data of copper and lead ions fitted well to the Langmuir and Freundlich isotherm models. The maximum sorption capacity (Q_m)

Department of Science, Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University, Pattani 94000 Thailand

Ph.D.(Environmental Science), ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอเมือง จังหวัดปัตตานี 94000

Corresponding e-mail: cyupadee@bunga.pn.psu.ac.th

รับต้นฉบับ 28 สิงหาคม 2546 รับลงพิมพ์ 23 เมษายน 2547

values (mean±SD) of *Chaetomorpha* sp., *U. reticulata*, *G. fisheri*, activated carbon and silica gel for lead ions were 1.26±0.14, 1.19±0.14, 1.18±0.15, 1.14±0.11 and 1.15±0.12 mg/g, respectively. For copper adsorption, the Q_m values for *G. fisheri*, *U. reticulata* and *Chaetomorpha* biomass were 15.87±1.03, 14.71±1.02 and 12.35±1.03 mg/g, respectively. While those of activated carbon and silica gel were not different ($Q_m = 8.64±0.95$ and 8.16±0.97 mg/g, respectively).

The removal of metals (lead and copper) by each algal biosorbents and activated carbon were also studied using a continuous flow system. The concentration of each metal was 20 mg/l. It was found that the column packed with *Chaetomorpha* biomass had lead removal capacity (1.90 mg/g) higher than those for *U. reticulata* and *G. fisheri* (1.20 and 1.04 mg/g, respectively). For copper, the three algal adsorbents exhibited similar removal capacities within a range of 7.00-9.60 mg/g, whereas activated carbon column had least sorption capacity for lead and copper

Key words : biosorption, algal biosorbents, wastewater treatment, heavy metal removal

บทคัดย่อ

ยุพดี ชัยสุขสันต์

การดูดซับทางชีวภาพของตะกั่วและทองแดงโดยชีวมวลของสาหร่ายทะเลบางชนิด

ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2547 26(5) : 727-740

การดูดซับทางชีวภาพของโลหะหนักโดยใช้สาหร่าย เป็นเทคนิคที่มีแนวโน้มที่จะกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพและราคาถูกลง ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก คือ ตะกั่วและทองแดงในสารละลายโดยชีวมวลของสาหร่ายทะเลที่พบมากในอ่าวปัตตานี ซึ่งได้แก่ สาหร่ายผมนาง (*Gracilaria fisheri*), สาหร่ายผักกาด (*Ulva reticulata*) และสาหร่ายไส้ไก่ (*Chaetomorpha* sp.) โดยศึกษาผลของพีเอชต่อความสามารถดูดซับโลหะหนัก (ตะกั่ว และทองแดง) ของวัสดุตัวอย่างสาหร่ายเหล่านี้ และศึกษาความสามารถดูดซับโลหะหนักของตัวอย่างสาหร่ายชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับสารดูดซับสังเคราะห์คือ ถ่านกัมมันต์ และซิลิกาเจล แบบไม่ต่อเนื่อง โดยการเขย่าวัสดุตัวอย่างในสารละลายโลหะแต่ละชนิด ที่พีเอชต่างๆ หรือที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และวัดปริมาณโลหะที่เหลือในสารละลายโดยเครื่องอะตอมมิคแอนบอซอพซัน เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วและทองแดงเท่ากับ 70 ไมโครกรัม/ลิตร และ 20 มก./ลิตร ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า พีเอชมีผลต่อการดูดซับโลหะโดยวัสดุตัวอย่างสาหร่ายทั้งสามชนิดในทำนองเช่นเดียวกันคือ มีค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.0 ถึง 4.0 และเริ่มคงที่ ณ พีเอช 5.0-7.0 วัสดุสาหร่ายทั้งสามชนิดสามารถดูดซับโลหะได้ใกล้เคียงกัน ที่ความเข้มข้นโลหะต่ำๆ และดูดซับได้น้อยลงที่ความเข้มข้นโลหะสูงขึ้น ส่วนถ่านกัมมันต์ และซิลิกาเจล มีการดูดซับโลหะหนักได้น้อยกว่าและเกิดอย่างค่อยเป็นค่อยไป กลไกการดูดซับโลหะเป็นไปตามแบบจำลองของแลงก์เมียร์ และฟรุนดลิช โดยวัสดุสาหร่ายไส้ไก่ สาหร่ายผักกาด สาหร่ายผมนาง ถ่านกัมมันต์ และซิลิกาเจล มีความสามารถดูดซับตะกั่วสูงสุด (Q_m) เท่ากับ 1.26±0.14, 1.19±0.14, 1.18±0.15, 1.14±0.11 และ 1.15±0.12 มก./กรัม ตามลำดับ กรณีทองแดง วัสดุสาหร่ายผมนาง สาหร่ายผักกาด และสาหร่ายไส้ไก่ สามารถดูดซับทองแดงสูงสุด (Q_m) เท่ากับ 15.87±1.03, 14.71±1.02 และ 12.35±1.03 มก./กรัม ตามลำดับ ส่วนถ่านกัมมันต์และซิลิกาเจลมีค่า Q_m ไม่แตกต่างกัน (8.64±0.95 และ 8.16±0.97 มก./กรัม ตามลำดับ)

ผลการศึกษาการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิดคือ ตะกั่ว และทองแดง แบบระบบต่อเนื่อง โดยใช้วัสดุตัวอย่างอบแห้งแต่ละชนิด ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว และทองแดงคือ 20 มก./ลิตร, พีเอช 5.0±0.5 ตามลำดับ พบว่าคอลัมน์ที่บรรจุวัสดุสาหร่ายไส้ไก่ มีความสามารถลดปริมาณตะกั่ว (1.90 มก./กรัม) ซึ่งมากกว่ากรณีของสาหร่ายผักกาดและสาหร่ายผมนางกำจัดตะกั่ว (1.20 และ 1.04 มก./กรัม ตามลำดับ) ในกรณีของทองแดง วัสดุสาหร่ายทั้งสามชนิดสามารถกำจัดทองแดงได้ไม่แตกต่างกันมากนัก (7.00-9.60 มก./กรัม) ส่วนคอลัมน์ที่บรรจุถ่านกัมมันต์มีความสามารถกำจัดตะกั่วและทองแดงได้น้อยที่สุด

การปนเปื้อนของโลหะหนักที่เป็นพิษอันเนื่องมาจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ เป็นปัญหาสำคัญที่พบมากในปัจจุบัน กิจกรรมดังกล่าวได้แก่ เกษตรกรรม อุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การทำเหมืองแร่ การผลิตสารเคมี โลหะและแบตเตอรี่ เป็นต้น โลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในของเสียจากกิจกรรมเหล่านี้ที่ถูกปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม มักจะสะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแหล่งน้ำธรรมชาติ จากรายงานของปริยาและคณะ (2541) พบการปนเปื้อนของโลหะหนัก ในน้ำ ตะกอนดิน และพืชน้ำ (หญ้าทะเลและสาหร่าย) เป็นจำนวนมากตามบริเวณต่างๆ รอบอ่าวปัตตานี โดยพบการปนเปื้อนของโลหะหนักในตะกอนดินมากที่สุด ปริมาณทองแดง สังกะสี แคดเมียม และตะกั่วเท่ากับ 59.5, 178.3, 21.7 และ 22.3 มก./กิโลกรัม ตามลำดับ การสะสมโลหะหนักเหล่านี้ในสิ่งแวดล้อม เป็นผลให้มนุษย์และสิ่งมีชีวิตต่างๆ ต้องเสี่ยงต่อการได้รับพิษจากโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในระดับความเข้มข้นซึ่งเกินกว่าสภาพตามธรรมชาติมากยิ่งขึ้น เนื่องจากโลหะหนักมีความคงทน ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางเคมี ภายภาพหรือทางชีวภาพ จึงสามารถสะสมอยู่ในสิ่งมีชีวิตทุกระดับในห่วงโซ่อาหาร หากปริมาณการสะสมในสิ่งมีชีวิตนี้มีค่าสูงกว่าขีดจำกัด (threshold level) ของสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดแล้วจะก่อให้เกิดอาการเป็นพิษขึ้น (Chaisuksant, 1997)

ได้มีความสนใจและศึกษาวิจัยเพื่อหาวิธีการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในปริมาณสูงเหล่านี้จากน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม วิธีการต่างๆ ที่นิยมใช้กันในปัจจุบันได้แก่ การตกตะกอนด้วยสารเคมีบางชนิด (chemical precipitation) กระบวนการออกซิเดชัน/รีดักชัน (chemical oxidation/reduction) การระเหย (evaporation) การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) การแยกด้วยแผ่นเยื่อบาง (membrane separation) และการชุบด้วยไฟฟ้า (electroplating) เป็นต้น (Aderhold *et al.*, 1996) อย่างไรก็ตาม วิธีการเหล่านี้มักไม่มีประสิทธิภาพ และ/หรือมีราคาแพงมากเมื่อนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักที่มีอยู่ในปริมาณน้อยๆ (< 100 มก./ลิตร) (Volesky, 1987) ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ ในการกำจัดโลหะเป็นพิษที่มีปริมาณน้อยๆ ออกจากน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม วิธีการหนึ่งก็คือ การดูดซับทางชีวภาพ (biosorption) โดยใช้วัสดุที่ได้จากธรรมชาติซึ่งเรียกว่า สารดูดซับชีวภาพ

(biosorbent) ข้อดีของเทคนิคการดูดซับทางชีวภาพนี้คือสามารถกำจัดไอออนของโลหะหนักที่ละลายน้ำในปริมาณน้อยๆ ตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับสูง มีความจำเพาะ ราคาไม่แพง และไม่มีอันตราย นอกจากนี้ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ก็ไม่ยุ่งยากซับซ้อน (Yu *et al.*, 1998)

สารดูดซับที่เตรียมได้จากธรรมชาติและจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาตินั้นได้แก่ แบคทีเรีย รา สาหร่าย ยีสต์ ผงถ่าน สารดูดซับจำพวกดินไดอะตอม (diatomaceous earth) ผักตบชวา และวัสดุเหลือใช้จากเกษตรกรรมต่างๆ เป็นต้น จากการศึกษาพบว่า สาหร่ายทะเลประเภทสาหร่ายสีน้ำตาลมีสมบัติดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียได้มากกว่าสารหรือผลิตภัณฑ์ชีวภาพอื่นๆ และสารดูดซับที่เตรียมได้จากสาหร่ายทะเลเหล่านี้ มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักที่ใกล้เคียงหรือมากกว่าเรซินสังเคราะห์ (synthetic ion-exchange resin) อีกด้วย (Yu *et al.*, 1998)

อ่าวปัตตานีเป็นพื้นที่หนึ่งซึ่งพบสาหร่ายทะเลจำนวนมาก ได้แก่ สาหร่ายสีเขียว (เช่น *Ulva reticulata*, *Chaetomorpha* sp.) ซึ่งยังไม่มีมีการใช้ประโยชน์ และสาหร่ายสีแดง (เช่น *Gracilaria fisheri* และ *G. tenuistipitata*) ซึ่งสาหร่ายสีแดงชนิด *G. fisheri* ชาวประมงได้เก็บเกี่ยวเพื่อเป็นอาหาร และจำหน่ายสำหรับสกัดวุ้นในโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร ดังนั้นหากสามารถนำวัสดุธรรมชาติในท้องถิ่นที่สามารถหาได้ง่ายมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการศึกษาการดูดซับโลหะหนัก ก็นับว่าจะเป็นการช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดโลหะหนักได้มาก นอกจากนี้ข้อมูลเกี่ยวกับสารดูดซับชีวภาพจำพวกสาหร่ายทะเลในประเทศไทย ยังมีไม่มาก

ด้วยเหตุดังกล่าวนี้ จึงเป็นจุดสนใจที่จะนำสาหร่ายทะเลที่พบมากในอ่าวปัตตานี ได้แก่ สาหร่าย ผมนาง (*G. fisheri*) สาหร่ายผักกาด (*U. reticulata*) และสาหร่ายไส้ไก่ (*Chaetomorpha* sp.) มาศึกษาสมบัติการดูดซับโลหะหนักคือ ตะกั่ว ทองแดง แบบสมดุล ซึ่งได้แก่ ผลของพีเอชต่อการดูดซับโลหะหนัก ความสามารถดูดซับโลหะหนักของตัวอย่างสาหร่ายเปรียบเทียบกับสารดูดซับสังเคราะห์ (synthetic adsorbents) คือถ่านกัมมันต์ (activated carbon) และซิลิกาเจล (silica gel) ศึกษาแอดซอร์ปชันไอโซเทอร์ม (adsorption isotherms) ตาม

แบบจำลองการดูดซับของแลงก์เมียร์ (Langmuir) และ ฟรูนดิช (Freundlich) ตลอดจนศึกษาการดูดซับโลหะหนัก โดยระบบต่อเนื่อง เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้บำบัด น้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยๆ ในแหล่งน้ำธรรมชาติต่อไป

วิธีการทดลอง

1. การเตรียมสาหร่าย

1) ทำการเก็บสาหร่ายทะเลชนิดต่างๆ จากบริเวณ โดยรอบอ่าวปัตตานีคือที่บ้านตันหยงลูโล๊ะ ปากแม่น้ำยะหริ่ง บ้านดาโต๊ะ และแหลมตาชี

2) นำสาหร่ายที่จะวิเคราะห์มาล้างด้วยน้ำประปา และน้ำกลั่นหลายๆ ครั้ง ก่อนอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงในตู้อบ แล้วนำมาบดให้ละเอียด ก่อนนำไปร่อนด้วยตะแกรงร่อนให้มีขนาดอนุภาค ประมาณ 300-600 เมช

2. ศึกษาการปนเปื้อนโลหะหนักในตัวอย่างสาหร่าย

ทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักตามวิธีมาตรฐานของ APHA (1992) โดยการย่อยตัวอย่าง สาหร่ายที่อบแห้งและบดละเอียดจำนวน 1 กรัม ด้วยกรด ไนตริกเข้มข้น 5 มล. ให้ความร้อนจนเกิดควันสีน้ำตาล เมื่อควันสีน้ำตาลจางลง ลดอุณหภูมิ แล้วค่อยๆ เติมกรด เปอร์คลอริกเข้มข้น 10 มล. เขย่าให้เข้ากัน ให้ความร้อนต่อไปจนเกิดควันสีขาว จะได้สารละลายใส วางทิ้งให้เย็น กรองด้วยกระดาษกรอง ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 50 มล. ในช่วงวัดปริมาตรก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง อะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบเฟลม กรณีของทองแดงและแบบกราไฟต์ กรณีตะกั่ว (AAS-Flame/Graphite furnace, Perkin Elmer Analyst 100) ที่ศูนย์เครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

3. การศึกษาการดูดซับโลหะหนักของสาหร่ายชนิดต่าง ๆ แบบสมดุล (Batch equilibrium system)

3.1 ศึกษาผลของพีเอช ต่อความสามารถดูดซับโลหะหนักของตัวอย่างสาหร่าย

1) นำตัวอย่างสาหร่ายที่อบแห้งจำนวน 0.1

กรัม มาเติมสารละลายโลหะหนัก (ตะกั่วเข้มข้น 70 ไมโครกรัม/ลิตร หรือทองแดง 20 มก./ลิตร) ปริมาตร 50 มล. ที่มีค่าพีเอชต่างๆ กัน คือ 2.0, 3.0, 4.0, 4.5, 5.0, 6.0 และ 7.0 นำมาเขย่าด้วยเครื่องเขย่า ความเร็ว 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นจนถึงสมดุล ตามวิธีการของ Matheickal และ Yu (1996)

2) เมื่อครบเวลา กรองสาหร่ายออกโดยใช้เครื่องกรองเยื่อบาง (membrane filter, Millipore) ขนาด 0.45 ไมโครเมตร นำสารละลายใส่ที่กรองได้มาตรวจหาปริมาณโลหะหนักที่เหลือด้วยเครื่อง AAS

3) นำค่าพีเอชที่เหมาะสมไปใช้ในการทดลองต่อไป

3.2 ศึกษาความสามารถดูดซับโลหะหนักของวัสดุสาหร่ายเปรียบเทียบกับสารดูดซับสังเคราะห์

1) นำตัวอย่างวัสดุดูดซับที่อบแห้งจำนวน 0.1 กรัม มาเติมสารละลายโลหะหนักที่ทราบความเข้มข้นแน่นอนในแต่ละชุดการทดลอง (Pb^{2+} 0, 0.25, 0.5, 1, 2, 4 มก./ลิตร; Cu^{2+} 0, 5, 10, 15, 20, 25 มก./ลิตร) และปรับค่าพีเอชของสารละลายให้ได้ 5.0 ± 0.5 (ค่าที่ได้จากการทดลองข้อ 3.1) โดยใช้กรดไนตริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำการเขย่า ความเร็ว 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลา กรองสาหร่ายออกโดยใช้เครื่องกรองเยื่อบาง (membrane filter, Millipore) ขนาด 0.45 ไมโครเมตร นำสารละลายใส่ที่กรองได้มาตรวจหาปริมาณโลหะหนักที่เหลือด้วยเครื่อง AAS

3.3 การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับโลหะหนัก

1) เขย่าตัวอย่างสาหร่ายที่อบแห้ง 0.1 กรัม ในภาชนะที่บรรจุสารละลายโลหะหนักแต่ละชนิดคือ ตะกั่วในสารละลาย ความเข้มข้น 15 และ 50 ไมโครกรัม/ลิตร ส่วนทองแดง เข้มข้น 10 และ 20 มก./ลิตร ซึ่งมีค่าพีเอช 5.0 ± 0.5 โดยใช้ความเร็ว 100 รอบ/นาที

2) วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายแต่ละชุดที่เวลาต่างๆ กัน คือ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60, 120, 180 และ 240 นาที โดยใช้เครื่อง AAS

4. การศึกษาการดูดซับโลหะหนักของสาหร่าย แบบระบบต่อเนื่อง (Continuous Flow System)

1) บรรจุสาหร่ายที่อบแห้งลงในคอลัมน์ขนาดเส้น

ผ่านศูนย์กลาง 1.5 ซม. ให้มีความสูงประมาณ 10-15 ซม.

2) ผ่านสารละลายโลหะหนักตะกั่ว หรือทองแดง (เข้มข้น 20 มก./ลิตร) พีเอช 5.0 ± 0.5 ลงในคอลัมน์ ปรับอัตราการไหลของสารละลายประมาณ 1.5 มล./นาที และเก็บสารละลายที่ออกจากคอลัมน์จำนวน 10 มล. ในแต่ละหลอด

- นำสารละลายที่เก็บในแต่ละหลอดมาวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ โดยใช้เครื่อง AAS

- เปรียบเทียบความสามารถการดูดซับโลหะหนักกับสารดูดซับสังเคราะห์ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ และซิลิกาเจล ซึ่งทำการทดลองในทำนองเดียวกัน

ผลการทดลอง

1. ปริมาณโลหะหนัก (ตะกั่ว และทองแดง) ที่ปนเปื้อนในวัสดุตัวอย่าง

ผลการตรวจสอบหาปริมาณโลหะหนักคือ ตะกั่ว และทองแดง ในวัสดุตัวอย่างสาหร่ายที่เก็บจากอ่าวปัตตานี เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ แสดงใน Table 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ปริมาณโลหะหนักตะกั่วและทองแดงที่พบในวัสดุตัวอย่างมีปริมาณน้อยมาก คือพบปริมาณตะกั่วในช่วง 0.25-0.55 มก./กก. และทองแดง ในช่วง 2.00-7.62 มก./กก. โดยค่า limit of determination ของวิธีการวิเคราะห์ ตะกั่วและทองแดงนี้ เท่ากับ 0.05 และ 0.25 มก./กก. ปริมาณที่ตรวจพบนี้มีค่าต่ำกว่าที่รายงานโดยปรียาและคณะ (2541) ซึ่งพบตะกั่วและทองแดงในสาหร่ายผสมนางและสาหร่ายผักกาดที่เก็บจากอ่าวปัตตานีอยู่ในช่วง 4.74-26.78 และ 3.68-9.96 มก./กก. ตามลำดับ และจินตนา (2543)

ซึ่งพบปริมาณตะกั่วในสาหร่ายผสมนางและสาหร่ายไส้ไก่อยู่ในช่วง 0.84-2.80 มก./กก. และ 1.62-3.11 มก./กก. ตามลำดับ

2. การศึกษาความสามารถดูดซับโลหะหนัก (Heavy Metal Uptake Capacity) โดยวัสดุตัวอย่างแบบสมดุล (Batch Equilibrium Experiment)

ความสามารถดูดซับโลหะหนักโดยวัสดุตัวอย่างรายงานในรูปของ Q ซึ่งหมายถึง ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับ (ไมโครกรัม/ลิตร หรือ มก./ลิตร) ต่อปริมาณวัสดุตัวอย่างที่ใช้ (กรัม) ดังนั้น หน่วยของ Q คือ ไมโครกรัม/กรัม หรือ มก./กรัม

2.1 การศึกษาผลของพีเอชต่อความสามารถดูดซับโลหะหนักของตัวอย่างสาหร่าย

1) จากการศึกษาศักยภาพการดูดซับตะกั่ว โดย *G. fisheri*, *U. reticulata* หรือ *Chaetomorpha* sp. ปริมาณชนิดละ 0.1 กรัม ในสารละลายตะกั่วเข้มข้น 70 ไมโครกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มล. ณ พีเอชต่างๆ คือ 2.0, 3.0, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 และ 7.0 ให้ผลการทดลองแสดงใน Figure 1 จะเห็นได้ว่า การดูดซับตะกั่วโดยวัสดุตัวอย่างสาหร่ายแต่ละชนิดมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน คือมีอัตราการการดูดซับเพิ่มขึ้นสูง เมื่อพีเอชของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.0 ถึง 5.0 อัตราการเพิ่มการดูดซับจะลดลงและเริ่มคงที่ ณ พีเอช 5.0-7.0 โดย *G. fisheri* จะดูดซับตะกั่วเพิ่มขึ้นจาก 28.50 ไมโครกรัม/กรัม ที่พีเอช 2.0 ไปเป็น 35.30 ไมโครกรัม/กรัมที่พีเอช 7.0 ส่วน *U. reticulata* และ *Chaetomorpha* sp. ดูดซับตะกั่วเพิ่มขึ้นจาก 27.80 และ 27.60 ไมโครกรัม/กรัมที่พีเอช 2.0

Table 1. Lead and copper content in samples. (mean±SD)

Samples	Lead (mg/kg)	Copper (mg/kg)
<i>Gracilaria fisheri</i>	0.48±0.04	2.40±0.03
<i>Ulva reticulata</i>	0.55±0.02	7.35±0.02
<i>Chaetomorpha</i> sp.	0.26±0.05	7.62±0.03
Activated carbon	0.25±0.05	2.00±0.08

Number of samples = 3

nd. = not detected

detection limit of AAS = 8.6 µg/l (Pb, Graphite AAS), 0.085 mg/l (Cu, Flame AAS)

limit of determination (LOQ) = 0.05 mg/kg (Pb), 0.25 mg/kg (Cu)

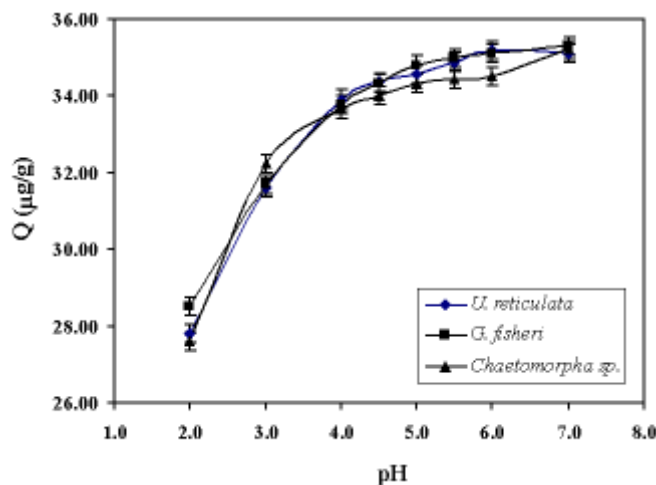


Figure 1. Lead uptake capacity (Q , $\mu\text{g/g}$) by *Ulva reticulata*, *Gracilaria fisheri* and *Chaetomorpha* sp. in lead (II) solution ($70 \mu\text{g/l}$) at different pH. Bars represent ± 1 SD.

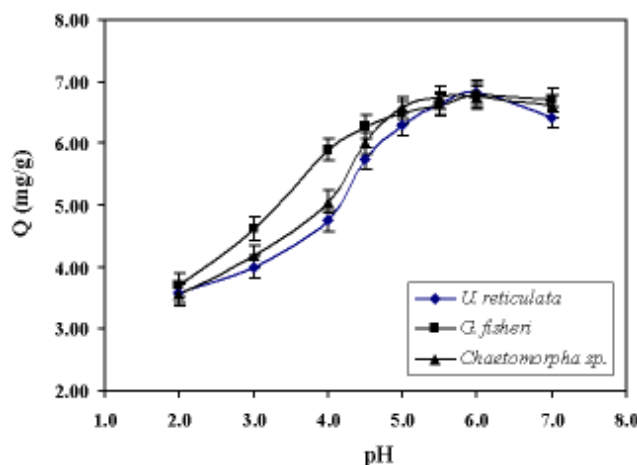


Figure 2. Copper uptake capacity (Q , mg/g) by *U. reticulata*, *G. fisheri* and *Chaetomorpha* sp. in copper (II) solution (20 mg/l) at different pH. Bars represent ± 1 SD.

ไปเป็น 35.10 และ 35.20 ไมโครกรัม/กรัม ที่พีเอช 7.0 ตามลำดับ

2) จากการศึกษาความสามารถดูดซับทองแดงโดยใช้วัสดุสาหร่ายปริมาณอย่างละ 0.1 กรัม ในสารละลายทองแดงเข้มข้น 20 มก./ลิตร ปริมาตร 50 มล. ณ พีเอชต่างๆ คือ 2.0, 3.0, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 และ 7.0 ให้ผลการทดลอง แสดงใน Figure 2 จะพบว่าพีเอชมีผลต่อการดูดซับทองแดงเช่นเดียวกับกรณีของตะกั่ว คือสาหร่ายสามารถดูดซับทองแดงได้เพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชของ

สารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.0 ถึง 5.0 อัตราการเพิ่มการดูดซับโลหะจะลดลงและการดูดซับโลหะเกิดค่อนข้างคงที่ในช่วงพีเอช 5.0-7.0 โดย *G. fisheri* จะดูดซับทองแดงเพิ่มขึ้นจาก 3.70 มก./กรัม ที่พีเอช 2.0 ไปเป็น 6.70 มก./กรัม ที่พีเอช 7.0 ส่วน *U. reticulata* และ *Chaetomorpha* sp. ดูดซับทองแดงเพิ่มขึ้นจาก 3.58 และ 3.55 มก./กรัม ที่พีเอช 2.0 ไปเป็น 6.40 และ 6.60 มก./กรัม ที่พีเอช 7.0 ตามลำดับ

จะเห็นได้ว่า พีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับ

โลหะหนักเหล่านี้อยู่ในช่วง 4-6 ตรงกับผลที่ได้จากณัฐกมล (2541) ซึ่งทดลองการดูดซับทองแดงโดยสาหร่ายผมนาง (*G. fisheri*) และใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Matheickal และ Yu (1996) ในการดูดซับตะกั่วโดยสาหร่ายสีน้ำตาล (*Ecklonia radiata*) ซึ่งรายงานพีเอชที่เหมาะสมคือ 4.5-5.5

พีเอชของสารละลายมีผลต่อการดูดซับโลหะหนักทั้งสามชนิดในทำนองเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากพีเอชมีความสัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่อยู่บริเวณพื้นผิวของสาหร่าย ซึ่งประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์ประเภทเซลลูโลส และมักมีหมู่ต่างๆ อยู่ด้วย เช่น หมู่คาร์บอนิล หมู่ฟอสเฟต และหมู่อะมิโน เป็นต้น ที่พีเอชต่างๆ (ช่วง 2-3) จะมีความเข้มข้นของโปรตอนสูง หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้มักมีประจุเป็นศูนย์หรือเป็นบวก มีการแข่งขันในการจับบนผิวหน้าของสาหร่ายระหว่างโปรตอนและไอออนของโลหะหนัก จึงทำให้พันธะระหว่างโลหะกับตัวดูดซับไม่คงที่ และโปรตอนมีประสิทธิภาพในการจับกับไอออนของโลหะได้ดีกว่า เป็นผลให้การดูดซับโลหะไม่ดีนัก เมื่อพีเอชของสารละลายสูงขึ้น (มากกว่า 4) ความเข้มข้นโปรตอนลดลง ในขณะที่หมู่ฟังก์ชันต่างๆ จะมีประจุเป็นลบ ไอออนโลหะมีความสามารถแข่งขันกับโปรตอนได้สูง จึงทำให้การดูดซับโลหะเกิดได้ดีขึ้น (Darnall *et al.*, 1986; Fourest and Roux, 1992) ในการทดลองนี้ไม่ได้ทดลองที่พีเอชสูงกว่า 7 เนื่องจากจะเกิดการตกตะกอนของโลหะหนักในสารละลายซึ่งอาจอยู่ในรูปของ metal hydroxide (Buffle and De Vitre, 1994) ทำให้ไม่สามารถทดลองได้ นอกจากนี้ได้เลือกทำการทดลองการดูดซับโลหะตะกั่วในช่วงความเข้มข้น

น้อยๆ (ระดับไมโครกรัม/ลิตร) และทองแดงที่ความเข้มข้นระดับมก./กรัม เนื่องจากรายงานที่มีมาก่อนมักทำที่ความเข้มข้นตะกั่วสูงๆ และในแหล่งน้ำธรรมชาติที่ปนเปื้อนโลหะหนักมักตรวจพบปริมาณโลหะตะกั่วที่น้อยกว่าทองแดง

2.2 ความสามารถดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่ายเปรียบเทียบกับสารดูดซับสังเคราะห์

1) ผลการทดลองการดูดซับโลหะหนักตะกั่วโดย *G. fisheri*, *U. reticulata* และ *Chaetomorpha* sp. เปรียบเทียบกับสารดูดซับสังเคราะห์ คือ ถ่านกัมมันต์ และซิลิกาเจล แสดงใน Table 2 และ Figure 3 พบว่าสาหร่ายทั้งสามชนิดมีความสามารถดูดซับโลหะหนักตะกั่วได้ใกล้เคียงกันที่ความเข้มข้นโลหะต่ำๆ และจะดูดซับได้น้อยลงที่ความเข้มข้นโลหะสูงขึ้น ซึ่งพิจารณาได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับ ซึ่งมีค่าลดลง ส่วนสารดูดซับสังเคราะห์คือ ถ่านกัมมันต์ และซิลิกาเจล มีการดูดซับโลหะหนักได้น้อยกว่าและเกิดอย่างค่อยเป็นค่อยไป

2) ผลการทดลองการดูดซับทองแดงโดย *G. fisheri*, *U. reticulata* หรือ *Chaetomorpha* sp. เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ และซิลิกาเจล แสดงใน Table 3 และ Figure 4 จะเห็นได้ว่า กราฟมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีของตะกั่ว คือ สาหร่ายทั้งสามชนิด สามารถดูดซับโลหะทองแดงได้ใกล้เคียงกันที่ความเข้มข้นโลหะต่ำๆ และจะดูดซับได้น้อยลงที่ความเข้มข้นโลหะสูงขึ้น พิจารณาได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับ ซึ่งมีค่าลดลง ส่วนถ่านกัมมันต์ และซิลิกาเจลมีการดูดซับโลหะหนักได้น้อยกว่าและเกิดอย่างค่อยเป็นค่อยไป การที่สาหร่ายสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีในสารละลายช่วงความเข้มข้นต่ำๆ น่าจะเป็น

Table 3. Copper uptake capacity (Q, mg/g) and %adsorption (%Ad) at initial concentrations (C₀, mg/l) of copper by *G. fisheri*, *U. reticulata*, *Chaetomorpha* sp., activated carbon and silica gel.

C ₀ (mg/l)	<i>G. fisheri</i>		<i>U. reticulata</i>		<i>Chaetomorpha</i> sp.		activated carbon		silica gel	
	Q (mg/g)	%Ad	Q (mg/g)	%Ad	Q (mg/g)	%Ad	Q (mg/g)	%Ad	Q (mg/g)	%Ad
5	1.75	70.0	1.80	72.0	1.88	75.4	1.53	61.5	1.70	68.0
10	3.30	66.0	3.35	67.0	3.60	72.0	2.76	55.2	2.55	51.0
15	4.68	62.4	4.60	61.3	4.94	65.9	3.71	49.5	3.61	48.0
20	6.00	60.0	6.00	60.0	6.35	63.5	4.40	44.0	4.30	43.0
25	7.33	58.6	7.45	59.6	7.48	59.8	5.45	43.6	5.70	45.6

$$\% \text{Adsorption (\%Ad)} = \text{adsorbed metal concentration (mg/l)} / \text{initial metal concentration (C}_0\text{, mg/l)} \times 100$$

Table 2. Lead uptake capacity (Q, mg/g) and %adsorption (%Ad) at initial concentrations (C₀, mg/l) of lead by *G. fisheri*, *U. reticulata*, *Chaetomorpha* sp., activated carbon and silica gel.

C ₀ (mg/l)	<i>G. fisheri</i>		<i>U. reticulata</i>		<i>Chaetomorpha</i> sp.		activated carbon		silica gel	
	Q (mg/g)	%Ad	Q (mg/g)	%Ad	Q (mg/g)	%Ad	Q (mg/g)	%Ad	Q (mg/g)	%Ad
0.25	0.112	89.6	0.113	90.4	0.115	92.0	0.095	76.0	0.09	72.0
0.5	0.226	91.0	0.22	88.0	0.215	86.0	0.195	78.0	0.17	68.0
1.0	0.42	84.6	0.43	86.0	0.43	86.9	0.37	74.0	0.325	65.0
2.0	0.75	75.0	0.75	75.3	0.76	76.0	0.58	58.0	0.51	51.0
4.0	1.04	52.0	1.07	53.5	1.10	55.0	0.89	44.7	0.85	42.5

%Adsorption (%Ad) = adsorbed metal concentration (mg/l) / initial metal concentration (C₀, mg/l) x 100

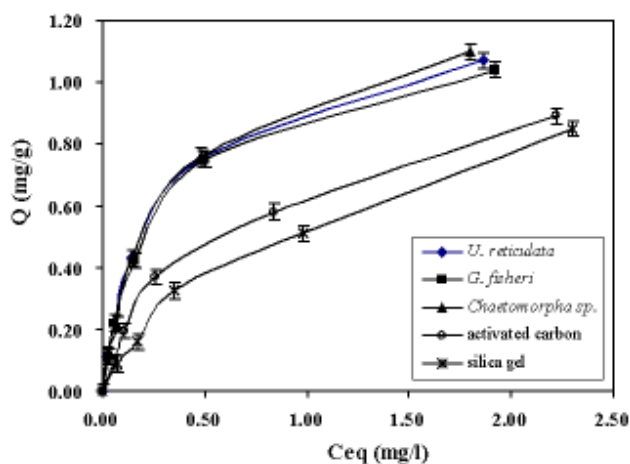


Figure 3. Lead uptake capacity (Q, mg/g) at equilibrium lead concentrations (C_{eq}, mg/l) by various adsorbents. Bars represent ± 1 SD.

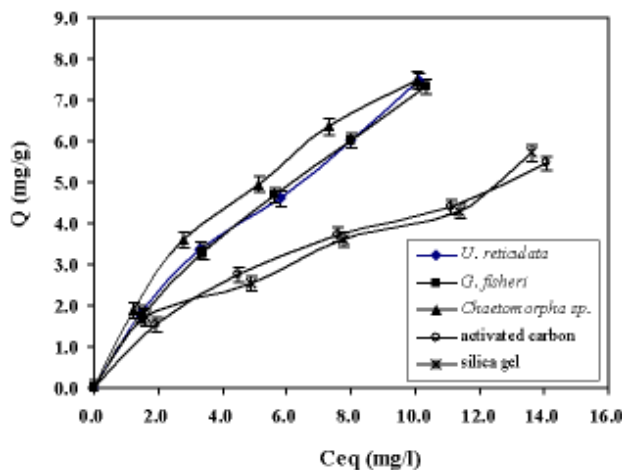


Figure 4. Copper uptake capacity (Q, mg/g) at equilibrium copper concentrations (C_{eq}, mg/l) by various adsorbents. Bars represent ± 1 SD.

ประโยชน์ในการกำจัดโลหะหนักในแหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักปริมาณน้อยๆ

2.3 ไอโซเทอร์มของการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่ายตัวอย่าง

ผลการศึกษาเบื้องต้นในข้อ 2.2 สามารถนำมาศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับได้โดยการเขียนกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับตะกั่วและทองแดงตามสมการของแลงก์เมียร์ (Langmuir) และฟรอนด์ลิช (Freundlich) โดยที่แบบจำลองของแลงก์เมียร์ เป็นการดูดซับที่ตัวถูกดูดซับเรียงกันเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ ส่วนของฟรอนด์ลิชเป็นการดูดซับที่ตัวถูกดูดซับเรียงซ้อนกันหลายชั้นบนพื้นผิวตัวดูดซับ (แม้น, 2535)

แบบจำลองของแลงก์เมียร์:

$$C_{eq}/Q = 1/Q_m \cdot b + C_{eq}/Q_m \quad (1)$$

- เมื่อ C_{eq} = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (steady state) (มก./ลิตร)
 Q = ความสามารถในการดูดซับ = ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ (มก./กรัม)
 Q_m = ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มก./กรัม)
 b = ค่าคงที่การดูดซับแบบชั้นเดียว (Adsorption affinity)

แบบจำลองของฟรอนด์ลิช:

$$\ln Q = \ln K + 1/n \ln C_{eq} \quad (2)$$

- เมื่อ K = Freundlich sorption coefficient = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (มก./กรัม)
 n = ค่าคงที่แสดงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย
 สรุปค่าคงที่ไอโซเทอร์มของแลงก์เมียร์และฟรอนด์ลิช สำหรับการดูดซับโลหะโดยวัสดุทั้ง 5 ชนิด แสดงใน Table 4 ซึ่งพบว่าแบบจำลองของแลงก์เมียร์และของฟรอนด์ลิช สามารถอธิบายกลไกการดูดซับของวัสดุดูดซับทั้งห้าชนิด โดยสาหร่ายทั้งสามชนิด มีกลไกการดูดซับที่เป็นไปได้ทั้งแบบแลงก์เมียร์และฟรอนด์ลิช เนื่องจากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) (r^2) มีค่าใกล้เคียงกัน

สำหรับการดูดซับโลหะแบบแลงก์เมียร์ พบว่าตัวอย่างสาหร่าย *G. fisheri* ดูดซับตะกั่วใกล้เคียงกับ *U. reticulata* และค่อนข้างน้อยกว่าของ *Chaetomorpha* sp. ซึ่งสามารถดูดซับตะกั่วได้สูงกว่า ($Q_m = 1.26 \pm 0.13$ มก./กรัม) แต่มีแนวโน้มดูดซับทองแดง ($Q_m = 15.87 \pm 1.03$ มก./กรัม) ที่ดีกว่ากรณีตัวอย่าง *U. reticulata* และ *Chaetomorpha* sp. (14.71 ± 1.02 และ 12.35 ± 1.03 มก./กรัม ตามลำดับ) ซึ่งความแตกต่างนี้ อาจจะเนื่องมาจาก

Table 4. Langmuir isotherm and Freundlich isotherm of lead and copper uptake by biomass of algae and synthetic adsorbents.

	Langmuir isotherm (mean±SD)			Freundlich isotherm (mean±SD)		
	Qm(mg/g)	b	r ²	K (mg/g)	n	r ²
Pb: <i>G. fisheri</i>	1.18±0.15	3.74±0.06	0.999	0.91±0.05	1.93±0.17	0.954
<i>U. reticulata</i>	1.19±0.14	3.94±0.06	0.999	0.94±0.06	1.93±0.15	0.955
<i>Chaetomorpha</i> sp.	1.26±0.14	3.59±0.09	0.995	0.96±0.08	1.92±0.14	0.965
activated carbon	1.14±0.11	1.62±0.04	0.984	0.64±0.06	1.71±0.14	0.948
silica gel	1.15±0.12	1.05±0.05	0.967	0.53±0.04	1.56±0.12	0.984
Cu: <i>G. fisheri</i>	15.87±1.03	0.08±0.02	0.966	1.31±0.17	1.36±0.11	0.999
<i>U. reticulata</i>	14.71±1.02	0.09±0.03	0.901	1.42±0.18	1.43±0.15	0.996
<i>Chaetomorpha</i> sp.	12.35±1.03	0.15±0.05	0.966	1.70±0.20	1.53±0.15	0.993
activated carbon	8.64±0.95	0.10±0.03	0.966	1.04±0.12	1.61±0.10	0.994
silica gel	8.16±0.97	0.12±0.03	0.809	1.23±0.11	1.86±0.12	0.953

สาหร่ายแต่ละชนิดมีองค์ประกอบย่อยของโครงสร้างผนังเซลล์ที่แตกต่างกัน จึงมีความสามารถในการจับกับโลหะแต่ละชนิดได้แตกต่างกัน ส่วนถ่านกัมมันต์และซิลิกาเจลมีประสิทธิภาพดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิดได้ต่ำกว่าวัสดุดูดซับชีวภาพ

ความสามารถดูดซับโลหะตะกั่วของวัสดุตัวอย่างสาหร่ายทั้งสามชนิดนี้ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับวัสดุสาหร่ายสีน้ำตาล *Undaria pinnatifida* ซึ่ง treat ด้วย xanthate (Kim *et al.*, 1984) แต่ต่ำกว่ากรณีของ natural zeolites (Blanchard *et al.*, 1984) แบคทีเรีย *Pseudomonas aeruginosa* PU21 (Chang *et al.*, 1997) วัสดุสาหร่ายสีน้ำตาล *Ecklonia radiata* (Matheickal and Yu, 1996) และ *E. maxima* (Feng and Aldrich, 2004) (ดู Table 5)

สำหรับความสามารถดูดซับทองแดง พบว่า มีค่าใกล้เคียงกับกรณีของวัสดุดูดซับที่เป็นเชื้อรา *Rhizopus arrhizus* (Tobin *et al.*, 1984) แบคทีเรีย *Streptomyces noursei* (Mattuschka and Strabe, 1993) และมีค่ามากกว่าวัสดุดูดซับที่เป็นเชื้อรา *Aspergillus oryzae* (Huang *et al.*, 1991) แต่มีค่าน้อยกว่ากรณีของวัสดุเชื้อรา *Penicillium chrysogenum* (Fourest *et al.*, 1994) แบคทีเรีย *Pseudomonas aeruginosa* PU21 (Chang

et al., 1997) สาหร่ายขนาดเล็ก (microalgae) พวก *Scenedesmus obliquus* และ *Synechocystis* sp. (Donmez *et al.*, 1999) ตลอดจนวัสดุสาหร่ายสีน้ำตาล *Ecklonia radiata* (Matheickal *et al.*, 1997) และ *E. maxima* (Feng and Aldrich, 2004) (ดู Table 5)

กรณีกลไกการดูดซับแบบพรมติช วัสดุตัวอย่างสาหร่ายมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วที่คล้ายกับกรณีของแลงค์เมียร์คือ *Chaetomorpha* sp. ให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (sorption coefficient) สูงที่สุด (K = 0.96 มก./กรัม) รองลงมาคือ *U. reticulata* และ *G. fisheri* (K = 0.94 และ 0.91 มก./กรัม ตามลำดับ) ซึ่งพบว่ามีค่าต่ำกว่ากรณีวัสดุเชื้อรา *Aspergillus niger* (K = 1.69, n = 2.56) (Jianlong *et al.*, 2001) ส่วนการดูดซับทองแดง *Chaetomorpha* sp. ก็ให้ค่า K สูงที่สุด (1.70 มก./กรัม) รองลงมาคือ *U. reticulata* และ *G. fisheri* (K = 1.42 และ 1.31 มก./กรัม ตามลำดับ) ซึ่งแตกต่างจากกรณีของแลงค์เมียร์

การที่วัสดุชีวภาพชนิดต่างๆ เหล่านี้มีความสามารถดูดซับโลหะหนักได้แตกต่างกัน ส่วนหนึ่งอาจเนื่องมาจากองค์ประกอบพวกโพลีแซคคาไรด์ของโครงสร้างผนังเซลล์ของวัสดุชีวภาพ ประกอบด้วยชนิด จำนวนและสมบัติ

Table 5. Adsorption capacities (Q_m , mg/g) of Pb and Cu by the algal samples compared to those of previous work.

Samples	Q_m (mg/g)	Reference
Pb: Three algal biomass	1.18-1.26	This study
Xanthated <i>Undaria pinnatifida</i>	1.21	Kim <i>et al.</i> , 1984
Natural zeolites	16.6	Blanchard <i>et al.</i> , 1984
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> PU21	70.0	Chang <i>et al.</i> , 1997
<i>Ecklonia radiata</i>	282	Matheickal and Yu, 1996
<i>Ecklonia maxima</i>	227-243	Feng and Aldrich, 2004
Cu: Three algal biomass	12.3-15.9	This study
<i>Aspergillus oryzae</i>	4.40	Huang <i>et al.</i> , 1991
<i>Streptomyces noursei</i>	13.3	Mattuschka and Strabe, 1993
<i>Rhizopus arrhizus</i>	15.9	Tobin <i>et al.</i> , 1984
<i>Penicillium chrysogenum</i>	24.7	Fourest <i>et al.</i> , 1994
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> PU21	23.0	Chang <i>et al.</i> , 1997
<i>Scenedesmus obliquus</i>	26.7	Donmez <i>et al.</i> , 1999
<i>Synechocystis</i> sp.	32.4	Donmez <i>et al.</i> , 1999
<i>Ecklonia radiata</i>	70.5	Matheickal <i>et al.</i> , 1997
<i>Ecklonia maxima</i>	85.0-94.0	Feng and Aldrich, 2004

ที่แตกต่างกัน

2.4 จลนศาสตร์ (Kinetics Profiles) ของการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่ายตัวอย่าง

จากการทดลองจลนศาสตร์ของการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิด คือ ตะกั่ว (Pb^{2+} 15 และ 50 ไมโครกรัม/ลิตร) และทองแดง (Cu^{2+} 10 และ 20 มก./ลิตร) โดยวัสดุสาหร่ายสาหร่ายต่างๆ คือ *G. fisheri*, *U. reticulata* และ *Chaetomorpha* sp. ให้ผลแสดงใน Figure 5 และ 6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสาหร่ายแต่ละชนิดมีความสามารถดูดซับตะกั่ว

ได้ในเวลาที่รวดเร็ว โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วเท่ากับ 15 และ 50 ไมโครกรัม/ลิตร สาหร่ายดูดซับได้ 90% ของการดูดซับโดยสมบูรณ์ภายในเวลา 15-30 นาที ซึ่งตรงกับผลการทดลองของ Matheickal และ Yu (1996) ที่รายงานการดูดซับตะกั่วโดยมวลชีวภาพของสาหร่ายสีน้ำตาล *E. radiata* ได้เกือบ 100% ภายในเวลา 15 นาที สำหรับการดูดซับทองแดงก็เช่นเดียวกัน พบว่า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดงเท่ากับ 10 และ 20 มก./ลิตร วัสดุตัวอย่างสาหร่ายทั้งสามชนิดมีความสามารถ

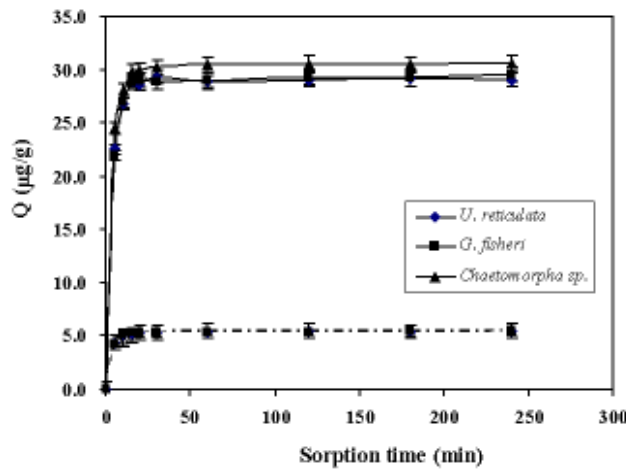


Figure 5. Lead uptake capacity (Q , $\mu\text{g/g}$) by biomass of *U. reticulata*, *G. fisheri* and *Chaetomorpha* sp. at different sorption time (min) using 15 $\mu\text{g/l}$ (dash line) and 50 $\mu\text{g/l}$ (solid line) of lead (II) solutions. Bars represent ± 1 SD.

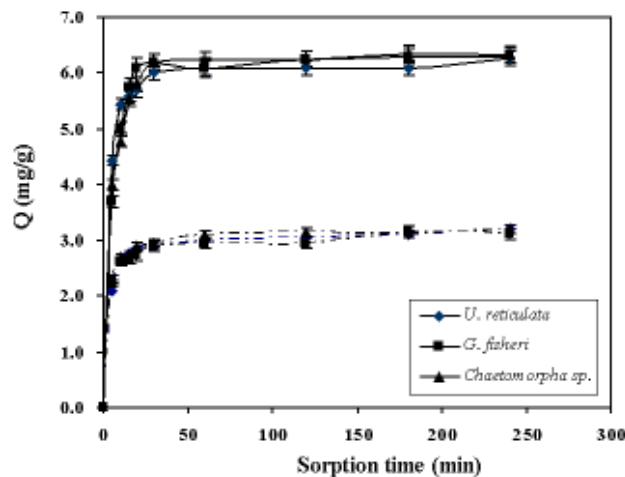


Figure 6. Copper uptake capacity (Q , mg/g) by biomass of *U. reticulata*, *G. fisheri* and *Chaetomorpha* sp. at different sorption time (min) using 10 mg/l (dash line) and 20 mg/l (solid line) of copper (II) solutions. Bars represent ± 1 SD.

ดูดซับทองแดงได้ในเวลาที่รวดเร็วคือ ภายในระยะเวลา 15-30 นาที สาหร่ายดูดซับทองแดงได้เกือบถึงสภาวะสมดุล (Figure 6) ผลการทดลองนี้ตรงกับผลการทดลองของ Matheickal และคณะ (1997) ซึ่งรายงานวัสดุสาหร่ายสีน้ำตาล *E. radiata* ดูดซับโลหะได้ถึง 90% ของการดูดซับโดยสมบูรณ์ภายในระยะเวลา 15 นาที

3. การทดสอบการดูดซับโลหะหนักโดยระบบต่อเนื่อง (Continuous Flow Experiment)

ผลการศึกษาการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิดแบบระบบต่อเนื่อง โดยใช้ตัวอย่างสาหร่ายที่อบแห้งจำนวน 5 กรัม บรรจุในคอลัมน์ และผ่านสารละลายตะกั่วความเข้มข้น 20 มก./ลิตร ลงไป แสดงใน Figure 7 จากรูปจะเห็นว่ากราฟที่ได้จากการพลอตระหว่างความเข้มข้นที่เหลือกับปริมาตรของสารละลายโลหะหนัก มีลักษณะเป็นรูปตัวเอส คอลัมน์ที่บรรจุวัสดุสาหร่าย *Chaetomorpha* sp. มีความสามารถลดปริมาณตะกั่วได้มากกว่าวัสดุสาหร่ายอีกสองชนิด โดย 1 กรัมของตัวอย่าง สามารถกำจัดตะกั่วได้ 480 มล. ในขณะที่ *U. reticulata* และ *G. fisheri* กำจัดตะกั่วได้ 305 และ 260 มล./กรัม ตามลำดับ ซึ่งเมื่อคำนวณค่าการดูดซับของคอลัมน์ (sorption capacity) สำหรับ *Chaetomorpha* sp., *U. reticulata* และ *G. fisheri* จะได้เท่ากับ 1.90, 1.20 และ 1.02 มก./กรัม ตามลำดับ ส่วนถ่านกัมมันต์มีความสามารถดูดซับตะกั่วได้น้อยที่สุด

การทดลองการดูดซับโลหะตะกั่วแบบต่อเนื่องนี้ให้ผลการทดลองตรงกับกรณีแบบสมดุล ซึ่งพบว่า วัสดุตัวอย่างสาหร่าย *Chaetomorpha* sp. สามารถดูดซับตะกั่วได้ดีที่สุด

ในกรณีของการดูดซับโลหะทองแดงก็ให้ผลเช่นเดียวกันคือ เมื่อใช้สารละลายทองแดงเข้มข้น 20 มก./ลิตร, พีเอช 5.0 ± 0.5 ผ่านลงในคอลัมน์แต่ละชุดซึ่งบรรจุวัสดุสาหร่ายอบแห้งจำนวน 1.5 กรัม พบว่า วัสดุสาหร่าย *Chaetomorpha* sp. สามารถกำจัดทองแดงได้ 240 มล./กรัม ซึ่งดีกว่า *U. reticulata* และ *G. fisheri* (200 และ 175 มล./กรัม ตามลำดับ) (Figure 8) อย่างไรก็ตามความสามารถดูดซับทองแดงระหว่างวัสดุสาหร่ายทั้งสามชนิดนี้ไม่แตกต่างกันมากนัก อยู่ในช่วง 175-240 มล./กรัม (7.0-9.6 มก./กรัม) ซึ่งต่างจากกรณีของการดูดซับตะกั่ว ส่วนถ่านกัมมันต์ดูดซับทองแดงได้น้อยที่สุด

บทสรุป

จากการตรวจสอบปริมาณโลหะหนักคือ ตะกั่ว และทองแดง ในวัสดุตัวอย่างสาหร่ายที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณน้อยมาก คือ ปริมาณตะกั่วอยู่ในช่วง 0.25-0.55 มก./กก. และทองแดง 2.00-7.62 มก./กก.

ผลการศึกษาความสามารถดูดซับโลหะหนักตะกั่วและทองแดง ของวัสดุตัวอย่างสาหร่ายทะเลที่เก็บจากอ่าวปัตตานี ซึ่งได้แก่ สาหร่ายพมนาง (*G. fisheri*), สาหร่าย

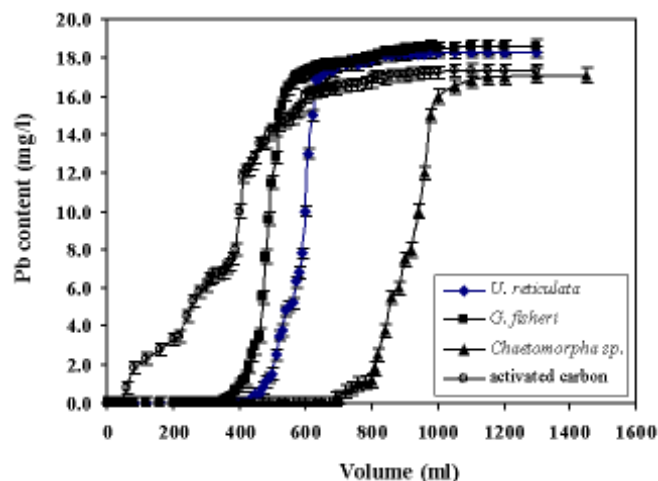


Figure 7. Breakthrough curve of lead removal by algae biomass using continuous flow system. Bars represent ± 1 SD.

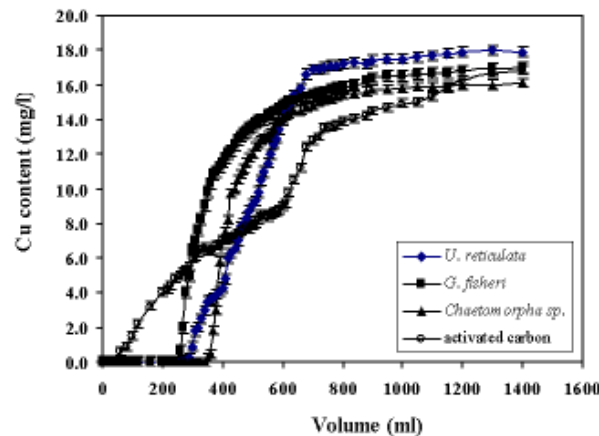


Figure 8. Breakthrough curve of copper removal by algae biomass using continuous flow system. Bars represent ± 1 SD.

ผักกาด (*U. reticulata*) และสาหร่ายไส้ไก่ (*Chaetomorpha* sp.) พบว่าพีเอชมีผลต่อการดูดซับโลหะโดยวัสดุตัวอย่างสาหร่ายทั้งสามชนิดในทำนองเช่นเดียวกัน คือมีค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อพีเอชของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.0 ถึง 4.0 จากนั้นอัตราการเพิ่มการดูดซับจะลดลงและเริ่มคงที่ ณ พีเอช 5.0-7.0

เมื่อเปรียบเทียบการดูดซับตะกั่วและทองแดงโดยวัสดุสาหร่ายทั้งสามกับสารดูดซับสังเคราะห์คือ ถ่านกัมมันต์และซิลิกาเจล พบว่าวัสดุสาหร่ายทั้งสามชนิดมีความสามารถดูดซับตะกั่วได้ใกล้เคียงกันที่ความเข้มข้นโลหะต่างๆ และจะดูดซับได้น้อยลงที่ความเข้มข้นโลหะสูงขึ้น ส่วนถ่านกัมมันต์ และซิลิกาเจล มีการดูดซับโลหะหนักได้น้อยกว่าวัสดุสาหร่าย และเกิดอย่างค่อยเป็นค่อยไป โดยการดูดซับโลหะตะกั่วและทองแดงเป็นไปตามกลไกการดูดซับทั้งแบบแลงค์เมียร์และฟรุนดลิช ($r^2 = 0.809-0.999$ และ $0.948-0.999$ ตามลำดับ)

จากการทดลองจลนศาสตร์ของการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิด โดยวัสดุสาหร่ายต่างๆ พบว่าวัสดุสาหร่ายทั้งสามชนิดมีความสามารถดูดซับโลหะได้ในเวลาที่รวดเร็ว และดูดซับได้เกือบถึงสภาวะสมดุลคือ ได้ถึงร้อยละ 90 ของการดูดซับโดยสมบูรณ์ ภายในระยะเวลา 15-30 นาที

ผลการศึกษาการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิดคือ ตะกั่วและทองแดง แบบระบบต่อเนื่อง โดยใช้สารละลายโลหะเข้มข้นอย่างละ 20 มก./กรัม ผ่านลงในคอลัมน์ที่บรรจุวัสดุสาหร่ายแต่ละชนิดและถ่านกัมมันต์ที่อบแห้ง พบว่า

คอลัมน์ที่บรรจุวัสดุสาหร่าย *Chaetomorpha* sp. มีความสามารถดปริมาณตะกั่ว ซึ่งมากกว่า *G. fisheri* และ *U. reticulata* กรณีของทองแดง ความสามารถดปริมาณทองแดงระหว่างวัสดุสาหร่ายทั้งสามชนิดนี้ไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนคอลัมน์ที่บรรจุถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดโลหะได้น้อยที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้มีส่วนช่วยเหลือในการวิจัย ซึ่งได้แก่ คุณโสไลดาวัลย์ ศิริรัตนพันธ์ คุณกนกศักดิ์ นิสภาธร คุณจินตนา อ่อนกล้า คุณณัฐกมล สุขะพัฒน์ คุณแสวลี หลงสมัน และคุณอุไรวรรณ งานแข็ง โครงการวิจัยนี้ส่วนหนึ่งได้รับทุนสนับสนุนจาก สำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

เอกสารอ้างอิง

- จินตนา อ่อนกล้า. 2543. การวิเคราะห์หาตะกั่วและความสามารถในการดูดซับตะกั่วของสาหร่ายผสมนางและสาหร่ายไส้ไก่จากอ่าวปัตตานี. การวิจัยระดับปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
- ณัฐกมล สุขะพัฒน์. 2541. การวิเคราะห์หาโลหะบางชนิดและความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในสาหร่ายผสมนางจากอ่าวปัตตานี. การวิจัยระดับปริญญาตรี สาขาเคมี-ชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย

- สงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
 ปรียา วิริยานนท์ วิไลรัตน์ ชีวะเศรษฐกรรม จีรรัตน์ สำราญ
 และสรารุช เดชมนี. 2541. การปนเปื้อนโลหะหนัก
 บางชนิดในอ่าวปัตตานี ในรายงานวิจัยโครงการอ่าว
 ปัตตานีระยะที่ 2 ตอนที่ (3)4 คณะวิทยาศาสตร์และ
 เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขต
 ปัตตานี
 มั่น อมรสิทธิ์. 2535. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิง
 เครื่องมือ. พิมพ์ครั้งที่ 1, ชวนพิมพ์, กรุงเทพมหานคร.
 Aderhold, D., Williams, C.J. and Edyvean, R.G.J. 1996.
 The removal of heavy metal ions by seaweeds
 and their derivatives. *Biores. Technol.*, 58: 1-6.
 APHA, 1992. Standard Methods for the Examination of
 Water and Wastewater, 18th ed., A.E. Greenberg,
 L.S. Clesceri and A.D. Eaton, eds., American
 Public Health Association, American Water
 Works Association and Water Environment
 Federation, Washington D.C., pp. 3-1-3-32, 3-
 49, 3-61, 3-69.
 Baffle, J. and De Vitre, R.R. 1994. Chemical and Bio-
 logical Regulation of Aquatic Systems. Lewis
 Publishers, Boca Raton, FL, pp. 47-82.
 Blanchard, G., Maunye, M. and Martin, G. 1984.
 Removal of heavy metals from water by means
 of natural zeolites. *Water Res.*, 18: 1501-1507.
 Chaisuksant, Y. 1997. Bioconcentration and toxic
 effects of halobenzenes with fish (*Gambusia
 affinis*). Ph.D. thesis, Griffith University, Nathan,
 Australia.
 Chang, J.-S., Law, R. and Chang, C.-C. 1997. Biosorp-
 tion of lead, copper and cadmium by biomass
 of *Pseudomonas aeruginosa* PU21. *Water Res.*,
 31: 1651-1658.
 Darnall, D.W., Greene, B., Hosea, M., Mcpherson,
 R.A., Henzel, M. and Alexander, M.D. 1986.
 Recovery of heavy metals by immobilized algae.
 In: Trace Metal Removal from Aqueous Solution,
 Thompson, R., ed., The Royal Society of Chem-
 istry, London, pp. 1-25.
 Donmez, C.G., Aksu, Z., Ozturk, A., and Kutsal, T.
 1999. A comparative study on heavy metal
 biosorption characteristic of some algae. *Proc.
 Biochem.*, 34: 885-892.
 Feng, D. and Aldrich, C. 2004. Adsorption of heavy
 metals by biomaterials derived from marine alga
Ecklonia maxima. *Hydrometallurgy*, 73: 1-10.
 Fourest, E. and Roux, J. 1992. Heavy metal biosorption
 by fungal mycelial by-products: Mechanism and
 influence of pH. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*,
 37: 399-403.
 Fourest, E., Canal, C. and Roux, J. 1994. Improvement
 of heavy metal biosorption by mycelial dead
 biomasses (*Rhizopus arrhizus*, *Muchor miehei*,
 and *Penicillium chrysogenum*): pH control and
 cationic activation. *FEMS Microbiol. Rev.*, 14:
 325-333.
 Huang, J.P., Huang, C.P. and Morehart, A.L. 1991.
 Removal of heavy metal by fungi (*Aspergillus
 oryzae*) adsorption. In: Heavy Metals in the
 Environment. Vernet, J. P., ed., Elsevier, London,
 UK, pp. 329-349.
 Jianlong, W., Xinmin, Z., Decai, D. and Zhou, D. 2001.
 Bioadsorption of lead (II) from aqueous solu-
 tion by fungal biomass of *Aspergillus niger*.
J. Biotechnol., 87:273-277.
 Kim, Y.H., Park, J.Y., Yoo, Y.J. and Kwak, J.W. 1999.
 Removal of lead using xanthated marine brown
 alga *Undaria pinnatifida*. *Proc. Biochem.*, 34:
 647-652.
 Matheickal, J.T. and Yu, Q. 1996. Biosorption of lead
 from aqueous solutions by marine algae *Ecklonia
 radiata*. *Water Sci. Technol.*, 34: 1-7.
 Matheickal, J.T., Yu, Q., and Feltham, J. 1997. Cu (II)
 binding by *E. Radiata* biomaterial. *Environ.
 Technol.*, 18: 25-34.
 Mattuschka, B. and Strabe, G. 1993. Biosorption of
 metals by a waste biomass. *J. Chem. Technol.
 Biotechnol.*, 58: 57-63.
 Tobin, J.M., Cooper, G. and Neufeld, R.J. 1984. Uptake
 of metal ions by *Rhizopus arrhizus* biomass.
Appl. Environ. Microbiol., 47: 821-824.
 Volesky, B. 1987. Biosorbents for metal recovery.
Trends in Biotechnol., 5: 96-101.
 Yu, Q. and Kaewsarn, P. 1999. Fixed-bed study for
 copper (II) removal from aqueous solution by
 marine alga *Durvillaea potatorum*. *Environ.
 Technol.*, 20: 1005-1008.
 Yu, Q., Matheickal, J.T. and Latten, J. 1998. Heavy
 metal adsorption properties of marine algae *E.
 radiata*, *D. potatorum* and *L. japonica*. *Chinese
 J. Chem. Eng.*, 6: 68-72.