บทที่ 5
สรุปและอภิปรายผล

จากการทดลองทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างของเปลือกหอยเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับ และในการดูดซับทองแดง แมงกานีส และสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การทดลองจากการศึกษาลักษณะทางกายภาพ และ โครงสร้าง ของเปลือกหอย

สามารถใช้เปลือกหอยเชลล์และเปลือกหอยลายในการดูดซับโลหะหนักออกจากน้ำเสียได้ โดยเปลือกหอยทั้ง 2 ชนิดมีคุณสมบัติที่ดีในการดูดซับ โดยเปลือกหอยลายมีรูพรุน และมีพื้นผิวที่ขรุขระกว่าเปลือกหอยเชลล์ ซึ่งการที่รูพรุนมีจำนวนมากกว่าและมีพื้นที่ผิวขรุขระนี้จะมีผลทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น ทำให้สารดูดซับมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย (สันทัด ศิริอนันต์-ไพบูลย์, 2549) และจากการทดลองพบว่า เปลือกหอยเชลล์และเปลือกหอยลายมีสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยเปลือกหอยเชลล์มีผลึกเป็นแบบแคลไซต์ (Calcite) และอาราโกไนต์ (Aragonite) โดยประกอบด้วยแคลไซต์ และอาราโกไนต์ปริมาณ 94% และ 6% ตามลำดับ ส่วนเปลือกหอยลายมีผลึกเป็นแบบอาราโกไนต์ โดยมีอาราโกไนต์เป็นส่วนประกอบ 100% ซึ่งในเปลือกหอยแต่ละชนิดจะมีชนิดและปริมาณผลึกของแคลไซต์ และอาราโกไนต์ ที่แตกต่างกัน (Boolootain & Stiles, 1979) และนอกจากนี้มีงานวิจัยต่าง ๆ ได้สรุปไว้ว่าปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตนี้มีผลต่อกลไกการดูดซับ โดยกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นเกิดจากไอออนประจุบวกของโลหะหนักจะเข้าไปจับกับประจุลบของคาร์บอเนต (Temmam, Paquette, & Vali, 2000) แล้วเกิดเป็นตะกอนคาร์บอเนตที่ผิวและภายในรูพรุนของเปลือกหอย (Stipp, 1994; Stipp, Eggleston, & Nielson, 1994; Stipp & Hochella, 1991; Stipp, Hochella, Parks, & Leck, 1992; Stipp, Gutmannsbauer, & Lehmann, 1996; Petrucci et al., 2002)

2. การทดลองจากการศึกษาการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปลือกหอย

จากผลของระยะเวลาสมดุลที่ใช้ในการดูดซับทองแดง สังกะสี และแมงกานีส ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปลือกหอยลายและเปลือกหอยเชลล์ พบว่าเปลือกหอยลายและเปลือกหอยเชลล์สามารถดูดซับทองแดง และสังกะสี จนความเข้มข้นของสังกะสี และ ทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลงอย่างรวดเร็วและเข้าสู่สมดุลที่เวลา 25 และ 60 นาที ตามลำดับ โดยในงานวิจัยนี้มีระยะเวลาสมดุลที่ใช้ในการดูดซับรวดเร็วกว่าการทดลองของ ชยาภาส ทับทอง และสินศุภา จุ้ยจุลเดิม (2548) ที่ทำการศึกษาการดูดซับทองแดงโดยใช้เปลือกหอยแครงเป็นตัวดูดซับ ภายใต้ความเข้มข้น 20 mg/L ปริมาณ 200 มิลลิลิตร ที่ pH 5 ด้วยเปลือกหอยที่มีขนาด 65-120 ไมโครเมตร ปริมาณ 0.1 กรัม

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ทำการเขย่าด้วยความเร็วรอบ 160 รอบ/นาทีที่อุณหภูมิห้อง พบว่า สามารถดูดซับทองแดงจนความเข้มข้นของทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลงอย่างรวดเร็วและเข้าสู่สมดุลที่เวลา 120 นาที และมีการดูดซับเร็วกว่าการทดลองของ Liu, Sun, Xu, and Li (2009) ที่ทำการศึกษาการดูดซับทองแดงโดยใช้เปลือกหอย 2 ฝาเป็นตัวดูดซับ ภายใต้ความเข้มข้น 100 mg/L ที่ pH 5 ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ด้วยเปลือกหอยที่มีขนาด 100 ไมโครเมตร ปริมาณ 1 กรัม ทำการเขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบ/นาทีที่อุณหภูมิ 32 ^{0}C พบว่า สามารถดูดซับทองแดง จนความเข้มข้นของทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลงอย่างรวดเร็วและเข้าสู่สมดุลที่เวลา 90 นาที อาจเนื่องมาจากสภาวะต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ เช่น ขนาดของรูพรุนและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ ความปั่นป่วน อุณหภูมิ และ ชนิดของโลหะหนักที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกันจะมีความสามารถในการละลายที่แตกต่างกันจึงทำให้มีระยะเวลาในการการดูดซับที่แตกต่างกัน (พรวรัญช์ คีรีวงก์ และภัทรียา สังข์ดี, 2550) หรือขนาดของตัวดูดซับที่แตกต่างกัน โดยตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ในการดูดซับมากกว่า จึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้นด้วย (Du, Lian, & Zhu, 2011) ส่วนในการดูดซับแมงกานีสเปลือกหอยลายและเปลือกหอยเชลล์ไม่สามารถดูดซับแมงกานีสในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดีเท่าที่ควรจึงไม่สามารถหาระยะเวลาสมดุลในการดูดซับแมงกานีสด้วยเปลือกหอยได้ แม้จะเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ และระยะเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการทดลองของนันประภา อุยสูงเนิน และพิมรำไพ จารลี (2550) ที่ใช้ดินนาในการดูดซับแมงกานีสในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งหาระยะเวลาสมดุลในการดูดซับแมงกานีสที่เวลา 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 และ 20 ชั่วโมง ด้วยดินนาปริมาณ 1 กรัมภายใต้ความเข้มข้น 50 mg/L ที่ pH 7 ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ทำการเขย่าด้วยความเร็วรอบ 250 รอบ/นาทีที่อุณหภูมิห้อง พบว่าไม่สามารถหาระยะเวลาสมดุลในการดูดซับแมงกานีสด้วยดินนาได้เช่นกัน และการทดลองของกาญจนา พานแก้ว, อานนท์ ดวงพิลา, ภูริวัฒน์ ดิษฐเจริญ, วิภาดา สนองราษฎร์ และสมภพ สนองราษฎร์ (2008) ที่ใช้เปลือกไข่ในการดูดซับแมงกานีสในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้เปลือกไข่ปริมาณ 10-15 กรัมในดูดซับ ที่ความเข้มข้น 890 mg/L ปริมาณ 250 มิลลิลิตร ซึ่งตั้งขวดทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง พบว่า การดูดซับแมงกานีสด้วยเปลือกไข่เป็นไปได้ต่ำเช่นกัน ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาในการดูดซับนานถึง 20 วัน ซึ่งยังเหลือความเข้มข้นมากกว่า 20 mg/L โดยอาจเกิดจากวัสดุดูดซับที่ใช้มีปริมาณแมงกานีสอยู่ในวัสดุดูดซับปริมาณสูงอยู่ก่อนแล้วจึงทำให้ไม่สามารถดูดซับโลหะหนักชนิดนี้เข้าไปได้อีก หรือสามารถดูดซับเข้าไปได้ในปริมาณน้อย (นันประภา อุยสูงเนิน และพิมรำไพ จารลี, 2550) ซึ่งสอดคลองกับการทดลองของ Juncharoenwongsa, Siriprom, Kaewkhao, Choeysuppaket, Limsuwan, and Phachana (2011) ที่ทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีในเปลือกหอยลายในบริเวณจังหวัดชลบุรี พบว่า เปลือกหอยลายมี Ca, Sc, Cr, Mn, Fe, Zn, Cu, Sr, Au และ Pb เป็นส่วนประกอบ โดยมีปริมาณแมงกานีสที่สะสมอยู่

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ในเปลือกหอยปริมาณสูงถึง 75 ppm ซึ่งมีปริมาณการสะสมสูงกว่าสังกะสีและทองแดง ซึ่งมีปริมาณ 22 และ 54 ppm ตามลำดับ

จากการทดลองทำการศึกษาความเข้มข้นสูงสุดในการดูดซับทองแดง สังกะสี และแมงกานีสออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 100, 200, 300, 400 และ 500 mg/L ด้วยเปลือกหอยลายและหอยเชลล์ โดยใช้เปลือกหอยในแต่ละชนิดในการดูดซับทองแดง สังกะสี และแมงกานีสปริมาณ 1, 1 และ 5 กรัมตามลำดับ ที่ pH 5 และทำการเขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 90 นาที พบว่า ที่ความเข้มข้นในช่วง 100-500 mg/L เปลือกหอยลายและเปลือกหอยเชลล์ มีประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงและสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ได้ในปริมาณที่สูงมาก คือ 92.96-99.50% และ 96.67-98.84% ตามลำดับ และมีความสามารถดูดซับ 44.14-47.19 และ 46.4-46.97 ซึ่งมีความสามารถสูงกว่าการทดลองของ Liu, Sun, Xu, and Li (2009) ที่ทำการศึกษาการดูดซับทองแดงด้วยเปลือกหอย 2 ฝา ภายใต้ความเข้มข้น 100-1400 mg/L ที่ pH 5 ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ด้วยเปลือกหอยที่มีขนาด 100 ไมโครเมตร ปริมาณ 1 กรัม ทำการเขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบ/นาทีที่อุณหภูมิ 32 ^{0}C พบว่าเปลือกหอย 2 ฝามีประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงที่ความเข้มข้นไม่เกิน 400 mg/L โดยมีความสามารถในการดูดซับทองแดง 38.93 mg/g และสอดคล้องกับการทดลองของ Amarasinghe and Williams (2007) ที่ทำการศึกษาการดูดซับทองแดงด้วยกากของชาดำ ภายใต้ความเข้มข้น 50-200 mg/L ที่ pH 5.5 ปริมาณ 200 มิลลิลิตร ด้วยกากของชาดำปริมาณ 1 กรัม เขย่าเป็นเวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิ 22 ^{0}C พบว่า กากของชาดำมีความสามารถในการดูดซับทองแดงปริมาณไม่เกิน 20 mg/g และนอกจากนี้จากการทดลองยังพบว่าที่ความเข้มข้น 400 mg/L เปลือกหอยลายมีประสิทธิภาพมีประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับทองแดง, สังกะสีและแมงกานีสมากกว่าเปลือกของหอยเชลล์ ซึ่งอาจเกิดจากการที่เปลือกหอยลายมีพื้นที่ผิว และปริมาณรูพรุนที่มากกว่าเปลือกหอยเชลล์ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง เปลือกหอยเชลล์และเปลือกหอยลายสามารถดูดซับทองแดง และสังกะสี ให้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรมที่ถูกประกาศไว้โดยกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมได้ โดยเปลือกหอยเชลล์สามารถดูดซับทองแดงและสังกะสีที่ความเข้มข้นไม่เกิน 300 mg/L และ 200 mg/L ตามลำดับ และเปลือกหอยลายสามารถดูดซับทองแดงและสังกะสีที่ความเข้มข้นไม่เกิน 200 mg/L ให้มีความเข้มข้นไม่เกิน 2 และ 5 mg/L ตามลำดับ ส่วนในการดูดซับแมงกานีสเปลือกหอยเชลล์และเปลือกหอยลายไม่สามารถดูดซับแมงกานีสให้มีความเข้มข้นต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้ง คือ ความเข้มข้นเกิน 5 mg/L ได้ แม้จะมีการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจาก 1 กรัมเป็น 5 กรัม

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

จากการทดลองทำการศึกษา pH ที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดง สังกะสี และแมงกานีสจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 500 mg/L ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปลือกหอยลายและหอยเชลล์ปริมาณ 1, 1 และ 5 กรัม ตามลำดับ ที่ pH 3, 5, 7, 9 และ 11 ทำการเขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิห้อง ระยะเวลา 90 นาที พบว่า ค่า pH ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เป็นเบสมีความสามารถ และประสิทธิภาพในดูดซับทองแดง สังกะสี และแมงกานีสได้ในปริมาณสูง เนื่องจากในสารละลายที่มีค่า pH เป็นเบสจะการเกิดการตกตะกอนร่วมกับการดูดซับทำให้โลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์มีปริมาณต่ำลงมาก และรองมา คือ ค่า pH ของสารละลายที่เป็นกลาง และกรด ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่า pH 9 สามารถดูดซับทองแดง สังกะสี และแมงกานีสได้สูง รองลงมาเป็น pH 11, pH 7, pH 5 และ pH 3 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ กาญจนา พานแก้ว, อานนท์ ดวงพิลา, ภูริวัฒน์ ดิษฐเจริญ, วิภาดา สนองราษฎร์ และสมภพ สนองราษฎร์ (2008) ที่ใช้เปลือกไข่ในการดูดซับแมงกานีสในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 890 mg/L ปริมาณ 250 มิลลิลิตร ที่ pH 1, pH 4, pH 7 และ pH 10 โดยใช้เปลือกไข่ปริมาณ 10-15 กรัมในดูดซับ ซึ่งตั้งขวดทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 1 วัน พบว่าที่ pH 10 ในน้ำเสียสังเคราะห์สามารถดูดซับแมงกานีสในน้ำเสียสังเคราะห์สูงที่สุด รองลงมาคือ pH 7, pH 4 และ pH 1 ตามลำดับ พบว่า ที่ pH 10 สามารถดูดซับแมงกานีสจนเหลือความเข้มข้นต่ำที่สุด และพบว่ามีการเกิด การตกตะกอนในสารละลายขึ้นเช่นกัน และสอดคล้องกับการทดลองของ ปัทมา พักสาหาร (2546) ที่ใช้เปลือกไข่ไก่ในการบำบัดแมงกานีสในน้ำเสีย ซึ่งพบว่า pH ที่เป็นด่างจะมีการตกตะกอนทางเคมีของโลหะหนัก ซึ่งมีผลต่อการดูดซับแมงกานีสโดยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับแมงกานีสให้สูงขึ้น และ pH ที่เป็นกรดมีผลต่อต่อการดูดซับแมงกานีสเล็กน้อย เนื่องจากในสภาวะที่สารละลายเป็นกรดจะมีผลต่อแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนในสารละลายมากกว่าสารละลายเป็นกลางและเบส ทำให้ผิวของวัสดุดูดซับมีประจุบวกซึ่งจะผลักไอออนของโลหะหนักที่มีประจุบวกเช่นกันออกมา ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับจึงน้อย แต่ถ้า pH ของสารละลายสูงขึ้นจะทำให้หมู่ฟังชั่นบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับมีประจุลบ ซึ่งจะจับกับไอออนของโลหะหนักที่มีประจุบวกทำให้การดูดซับมีประสิทธิภาพสูง (Du, Lian, & Zhu, 2011; Zachara, Cowan, & Resch, 1991; วิวรรณ ขจรเกียรติกุล, 2539; ศิโรรัตน์ ศรีเกษเพชร์, 2543) และนอกจากนี้ยังพบว่าสารละลายโลหะหนักที่มีค่า pH เป็นเบสจะมีการตกตะกอนของสารละลายโลหะหนักร่วมด้วย โดยจะทำให้โลหะหนักเปลี่ยนรูปเป็นโลหะหนักไฮดรอกไซด์ เช่น คอปเปอร์ไฮดรอกไซด์, ซิงค์ไฮดรอกไซด์ และแมงกานีสไฮดรอกไซด์ เป็นต้น โดยการตกตะกอนนี้จะช่วยให้ปริมาณโลหะหนักในสารละลายลดลงด้วย (ยุวรัตน์ ปรมีศนาภรณ์, 2544) และเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง พบว่า เปลือกหอยเชลล์และเปลือกหอยลายสามารถดูดซับทองแดง และสังกะสี ให้มีค่าต่ำ

กว่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรมที่ถูกประกาศไว้โดย กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมได้ โดยเปลือกหอยเชลล์สามารถดูดซับทองแดงที่ความเข้มข้น 500 mg/L ที่ pH 7-11 และสามารถดูดซับสังกะสีที่ความเข้มข้น 500 mg/L ที่ pH 7-11 ส่วนเปลือกหอยลาย สามารถดูดซับทองแดงที่ความเข้มข้น 500 mg/L ที่ pH 9-11 และสามารถดูดซับสังกะสีที่ความเข้มข้น 500 mg/L ที่ pH 7-11 ให้มีความเข้มข้นไม่เกิน 2 และ 5 mg/L ตามลำดับ ส่วนในการดูดซับแมงกานีสเปลือกหอยเชลล์และเปลือกหอยลายไม่สามารถดูดซับแมงกานีสให้มีความเข้มข้นต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้ง คือ ความเข้มข้นเกิน 5 mg/L ได้ แม้จะมีการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจาก 1 กรัมเป็น 5 กรัม

ข้อเสนอแนะ

1. จากการทดลองได้ทราบว่าเปลือกหอยลายและหอยเชลล์สามารถดูดซับโลหะหนักทองแดงและสังกะสีได้ดี จึงควรนำเปลือกหอยลายและหอยเชลล์ไปประยุกต์ใช้กับการดูดซับในระบบต่อเนื่องแบบคอลัมน์ เพื่อเป็นแนวทางการนำไปใช้งานในระบบบำบัดต่อไป

2. ควรมีการศึกษาการดูดซับโลหะหนักชนิดอื่น ๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสีย เช่นเดียวกับ ทองแดง แมงกานีส และสังกะสี ด้วยเปลือกหอยเชลล์และเปลือกหอยลาย

3. ควรมีการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก ในสภาวะที่สารละลายมีโลหะหนักหลายชนิดร่วมกัน เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของโลหะหนักแต่ละชนิดที่กระทำต่อกันว่าส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับอย่างไร

4. เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการและใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมได้จากห้องปฏิบัติการ ดังนั้นเพื่อให้การกำจัดทองแดง สังกะสี และแมงกานีสด้วยเปลือกหอยเชลล์และเปลือกหอยลาย สามารถนำไปใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียได้จริง จึงควรจะมีการศึกษาการดูดซับโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ จริงมาใช้ในการศึกษา

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University