บทที่ 5
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการตรวจสอบปริมาณโลหะหนักคือ ตะกั่ว ทองแดง และสารหนู ในวัสดุตัวอย่างสาหร่ายที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณน้อยมาก คือ ปริมาณตะกั่วอยู่ในช่วง 0.21-0.41 mg/kg ทองแดง 5.58-7.62 mg/kg และตรวจไม่พบสารหนูในวัสดุตัวอย่าง

ผลการศึกษาความสามารถดูดซับโลหะหนักบางชนิด (heavy metal uptake capacity) คือ ตะกั่ว ทองแดง และสารหนูของวัสดุตัวอย่างสาหร่ายทะเลชนิดต่าง ๆ ที่เก็บจากอ่าวปัตตานี ซึ่งได้แก่ สาหร่ายผมนาง (*Gracilaria fisheri*), สาหร่ายผักกาด (*Ulva reticulata*) และ สาหร่ายไส้ไก่ (*Chaetomorpha* sp.) พบว่า pH มีผลต่อการดูดซับโลหะโดยวัสดุตัวอย่างสาหร่ายทั้งสามชนิดในทำนองเช่นเดียวกัน คือ มีอัตราการดูดซับเพิ่มขึ้นมากเมื่อ pH ของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น จาก pH 2.0 ถึง pH 4.0 จากนั้นอัตราการเพิ่มการดูดซับจะลดลงและเริ่มคงที่ ณ pH 5.0-7.0

เมื่อเปรียบเทียบการดูดซับโลหะหนักตะกั่วโดยวัสดุดูดซับสาหร่าย *Ulva* sp., *G. fisheri* และ *Chaetomorpha* sp. กับสารดูดซับสังเคราะห์ คือ ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) และซิลิกาเจล (silica gel) พบว่า วัสดุสาหร่ายทั้งสามชนิดมีความสามารถดูดซับโลหะหนักตะกั่วได้ใกล้เคียงกันและเป็นไปอย่างรวดเร็วที่ความเข้มข้นโลหะต่ำ ๆ และจะดูดซับได้น้อยลงที่ความเข้มข้นโลหะสูงขึ้น ซึ่งพิจารณาได้จากค่า %Adsorption ซึ่งมีค่าลดลง ส่วนสารดูดซับสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ และซิลิกาเจลมีการดูดซับโลหะหนักได้น้อยกว่าสาหร่ายและเกิดอย่างค่อยเป็นค่อยไป เช่นเดียวกันกรณีของการดูดซับทองแดง สาหร่ายทั้งสามชนิด สามารถดูดซับโลหะทองแดงได้ใกล้เคียงกันและเป็นไปอย่างรวดเร็วที่ความเข้มข้นโลหะต่ำ ๆ และจะดูดซับได้น้อยลงที่ความเข้มข้นโลหะสูงขึ้น ซึ่งพิจารณาได้จากค่า %Adsorption ซึ่งมีค่าลดลง ส่วนถ่านกัมมันต์ และ ซิลิกาเจลมีการดูดซับโลหะหนักได้น้อยกว่าและเกิดอย่างค่อยเป็นค่อยไป

เมื่อเขียนกราฟแอบซอพชันไอโซเทอร์มตามสมการของ Langmuir และ Freundlich พบว่า การดูดซับโลหะตะกั่วและทองแดงเป็นไปตามกลไกการดูดซับแบบ Langmuir และ Freundlich model ((r^2=0.809-0.999 และ 0.948-0.999 ตามลำดับ) โดยที่วัสดุตัวอย่างสาหร่าย *Chaetomorpha* sp. มีการดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าตัวอย่างสาหร่ายอีกสองชนิด คือ มีค่าความสามารถดูดซับตะกั่วสูงสุด (Q_m) เท่ากับ 1.261 mg/g ส่วน *Ulva* sp. และ *G. fisheri* มีค่า Q_m เท่ากับ 1.186 และ 1.183 mg/g ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่ากรณีของถ่านกัมมันต์และซิลิกาเจล (Q_m = 1.140 และ 1.156 mg/g ตามลำดับ) สำหรับการดูดซับทองแดง พบว่า *G. fisheri* ดูดซับได้ดีกว่าวัสดุตัวอย่างอื่นๆ คือ มีค่า Q_m สูงที่สุดเท่ากับ 15.87 mg/g รองลงมาคือ *Ulva* sp. (Q_m = 14.71 mg/g) และ *Chaetomorpha* sp. (Q_m = 12.35 mg/g) ส่วนถ่านกัมมันต์และซิลิกาเจลมีค่า Q_m ไม่แตกต่างกัน (8.64 และ 8.16 mg/g ตามลำดับ) กรณีของ Freundlich model วัสดุตัวอย่างสาหร่ายมีความสามารถดูดซับตะกั่วที่คล้ายกับกรณีของ Langmuir model ส่วนการดูดซับสารหนู วัสดุดูดซับชีวภาพ

มีการดูดซับสารหนูได้น้อยและกลไกการดูดซับแบบ Langmuir เกิดได้ไม่ดี (r^2=0.532-0.593) โดย *Ulva* sp. มีแนวโน้มที่จะดูดซับได้ดีกว่า *G. fisheri* และ *Chaetomorpha* sp. (Q_m = 0.085, 0.0725 และ 0.0704 mg/g ตามลำดับ) สารหนูจะเกิดการดูดซับแบบ Freundlich ได้ดีกว่า (r^2=0.942-0.991)

จากการทดลองจลนศาสตร์ของการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิด คือ ตะกั่ว ทองแดง และ สารหนู โดยวัสดุสาหร่ายต่าง ๆ พบว่า วัสดุสาหร่ายทั้งสามชนิดมีความสามารถดูดซับโลหะได้ในเวลาที่รวดเร็ว และดูดซับได้เกือบถึงสภาวะสมดุล คือ ได้ถึงร้อยละ 90 ของการดูดซับโดยสมบูรณ์ ภายในระยะเวลา 15-30 นาที

ผลการศึกษาการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิด คือ ตะกั่ว และทองแดง แบบ continuous flow system โดยใช้วัสดุสาหร่ายที่อบแห้ง (*Ulva* sp., *G. fisheri*, *Chaetomorpha* sp.) และถ่านกัมมันต์ พบว่า คอลัมน์ที่บรรจุวัสดุสาหร่าย *Chaetomorpha* sp. มีความสามารถลดปริมาณตะกั่วได้มากกว่า *G. fisheri* และ *Ulva* sp. โดย 1 กรัมของตัวอย่าง สามารถกำจัดตะกั่วได้ 480 ml (ความเข้มข้น 20 mg/l, pH 5.0) ในขณะที่ *Ulva* sp. และ *G. fisheri* กำจัดตะกั่วได้ 305 และ 260 ml/g ตามลำดับ และถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดตะกั่วได้น้อยที่สุด (80 ml/g) ในกรณีของทองแดง เมื่อใช้สารละลายทองแดง เข้มข้น 20 mg/l, pH 5.0 ความสามารถลดปริมาณทองแดงระหว่างวัสดุสาหร่ายทั้งสามชนิดนี้ไม่แตกต่างกันมากนัก อยู่ในช่วง 175-240 ml/g โดยวัสดุสาหร่าย *Chaetomorpha* sp. สามารถกำจัดทองแดงได้ 240 ml/g ซึ่งดีกว่า *Ulva* sp. และ *G. fisheri* (200 และ 175 ml/g ตามลำดับ)

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีบางชนิดของวัสดุดูดซับพบว่า ตัวอย่างสาหร่ายทั้งสามชนิดและถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลองมีค่ามวลของแข็งที่ใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วงร้อยละ 87-90 โดยสาหร่าย *G. fisheri* มีค่ามวลของแข็งมากที่สุด (ร้อยละ 90) และถ่านกัมมันต์มีค่าน้อยที่สุด (ร้อยละ87) วัสดุตัวอย่างสาหร่าย *G. fisheri* มีสมบัติการบวมน้ำ คือ swelling ratio (0.191) ซึ่งมากกว่าของสาหร่าย *Ulva* sp. (0.154) และ *Chaetomorpha* sp. (0.156) แต่ความสามารถดูดซับน้ำของวัสดุตัวอย่างสาหร่ายทั้งสามมีค่าใกล้เคียงกัน (Volume of absorbed solvent, VAS = 0.81-0.84) จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสาหร่ายผมนางโดยใช้เครื่อง FTIR พบว่า พื้นผิวของสาหร่ายประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (–OH) หมู่อัลคิล ($–CH_3$) หมู่ C=O ที่ต่อกับพันธะ C=C หรือพันธะ –NH และหมู่ C–O

ผลการเปลี่ยนแปลงพื้นผิววัสดุตัวอย่างสาหร่ายผมนางด้วย 37% Formaldehyde พบว่า หมู่ฟังก์ชัน –OH ได้หายไป มีหมู่ฟังก์ชัน C–O และ C=O แต่หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ปรากฏไม่ชัดเจนนัก วัสดุสาหร่ายที่เปลี่ยนแปลงสภาพพื้นผิว สามารถดูดซับโลหะทองแดงได้ใกล้เคียงกับวัสดุสาหร่ายที่ไม่เปลี่ยนสภาพ แต่ที่ระยะเวลานานขึ้น จะมีแนวโน้มที่กำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าวัสดุสาหร่ายที่ไม่เปลี่ยนแปลงสภาพพื้นผิว

ผลการปรับสภาพวัสดุตัวอย่างสาหร่ายผมนางด้วย 0.2 M $CaCl_2$ เมื่อดูภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ตัวอย่างสาหร่ายผมนางที่เตรียมได้ มีลักษณะพื้นผิวเป็นร่องอย่างมีระเบียบและมีลักษณะที่แตกต่างจากพื้นผิวของตัวอย่างสาหร่ายที่ไม่ปรับสภาพ มีสมบัติการบวมน้ำและความสามารถการดูดซับน้ำที่ใกล้เคียงกับสาหร่ายที่ไม่ปรับสภาพ (Swelling ratio = 0.195 และ VAS =

Prince of Songkla University Pattani Campus

0.805) จากการทดสอบความสามารถดูดซับโลหะทองแดง และตะกั่วของสาหร่ายผมนางที่ไม่ปรับและที่ปรับสภาพด้วย 0.2 M $CaCl_2$ โดยการทดลองแบบ Batch equilibrium system พบว่า สาหร่ายที่ปรับสภาพแล้วมีความสามารถกำจัดโลหะทองแดงหรือตะกั่วได้ดีกว่า คือที่ความเข้มข้น Cu^{2+} เริ่มต้น 50 mg/l จะสามารถดูดซับทองแดงได้สูงถึงร้อยละ 80 ดูดซับตะกั่วได้ถึงร้อยละ 65 (ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 mg/l) ในขณะที่สาหร่ายผมนางที่ไม่ปรับสภาพจะสามารถดูดซับทองแดงได้ร้อยละ 60 และดูดซับตะกั่วได้เพียงร้อยละ 55 นอกจากนี้สาหร่ายผมนางที่ปรับสภาพด้วย 0.2 M $CaCl_2$ มีการดูดซับโลหะทองแดงเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะคือ 4.0 โดยในช่วง pH 2-4 อัตราการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างมากและคงที่อยู่ที่ช่วง pH 4.0-6.0 โดยที่มีการดูดซับโลหะได้รวดเร็วและเข้าสู่สภาวะสมดุลภายในระยะเวลา 15-30 นาที โลหะเบาพวก Na^+, K^+, Ca^{2+} และ Mg^{2+} (ความเข้มข้น 10 mM) ไม่มีผลต่อความสามารถดูดซับโลหะทองแดงโดยวัสดุสาหร่ายผมนางที่ปรับสภาพด้วย 0.2 M $CaCl_2$ อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p=0.05$)

จากการศึกษา Adsorption-desorption ของทองแดงแบบ batch equilibrium system ของวัสดุสาหร่ายผมนางที่ปรับสภาพด้วย 0.2 M $CaCl_2$ พบว่า desorption efficiency มีค่าเท่ากับ 94.5 % ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างจากกรณีของตัวอย่างที่ไม่ปรับสภาพ (94.3%)

จากการทดสอบการกำจัดโลหะหนักตะกั่วและทองแดงในน้ำตัวอย่างที่ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยใช้วัสดุสาหร่ายผมนางที่เปลี่ยนแปลงสภาพพื้นผิวด้วย 0.2 M $CaCl_2$ โดยการทดลองแบบต่อเนื่อง พบว่าค่า pH รวมถึงความกระด้าง และความเป็นด่างของน้ำตัวอย่างตลอดการทดลองมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก คอลัมน์สามารถลดปริมาณตะกั่วได้ 410 ml/g (98 %) และทองแดง 1450 m l/g (96.6 %)

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นเพื่อเป็นแนวทางในการที่จะนำสาหร่ายชนิดต่าง ๆ ที่พบเป็นจำนวนมากในอ่าวปัตตานี โดยที่บางชนิดยังไม่มีการใช้ประโยชน์ หรือใช้ประโยชน์น้อย มาใช้ให้ได้ประโยชน์สูงสุดในการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียและน้ำธรรมชาติ แต่ยังไม่สมบูรณ์ จะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในด้านสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกลและทางเคมีของสารดูดซับชีวภาพ เช่น หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวและเกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับโลหะ เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกการดูดซับอย่างแท้จริง และสามารถนำไปพัฒนาวิธีการเพิ่มเสถียรภาพและสมบัติการดูดซับโลหะนอกเหนือจากวิธีการใช้ 37% formaldehyde crosslinking หรือ ใช้ 0.2 M $CaCl_2$ ตามด้วย heat treatment ซึ่งได้แก่ การใช้ silica gel entrapment นอกจากนี้ยังต้องศึกษากระบวนการ adsorption-desorption หลาย ๆ รอบของวัสดุสาหร่ายผมนาง และสาหร่ายชนิดอื่น ๆ เพื่อให้ทราบถึงการนำกลับมาใช้ใหม่ว่าเป็นไปได้มากน้อยเพียงใด ศึกษาการใช้วัสดุตัวอย่างหลายชนิดร่วมกันในการกำจัดโลหะหนักแบบต่อเนื่อง นอกจากนี้ จากการศึกษาการดูดซับโลหะแบบ batch system ของนิตยาและคณะ (2538) พบว่า วัสดุชีวภาพอื่น ๆ ได้แก่ กาบมะพร้าว ถ่านไม้ เปลือกลิสง ผักตบชวา และกระดองปู ก็สามารถดูดซับโลหะสารหนูได้ดี โดยสามารถลดปริมาณ

Prince of Songkla University Pattani Campus

สารหนูในน้ำได้ในช่วง 4.5-34.3 μg/g ดังนั้นจึงน่าที่จะนำองค์ความรู้ที่ได้นี้มาประยุกต์ใช้พัฒนาวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรม หรือวัสดุที่ยังไม่ใช้ประโยชน์อื่น ๆ ซึ่งมีอยู่มากในท้องถิ่น ซึ่งได้แก่ กาบมะพร้าว ขี้เลื่อย ซังข้าวโพด กากทะลายปาล์ม ผักตบชวา และกระดองปู เป็นต้น ในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติหรือน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม

Prince of Songkla University Pattani Campus