



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้ได้ค้นพบการเตรียมสารดูดซับจากกระดูกหมู โดยเตรียมในภาวะต่างกัน และศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี ของสารดูดซับที่เตรียมได้ จากนั้นศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารตะกั่วและแคลเซียม โดยครอบคลุมปัจจัยด้านความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะเวลาสัมผัส การเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายภายหลังการกำจัด ปริมาณสารดูดซับที่เหมาะสมที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด โดยการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง(แบตช์) และแบบแท่งดูดซับต่อเนื่อง(คอลัมน์) รวมทั้งการศึกษาโครงสร้างของผลึกและสารที่เกิดขึ้นใหม่ภายหลังการดูดซับและการฟื้นฟูสภาพเกลือกระดูกที่ใช้งานแล้วด้วยวิธีทางเคมี

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ได้เตรียมสารดูดซับ 4 ชนิดจากกระดูกหมู ได้แก่ เกล็ดกระดูก ฟงกระดูก ถ่านกระดูก และถ่านกัมมันต์กระดูก โดยเกล็ดกระดูกและฟงกระดูกอบที่ 150 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง ส่วนถ่านกระดูกเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์กระดูกกระตุ้นด้วยสารละลายเกลือแอมโมเนียม 6 ชั่วโมงและเผาที่ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง

โครงสร้างทางอนุภาคของสารดูดซับทั้ง 3 ชนิด เป็นผลึกรูปหกเหลี่ยม(hexagonal) มีด้านทั้งสามและมุมของผลึกใกล้เคียงกันมากกับโครงสร้างกระดูกโค-กระบือมีองค์ประกอบหลักทางเคมีเหมือนกันและมีปริมาณมากที่สุดคือแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์มีองค์ประกอบหลักคือธาตุแคลเซียม ฟอสฟอรัส อัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสมีค่า  $1.70 \pm 0.01$  ซึ่งอยู่ในช่วงเดียวกับกระดูกโค-กระบือ ( $Ca/P = 1.67-2.0$ )

การเผาทำให้อัตราส่วนของ Ca/P เพิ่มขึ้น รวมทั้งร้อยละโดยน้ำหนักของแคลเซียมและฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณคาร์บอนและอินทรีย์สารลดลง การเผาไม่มีผลต่อขนาดของผลึกโครงสร้าง เพียงแต่ไปเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาด และปริมาตรของโพรง โดยอุณหภูมิที่ให้กับสารดูดซับกระดูกจะไปเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะและเพิ่มขนาดของโพรง การมีพื้นที่ผิวจำเพาะของสารดูดซับมากและขนาดของโพรงใหญ่ ปริมาตรรวมของโพรงมากก็ไม่ได้เหมาะสมที่จะกำจัดตะกั่วและแคลเซียมได้มากในแนวโน้มที่แปรผันโดยตรง ทั้งนี้ต้องพิจารณากระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในระบบการกำจัดโลหะชนิดนั้น

ภายหลังการนำฟงกระดูกและถ่านกระดูกรวมทั้งถ่านกัมมันต์กระดูกไปกำจัดตะกั่วและแคลเซียมแล้ว พบว่าเกิดผลิตภัณฑ์ใหม่เป็นผลึกฟอสเฟตและแคลเซียมแคลเซียมไฮดรอกซี

อะพาไทต์ โครงสร้างของผลึกมันท์ยังคงเป็นรูปหกเหลี่ยม (hexagonal) ขนาดใกล้เคียงกันมากกับผลึกของสารดูดซับก่อนการดูดซับ และจากภาพถ่ายทางอิเล็กตรอนไมโครสโคป พบว่าตะกั่วและแคดเมียมเข้าไปอยู่ในโพรงของสารดูดซับ และปริมาตรรวมของโพรงจะลดลง

กระดูกหมุดัมจากร้านอาหาร นำมาเตรียมเป็นถ่านกระดูกเผาที่ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง เป็นสภาวะการเตรียมที่เหมาะสมที่สุด ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายตะกั่วได้สูงสุด เวลาสัมผัส 24-36 ชั่วโมง (ขึ้นอยู่กับปริมาณถ่านที่ใช้) ส่วนการกำจัดแคดเมียม ผงกระดูกให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด ที่เวลาสัมผัส 72 ชั่วโมง ทุกความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม พีเอชของสารละลายตะกั่วและแคดเมียมเริ่มต้นเป็น  $5 \pm 0.1$  อัตราเร็วในการเขย่า 175 รอบต่อนาที

ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของสารดูดซับกระดูกหมุดัมพบว่าถ่านกระดูกเผาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง และถ่านกระดูกเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมงให้ประสิทธิภาพเท่ากันและประสิทธิภาพสูงสุด รองลงไปเป็นถ่านกัมมันต์และผงกระดูก ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมของสารดูดซับกระดูกหมุดัมพบว่าผงกระดูกให้ประสิทธิภาพสูงสุดรองลงไปเป็นถ่านกัมมันต์และถ่านกระดูกเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง และถ่านกระดูกเผาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง ตามลำดับ

ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของถ่านกระดูกและไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียมของผงกระดูกเป็นแบบแลงมัวร์ ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของผงกระดูกเป็นแบบฟรุนด์ลิช

การศึกษาการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมแบบแบ่งเกล็ดกระดูก พบว่าที่ระดับความสูงของเกล็ดกระดูก 30, 60, 90 เซนติเมตรสามารถกำจัดตะกั่วได้ 3651, 2326 และ 1550 BV. และประสิทธิภาพการกำจัดเป็น 65, 32 และ 21 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และสามารถกำจัดแคดเมียมได้ 4636 BV. ที่ ประสิทธิภาพเป็น 60 มิลลิกรัมต่อกรัมที่ชั้นความสูงเกล็ดกระดูก 30 เซนติเมตร และ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วหรือแคดเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเป็น  $4 \pm 0.1$  อัตราการไหล 0.6 ลิตรต่อชั่วโมง

การฟื้นฟูสภาพเกล็ดกระดูกที่ใช้งานแล้ว ด้วยสารละลายของกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 นาน 30 นาที จะสามารถฟื้นฟูสภาพเกล็ดกระดูกที่ใช้งานแล้วได้ร้อยละ 23 และการล้างสามารถทำได้เพียงครั้งเดียวเนื่องจากสามารถนำมากำจัดสารละลายโลหะได้ประสิทธิภาพต่ำเพียงร้อยละ 20 ของความสามารถกำจัดของเกล็ดกระดูกที่ยังไม่ผ่านการใช้งานและการฟื้นฟูสภาพ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมสารดูดซับจากกระดูกหมูในการกำจัดสารละลาย ตะกั่วและสารละลายแคดเมียมที่สังเคราะห์ขึ้น แต่มีหลายสิ่งที่ยังไม่ได้ศึกษาและขอฝากให้มีการวิจัย ต่อเนื่องโดยใช้สารดูดซับกระดูกหมูในการกำจัดโลหะหนักเพื่อยืนยันหลักการและสิ่งที่ได้ค้นพบดังนี้

- 5.2.1 การเตรียมสารดูดซับชนิดต่างๆจากกระดูกหมูสด ได้แก่ เกล็ดกระดูก ฟงกระดูก ถ่านกระดูก ในการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมที่ปนเปื้อนในธรรมชาติเพื่อเปรียบเทียบกับ ผลการศึกษานี้
- 5.2.2 การศึกษาใช้เกล็ดกระดูกที่เตรียมจากกระดูกสดในการกำจัดสารละลายตะกั่วแบบ แท่งเกล็ดกระดูกต่อเนื่องให้ถึงจุด breakthrough เนื่องจากการศึกษานี้ได้เกิดการอุดตันก่อนถึงจุด breakthrough ทั้งนี้ควรใช้เกล็ดกระดูกสูง 30 เซนติเมตร เนื่องจาก ประสิทธิภาพในการกรองสารละลายตะกั่วได้ดีมาก
- 5.2.3 การศึกษาการฟื้นฟูสภาพเกล็ดกระดูกที่ใช้ดูดซับสารละลายแคดเมียมด้วยวิธีทางเคมี
- 5.2.4 การศึกษากลไกการดูดซับในการกำจัดตะกั่วและแคดเมียม ติดตามการแทนที่ของ แคดเมียมในองค์ประกอบของกระดูกด้วยโลหะหนัก

ด้วยโครงสร้างของกระดูกสัตว์จะเป็นกระดูกหมู กระดูกวัว ต่างมีองค์ประกอบหลัก ที่เหมือนกัน โครงสร้างใกล้เคียงกันมาก จึงควรมีการการวิจัยในอนาคตโดยใช้กระดูกสัตว์ชนิดอื่น เช่น กระดูกปลา กระดูกไก่ และกระดูกสัตว์ปีกชนิดอื่น ๆ นำมาศึกษากำจัดโลหะหนักชนิดอื่น นอกจาก ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง นิกเกิล โปรท ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะสามารถกำจัดได้ผลดี

อย่างไรก็ตาม การศึกษาสารดูดซับจากกระดูกสัตว์มีผลงานวิจัยออกมาเรื่อย ๆ สามารถศึกษาวิจัยและพัฒนาได้อีกมาก การเตรียมและพัฒนาสารดูดซับจากกระดูกด้วยวิธีการอย่างอื่น นอกจากกระดูกอบ ถ่านกระดูก ถ่านกัมมันต์กระดูก เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดโลหะหนักและกำจัดมลพิษในน้ำเสีย ทั้งไอออนบวกและไอออนลบ รวมถึงสารกัมมันตภาพรังสีที่ปนเปื้อน ในสิ่งแวดล้อม ทั้งในน้ำ ในดิน และในบรรยากาศ เป็นสิ่งท้าทายให้มีการศึกษา ค้นคว้า วิจัยในอนาคตต่อไป