

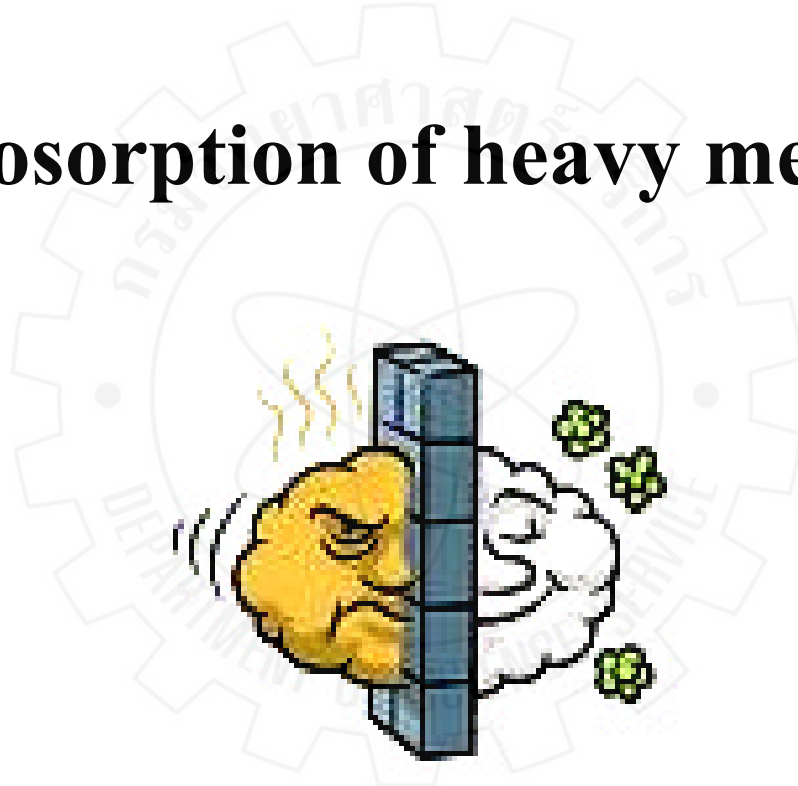
IR 2

ประมวลสารสนเทศพร้อมใช้

การดูดซับโลหะหนัก

โดยวิธีทางชีวภาพ

(Biosorption of heavy metals)



สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มีนาคม 2553

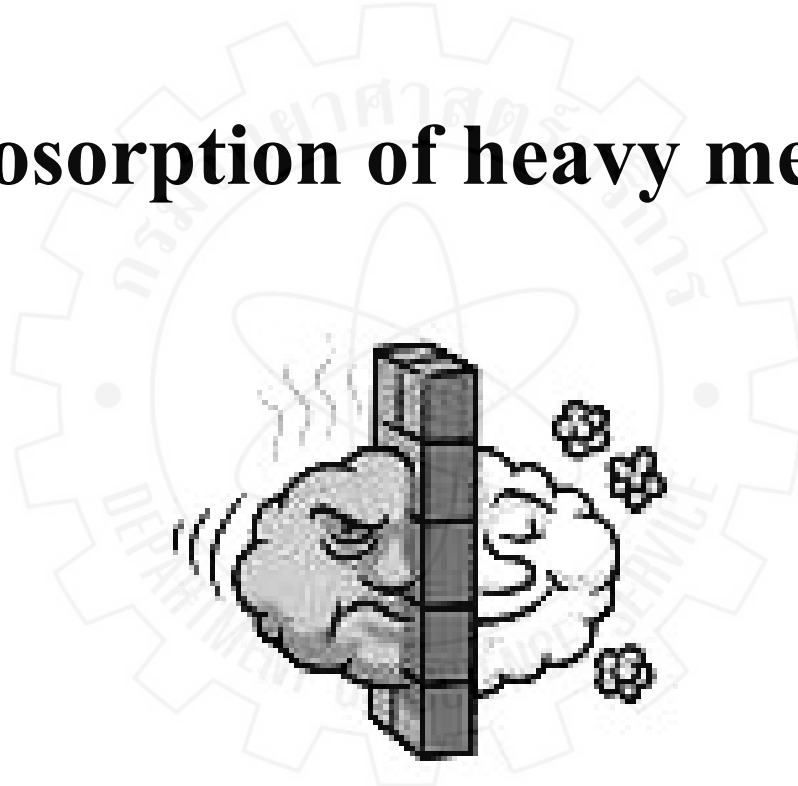
IR 2

ประมวลสารสนเทศพร้อมใช้

การดูดซับโลหะหนัก

โดยวิธีทางชีวภาพ

(Biosorption of heavy metals)



สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มีนาคม 2553

คำนำ

ประมวลสารสนเทศพร้อมใช้ เรื่อง “การดูดซับโลหะหนักโดยวิธีทางชีวภาพ (Biosorption of heavy metals)” ฉบับนี้ สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ ได้จัดทำขึ้นภายใต้โครงการเครือข่ายห้องสมุดอิเล็กทรอนิกส์ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของประเทศ โครงการย่อยที่ 2 โครงการเพิ่มศักยภาพการเข้าถึงสารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในรูปแบบ Digital Library กิจกรรมย่อย 2.5 ประมวลสารสนเทศ พร้อมใช้ (Information Repackaging) ในส่วนของสาระน่ารู้ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจากต่างประเทศ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ประมวลสารสนเทศพร้อมใช้นี้ให้ผู้ใช้ได้เข้าถึงสารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในรูปแบบที่เข้าใจได้ง่ายและสะดวกพร้อมใช้ เอกสารประมวลพร้อมใช้ฉบับนี้ให้ความรู้เกี่ยวกับหลักของการดูดซับโลหะหนักโดยวิธีทางชีวภาพ กลไกที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับโลหะหนักโดยวิธีทางชีวภาพ ชนิดของโลหะหนัก แหล่งที่พบ และผลกระทบของโลหะหนักต่อสุขภาพของมนุษย์ ชนิดของมวลชีวภาพที่ใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนักและการนำเอาโลหะหนักกลับคืน

คณะผู้จัดทำหวังว่า ประมวลสารสนเทศพร้อมใช้ฉบับนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้ที่สนใจศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการดูดซับโลหะหนักโดยวิธีทางชีวภาพ โดยเอกสารฉบับเต็มที่ใช้ในการเรียบเรียงประมวลสารสนเทศพร้อมใช้ฉบับนี้ได้รวบรวม จัดเก็บ และให้บริการ ณ บริเวณห้องอ่านชั้น 2

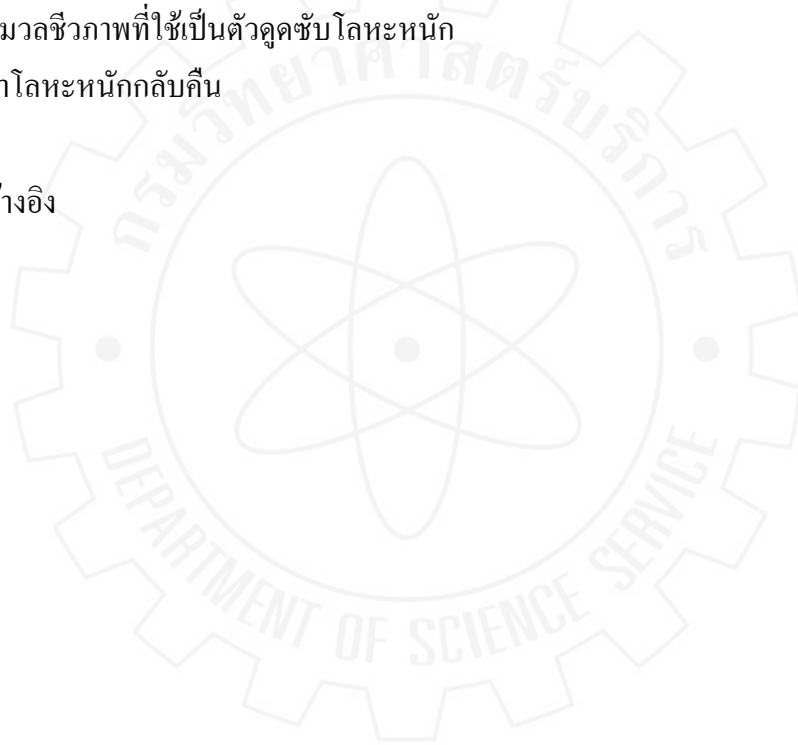
ศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มีนาคม 2553

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	1
คำสำคัญ	1
บทนำ	2
หลักการของการดูดซับโลหะหนักโดยวิธีทางชีวภาพ	3
กลไกที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับโลหะหนักโดยวิธีทางชีวภาพ	4
ชนิดของโลหะหนัก แหล่งที่พบ และผลกระทบของโลหะหนักต่อสุขภาพของมนุษย์	7
ชนิดของมวลชีวภาพที่ใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนัก	8
การนำเอาโลหะหนักกลับคืน	13
บทสรุป	15
เอกสารอ้างอิง	16



การดูดซับโลหะหนักโดยวิธีทางชีวภาพ (Biosorption of heavy metals)

บทคัดย่อ

โลหะหนักในสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติจะอยู่ในรูปของตะกอนที่ไม่เคลื่อนที่และในสินแร่ นอกจากนี้ยังมีโลหะหนักที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การทำเหมืองแร่ กระบวนการอุตสาหกรรมทำให้เกิดการสะสมของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมบนพื้นโลกและในน้ำ โลหะหนักเหล่านี้ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ มลพิษที่เกิดจากการปลดปล่อยของโลหะหนักหากไม่ได้รับการบำบัดที่เหมาะสมแล้ว จะมีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม และสุขภาพอย่างมีนัยสำคัญจากการสะสมในห่วงโซ่อาหาร ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำที่ปนเปื้อน การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียทำได้โดยวิธีทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ การใช้สารดูดซับทางชีวภาพ เป็นทางเลือกหนึ่งที่มีการนำมาใช้ เทคโนโลยีนี้ประกอบด้วยมวลชีวภาพหลายชนิดที่ใช้เป็นตัวจับโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย สารดูดซับชีวภาพเตรียมจากการนำมวลชีวภาพมาผ่านกระบวนการเพื่อให้มีโครงสร้างคล้ายเม็ดลูกปัดและมีตำแหน่งสำหรับจับโลหะ ซึ่งโลหะที่ถูกจับไว้สามารถปลดปล่อยออกมาได้โดยใช้สารชะและสารดูดซับชีวภาพ โดยสามารถนำกลับไปใช้ในกระบวนการได้อีก เทคโนโลยีนี้ไม่เพียงแต่มีประสิทธิภาพและมีค่าใช้จ่ายน้อยเท่านั้นแต่ยังเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อระบบนิเวศในขณะที่กระบวนการอื่นไม่ประสบผลสำเร็จ

คำสำคัญ : การดูดซับทางชีวภาพ; มวลชีวภาพ; สารดูดซับชีวภาพ; โลหะหนัก; กากตะกอน; น้ำเสีย

Key words : Biosorption; Biomass; Biosorbents; Heavy metals; Sludge; Wastewater

1. บทนำ

การปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมทางดิน ทางน้ำ และทางอากาศ ก่อให้เกิดความเสียหายและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและเป็นปัญหาสำคัญของโลกในปัจจุบัน โลหะหนักเข้าไปสู่สิ่งแวดล้อมได้หลายทาง แหล่งที่มาหลักๆ ของโลหะหนัก ได้แก่ โรงงานอุตสาหกรรม การใช้สารกำจัดศัตรูพืช การทำเหมืองแร่ สารเคมีจากอุตสาหกรรมเกษตร น้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน และวัสดุเหลือทิ้งต่างๆ เช่น วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานกระดาษและโรงงานผลิตอาหารสำเร็จรูป ปัจจุบันปริมาณของเสียจากบ้านเรือนและอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้น จึงมีการใช้ประโยชน์กากตะกอนของเสียที่บำบัดแล้ว อย่างไรก็ตาม ต้องมีความระมัดระวังในการใช้เนื่องจากโลหะหนักอาจสะสมอยู่ในกากตะกอนเป็นจำนวนมาก กากตะกอนน้ำเสียถูกนำมาใช้มากขึ้นในการเกษตรเพื่อเพิ่มธาตุอาหารพืชและอินทรีย์วัตถุให้กับดิน กากตะกอนน้ำเสียมักมีธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืช เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม แต่ในขณะเดียวกันก็มีสารที่เป็นพิษต่อสุขภาพด้วย เช่น โลหะหนัก และจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโทษ ดังนั้นการใช้กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียเพื่อปรับปรุงดินและเพิ่มธาตุอาหารให้แก่พืช ในขณะเดียวกันก็จะเพิ่มโลหะหนักลงไปในดินด้วยซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จากการศึกษาของ Teixeira, ST., Jose de Melo, W., and Silva, ET. (2005) พบว่า การใช้กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียเพื่อปรับปรุงสภาพดินที่เสื่อมแม้ว่ากากตะกอนจะมีโลหะหนัก เช่น นิกเกิล เหล็ก ทองแดง แมงกานีส สังกะสี ฯลฯ อยู่ในปริมาณน้อย แต่โลหะหนักเหล่านี้ก็อยู่ในสภาพที่เคลื่อนที่ได้ จึงมีแนวโน้มที่จะปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อมและการสะสมโลหะหนักลงในดิน ทำให้สภาพดินเสื่อม ผลผลิตพืชที่เป็นอาหารมีคุณภาพไม่เหมาะสมต่อการบริโภค โลหะหนักที่พบในพืชขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและการเคลื่อนย้ายในดิน คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินมีผลต่อการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน (Antanaitis, D., and Antanaitis, A., 2004)

โลหะหนักจากการทำอุตสาหกรรมสามารถเข้าสู่ระบบจ่ายน้ำและน้ำบริโภคได้ แม้แต่ฝนกรดซึ่งละลายดิน หิน สามารถปลดปล่อยโลหะหนักลงสู่แหล่งน้ำ ลำธารและน้ำใต้ดิน รวมทั้งการใช้กากตะกอนปรับปรุงดิน เนื่องจากน้ำตามธรรมชาติไหลเวียนไม่หยุดนิ่ง สิ่งปนเปื้อนจึงกระจายไปสู่ระบบนิเวศ แหล่งน้ำจึงเต็มไปด้วยแบคทีเรีย และสารที่เป็นพิษ สารพิษที่เป็นโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว โครเมียม พรอท ยูเรเนียม ซีลีเนียม สังกะสี สารหนู แคลเดียม เงิน ทอง และนิกเกิล ปัจจุบันโลหะหนักเป็นปัญหาของแหล่งน้ำและสิ่งแวดล้อม เนื่องจากโลหะหนักเป็นสารที่ไม่เสื่อมสลายทางชีวภาพ จากการทิ้งของเสีย มลภาวะจากดิน และน้ำ โลหะหนักสามารถเข้าไปอยู่ในสายใยอาหารได้ (food web) ปริมาณโลหะหนักที่เพิ่มขึ้นและมีระดับสูงขึ้นจนเกิดการรับและสะสมสารพิษในห่วงโซ่อาหาร เรียกว่า “bio-magnification” โลหะหนักความเข้มข้นต่ำก็เป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่นได้ (Alluri, HK., et al., 2007) โลหะหนักสามารถทำลายระบบประสาท ตับ กระจก และขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ที่สำคัญ นอกจากนี้ยังสามารถจับกับโปรตีนและป้องกันไม่ให้เกิดการจำลองดีเอ็นเอในการแบ่งตัวของเซลล์ การหลีกเลี่ยงอันตรายต่อสุขภาพจำเป็นต้องกำจัดเอาโลหะหนักปนเปื้อนในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือจากชุมชนที่อยู่อาศัยออกก่อนทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ

วิธีการกำจัดโลหะหนักปนเปื้อนในน้ำเสียอุตสาหกรรมมี 3 วิธี ได้แก่ วิธีทางกายภาพ วิธีทางเคมีและวิธีทางชีวภาพ กระบวนการกำจัดโลหะหนักออกขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น เทคโนโลยีของการบำบัดน้ำเสีย ความเข้มข้นและสถานะการออกซิเดชัน (oxidation state) ของโลหะ ความเป็นกรด-ด่างของน้ำ และกลไกการกำจัดโลหะ เทคนิคปัจจุบันที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ วิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี เช่น วิธีออสโมซิสย้อนกลับ (reverse osmosis) การแยกกรองด้วยไฟฟ้า (electrodialysis) การกรอง (filtration) การแลกเปลี่ยนประจุ (ion-exchange) การตกตะกอนด้วยวิธีทางเคมี (chemical precipitation) เช่น การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) ที่แรงสามารถกำจัด ตะกั่ว สังกะสี และทองแดงที่ปนเปื้อนในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถแตกตัวให้น้ำและออกซิเจน และยังพบว่าไอออนของทองแดง (Cu^{2+}) จะเพิ่มประสิทธิภาพการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Badmus, MAO., Audu, TOK. and Anyana, BU., 2007) โดยทั่วไปวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี มีข้อเสีย คือ ไม่สามารถกำจัดโลหะหนักออกได้อย่างสมบูรณ์ ต้องใช้ตัวทำปฏิกิริยา (reagent) และพลังงานมาก เกือบของโลหะหนักส่วนใหญ่ละลายน้ำได้เป็นสารละลายที่ไม่สามารถแยกด้วยวิธีทางกายภาพธรรมดา โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสารละลายมีไอออนของโลหะหนักละลายอยู่ 1-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลพลอยได้ในรูปของกากตะกอนที่เป็นพิษหรือของเสียอื่นต้องกำจัดทิ้งอย่างระมัดระวัง การตระหนักถึงมลพิษที่มีต่อสิ่งแวดล้อมและข้อกฎหมาย จึงมีการใช้วิธีทางชีวภาพเป็นทางเลือก ได้แก่ เทคโนโลยีดูดซับทางชีวภาพโดยใช้มวลชีวภาพธรรมชาติในการดูดซับและทำให้โลหะหนักไม่เคลื่อนที่ในสารละลาย เป็นกระบวนการกำจัดโลหะหนักที่ประหยัด เป็นมิตรกับระบบนิเวศ โลหะหนักที่ถูกดูดซับและสารดูดซับชีวภาพสามารถนำกลับไปใช้ในระบบได้ จุลชีพหรือจุลินทรีย์สามารถดูดซับโลหะหนักได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม ทางตรงโดยการสะสมสารพิษในสิ่งมีชีวิต (bioaccumulation) และ/หรือทางอ้อมโดยการดูดซับทางชีวภาพ (biosorption) ในการบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณมากพบว่า biosorption จะมีประสิทธิภาพดีกว่า bioaccumulation

ถ่านกัมมันต์ เป็นวัสดุที่นิยมใช้ในการดูดซับโลหะ เนื่องจากราคาถูกและมีความสามารถสูงในการดูดซับและมีการใช้อย่างกว้างขวาง คุณสมบัติของผิวหน้าถ่านกัมมันต์มีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการดูดซับ (Puziy, AM., et al., 2004) ผิวหน้าถ่านกัมมันต์ทำให้มีสภาพเป็นกรดด้วยกรดฟอสฟอริก การดูดซับไอออนของทองแดง แคดเมียม โคบอลต์ และตะกั่ว ขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายและความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักเหล่านั้นและแบบจำลองการดูดซับผิวหน้าเชิงซ้อน (surface complexation model, DDL)

2. หลักการของการดูดซับโลหะหนักโดยวิธีทางชีวภาพ

การดูดซับทางชีวภาพ (biosorption) หมายถึง การดูดซับโลหะหนักด้วยมวลชีวภาพ ซึ่งเป็นการกระทำทางเคมี ฟิสิกส์ ที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะหนัก/กลุ่มโลหะหนักที่มีประจุกับเซลล์จุลินทรีย์ เป็นวิธีทางชีวภาพใน

การควบคุมสิ่งแวดล้อม สามารถนำไปใช้เป็นทางเลือกในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อน มีข้อดีกว่าวิธีดั้งเดิมในด้านค่าใช้จ่าย ประสิทธิภาพ กากตะกอนที่เกิดจากวิธีทางเคมี/ชีวภาพ การเพิ่มสารอาหาร และสารดูดซับชีวภาพ (biosorbent) สามารถนำไปผ่านกระบวนการแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้และโลหะยังสามารถเอาออกมาจากสารดูดซับนั้นได้

กระบวนการดูดซับทางชีวภาพเกี่ยวข้องกับวัฏภาคของของแข็ง คือ สารดูดซับที่เป็นวัสดุชีวภาพและวัฏภาคของของเหลว (ตัวทำละลายที่ใช้โดยทั่วไปคือ น้ำ) ที่มีกลุ่มของตัวที่จะถูกดูดซับอยู่ สารซอร์เบต (sorbate) โลหะที่มีประจุ เป็นแรงดูดซับระหว่างสารดูดซับกับกลุ่มของตัวถูกดูดซับที่กระทำต่อกันและยึดติดด้วยกลไกที่แตกต่างกัน กระบวนการดูดซับจะดำเนินต่อเนื่องจนถึงจุดสมดุลระหว่างปริมาณกลุ่มโลหะที่ยึดติดกับสารดูดซับกับส่วนที่เหลืออยู่ในสารละลาย การที่มีโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับในสารละลายมาก แต่ไม่มีตำแหน่งหรือจุดที่จะจับกับอนุภาคของสารดูดซับเป็นการเกิดความไม่สมดุลระหว่างกระบวนการที่สร้างแรงผลักดันสำหรับกลุ่มตัวละลาย (โลหะ) โลหะหนักจะถูกดูดซับอยู่ที่ผิวของมวลชีวภาพ (biomass) ซึ่งเป็นสารดูดซับชีวภาพซึ่งมีประจุของโลหะอยู่ในสารละลาย (sorbate) จำนวนมาก การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสารดูดซับชีวภาพและโลหะหนักที่อยู่ในสารละลายนั้นศึกษาได้จากความจุของสารดูดซับชีวภาพ ซึ่งสามารถอธิบายด้วย adsorption isotherm ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณที่ถูกดูดซับกับปริมาณที่เหลืออยู่ในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ ณ จุดสมดุลโดยประสิทธิภาพของการดูดซับสามารถอธิบายโดยใช้แบบจำลองของ Freundlich and Langmuir isotherm (Hussein, H. et al., 2004)

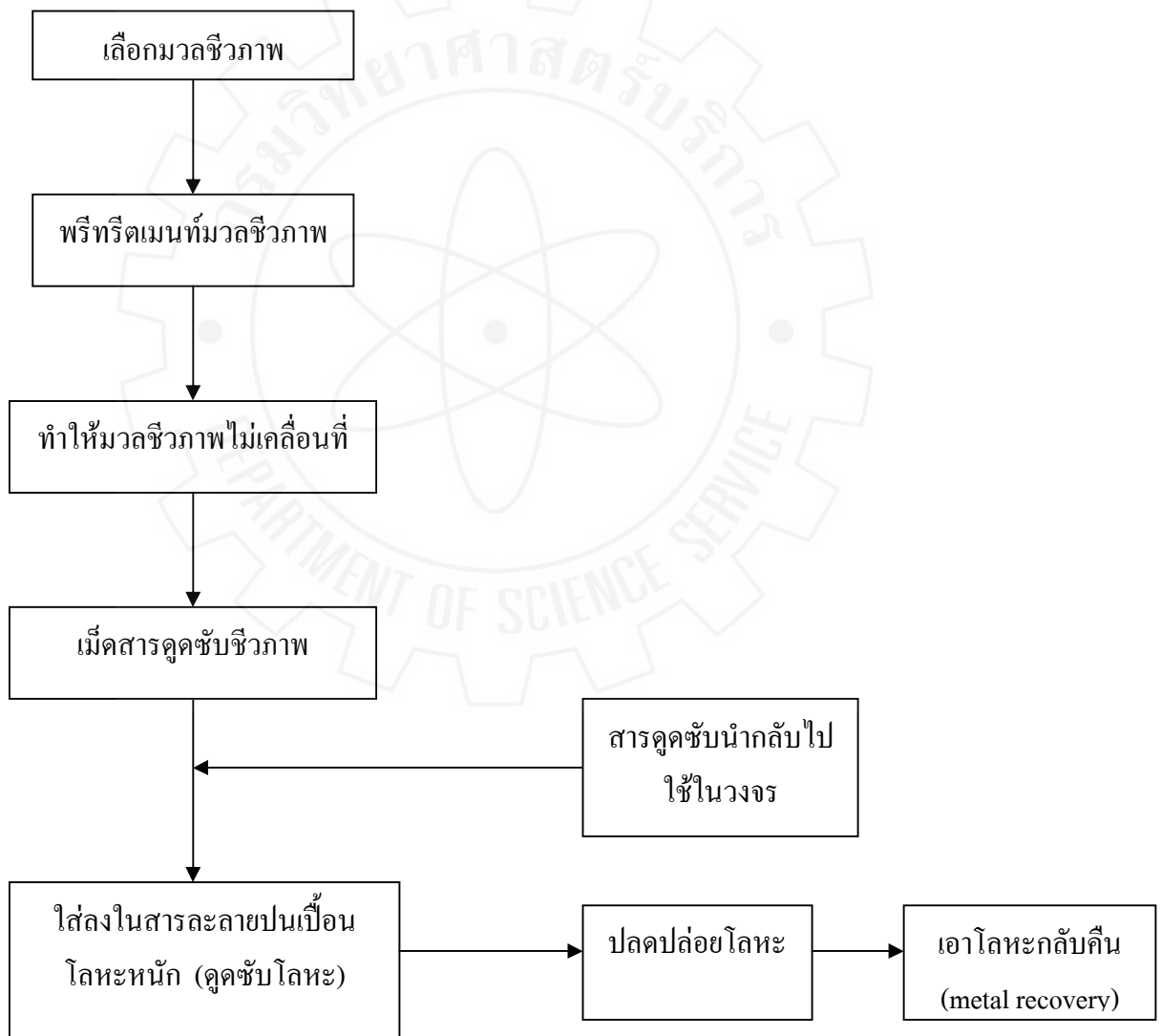
3. กลไกที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับโลหะหนักโดยวิธีทางชีวภาพ

โลหะหนักสามารถจับกับจุลินทรีย์ที่มีชีวิตด้วยกลไกต่างๆ กลไกที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับชีวภาพนี้มีการจำแนกโดยใช้เกณฑ์ เช่น กลไกที่จัดอยู่บนพื้นฐานเมแทบอลิซึมของเซลล์ จำแนกได้เป็นกลไกที่ขึ้นและไม่ขึ้นกับกระบวนการสร้างและสลาย (metabolism) หรือกลไกที่อยู่บนพื้นฐานของกลุ่มที่ถูกดูดซับ ซึ่งจัดว่าเป็นการสะสมในเซลล์/การตกตะกอนนอกเซลล์ (intracellular accumulation/extracellular precipitation) การสะสม/การตกตะกอนบนผิวหน้าเซลล์ (cell surface sorption/precipitation) การสะสมภายในเซลล์ (intracellular accumulation) ไอออนที่ถูกดูดซับจะถูกส่งผ่านเยื่อ (membrane) เช่นเดียวกับกลไกการรับ-ส่งไอออนของโพแทสเซียม แมกนีเซียมและโซเดียมผ่าน membrane การเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้นโดยการเร่งปฏิกิริยาด้วยจุลินทรีย์ เช่น การเกิดออกซิไดซ์ การรีดิวซ์ การเติม หรือ เอาออกของหมู่เมทิล โดยโลหะหนักจะยึดจับกับจุลินทรีย์ด้วยสารเชิงซ้อนนอกเซลล์ (extracellular complexation) ซึ่งกลไกที่เกี่ยวข้องของการดูดซับโลหะหนักโดยวิธีทางชีวภาพ (Alluri, HK., et al., 2007) ประกอบด้วย

3.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เป็นการกระทำทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic interaction) เช่น การดูดซับทางชีวภาพของทองแดงโดยแบคทีเรีย *Zooglea ramigera* และสาหร่าย *Chorella vulgaris*

3.2 การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) ได้แก่ การดูดซับทางชีวภาพของทองแดงโดยรา *Ganoderma lucidium* และ *Asperigillus niger*

3.3 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (complexation) ได้แก่ การดูดซับทางชีวภาพของทองแดงโดย *Zooglea ramigera* และ *Chorella vulgaris* ที่เกิดขึ้นโดยการผ่านการดูดซับและการเกิดพันธะโคออร์ดิเนตระหว่างโลหะกับหมู่อะมิโน (amino) หรือ หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl) ของผนังเซลล์ กลไกที่กล่าวมาแล้วนี้อาจเกิดขึ้นพร้อมๆ กันได้ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังแสดงกระบวนการดูดซับทางชีวภาพของโลหะหนัก (Alluri, HK., et al., 2007)

ตัวอย่างการดูดซับโลหะหนักทางชีวภาพในการบำบัดน้ำเสีย มีรายละเอียดดังนี้

1) การบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมโดยใช้ดินธรรมชาติ ประเทศที่พัฒนาแล้วและประเทศที่กำลังพัฒนาหลายประเทศ มีข้อบังคับเกี่ยวกับการบำบัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำก่อนทิ้ง วิธีการบำบัดมักใช้เทคนิคที่ง่าย และใช้วัสดุในท้องถิ่นเพื่อลดค่าใช้จ่าย จากงานวิจัย พบว่า แคลเซียมในรูปแคลเซียมออกไซด์ (CaO) หรือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) และคาร์บอเนตตัวอื่น เป็นวัสดุที่ใช้กำจัดโลหะหนักในน้ำเสียได้ ดังนั้นดินธรรมชาติที่มีแคลเซียมและคาร์บอเนตสูงสามารถนำมาใช้ได้ Tayim, HA., and Al-Yazouri, AH. (2005) ได้ศึกษาการใช้ดินในพื้นที่ที่มีคาร์บอเนตในเมืองอะบูดาบี (Abu Dhabi) ประเทศสาธารณรัฐอิมิเรต เพื่อดูดซับโลหะหนัก (ตะกั่ว สังกะสี เหล็ก ทองแดง และแมงกานีส) ออกจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมโดยการกรองผ่านดิน (soil filtration) น้ำที่บำบัดแล้วมีปริมาณโลหะหนักต่ำกว่าระดับที่กำหนดตามหน่วยงานพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของประเทศ ดินที่มีคาร์บอเนตสูงสามารถกำจัดโลหะหนักบางตัวออกจากน้ำเสียได้โดยการตกตะกอนเป็นเกลือคาร์บอเนต ความเป็นกรด-ด่าง (pH) มีผลต่อการดูดซับออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสรวมถึงการตกตะกอนของโลหะคาร์บอเนต การบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมโดยการกรองผ่านดินทำให้สามารถกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำได้ดีจนทำให้มีปริมาณโลหะหนักต่ำกว่าระดับที่กำหนด การกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีนี้มีประสิทธิภาพอยู่ระหว่าง 75-100 % และการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ของโลหะหนักจะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อค่า pH มากกว่า 9

2) โรงงานบำบัดน้ำเสีย (Wschod) ที่บำบัดน้ำเสียด้วยวิธีชีวภาพ-เชิงกล “Wschod” เป็นโรงงานบำบัดน้ำเสียที่มีหน่วยบำบัดเชิงกล (mechanical treatment unit) และหน่วยบำบัดชีวภาพ (biological treatment unit) หน่วยบำบัดเชิงกลจะทำการคัดกรอง ดักจับไขมันจารบี (grease) ด้วยทราย ซึ่งเป็นการกำจัดสิ่งสกปรกเบื้องต้น หน่วยบำบัดชีวภาพประกอบด้วยปฏิกรณ์ชีวภาพ (biological reactor) เป็นส่วนที่ทำให้สิ่งสกปรกที่ผ่านหน่วยบำบัดเชิงกลแล้วไหลขึ้นทั้งหมดเป็นระบบต่อเนื่อง ของเสียจากบ้านเรือนและจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานผลิตอาหาร แก๊ส และอุตสาหกรรมเคมี จะถูกส่งเข้าสู่โรงงานบำบัดน้ำเสีย “Wschod” กล่าวคือ หน่วยบำบัดเชิงกลจะคัดกรอง จับไขมันจารบี และทำให้ใสก่อน จากนั้นส่งเข้าสู่หน่วยบำบัดชีวภาพเพื่อบำบัด และทำให้ใสขึ้นอีก กากตะกอนที่ได้หลังจากการทำให้ใสถูกนำมาวิเคราะห์หาโลหะหนัก ได้แก่ สังกะสี ทองแดง ตะกั่ว แคดเมียม โครเมียม นิกเกิลและเงิน รวมทั้งหาโลหะหนักของของเสียโดยไม่ได้แยกของแข็งที่เป็นสิ่งสกปรกออก (raw sewage) จากการศึกษานี้ พบว่า สังกะสีและทองแดงมีปริมาณลดลงมากที่สุด หลังจากการบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพ สังกะสีถูกกำจัดออกไปในการบำบัดเชิงกล ปริมาณโลหะหนักของ สังกะสี ทองแดง ตะกั่วและแคดเมียมในกากตะกอนปฐมภูมิจากการบำบัดเชิงกล พบว่า มีค่าสูงกว่ากากตะกอนจากการบำบัดชีวภาพ ปริมาณตะกั่วและแคดเมียมในกากตะกอนปฐมภูมิและกากตะกอนจากการบำบัดชีวภาพ มีค่าต่างกันมากที่สุด (ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์) ขณะที่สังกะสีมีความแตกต่างน้อยที่สุด (8 เปอร์เซ็นต์)

ความเข้มข้นของโลหะหนักในกากตะกอนปฐุมภูมิ (หลังจากบำบัดเชิงกล) ลดลงดังนี้
สังกะสี > ทองแดง > โครเมียม > เงิน > ตะกั่ว > นิกเกิล > แคดเมียม และ
ในกากตะกอนชีวภาพ ลำดับความเข้มข้นลดลงดังนี้
สังกะสี > ทองแดง > ตะกั่ว > โครเมียม > เงิน > นิกเกิล > แคดเมียม

กระบวนการบำบัดทางชีวภาพมีความสำคัญมากในการกำจัดโลหะหนักออกจากของเสีย เนื่องจากทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักลดลงมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ จากการวิเคราะห์โลหะหนักหลังจากการบำบัดแล้วพบว่า มีค่าไม่เกินค่ายอมรับที่ให้มีได้ก่อนทิ้งลงสู่แหล่งน้ำและดิน เนื่องจากความเป็นพิษต่อจุลชีพและสามารถสะสมในสิ่งแวดล้อม ความเข้มข้นของโลหะหนักในกากตะกอนจึงเป็นตัวชี้วัดเบื้องต้นของคุณภาพกากตะกอน โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่เพาะปลูก โลหะหนักที่สามารถทำให้เกิดมลพิษในดินคือ แคดเมียม ทองแดง ปรอท ตะกั่ว สังกะสี โครเมียมและนิกเกิล โลหะเหล่านี้จะถูกดูดซับไว้ที่ผิวหน้าดินและพืชสามารถดูดเข้าไปสะสมในส่วนต่างๆ ได้ จากการวิเคราะห์โลหะหนักในโรงงานบำบัดน้ำเสีย (Wschod) ด้วยวิธีชีวภาพเชิงกล ในเมือง Gdansk ประเทศโปแลนด์ ในปี ค.ศ. 2000 และ 2001 นั้น พบว่า ความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นที่กำหนดในเมือง Gdansk อีกทั้งกากตะกอนปฐุมภูมิและกากตะกอนชีวภาพจากโรงงานบำบัดนี้สามารถนำไปใช้ในพื้นที่เพาะปลูกได้ (Kulbat, E., et al., 2003)

4. ชนิดของโลหะหนัก แหล่งที่พบ และผลกระทบของโลหะหนักต่อสุขภาพของมนุษย์ (Alluri, HK., et al., 2007)

โลหะหนัก (ปริมาณน้อย) ที่ปนเปื้อนในน้ำจะไม่สามารถตรวจวัดได้ โลหะหนักเหล่านี้ ได้แก่ สารหนู แคดเมียม ตะกั่ว แมงกานีส ปรอท และสังกะสี ซึ่งมีความคงทนและไม่สลายตัวเมื่ออยู่ในน้ำ จึงทำให้โลหะหนักเข้าไปสู่ห่วงโซ่อาหาร และเป็นอันตรายต่อมนุษย์ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 นอกจากนี้ยังมีโครเมียม (Chromium, Cr) โดยการปนเปื้อนของโครเมียมจะมาจากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า อุตสาหกรรมผลิตโครเมียม และโรงงานฟอกหนัง โครเมียมที่เป็นสารก่อมะเร็ง คือ Cr^{6+} หรือ Cr (VI) (hexavalent chromium) แม้ว่าโครเมียมจะมีปริมาณน้อยในน้ำก็ตาม ก็สามารถทำให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อมได้ มีการกำหนดปริมาณโครเมียมที่ยอมให้มีได้ เช่น ประเทศญี่ปุ่น กำหนดค่าสูงสุดของโครเมียมที่ยอมให้มีได้ในน้ำเสีย คือ 2 มก./ลบ.ม. (สำหรับโครเมียมทั้งหมด) และ 0.05 มก./ลบ.ม. (สำหรับ Cr (VI))

ตารางที่ 1 ชนิดของโลหะหนัก แหล่งที่มา และผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์

โลหะหนัก	แหล่งที่มา	ผลต่อสุขภาพ	ระดับที่อนุญาตให้ดื่มได้ (พีพีเอ็ม)
สารหนู	สารกำจัดศัตรูพืช สารกำจัดเชื้อรา การถลุงโลหะ	หลอดเลือดอักเสบ ผิวหนังอักเสบ	0.02
แคดเมียม	การเชื่อมโลหะ การชุบโลหะ สารกำจัดศัตรูพืช ปุ๋ย แบตเตอรี่ โรงปฏิกรณ์ปรมาณู	ทำลายตับ หลอดลม อักเสบ ระบบทางเดินอาหาร ไชกระดูก มะเร็ง	0.06
ตะกั่ว	โรงงานทำสี สารกำจัดศัตรูพืช ควัน ท่อไอเสียรถยนต์ การทำเหมือง การเผาถ่าน	ทำลายตับ ไต ระบบทางเดินอาหาร ในเด็กทำให้ปัญญาอ่อน	0.1
แมงกานีส	การเชื่อมโลหะ สารเติมในน้ำมันเชื้อเพลิง การผลิตโลหะผสมเหล็กและแมงกานีส	สูดดมหรือสัมผัสจะทำลายระบบประสาทส่วนกลาง	0.26
ปรอท	สารกำจัดศัตรูพืช แบตเตอรี่ อุตสาหกรรมกระดาษ	ทำลายระบบประสาท เป็นพิษต่อโพรโทพลาสซึม	0.01
สังกะสี	โรงกลั่น การผลิตทองเหลือง การชุบโลหะ ท่อประปา	ไอของสังกะสีกัดกร่อนผิวหนัง ทำลายเยื่อประสาท	15

ที่มา : Alluri, HK., et al. (2007)

5. ชนิดของมวลชีวภาพที่ใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนัก

ความสำเร็จของกระบวนการดูดซับ คือ การเตรียมสารดูดซับชีวภาพที่ดี โดยเริ่มจากการเลือกมวลชีวภาพชนิดต่างๆ นำไปผ่านกรรมวิธี (pretreatment) และทำให้ไม่มีการเคลื่อนที่ (immobilization) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจับโลหะหนัก โลหะหนักที่ถูกจับจะถูกเอาออกโดยกระบวนการคาย (desorption process) และสารดูดซับชีวภาพนั้นจะสามารถนำกลับมาใช้ในกรรมวิธีต่อไปได้ การเลือกมวลชีวภาพสำหรับดูดซับโลหะหนักเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญ มีมวลชีวภาพหลายชนิดถูกนำมาใช้ในการทำความสะอาดน้ำทิ้งอุตสาหกรรม เช่น มวลชีวภาพจากกากตะกอนกัมมันต์ (activated sludge) ของเสียจากการหมักของโรงงานอุตสาหกรรม (อาหาร นมเนย แป้ง) รวมทั้งสิ่งมีชีวิตตามธรรมชาติ ได้แก่ แบคทีเรีย ยีสต์ รา สาหร่าย เปลือกกุ้งและสาหร่ายทะเล นอกจากนี้ ยังมีแหล่งจุลินทรีย์อื่นที่ได้จากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เช่น ขนสัตว์ ข้าว ฟางข้าว จั่นมะพร้าว

ชา กาแฟ เปลือกวอลนัท ไยมะพร้าว ฝักถั่ว ฯลฯ ซึ่งเป็นแหล่งของมวลชีวภาพที่ดี อย่างไรก็ตาม สาหร่ายทะเล แบคทีเรีย ยีสต์ และราได้ผ่านการทดสอบสำหรับใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนักและให้ผลที่น่าพอใจ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ชนิดของสาหร่าย รา ยีสต์ และแบคทีเรียที่สามารถดูดซับโลหะหนัก (Alluri, HK., et al., 2007)

ชนิดของสาหร่าย ราและยีสต์	โลหะหนักที่ถูกดูดซับ
<u>สาหร่าย</u>	
<i>Chlorella emersonii</i>	แคดเมียม
<i>Sargassum muticum</i>	แคดเมียม
<i>Ascophyllum sargassum</i>	ตะกั่ว แคดเมียม
<i>Ulva reticulate</i>	ทองแดง (Cu (II))
Brown sea weeds	โครเมียม
<i>Ecklonia species</i>	ทองแดง (Cu (II))
<u>รา</u>	
<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	นิกเกิล (Ni (II)) ตะกั่ว (Pb (II))
<i>Aspergillus niger</i>	แคดเมียม
<i>Aspergillus fumigatus</i>	เออร์เนียม (Ur (VI))
<i>Aspergillus terreus</i>	ทองแดง
<i>Penicillium chrysogenum</i>	ทอง
<u>ยีสต์</u>	
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	ยูเรเนียม แคดเมียม เมทิลเมอร์คิวรี ปรอท
<i>Kluyveromyces fragilis</i>	(Hg(II))
	แคดเมียม
<u>แบคทีเรีย</u>	
<i>Bacillus polymyxa</i>	ทองแดง
<i>Bacillus coagulans</i>	โครเมียม (Cr(VI))
<i>Eschereria coli</i>	ปรอท ทองแดง โครเมียม นิกเกิล
<i>Pseudomonas species</i>	โครเมียม (Cr (VI)) ทองแดง (Cu (II))
	แคดเมียม(Cd (II)) นิกเกิล (Ni (II))

5.1 สาหร่ายทะเล (sea weeds) สาหร่ายทะเลเป็นพืชใต้น้ำทะเลกลุ่มใหญ่กลุ่มหนึ่ง ข้อดีของสาหร่ายทะเล คือ มีพื้นที่ผิวกว้าง สะดวกต่อการผลิตอนุภาคดูดซับชีวภาพ เพื่อให้เหมาะสมกับกระบวนการดูดซับ สาหร่ายทะเลมีจุดหรือตำแหน่งที่ทำหน้าที่ยึดจับโลหะหนักที่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนประจุบวกและลบ ตำแหน่งที่จับโลหะหนักซึ่งเป็นประจุบวกของเซลล์สาหร่ายประกอบด้วย carboxyl, amine, imidazole, phosphate, sulphate, sulfhydryl, hydroxyl และกลุ่มที่ทำหน้าที่ทางเคมีในรูปของเซลล์โปรตีนและน้ำตาล สาหร่ายสีน้ำตาลเป็นสารดูดซับชีวภาพที่ดีมาก ผันงเซลล์ประกอบด้วย ฟุคอยดิน (fucoidin) และกรดอัลจินิก (alginic acid) ซึ่งกรดอัลจินิกจะมีตำแหน่งที่เป็นประจุลบของ carboxylate ion และ sulphate ion เพื่อยึดจับโลหะหนักเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกลาง (Alluri, HK., et al., 2007)

5.2 ราและยีสต์ (fungi and yeast) ราเป็นจุลินทรีย์ชนิดหนึ่งที่มีทั้งชนิดเซลล์เดี่ยว (ยีสต์) และหลายเซลล์ (ราที่มีรูปร่างเป็นเส้นใย) ราส่วนใหญ่มีการเจริญเติบโตเป็นแบบเส้นสายหรือเส้นใย ผันงเซลล์ของราเรียงทับซ้อนกันเป็นชั้นบางๆ (multi-laminate) คิดเป็น 90% ของน้ำหนักแห้ง ประกอบด้วยอะมิโนและนอน-อะมิโนพอลิแซ็กคาไรด์ (amino or non-amino polysaccharides) ผันงเซลล์ของรามีพอลิแซ็กคาไรด์และไกลโคโปรตีน (glycoprotein) เป็นจำนวนมากและมีหมู่ที่ดูดซับโลหะหนักได้หลายชนิด เช่น amine, imidazole, phosphate, sulphate, sulfhydryl และ hydroxyl สำหรับ *Saccharomyces cerevisiae* สามารถดูดซับโลหะหนักที่เป็นพิษ คือ ยูเรเนียม ซึ่งเป็นสารกัมมันตรังสีปนเปื้อนในสารละลายได้ รวมถึงโลหะหนักอื่นๆ เช่น ซีลีเนียม (selenium) พลวง (antimony) และปรอท (mercury) (Alluri, HK., et al., 2007) มวลชีวภาพจากราได้จากกระบวนการผลิตกรดแลคติก (lactic acid) จากน้ำทิ้งของแป้งมันฝรั่งโดยใช้รา *Rhizopus arrhizus* 36017 และ *Rhizopus oryzae* 2062 (Huang, LP., et al., 2005) โดยพบว่า ความเข้มข้นของแป้งประมาณ 20 กรัมต่อลิตร ที่มีค่า pH เท่ากับ 6.0 และอุณหภูมิ 30 °C เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการหมักโดยให้กรดแลคติก 0.85 – 0.92 กรัมต่อกรัม และ fungal biomass 1.5 – 3.5 กรัมต่อลิตร ในเวลา 36 – 48 ชั่วโมง ซึ่งรา *Rhizopus arrhizus* 36017 จะมีความสามารถในการผลิตกรดแลคติกและ fungi biomass ได้มากกว่าและน้อยกว่ารา *Rhizopus oryzae* 2062 ที่ภายใต้สภาวะคล้ายกัน

5.3 แบคทีเรีย (bacteria) แบคทีเรียเป็นจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็ก ประกอบด้วยเซลล์เพียงเซลล์เดียว โดยมีพื้นที่ผิวสำหรับจับโลหะหนักและความแข็งแรงในการยึดจับต่างกัน ผันงเซลล์ของแบคทีเรียและไซยาโนแบคทีเรียส่วนใหญ่ประกอบด้วยเพปทิโดไกลแคน (peptidoglycan) ซึ่งเป็นโซ่ตรงไคแซ็กคาไรด์เอ็น-อะซิetylกลูโคซามีน (disaccharide N-acetylglucosamine), กรดเบต้า-1,4-เอ็น-อะซิetylมูรามิก (β -1,4-N-acetylmuramic acid) ต่อกับโซ่เพปไทด์ กลุ่มแบคทีเรียดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิดขึ้นกับตำแหน่งบนผิวหน้า ที่จับโลหะ แรงยึดจับต่อไอออน และกลไกการยึดติด Yan-bin, X., Hua-hua, X., and Shui-yu, S. (2005) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียม (CrVI) ปนเปื้อนด้วยระบบกรองชีวภาพไร้อากาศ (anaerobic biofilter system) โดยใช้กากตะกอนที่มีจุลินทรีย์หลายชนิดรวมทั้งแบคทีเรีย 2 สายพันธุ์ พบว่า สามารถลดปริมาณโครเมียม (CrVI) จาก 60 มก./ลิตร เป็น

ต่ำกว่า 0.5 มก./ลิตรได้ในเวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งในระบบไร้อากาศอาจทำให้ Cr (VI) ถูกรีดิวส์ไปเป็น Cr(III)ในรูปของตะกอน โครเมียมไฮดรอกไซด์บนผิวหน้าของจุลินทรีย์ ตัวอย่างของการการดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียด้วยแบคทีเรีย มีดังนี้

1) การดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียด้วย *Pseudomonas sp.* โลหะหนักที่ถูกดูดซับ ได้แก่ โครเมียม (Cr (VI)) ทองแดง (Cu (II)) แคดเมียม (Cd (II)) และนิกเกิล (Ni (II)) ที่อยู่ในน้ำเสียโดยใช้มวลชีวภาพของ *Pseudomonas sp.* 4 สายพันธุ์และทำการประเมินประสิทธิภาพของตัวดูดซับชีวภาพจากแบบจำลอง Langmuir and Freundlich model พบว่า โลหะหนักจะถูกดูดซับได้อย่างรวดเร็วภายใน 10 นาทีแรกและแต่ละสายพันธุ์มีความสามารถในการต้านและสะสมไอออนของโลหะหนักต่างกัน กล่าวคือ ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของตัวดูดซับชีวภาพเรียงลำดับจากมากไปน้อย ดังนี้ Ni (II) > Cd (II) > Cu (II) > Cr (VI) (Hussein, H. et al., 2004) โดย Cd (II) และ Ni (II) สามารถถูกดูดซับโดย *Pseudomonas sp.* ได้มากถึง 500 และ 556 มิลลิกรัมต่อกรัมของมวลชีวภาพ ตามลำดับ ขณะที่ Cu(II) และ Cr(VI) จะถูกดูดซับ 8.9-238 มิลลิกรัมต่อกรัมของมวลชีวภาพ Cr (VI) และ Cu (II) สามารถแยกออกจากมวลชีวภาพที่ดูดซับได้สูง 38 % และ 93 % ของความเข้มข้นที่มีในน้ำทิ้ง ตามลำดับ (การที่ Cu (II) สามารถแยกออกจากมวลชีวภาพที่ดูดซับได้สูงถึง 93 % นั้นต้องมี Cr (VI) อยู่ด้วย) ส่วน Cd (II) และ Ni (II) สามารถแยกออกจากมวลชีวภาพที่ดูดซับได้ระหว่าง 35- 88 % และการดูดซับโลหะหนักหลายชนิดในระบบน้ำทิ้งด้วยแบคทีเรียจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าระบบที่มีโลหะหนักอยู่เพียงชนิดเดียว

2) การเตรียมและการทำให้มวลชีวภาพไม่เคลื่อนที่ (Pretreatment of Biomass/ Immobilization of Biomass) สารดูดซับชีวภาพเตรียมจากการนำมวลชีวภาพมาผ่านกระบวนการเบื้องต้น (pretreat) ด้วยวิธีที่แตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโลหะหนักที่จะถูกดูดซับ และตัวแปรอื่น ได้แก่ จำนวนตำแหน่งที่ดูดซับบนวัสดุดูดซับชีวภาพ การเข้าถึงตำแหน่งนั้นๆ สถานะสภาพทางเคมี และความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่ดูดซับกับโลหะหนัก โดยมวลชีวภาพที่มีขนาดใหญ่จะถูกทำให้เป็นอนุภาคที่ละเอียดหรือมีขนาดเล็กแล้วนำไปทรिटต์ต่อไป (ตามแต่ละวิธี) เช่น การใช้ความร้อน การล้างด้วยสารซักฟอก กรด ด่าง หรือ เอนไซม์ วิธีที่ใช้ความร้อนและล้างด้วยสารซักฟอกจะเป็นการเพิ่มกลุ่มยึดเหนี่ยวกับโลหะหนัก ในขณะที่วิธีการใช้เอนไซม์เป็นการทำลายส่วนที่ไม่ต้องการและเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ (Alluri, HK., et al., 2007 ; Atkinson, BW., Bux, F., and Kasan, HC.,1998)

มวลชีวภาพที่มาจากจุลินทรีย์ประกอบด้วยอนุภาคเล็กที่มีความหนาแน่นน้อย (low density) ความแข็งแรงเชิงกลต่ำ (poor mechanical strength) ความแข็งแกร่งน้อย (little rigidity) แต่มีความแข็งพอที่จะทนต่อแรงดัน (withstand the application pressures) ความสามารถรับการคงอยู่ของน้ำได้ (water retention capacity) แม้ว่าผ่านวงจรการทำให้กลับคืนสภาพก็ยังคงดูดซับโลหะได้มากและเร็ว เนื่องจากการไม่เคลื่อนที่ของ

มวลชีวภาพจึงมีอายุการใช้งานที่ดีกว่า ง่ายและสะดวกต่อการใช้เมื่อเปรียบเทียบกับมวลชีวภาพอิสระ ซึ่งเสื่อมสภาพทางชีวภาพได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องทำให้มวลชีวภาพที่อยู่ในสภาพไม่เคลื่อนที่ก่อนที่จะนำไปใช้เป็น สารดูดซับชีวภาพ ซึ่งมีเทคนิค ได้แก่

1. การดูดซับของสารดูดซับชีวภาพที่มีต่อตัวค้ำจุนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย (inert support) เช่น ถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็น inert support ในการเกิดเป็นไบโอฟิล์ม (biofilm) โดยจุลินทรีย์ *Enterobacter aerogens*
2. การดักจับสารดูดซับชีวภาพไว้ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ (polymeric matrix) ซึ่งพอลิเมอร์ที่ใช้ คือ calcium alginate, polyacrylamide, polysulfone และ polyethylenimine
3. การเกิดพันธะโคเวเลนต์ของสารดูดซับชีวภาพกับสารประกอบตัวนำ (vector compounds)
4. การเกิด cross-linking ของเซลล์จุลินทรีย์

เทคนิคที่ 3 และ 4 เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กับการทำให้ตัวดูดซับชนิดสาหร่ายอยู่ในสภาพที่ไม่เคลื่อนที่ โดยพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ใช้กับมวลชีวภาพในการดูดซับโลหะหนัก แสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 พอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ใช้กับมวลชีวภาพในการดูดซับโลหะหนัก (Alluri, HK., et al., 2007)

พอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ไม่เคลื่อนที่	ชนิดของมวลชีวภาพ	โลหะที่ถูกดูดซับ
Calcium alginate	<i>Chryseomonas luteola</i> <i>Laminaria digitata</i> <i>Bacillus cereus</i> <i>Luffa cylindrical</i>	ทองแดง นิกเกิล ทองแดง แคลเมียม ตะกั่ว ตะกั่ว แคลเมียม
Polyurethane	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> <i>Ascophyllum nodosum</i> <i>Asperigillus niger</i> <i>Phanerochaete chryosporium</i> <i>Aspergillus terreus</i> <i>Rhizopus delemar</i>	เออโรเนียม ทองแดง ทองแดง ทองแดง แคลเมียม ตะกั่ว เหล็ก โครเมียม นิกเกิล โคบอลต์ ทองแดง นิกเกิล
Silica	Algasorb <i>Saccharomycete</i> <i>Asperigillus niger</i>	ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว เออโรเนียม ทองแดง สังกะสี เหล็ก นิกเกิล ตะกั่ว โครเมียม ทองแดง สังกะสี แคลเมียม
Polyacrylamide	<i>Citrobacter</i> <i>Pseudomonas maltophilia</i>	เออโรเนียม แคลเมียม ตะกั่ว ทอง

6. การนำเอาโลหะหนักกลับคืน

การทำให้ตัวดูดซับชีวภาพที่ใช้แล้วคืนกลับมาใช้ใหม่เป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดค่าใช้จ่ายของกระบวนการดูดซับโลหะหนักได้ วิธีการคือ ต้องปลดปล่อยโลหะหนักที่ดูดซับออกจากตัวดูดซับ และนำตัวดูดซับชีวภาพนั้นไปใช้ในกระบวนการดูดซับโลหะหนักต่อไป โดยการสกัดโลหะหนักออกจากสารละลายในรูปที่เข้มข้น ตัวดูดซับชีวภาพที่นำกลับมาใช้ใหม่จะมีประสิทธิภาพในการการดูดซับโลหะหนักใกล้เคียงกับตัวดูดซับชีวภาพเดิม โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือทำลายมวลชีวภาพของตัวดูดซับ สารที่ใช้ในการนำโลหะหนักกลับคืน ได้แก่ กรดเกลือ (HCl, H₂SO₄, HNO₃) ซึ่งถูกใช้ในการดึงโลหะหนักออกจากสารดูดซับชีวภาพหรือใช้กรดอินทรีย์ เช่น กรดมะนาว (citric acid), กรดน้ำส้ม (acetic acid), กรดแลคติก (lactic acid) และใช้สารเชิงซ้อน เช่น EDTA, thiosulfate และอื่นๆ

การดูดซับชีวภาพของโลหะหนัก (ทองแดง แคลเซียม สังกะสี นิกเกิล และตะกั่ว) ด้วยถ่านกัมมันต์ซึ่งเป็นมวลชีวภาพที่ประกอบด้วยจุลินทรีย์หลายชนิด ส่วนใหญ่คือ แบคทีเรีย รา ยีสต์ สาหร่าย และโปรโตซัว ซึ่งหาได้ง่ายจากโรงงานบำบัดน้ำเสีย โดยปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับทองแดง แคลเซียม สังกะสี นิกเกิลและตะกั่วของถ่านกัมมันต์ คือ pH และความเข้มข้นของไอออนโลหะหนัก การยึดจับระหว่างโลหะหนักกับโปรตอนในกระบวนการดูดซับจะมากขึ้นเมื่อ pH = 2 การปลดปล่อยโปรตอนจากมวลชีวภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของมวลชีวภาพเพิ่ม ซึ่งเป็นการยืนยันว่ามีการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างโปรตอนกับไอออนของโลหะหนักที่เกิดขึ้นในกระบวนการดูดซับโลหะหนัก ปริมาณมวลชีวภาพดูดซับที่ใช้คำนวณได้จากแบบจำลอง Langmuir and Freundlich model โดยข้อมูลที่ได้จากการคำนวณและการทดลองจะเห็นได้ว่า กลไกของการดูดซับเป็นแบบการแลกเปลี่ยนของประจุ กล่าวคือ เป็นการคายโลหะหนักออกจากตัวดูดซับชีวภาพด้วยการใช้ตัวชะ (eluent) ทำให้สามารถนำมวลชีวภาพกลับมาใช้ได้ใหม่ได้ในวงจรของการดูดซับและการคายโลหะหนัก กรดเกลือ และ EDTA เป็นตัวดูดซับโลหะหนักที่ดีสำหรับ ทองแดง แคลเซียม สังกะสี นิกเกิล และตะกั่ว การใช้ EDTA นั้น มวลชีวภาพสามารถนำกลับมาใช้ได้อีกในวงจรของการดูดซับและการคายโลหะหนัก ในขณะที่การใช้กรดเกลือ จะทำให้มวลชีวภาพไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้ (Hammami, A., et al., 2006)

นอกจากตัวดูดซับชีวภาพที่เป็นจุลินทรีย์ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น พืชก็สามารถดูดซับโลหะหนักได้เช่นกัน เช่น โกงกางใบใหญ่ (*Rhizophora mucronata*) ที่เป็นพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำสามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักอยู่ได้ พรสุดา ฆานูการ์ณ และ กนกพร บุญส่ง (2005) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของโกงกางใบใหญ่ในการบำบัดน้ำเสียที่มีตะกั่วและสังกะสี โดยประเมินความสามารถในการบำบัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม โกงกางใบใหญ่โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการเติมตะกั่วและสังกะสีและชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมโลหะหนัก ใช้เวลากักเก็บน้ำเสีย 3.5 วัน และปล่อยให้ระบบแห้ง 3.5 วัน พบว่า ชุดทดลองที่เติมตะกั่วและสังกะสี 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีเปอร์เซ็นต์การบำบัดตะกั่วและไนโตรเจนสูงสุด ส่วนชุดทดลองที่เติมตะกั่วและสังกะสี

20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีเปอร์เซ็นต์การบำบัดสังกะสีสูงสุด และการบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมดสูงสุดจะพบในชุดควบคุมที่เติมตะกั่วและสังกะสี 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อความเข้มข้นของตะกั่วและสังกะสีเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมดลดลง ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า โกงกางใบใหญ่สามารถเอาโลหะหนักและธาตุอาหารออกจากน้ำเสียได้

อัลมัส (ulmus) ซึ่งเป็นพืชที่ขึ้นอยู่ทั่วไปตามถนนและสวนสาธารณะในประเทศอิหร่าน ใบและเถาของอัลมัสสามารถใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียได้ เช่น โครเมียม (Cr) ในน้ำเสียที่อยู่ในรูปของ Cr (III) และ Cr (VI) ซึ่งเป็นโลหะหนักอันตราย โดย Cr (VI) จะอยู่ในรูปของโครเมตไอออน (CrO_4^{2-}) และไดโครเมตไอออน ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) (Gholami, F., et al., 2006) ซึ่งการดูดซับ Cr (VI) ออกจะมีประสิทธิภาพมากกว่า 85% การดูดซับโลหะหนักของใบอัลมัสจะถึงจุดสมดุลที่เวลา 60 นาที และ pH ที่เหมาะสมเท่ากับ 6 การดูดซับใบโลหะหนักทางใบของอัลมัสจะให้ค่า COD สูงขึ้นมากกว่าการใช้เถาจากการเผาใบที่ 550°C เป็นเวลา 30 นาที และตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักโดยพืช ได้แก่ ความเข้มข้นของโครเมียม เวลา pH และโลหะเบาที่มีในสารละลายตัวอื่น (เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ และ K^+)

เส้นใยของพืชทางการเกษตร เช่น ปอ กระเจี๊ยบ และยาสูบ มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนของโลหะหนักออกจากน้ำเสียได้ แต่เส้นใยของไม้ไม่มีประสิทธิภาพต่ำกว่า นักวิจัยพยายามเพิ่มประสิทธิภาพของความจุโลหะหนักในการดูดซับโดยการดัดแปลงทางเคมี แต่อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ก็ยังคงมีค่าใช้จ่ายสูงและมีปัญหา เช่น การซึมของสารประกอบอินทรีย์ที่มีสี กลิ่น หรือมลพิษอื่นจากการใช้สารเคมีที่มีพิษ อาจกล่าวได้ว่า การเอาโลหะหนักออกประกอบด้วย 4 กลไก คือ การดูดซึม การดูดซับ การแลกเปลี่ยนประจุ และคีเลชัน (chelation เป็นการกำจัดโลหะหนักโดยใช้สารบางอย่างเข้าไปจับกับโลหะหนัก ซึ่งสารที่นิยมใช้ในการทำ chelation คือ EDTA) และกลไกการกำจัดโลหะหนักเป็นไปได้มากที่สุด คือ การแลกเปลี่ยนประจุ Han, JS., Park, JK., and Min, SH. (2000) ได้ศึกษาความจุของการดูดซับโลหะหนักในน้ำ (Ni, Cu, Zn และ Cd) ด้วยเส้นใยของหญ้าอัลฟัลฟา (alfalfa) และสน (juniper) เพื่อประเมินผลความเป็นกรด-ด่าง การแข่งขันกันระหว่างประจุ และการรบกวนที่เกิดจากแคลเซียม โดยใช้อัลฟัลฟาและสนที่ผ่านการบดละเอียดและนำมาผ่านการดัดแปลงทางเคมีเพื่อเพิ่มความจุในการดูดซับ พบว่า ความจุในการดูดซับโลหะหนักขึ้นอยู่กับสมดุลของความเป็นกรด-ด่างของสารละลายที่อุณหภูมิห้อง และ pH ต่ำกว่า 3 เส้นใยของหญ้าอัลฟัลฟาและสนสามารถดูดซับโลหะหนักได้น้อย เนื่องจากการแข่งขันระหว่างไอออนของไฮโดรเจนกับโลหะหนักที่ตำแหน่งในการดูดซับ อัตราการดูดซับโลหะหนักมีค่าคงที่ในเวลาเริ่มต้น 15 นาที แล้วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นจะถึงจุดสูงสุดของการดูดซับ การเปลี่ยนแปลงอัตราการดูดซับของโลหะหนักนี้มาจากกระบวนการดูดซับที่ต่างกัมนั่นคือ จะเกิดกลไกการดูดซับโลหะหนักแบบแลกเปลี่ยนประจุก่อนแล้วตามด้วยการดูดซับทางเคมี การดูดซับโลหะหนักหลายชนิดที่อยู่รวมกันในสารละลายจะดูดซับได้น้อยกว่าสารละลายที่มีโลหะหนักชนิดเดียว ซึ่งสอดคล้องกับการดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียด้วย *Pseudomonas* sp. เส้นใยอัลฟัลฟามีความจุในการดูดซับ

โลหะหนักได้สูงกว่าเส้นใยสน(ยกเว้นแคดเมียมไอออน) การดัดแปลงทางเคมีของเส้นใยโดยซัลโฟเนชัน (sulfonation) จะเพิ่มความจุในการดูดซับโลหะหนักของเส้นใยสนได้มากกว่า 250 เปอร์เซ็นต์

7. บทสรุป

การกำจัดโลหะหนักปนเปื้อนในน้ำเสียสามารถทำได้โดยใช้วิธีทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ซึ่งวิธีทางชีวภาพมีจุลินทรีย์อยู่หลายชนิดที่สามารถดูดซับโลหะหนักจากสิ่งแวดล้อมเข้าไปในตัวมันและกำจัดโลหะหนักออกมาได้ เช่น สาหร่าย ยีสต์ แบคทีเรีย และรา วิธีทางชีวภาพที่ใช้จุลินทรีย์ในการกำจัดโลหะหนักจัดเป็นทางเลือกที่นิยมใช้ในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียของโรงงานที่มีการพัฒนาอุตสาหกรรมไปอย่างรวดเร็วและไม่กระทบถึงความเป็นพิษของโลหะหนัก การใช้เทคโนโลยีชีวภาพในการดูดซับโลหะหนักด้วยสารดูดซับชีวภาพเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่เป็นประโยชน์และน่าสนใจกว่าวิธีดั้งเดิม เทคโนโลยีนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความจุของตัวดูดซับชีวภาพ ประสิทธิภาพการดูดซับ การเลือกจับโลหะหนักของสารดูดซับชีวภาพ ความยากง่ายในการกำจัดโลหะหนัก ราคา และการดำเนินการ แม้ว่าเทคโนโลยีนี้จะมีข้อเสีย คือ การอิมตัวเร็วของตัวดูดซับชีวภาพและการควบคุมทางชีวภาพของลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับจากมวลชีวภาพก็ตาม แต่ก็มีข้อดีหลายประการ เช่น ลดค่าใช้จ่ายและกากตะกอนลง มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง สามารถนำเอาโลหะหนักกลับคืนจากตัวดูดซับชีวภาพได้และการทำให้ตัวดูดซับชีวภาพคืนสภาพโดยการนำกลับไปใช้ได้ใหม่ ในกระบวนการดูดซับโลหะหนักทางชีวภาพ ซึ่งภาครัฐ เอกชน และประชาชนควรตระหนักและช่วยกันระมัดระวังผลเสียที่จะเกิดกับสิ่งแวดล้อม โดยการพัฒนาเทคโนโลยีที่ประหยัดและเป็นมิตรต่อระบบนิเวศหรือสิ่งแวดล้อมร่วมกัน

เอกสารอ้างอิง

- พรศุดา พานุกาญจน์ และ กนกพร บุญส่ง. ผลของความเข้มข้นของโลหะหนักต่อประสิทธิภาพการบำบัดของพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมโคงกางใบใหญ่. In **31st Congress on Science and Technology of Thailand, 2005** 18-20 October 2005; Suranaree University of Technology. 3 หน้า.
- Alluri, HK., et al. Biosorption: An eco-friendly alternative for heavy metal removal. **African Journal of Biotechnology**, 2007, vol. 6, no. 25, p. 2924-2931.
- Antanaitis, D., and Antanaitis, A. Migration of heavy metals in soil and their concentration in sewage and sewage sludge. **EKOLOGIJA**, 2004, no. 1, p. 42-45.
- Atkinson, BW., Bux, F., and Kasan, HC. Considerations of application of biosorption technology to remediate metal-contaminated industrial effluents. **Water South African**, 1998, vol. 24, no. 2, p. 129-135.
- Badmus, MAO., Audu, TOK., and Anyata, BU. Removal of heavy metal from industrial wastewater using hydrogen peroxide. **African Journal of Biotechnology**, February, 2007, vol. 6, no. 3, p. 238-242.
- Gholami, F., et al. Removal of chromium (VI) from aqueous solution by *Ulmus* leaves. **Iran. J. Environ. Health. Sci. Eng.**, 2006, vol. 3, no. 2, p. 97-102.
- Han, JS., Park, JK, and Min, SH. Removal of toxic heavy metal ions in runoffs by modified alfafa and juniper. In **1st World Congress of the International Water Association**, 2000. July 03-07; Paris:France. 2000, 4 pp.
- Hammamni, A., et al. Biosorption of heavy metals by activated sludge and their desorption characteristics. **Journal of Environmental management**, 2007, vol. 84, no. 4, p. 419-426.
- Huang, LP., et al. Simultaneous saccharification and fermentation of potato starch wastewater to lactic acid by *Rhizopus oryzae* and *Rhizopus arrhizus*. **Biochemical Engineering Journal**, 2005, vol. 23, p. 265-276.
- Hussein, H., et al. Biosorption of heavy metals from waste water using *Pseudomonas* sp.. **Electronic Journal of Biotechnology**, April, 2004, vol. 7, no. 1, p. 38-46.
- Kulbat, E., et al. Heavy metals removal in the mechanical-biological wastewater treatment plant “Wschod” in Gdank. **Polish Journal of Environmental Studies**, 2003, vol. 12, no. 5, p. 635-641.
- Puziy, AM., et al. Modeling of heavy metal ion binding by phosphoric acid activated carbon. **Applied Surface Science**, 2004, vol. 221, p. 421-429.

- Tayim, HA, and Al-Yazouri, AH. Industrial wastewater treatment using local natural soil in Abu Dhabi, U.A.E. **American Journal of Environmental Sciences**, 2005, vol. 1, no. 3, p. 190-193.
- Teixeira, ST., Melo, WJ., and Sila, ET. Heavy metals in a degraded soil treated with sludge from water treatment plant. **Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)**, Sep./Oct., 2005, vol. 62, no. 5, p. 498-501.
- Yan-bin, XU., Hua-hua, X. and Shi-yu, S. Study on anaerobic treatment of wastewater containing hexavalent chromium. **Journal of Zhejiang University SCIENCE**, 2005, vol. 6B, no. 6, p. 574-579.

