

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความหมายของโลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง ธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไปและมีเลขอะตอม 23-92 อยู่ในคาบที่ 4-7 ตัวอย่างเช่น แคดเมียม สังกะสี นิเกิล โครเมียม เหล็ก แมงกานีส ฯลฯ โลหะหนักถือว่าเป็นโลหะปริมาณน้อย (trace metals) ซึ่งส่วนมากจะอยู่ในกลุ่มทรานสิชัน (transition elements) นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่น ๆ ที่อยู่ในกลุ่มของธาตุรีเพรสเซนต์ (representative elements) คือ ตะกั่ว สารหนู พลวง และซีลีเนียม โลหะหนักสามารถก่อให้เกิดปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมในแหล่งน้ำ และดินตะกอน เนื่องจากมีความคงตัว ไม่สลายตัวโดยกระบวนการทางธรรมชาติ ทำให้บางส่วนสามารถสะสมอยู่ในสิ่งมีชีวิตและถ่ายทอดตามห่วงโซ่อาหารได้ (Logan & Feltz, 1985) ซึ่งผลทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ถ้าได้รับในปริมาณที่มากเกินไป การปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำมีสาเหตุเกิดจากธรรมชาติ เช่น ภูเขาไฟระเบิด การผุพังของหิน และจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เกษตรกรรม เป็นต้น นอกจากนี้ยังอาจเกิดจากปัจจัยร่วม เช่น ในฤดูมรสุม น้ำฝนที่ไหลผ่านชุมชนโดยเฉพาะบริเวณที่มีการคมนาคมหนาแน่น จะมีปริมาณโลหะหนักในน้ำและดินตะกอนในบริเวณนั้นมาก โลหะหนัก ที่พบในแหล่งน้ำส่วนใหญ่มีแหล่งกำเนิดมาจากกิจกรรมของมนุษย์ (Browne et al., 1982)

แหล่งกำเนิดโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม

ภารดี คะลา (2541) กล่าวถึง แหล่งกำเนิดของโลหะหนักที่พบในสิ่งแวดล้อมมาจาก 7 แหล่งด้วยกันคือ

1. การสกัดล้างจากแผ่นดิน โลหะหนักที่ได้จากแหล่งนี้ถือว่าเป็นค่า background level ของบริเวณนั้น ๆ ซึ่งพบว่าพื้นที่ใดเป็นแหล่งแร่ของโลหะหนักก็จะพบว่าน้ำในบริเวณนั้นมีโลหะหนักชนิดนั้น ๆ สูงด้วย
2. ยานพาหนะ เป็นแหล่งใหญ่ในการเกิดการสะสมตัวของตะกั่วในบรรยากาศ และในแหล่งชุมชน
3. การรั่วออกจากขยะ การรั่วของโลหะหนักจากขยะจะมีผลต่อแหล่งน้ำบนบกหรือ

4. การเผาไหม้เชื้อเพลิง การผลิตปูนซีเมนต์และอิฐบล็อก เชื้อเพลิงประเภทถ่าน น้ำมัน จะมีโลหะหนักบางตัวสูง เช่น สังกะสี แคดเมียม นิเกิล ในการผลิตซีเมนต์ นอกจากนั้นยังพบว่า บริเวณรอบ ๆ ที่มีสิ่งก่อสร้างประเภทอิฐจะมีโลหะหนักสะสมอยู่ด้วยค่อนข้างสูง

5. อุตสาหกรรมถลุงแร่โลหะ ในระหว่างการถลุงแร่จะมีโลหะหนักปนออกมากับน้ำทิ้ง

6. การใช้โลหะและสารประกอบโลหะ ในอุตสาหกรรม เช่น ใช้เกลือของโครเมียมในการฟอกหนัง ใช้สังกะสีในการทำท่อ เป็นต้น ก็เป็นที่มาของโลหะหนักสู่แหล่งน้ำ

7. โรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น พบอลูมิเนียมจากโรงงานทำภาชนะพวกอลูมิเนียม และโรงงานอัลลอยด์ สารหนูจากโรงงานผลิตสารฆ่าแมลง แคดเมียมจากโรงงานชุบโลหะ โรงงานทำสีและโรงงานผลิตเม็ดพลาสติก โครเมียมจากโรงงานชุบโลหะ โรงงานสีและสารฆ่าแมลง ตะกั่วจากโรงงานแบตเตอรี่ โรงงานสี และโรงกลั่นน้ำมัน แมงกานีสจากโรงงานสี โรงงานผลิตแบตเตอรี่ แห่งและโรงงานอัลลอยด์ นิเกิลจากโรงงานชุบโลหะและโรงงานอัลลอยด์ พลวงจากโรงงานสี โรงย้อมสีและสารฆ่าแมลง เงินจากอุตสาหกรรมการผลิตและล้างฟิล์ม และโรงงานชุบโลหะ สังกะสีจากโรงงานชุบโลหะและโรงงานทำสี เป็นต้น

ผลกระทบของโลหะหนักต่อมนุษย์

ความเป็นพิษของโลหะหนักเกิดจากการรบกวนกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์โดยกระบวนการที่สำคัญที่สุด คือ การรบกวนการทำงานของระบบเอนไซม์ โลหะหนักที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง เช่น ทองแดง โปรอท และเงิน จะยึดจับกลุ่ม อะมิโน(NH_2), อิมิโน(NH) และซัลไฟดริล (SH) ของเอนไซม์และขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ที่มีหมู่เหล่านี้เป็นองค์ประกอบสำคัญ กลไกที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ โลหะหนักบางชนิด เช่น แคดเมียม ทอง ทองแดง โปรอท และตะกั่ว สามารถยึดกับเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้คุณสมบัติในการเป็นตัวกัน และตัวควบคุมในการลำเลียงสารต่าง ๆ ของเยื่อหุ้มเซลล์เปลี่ยนแปลงไป (กิตติ เอกอำพัน, 2528)

แคดเมียม (Cadmium)

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี แคดเมียมเป็นธาตุที่มีเลขอะตอม (atomic numbers) 48 น้ำหนักอะตอม (atomic weight) 112.40 ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) 8.65 จุดหลอมละลาย (melting point) 320.9 องศาเซลเซียส จุดเดือด (boiling point) 767 องศาเซลเซียส มีสีเงิน แกมขาว น้ำหนักเบา อ่อน ดัดงอได้ง่าย ทนต่อการกัดกร่อน

ความเป็นพิษ มีผลกระทบต่อทางเดินอาหาร ทำให้อาเจียน และอาจถึงตายได้ถ้ามีการสะสมในร่างกายในปริมาณที่สูง มีผลกระทบทางเดินหายใจ ทำให้เกิดการระคายเคือง หลอดลม ปอด จมูก และคอ มีอาการปวดศีรษะ อ่อนเพลีย หนาวสั่น มีไข้ เกิดเป็นโรค อีไดอิด มีผลต่อระบบเลือดที่เข้าสู่หัวใจ ความดันโลหิตสูง มีผลต่อระบบการสร้างเม็ดเลือด และการเกิดโรคโลหิตจาง มาตรฐานน้ำทิ้ง ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่ยอมให้มีได้ในน้ำที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม ต้องไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร (สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อม, 2534)

นิเกิล (Nickel)

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี นิเกิลเป็นธาตุที่มีเลขอะตอม (atomic numbers) 28 น้ำหนักอะตอม (atomic weight) 58.70 ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) 8.90 จุดหลอมละลาย (melting point) 1445 องศาเซลเซียส จุดเดือด (boiling point) 2914 องศาเซลเซียส มีสีเงินขาว อ่อน ดัดงอได้ง่าย

ความเป็นพิษ โดยทั่วไปจะไม่ถูกดูดซึมผ่านทางเดินอาหาร เป็นสารชดนำทำให้เกิดโรคมะเร็งในช่องจมูก โพรงจมูก และปอด จะยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ เมื่อเข้าสู่ร่างกาย นิเกิลส่วนใหญ่จะไปสะสมตามกระดูกสันหลัง สมอง ปอดและหัวใจ พิษแบบเฉียบพลันจะทำให้มีอาการปวดหัว มึนงง คลื่นไส้ อาเจียน ปวดและแน่นหน้าอก ไอแห้ง ๆ หายใจขาดช่วง ตัวเขียวเพราะขาดออกซิเจน อ่อนเพลียมาก มีเลือดออกในปอด มาตรฐานน้ำทิ้งปริมาณความเข้มข้นของนิเกิลที่ยอมให้มีได้ในน้ำที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม ต้องไม่เกิน 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร (สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อม, 2534)

สังกะสี (Zinc)

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี สังกะสีเป็นธาตุที่มีเลขอะตอม (atomic numbers) 30 น้ำหนักอะตอม (atomic weight) 65.40 ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) 7.13 จุดหลอมละลาย (melting point) 420 องศาเซลเซียส จุดเดือด (boiling point) 907 องศาเซลเซียส มีสีเทาปนฟ้า น้ำหนักเบา อ่อน ดัดงอได้ง่าย

ความเป็นพิษ มีผลกระทบต่อระบบทางเดินอาหาร ทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้อง ท้องร่วง ตะคริว มีผลต่อระบบการเจริญเติบโต ทำให้เกิดอาการกระดูกอ่อน ร่างกายไม่เจริญเติบโต มาตรฐานน้ำทิ้งปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีที่ยอมให้มีได้ในน้ำที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม ต้องไม่เกิน 5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร (สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อม, 2534)

การดูดซับโลหะหนักทางชีวภาพ (Biosorption of heavy metals)

ความหมายของการดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption definition)

การดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption) นั้น Volesky (1990) ได้กล่าวถึงการศึกษาวิจัยของ Rothstein และคณะ ในปี ค.ศ. 1948 พบว่ายูเรเนียมทำปฏิกิริยากับผิวเซลล์ยีสต์เกิดเป็นคอมเพล็กซ์ (complex) กับหมู่ใด ๆ ที่เกี่ยวข้องกับขบวนการเมตาโบลิซึมของกูลโคส ต่อมาในปี ค.ศ. 1949 Ruchhoff ได้นำเอาหลักการดังกล่าวไปใช้ในการดึงพอลิเนียมจากน้ำโดยใช้ activated sludge ซึ่งพบว่าประมาณ 60% ของแร่กัมมันตภาพรังสีถูกดูดเกาะกับผิวเซลล์ได้ ซึ่งจากการศึกษาต่อ ๆ มาพบว่าไม่เฉพาะเซลล์ที่มีชีวิตเท่านั้นที่จะดูดซับสารกัมมันตภาพรังสี แต่เซลล์ที่ตายแล้ว (dead cell) ก็ยังสามารถดูดเกาะสารติดผิวเซลล์ได้ คล้ายกับเป็นตัวยึดเกาะทางชีวภาพ (biosorbent)

Shumate & Strandberg (1985) ได้กล่าวว่า Biosorption หมายถึง การเกิดปฏิกิริยาเคมี-กายภาพ ที่ไม่จำเพาะเจาะจง ระหว่างโลหะหนักหรือสารกัมมันตภาพรังสี กับ องค์ประกอบของผิวเซลล์ของสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิด

Gadd & White (1993) ได้กล่าวว่า Biosorption หมายถึงการดูดซับโดยชีวมวลทั้งที่มีชีวิตและไม่มีชีวิตโดยกระบวนการทางกายภาพและเคมี เช่น การดูดซับหรือการแลกเปลี่ยนประจุ

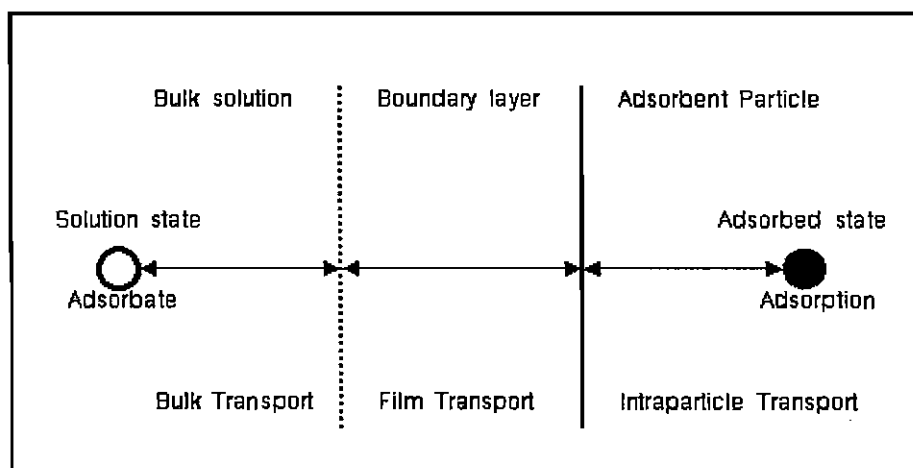
Kapoor & Viraraghavan (1995) ได้กล่าวว่า Biosorption หมายถึงความสามารถในการดูดกลืนโลหะหนักหรือสารกัมมันตภาพรังสี ออกจากสารละลายได้ในความสามารถต่าง ๆ กัน ของแบคทีเรีย รา ยีสต์ และสาหร่าย ซึ่งเกิดจากสิ่งมีชีวิตเล็ก ๆ รวมทั้งคุณสมบัติเฉพาะของโลหะนั้น ๆ หรือเกิดการเกาะกลุ่มรวมกันกับชีวมวล ในลักษณะการสะสมทางชีวภาพ (bioaccumulation)

ดังนั้นในความหมายของการดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption) หมายถึง การดูดกลืนโลหะหนักหรือสารกัมมันตภาพรังสี โดยชีวมวลที่มีชีวิตและไม่มีชีวิตโดยกระบวนการดูดซับโลหะหนัก อาจเกิดได้จากกระบวนการ Complexation, Coordination, Chelation of metals, Adsorption Ion-exchange และ Inorganic microprecipitation (Volesky, 1990)

กลไกการดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption mechanism)

กลไกการดูดซับเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของไอออนโลหะหนักจากสารละลายสู่ผิวของ biosorbent (Weber, 1985) ขั้นตอนแรก เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนโลหะหนักจากสารละลาย ไปยังผิวฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบ biosorbent เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเพราะมีการผสมหรือเกิดความปั่นป่วน (Gadd, 1988) ขั้นตอนที่สองเป็นการแพร่ไอออนโลหะหนักผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของ biosorbent

และขั้นตอนที่สาม เป็นการดูดซับระหว่างไอออนโลหะหนักกับ active sites บนผิว biosorbent เกิดขึ้นเร็วมาก (Tsezos et al., 1988) ซึ่งสามารถสรุปกลไกดังกล่าวได้ดังภาพ 1



ภาพ 1 ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับในกระบวนการ Biosorption
(McKay et al., 1983)

กระบวนการดูดซับโลหะหนักโดยชีวมวลที่ไม่มีชีวิตเป็นการดูดซับที่ไม่ขึ้นกับกระบวนการเมตาโบลิซึมของเซลล์ ซึ่งการดูดซับโลหะเกิดขึ้นบริเวณผิว biosorbent โดยอาจเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนโลหะหนัก ที่บริเวณหมู่เคมีต่าง ๆ เช่น การใช้กากส้ม อุ่น สับปะรด อินทผาลัม แอปเปิ้ล แครอท ซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตน้ำผลไม้มาทำการดูดซับโลหะหนัก พบว่ากลไกการดูดซับไอออนโลหะหนักเกิดจากการแลกเปลี่ยนประจุ ซึ่งกากของเสียเหล่านี้มีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชัน (functional groups) คาร์บอกซิลิก(carboxylic)ฟีนอลลิก (phenolic) ซึ่งมีอยู่ในเซลลูโลสเมตริก (cellulosic matrix) หรือวัสดุที่เกี่ยวข้องกับเซลลูโลส เช่น ลิกนิน (lignin) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ซึ่งประกอบไปด้วยสารชีวโมเลกุล (biomolecules) เช่น โปรตีน (proteins) พอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharides) และ เอกซ์ตราเซลลูลาร์โพลิเมอร์ (extracellular polymers) มีโครงสร้างของ SO_4^{2-} , RCOO^- , PO_4^{3-} ซึ่งมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนโลหะหนัก (Beveridge & Murray, 1980; Tobin et al., 1984; Barkley, 1991; Lee et al., 1998; Senthilkumaar et al., 2000; Nasernejad et al., 2004) หรืออาจมีหลายกระบวนการร่วมกัน เช่น การดูดซับทางกายภาพ (adsorption) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (complexation) การประสาน (coordination) การตกตะกอนสารอนินทรีย์ (inorganic microprecipitation) การคีเลตชัน (chelation) เป็นต้น (Volesky, 1990)

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

อิทธิพลของขนาดอนุภาค (Effect of particle size)

Gupta et al. (2003) ได้ศึกษาอิทธิพลขนาดของเถ้าจากชานอ้อย (bagasse fly ash) ซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมน้ำตาลต่อการดูดซับ แคดเมียมและนิเกิล โดยศึกษาขนาดอนุภาค เท่ากับ 100-150, 150-200 และ 200-250 ไมครอน พบว่า ตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจะดูดซับได้ดีกว่า ขนาดใหญ่ โดยวัสดุดูดซับขนาด 100-150 ไมครอน สามารถดูดซับแคดเมียมได้ 99% แต่ในการ ทดลองเลือกใช้ขนาด 200-250 ไมครอน เนื่องจากสามารถแยกตัวดูดซับได้ง่าย

Benguella & Benaissa (2002) ได้ศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคของไคติน (crab shell) ต่อการดูดซับแคดเมียม โดยศึกษาขนาดอนุภาค 6 กลุ่มคือ <0.20, 0.20-0.63, 0.63-1.25, 1.25-2.50, 2.50-4.10 และ 4.10-6.30 มิลลิเมตร พบว่า การเพิ่มหรือลดขนาดอนุภาคมีผลต่อความสามารถในการดูดซับแคดเมียมและการเข้าสู่สมดุลการดูดซับคือ ขนาด<0.20 มิลลิเมตร ความสามารถในการดูดซับแคดเมียม 13.57 mg/g และการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ 1 ชั่วโมง ขณะที่ ขนาด 4.10-6.30 มิลลิเมตร ความสามารถในการดูดซับลดลงเท่ากับ 7.5 mg/g และการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ 4 ชั่วโมง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าขนาดอนุภาคไคตินมีผลต่อจลนศาสตร์ของการดูดซับแคดเมียม

Gand & Weixing (1998) ได้ศึกษาอิทธิพลขนาดของก้านดอกทานตะวัน (sunflower stalks) ต่อการดูดซับโลหะหนักทองแดง แคดเมียม สังกะสีและโครเมียม โดยศึกษาขนาดอนุภาค เท่ากับ 25-45 และ >60 เมช พบว่า ขนาดของตัวดูดซับมีผลต่อการดูดซับไอออนของโลหะหนัก โดยที่ตัวดูดซับขนาดเล็กจะสามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักได้ดีกว่าตัวดูดซับที่มีขนาดใหญ่

อิทธิพลของความปั่นป่วน (Effect of agitation speed)

Benguella & Benaissa (2002) ศึกษาอิทธิพลของความปั่นป่วนต่อการดูดซับแคดเมียมของไคติน (crab shell) โดยศึกษาความเร็วรอบ 0, 100, 250, 400, 500, 1000 และ 1250 รอบต่อนาที พบว่า ความเร็วที่เหมาะสมในการแพร่ไอออนแคดเมียมเข้าสู่ผิวไคตินเท่ากับ 400 รอบต่อนาที โดยดูดซับแคดเมียมได้เท่ากับ 12.5 mg/g และยังพบอีกว่าความเร็วรอบที่ต่ำหรือสูงเกินไปมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง เช่น ความเร็วรอบ 1250 ต่อนาที ดูดซับได้เพียง 5.54 mg/g ซึ่งอธิบายได้ว่าไอออนแคดเมียมไม่มีเวลาพอที่จะจับกับหมู่ฟังก์ชันบริเวณผิวหน้าไคติน

Demirbas et al. (2002) ได้ศึกษาอิทธิพลของความปั่นป่วนต่อการดูดซับนิเกิล ของเปลือกถั่ว (hazelnut shell) โดยศึกษาความเร็วรอบเท่ากับ 50, 100, 150 และ 200 รอบต่อนาที พบว่าเมื่อความเร็วรอบเท่ากับ 50 ความสามารถในการดูดซับนิเกิลจะต่ำ และผลของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นเท่ากับ 200 รอบต่อนาที

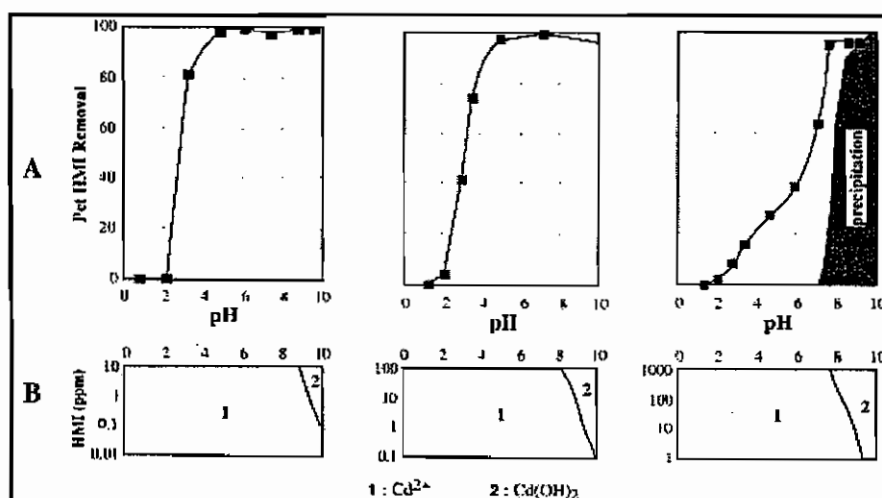
Singh et al. (1998) ได้ศึกษาอิทธิพลของความปั่นป่วนต่อการดูดซับแคดเมียมของ hematite โดยศึกษาความเร็วรอบเท่ากับ 50, 75, 100 และ 125 รอบต่อนาที พบว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจาก 50 ถึง 125 รอบต่อนาที มีผลทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 1.36 เป็น 1.68 $\mu\text{mol/g}$ ซึ่งอธิบายได้ว่าอัตราของความปั่นป่วนที่เพิ่มขึ้นทำให้ชั้น boundary layer ลดลง และการแพร่ไอออนแคดเมียมเข้าสู่ผิวหน้าวัสดุดูดซับได้มากขึ้น

อิทธิพลของความเป็นกรดต่าง (Effect of pH)

Boonamnuyvitaya et al. (2004) ได้ศึกษาอิทธิพลของ pH ต่อการดูดซับแคดเมียมของกากกาแฟและดิน โดยศึกษาค่า pH 1-9 พบว่า ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่า pH และสูงสุดที่ pH 7-9 ขณะที่ค่า pH ต่ำสามารถดูดซับแคดเมียมได้น้อย ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ที่แข่งขันกับไอออนแคดเมียมส่งผลในการปิดบังการดูดซับบนผิวตัวดูดซับ

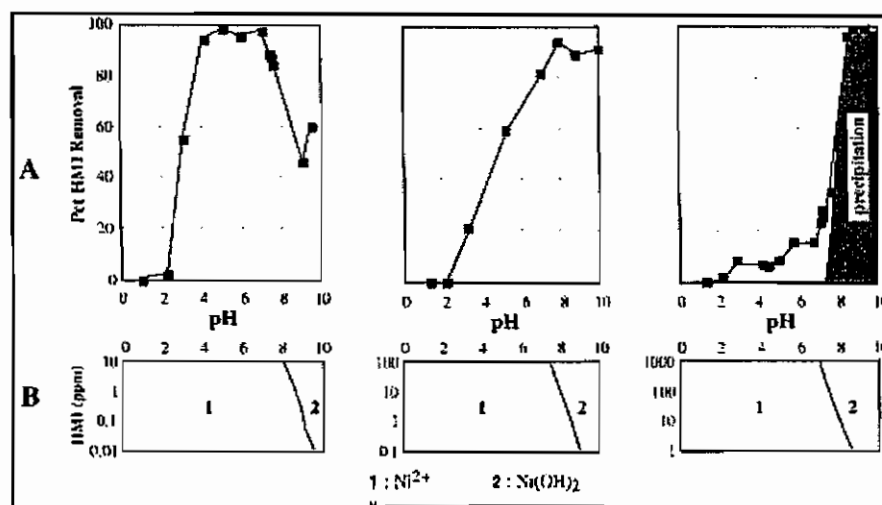
Romos et al. (1997) ได้ศึกษาการดูดซับแคดเมียมโดย Activated carbon พบว่าปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของแคดเมียมคือค่า pH ของสารละลายเมื่อค่า pH ของสารละลายเปลี่ยนแปลง โลหะหนักแคดเมียมก็จะเปลี่ยนรูปตามเกิดเป็น Cd^{2+} , $\text{Cd}(\text{OH})^+$, $\text{Cd}(\text{OH})_2$ และ $\text{Cd}(\text{OH})_3$ แต่ในช่วง pH ประมาณ 8 แคดเมียมจะเริ่มตกตะกอนเป็น $\text{Cd}(\text{OH})_2$

Gaballah & Kilbertus (1998) ได้ศึกษาอิทธิพลของ pH ต่อการดูดซับแคดเมียม นิเกิล และสังกะสี ของเปลือกต้นสนที่ผ่านการปรับสภาพ (modified pine bark) โดยศึกษาค่า pH 0-10 ความเข้มข้นเริ่มต้นโลหะหนักเท่ากับ 10, 100 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่า pH และยังพบอีกว่า แคดเมียมจะตกตะกอนเป็น $\text{Cd}(\text{OH})_2$ เมื่อ $\text{pH} > 8$ ส่วนนิเกิลจะเริ่มตกตะกอนเป็น $\text{Ni}(\text{OH})_2$ $\text{pH} > 7$ และสังกะสีจะเริ่มตกตะกอนเป็น $\text{Zn}(\text{OH})_2$ $\text{pH} > 6$ แสดงดังภาพ 2-4



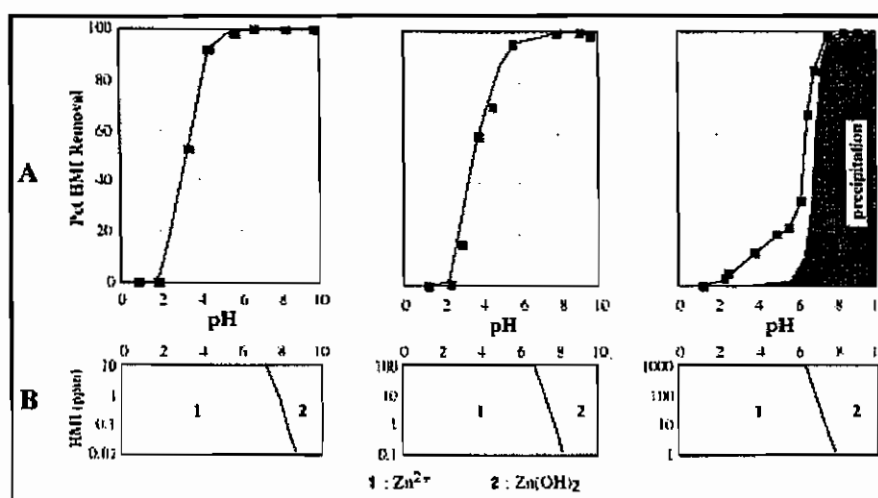
ภาพ 2 ผลของพีเอชต่อการดูดซับแคดเมียมโดย modified pine bark.

(Gaballah & Kilbertus, 1998)



ภาพ 3 ผลของพีเอชต่อการดูดซับนิเกิลโดย modified pine bark.

(Gaballah & Kilbertus, 1998)



ภาพ 4 ผลของพีเอชต่อการดูดซับสังกะสีโดย modified pine bark.

(Gaballah & Kilbertus, 1998)

อิทธิพลของอุณหภูมิ (Effect of temperature)

Chubar et al. (2004) ศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิระหว่าง 15-50 องศาเซลเซียส ต่อการดูดซับ ทองแดง สังกะสี และนิเกิล ด้วยชีวมวล (Coke) พบว่า ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของชีวมวลไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว

Martins et al. (2004) ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิระหว่าง 5-30 องศาเซลเซียส ต่อการดูดซับแคดเมียม และสังกะสี ด้วยมอส (*Fontinalis antipyretica* moss) พบว่า การดูดซับแคดเมียมไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ส่วนสังกะสีเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

Aksu (2001) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับแคดเมียมของสาหร่ายสีเขียว (*C. vulgaris*) โดยศึกษาอุณหภูมิระหว่าง 20-50 องศาเซลเซียส พบว่า การดูดซับเกิดได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โดยสามารถดูดซับแคดเมียมได้ 62.3 mg/g และยังพบอีกว่าการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 20 ถึง 50 องศาเซลเซียส ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงจาก 62.3 mg/g เหลือเพียง 34.9 mg/g

Ajmal et al. (2000) ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับนิเกิลของเปลือกส้ม (*Citrus reticulata*) โดยศึกษาที่อุณหภูมิระหว่าง 30-50 องศาเซลเซียส พบว่า การดูดซับนิเกิลจะสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น การดูดซับเกิดได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยสามารถดูดซับนิเกิลได้ 158 mg/g ซึ่งอธิบายได้ว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดการขยายของโพรงหรือกระตุนผิวหน้าของตัวดูดซับทำให้ความสามารถในการดูดซับนิเกิลเพิ่มขึ้น

อิทธิพลของไอออนโลหะชนิดอื่นที่อยู่ร่วมกัน (Effect of co-metals)

การดูดซับไอออนโลหะหนักในสารละลายที่มีของไอออนโลหะหนักตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปอยู่ร่วมกัน อาจแสดงผลในทางเสริมฤทธิ์ (Synergistic) หรือยับยั้งฤทธิ์ (Antagonistic) ซึ่งเกิดจากการแข่งขันกันจับกับ active site ที่ผิวเซลล์ หรือการลำเลียงผ่านเยื่อเมมเบรนของไอออนโลหะหนัก (Ting & Teo, 1994)

Saeed et al. (2005) ศึกษาผลกระทบของแคดเมียม ทองแดง นิเกิล และสังกะสี ที่มีผลต่อการดูดซับตะกั่วของเปลือกถั่วดำ (*Cicer arietinum*) ศึกษาทั้งแบบ binary และ ternary พบว่าโลหะหนักดังกล่าวไม่มีผลกระทบต่อการดูดซับตะกั่ว ซึ่งอธิบายได้ว่าตะกั่วมีขนาดไอออนที่ใหญ่กว่าทำให้ดูดซับบนพื้นผิวเปลือกถั่วดำได้มากกว่า

Iqbal & Edyvean (2004) ได้ศึกษาผลของการเสริมฤทธิ์ (Synergistic) หรือยับยั้งฤทธิ์ (Antagonistic) ของการดูดซับไอออนตะกั่ว สังกะสี และทองแดง ในสารละลายที่มีของไอออนโลหะหนักตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปอยู่ร่วมกันด้วยเชื้อรา (*Phanerochaete chrysosporium*) จากการศึกษพบว่า การดูดซับตะกั่วลดลง 6.35% ส่วนทองแดงลดลง 30.22% และสังกะสีลดลง 50.82% ซึ่งการดูดซับสังกะสี และทองแดง ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับตะกั่วซึ่งลดลงเพียงเล็กน้อยอาจเป็นผลมาจาก ตะกั่วมีน้ำหนักอะตอม (atomic weight) และค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity) ที่สูงกว่าทำให้ดูดซับบนเชื้อราได้มากกว่าทองแดง และสังกะสี

Benguella & Benaissa (2002) ศึกษาผลกระทบของทองแดง และสังกะสี ที่มีผลต่อการดูดซับแคดเมียมของไคติน (crushed crab shells) พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของทองแดงทำให้การดูดซับแคดเมียมลดลงส่วนไอออนของสังกะสีไม่มีผลต่อการดูดซับแคดเมียม ซึ่งการยับยั้งการดูดซับแคดเมียมของทองแดงนี้มีผลมาจากทองแดงมีรัศมีไอออนที่เล็กกว่าทำให้สามารถผ่านเข้าไปในโพรงขนาดเล็กได้มากกว่าทำให้ดูดซับบนพื้นผิวไคตินได้มากกว่าเช่นเดียวกัน

Lee et al. (1998) ศึกษาผลกระทบของ นิเกิล และตะกั่ว ที่มีผลต่อการดูดซับทองแดงของกากแอปเปิล (apple residues) จากการศึกษพบว่า เมื่ออัตราส่วนของทองแดงและนิเกิลเท่ากับ 1:1 การดูดซับทองแดงลดลงเพียงเล็กน้อยและเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเป็น 1:10 การดูดซับทองแดงลดลงอย่างมาก ส่วนการดูดซับทองแดงและตะกั่วพบว่า เมื่ออัตราส่วนของทองแดงและตะกั่วเท่ากับ 1:1 เป็นผลทำให้การดูดซับทองแดงลดลง 36% ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตะกั่วมีความสามารถในการแข่งขันกับทองแดงในการดูดซับบนกากแอปเปิลได้ดีกว่านิเกิล

Ting & Teo (1994) ศึกษาการใช้ยีสต์ (*Saccharomyces cerevisiae*) ดูดซับแคดเมียม และสังกะสี พบว่า สังกะสีไม่มีผลต่อการดูดซับแคดเมียม และการลำเลียงเข้าสู่เซลล์ เนื่องจาก ไอออนโลหะทั้งสองจับกับหมู่เคมีบนผนังเซลล์ยีสต์ที่ต่างกัน โดยแคดเมียม จับกับหมู่เคมีพวก Sulfur Donor ขณะที่ สังกะสีชอบจับกับหมู่เคมีที่เป็นพวก Oxygen/Nitrogen Donor นอกจากนี้ แคดเมียม และสังกะสีต่างมีความสัมพันธ์ต่อพื้นที่ผิวเซลล์ได้ต่างกัน

Norris & Persson (1977) ศึกษาผลกระทบของไอออนสังกะสี นิกเกิล แมงกานีส แมงกานีสและแคดเมียม ที่มีผลต่อการดูดซับแคดเมียมและโครเมียมของยีสต์ (*Saccharomyces cerevisiae*) พบว่าไอออนของสังกะสี นิกเกิล และแมงกานีส จะยับยั้งการดูดซับโคบอลต์ ส่วน ไอออนของแคลเซียมและแมงกานีส จะยับยั้งการดูดซับโลหะแคดเมียม ซึ่งการยับยั้งการดูดซับ โคบอลต์และแคดเมียมนี้มีผลจากไอออนโลหะที่มีขนาดใกล้เคียงกับโคบอลต์และแคดเมียม จะไป แย่งจับกับ active site ที่ผิวเซลล์

การสกัดไอออนโลหะหนัก (Desorption of heavy metals)

เพื่อให้ขบวนการ biosorption มีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ biosorbent จะต้องเวียนนำ กลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง ดังนั้นการสกัดโลหะออกจาก biosorbent และนำ biosorbent กลับมาใช้ใหม่สามารถทำได้โดยใช้สารละลายกรด หรือสารละลายเกลือชนิดต่าง ๆ (Butter, 1998; Tungtakanpoung, 2002)

ซึ่งวัสดุชีวมวลที่มีชีวิตมีการสะสมไอออนโลหะหนักทั้งที่บริเวณผนังเซลล์ และภายในเซลล์ ส่วนวัสดุชีวมวลที่ไม่มีชีวิตมีการสะสมที่ผนังเซลล์เท่านั้น ไอออนโลหะหนักที่สะสมภายในเซลล์มี ชีวิตจะยากต่อการสกัดออกจากเซลล์ แต่ไอออนโลหะหนักที่ผนังเซลล์สามารถสกัดออกได้ แต่เมื่อ ความเข้มข้นของสารละลายในการสกัดมากกว่า 1 M. จะทำให้วัสดุชีวมวลถูกทำลาย และมี ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง (Gadd, 1990)

Saeed & Iqbal (2003) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการสกัดไอออนแคดเมียมออกจากเปลือก ถั่วดำ (*Cicer arietinum*) โดยใช้สารละลาย HCl, H₂SO₄, HNO₃, EDTA, Na₂CO₃, NaHCO₃, KCl, Na-citrate ความเข้มข้น 0.1 M. พบว่า HCl, H₂SO₄, HNO₃, EDTA สามารถสกัดแคดเมียม ได้มากกว่า 98%

Ahuja et al. (1999) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการสกัดไอออนสังกะสีออกจากสาหร่าย (*Ocellularia angustissima*) โดยใช้สารละลาย EDTA (0.5-10 mM.), Na₂CO₃ (0.75-10 mM.),

NaHCO₃ (0.75-10 mM.), HCl (0.01-0.1 N.), H₂SO₄ (0.01-0.1 N.), CaCl₂ (0.5-2 mM.), Citrate buffer (0.2 M.) พบว่า EDTA ความเข้มข้น 10 mM. สามารถสกัดสังกะสีได้ดีที่สุด 64.72%

Kapoor et al. (1999) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการสกัดไออนตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และนิเกิลออกจากรา (*Apergillus niger*) โดยใช้สารละลาย HNO₃ (0.05 N.), Na₂CO₃ (0.1 N.), NaHCO₃ (0.1 N.), NH₄Cl (0.1 N.), Ca²⁺ (0.1 M.), Mg²⁺ (0.1 M.) พบว่า HNO₃ ความเข้มข้น 0.05 N. สามารถสกัดไออนตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และนิเกิลได้มากกว่า 98%

Suhasini et al. (1999) ทำการเปรียบเทียบการสกัดไออนโคบอลต์ออกจาก *Rhizopus* โดยใช้สารละลาย H₂SO₄, HCl, KOH, NaOH, NH₄Cl และ CaCl₂ ความเข้มข้น 0.1 N. ผลการทดลองพบว่า การใช้ HCl ความเข้มข้น 0.1 N. สามารถสกัดไออนโคบอลต์ได้มากกว่า 92 % และวัสดุชีวมวลยังคงมีประสิทธิภาพสูง เมื่อนำมาดูดซับไออนโคบอลต์ใหม่อีกครั้ง รองลงมาคือ H₂SO₄ สามารถสกัดไออนโคบอลต์ได้มากกว่า 90.5 %

Gaballah & Kilbertus (1998) ที่ได้ศึกษาเปรียบเทียบการสกัดไออนแคดเมียม และทองแดงออกจากเปลือกต้นสนที่ผ่านการปรับสภาพ (modified pine barks) โดยใช้สารละลาย HCl ความเข้มข้น 0.1, 0.2, 0.5, 1 N. และ H₂O พบว่า HCl ความเข้มข้น 1 N. สามารถสกัดแคดเมียมและทองแดงได้ 100%

Puranik & Paknikar (1997) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการสกัดไออนตะกั่วและสังกะสีออกจากชีวมวลเห็ดขี้ผึ้ง (*Streptovercillium cinnamomeum*) โดยใช้สารละลาย HCl, H₂SO₄, HNO₃, EDTA, Na₂CO₃, NaHCO₃, KCl, Na-citrate ความเข้มข้น 0.1 M. พบว่า HCl, H₂SO₄, HNO₃, EDTA สามารถสกัดตะกั่วและสังกะสีได้มากกว่า 90%

Mattuschka & Straube (1993) ทำการเปรียบเทียบการสกัดไออนโลหะทองแดง ตะกั่ว ออกจากชีวมวล (*Streptomyces noursei*) โดยใช้สารละลาย Acetic acid, Lactic acid, HCl, HNO₃, EDTA, NaHCO₃ และ NaOH พบว่าสารละลายกรดทั้ง 4 ชนิด สามารถสกัดไออนโลหะหนักได้ประมาณ 95% จึงได้ทำการศึกษาต่อโดยนำ HCl ที่ความเข้มข้นระหว่าง 0.01-1 M. มาสกัดไออนโลหะหนัก ผลการทดลองพบว่า HCl ความเข้มข้น 0.1 M. สามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้จริง เนื่องจากความเข้มข้นต่ำซึ่งไม่มีผลทำให้เซลล์ถูกทำลาย และมีประสิทธิภาพในการสกัดไออนโลหะหนักได้ดี มากกว่า 85%

Kuyucak & Volesky (1989) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการสกัดไออนโคบอลต์ออกจากชีวมวล (*Ascomyces nodosum*) โดยใช้สารละลาย H₂SO₄, HCl, NH₄OH, KHCO₃, EDTA, KSCN, KCl และ CaCl₂/HCl พบว่า การใช้ CaCl₂/HCl ความเข้มข้น 0.05 M. สามารถสกัดไออน

โคบอลต์ ได้มากกว่า 96 % และวัสดุชีวมวลยังคงมีประสิทธิภาพสูง เมื่อนำมาดูดซับไอออนโคบอลต์ใหม่อีกครั้ง ส่วน H_2SO_4 , KSCN และ HCl สามารถสกัดไอออนโคบอลต์ได้มากกว่า 90 % แต่ H_2SO_4 และ KSCN จะทำให้เกิดการสูญเสียของวัสดุดูดซับ และสารละลายหลังการสกัดมีสีเหลือง และสีชมพู ส่วน NH_4OH , $KHCO_3$ และ EDTA สกัดไอออนโคบอลต์ได้ 39%, 57% และ 60% ตามลำดับ

สภาวะสมดุลของการดูดซับ (Equilibrium Adsorption)

เมื่อเกิดการดูดซับตัวถูกละลายจะเคลื่อนที่ออกจากสารละลายไปเกาะบนผิวของตัวดูดซับ ทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น การดูดซับจะดำเนินไปเรื่อย ๆ แต่จะไม่ได้ค่า maximum capacity เพราะมีผลของการถ่ายเทมวลสารเข้ามาเกี่ยวข้องกับการสัมผัสระหว่างของไหลและของแข็ง ทำให้ตัวถูกละลายเกิดการดูดซับและการคายการดูดซับไปพร้อม ๆ กัน จนกระทั่งอัตราการดูดซับ (adsorption) เท่ากับอัตราการคายการดูดซับ (desorption) ซึ่งเรียกว่าระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับ (equilibrium adsorption) ที่อุณหภูมิคงที่ ณ สภาวะ สมดุลนี้ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของตัวดูดซับจะคงที่ สามารถอธิบายสมดุลที่เกิดขึ้นด้วยไอโซเทอมของการดูดซับที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (q) กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่อยู่ในสารละลาย ที่สภาวะสมดุล (C_e) ณ อุณหภูมิคงที่ (จิรพรน ขจรเกียรติกุล, 2539; ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์, 2522)

ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นเส้นที่ลากขึ้นมาเพื่อบอกถึงปริมาณการดูดซับสารหรือไอออนบนผิวของตัวดูดซับเส้นนี้เกิดจากการลากเส้นต่อกันระหว่างจุดต่าง ๆ ที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารหรือไอออนที่ถูกดูดซับไว้ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับกับความเข้มข้นของสารหรือไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ โดยทั่วไปการศึกษาการดูดซับมักพบไอโซเทอมใน 5 ลักษณะ แสดงดังภาพ 2.5 จำแนกจากลักษณะความโค้งความชันของเส้นไอโซเทอมในช่วงเริ่มต้น

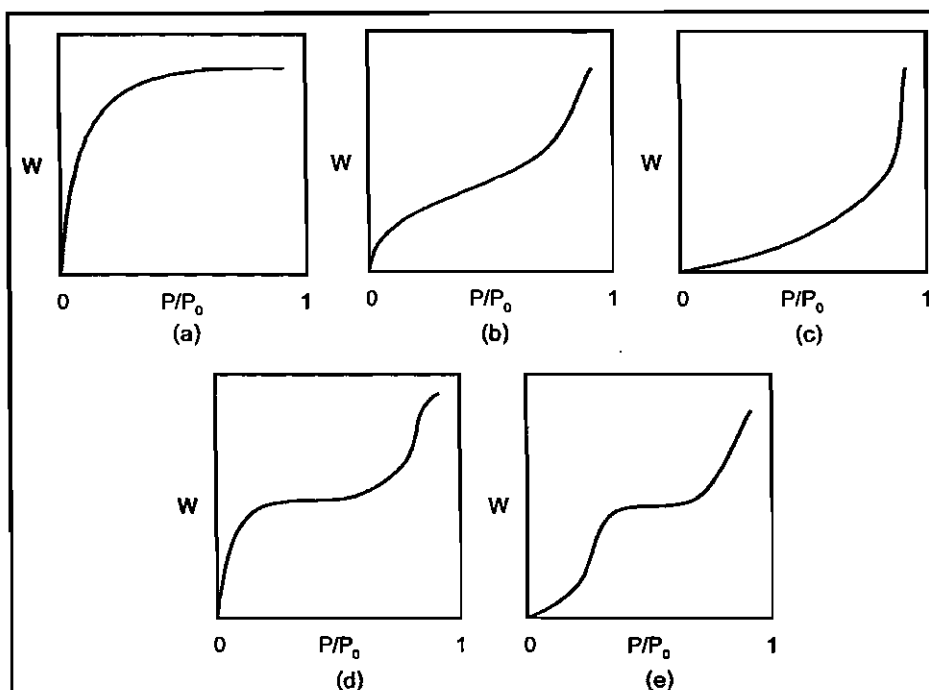
Type I Isotherm (แสดงดังภาพ 5 a) พบมากที่สุดเป็นการดูดซับโดยที่มีชั้นของตัวถูกดูดซับคลุมที่ผิวของตัวดูดซับได้หนาหนึ่งโมเลกุล (monolayer) พบทั้งการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางฟิสิกส์ จะเป็นปรากฏการณ์การดูดซับของ microporous powders ซึ่งปริมาณของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (relative pressure) ต่ำ ๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูงเข้าใกล้หนึ่ง จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งถ้ามีการดูดซับแบบนี้แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีรูพรุนเป็น microporous และมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวภายนอกของผลิตภัณฑ์

Type II Isotherm (แสดงดังภาพ 5 b) พบมากในปรากฏการณ์การดูดซับที่มีชั้นของตัวดูดซับหนาขึ้นเรื่อย ๆ (ปริมาณที่ถูกดูดซับเข้าสู่ค่าอนันต์) โดยจะเกิดบน nonporous powder ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนกว้างกว่า microporous (1.5 นาโนเมตร) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (inflection point or knee of isotherm) เกิดขึ้น เมื่อการดูดซับบนพื้นผิวชั้นแรกเกิดเกือบสมบูรณ์แล้ว (เป็น monolayer เกือบสมบูรณ์) และถ้าเพิ่ม relative pressure จะทำการดูดซับเกิดมากกว่า 1 ชั้น ดังนั้นการดูดซับแบบนี้จะเป็นการดูดซับแบบ multilayer

Type III Isotherm (แสดงดังภาพ 5 c) การดูดซับคล้าย Type II แต่การดูดซับของชั้นแรกนั้นให้ความร้อนออกมาน้อยกว่าความร้อนของการควบแน่น เป็นลักษณะเฉพาะของการเกิดความร้อนของการดูดซับ (heat of adsorption) มีน้อยกว่าความร้อนของการจับตัวกันของตัวถูกดูดซับที่เป็นของเหลว (the adsorbate heat of liquefaction) ดังนั้นการดูดซับที่เพิ่มขึ้น เกิดเพราะตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยากับชั้นของตัวถูกดูดซับมากกว่าปฏิกิริยากับผิวของตัวดูดซับ

Type IV Isotherm (แสดงดังภาพ 5 d) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดบนตัวดูดซับที่มีรัศมีรูพรุนประมาณ 15-1,000 อังสตรอม การดูดซับคล้าย Type II สำหรับความหนาของชั้นโมเลกุลชั้นแรก ๆ แต่การดูดซับจะถึงจุดอิ่มตัวเนื่องจากรูพรุนแคปิลารีภายในตัวดูดซับเต็มหมดแล้ว ความชันที่เพิ่มขึ้นเมื่อ relative pressure เพิ่มขึ้นชี้ให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนได้มากขึ้น ปรากฏการณ์ที่มีจุดเปลี่ยนของเส้นกราฟเกิดเช่นเดียวกับใน Isotherm Type II คือเกือบเป็น monolayer สมบูรณ์

Type V Isotherm (แสดงดังภาพ 5 e) การดูดซับคล้าย Type III ในช่วงความเข้มข้นต่ำแต่การดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จะเข้าสู่ค่าสูงสุดหนึ่งเช่นเดียวกับ Type IV เป็น ปรากฏการณ์การดูดซับที่เป็นผลจากแรงดึงดูดและตัวดูดซับมีค่าน้อย ๆ โดยขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วงประมาณ 15-1,000 อังสตรอม (Weber, 1972)



ภาพ 5 รูปแบบ Adsorption Isotherm (Weber, 1972)

สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอม

การอธิบายไอโซเทอมของการดูดซับจะนิยมเปลี่ยนเส้นโค้งให้อยู่ในรูปเส้นตรงแล้วคำนวณหาค่าต่าง ๆ ด้วยสมการเพื่อใช้อธิบายการดูดซับ โดยสมการที่ใช้มีหลายแบบ แต่จะอธิบายในที่นี้ได้แก่ รูปแบบของสมการ Langmuir และ Freundlich Adsorption Isotherm

Langmuir Adsorption Isotherm

แบบจำลองนี้พัฒนามาจากแนวคิดที่ว่าเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น จำนวน ตัวถูกดูดซับ ที่ถูกจับกับตำแหน่ง binding sites บนตัวดูดซับก็มากขึ้น ชัดขวางการจับของโมเลกุลอื่น ดังนั้นอัตราการดูดซับจึงเป็นสัดส่วนระหว่างตำแหน่ง binding sites ที่ว่างบนตัวดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ และที่สภาวะสมดุลอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายการดูดซับ ลักษณะการดูดซับจึงเป็นลักษณะ monolayer (Danald, 1995; ศิริวัฒน์ ศรีเกษเพรช, 2543) โดยมีสมมติฐาน ดังนี้

1. การดูดซับมีลักษณะเป็น monomolecular layer คือมีจำนวนตำแหน่งที่เกิดการดูดซับแน่นอน และเมื่อเกิดการดูดซับแล้ว อีออนหรือโมเลกุลจะไม่ซ้อนทับซึ่งกันและกันหรือชั้นของตัวถูกดูดซับมีความหนาเท่ากันหมด
2. เมื่อดูดซับ ตัวถูกดูดซับจะไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งกันในพื้นผิวสัมผัส และตัวถูกดูดซับจะไม่มีผลกระทบต่อกัน
3. พื้นผิวในการดูดซับ มีตำแหน่งและกลไกการดูดซับเหมือนกัน ทำให้โครงสร้างสารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นเหมือนกันเป็น homogeneous surface
4. พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุก ๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ

กำหนดให้ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อกรัมของวัสดุดูดซับ

$$q = \frac{V(C_i - C_e)}{W} \quad (2.1)$$

โดย q คือ ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อกรัมของวัสดุดูดซับ (mg/g)

C_i คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (mg/l)

C_e คือ ค่าความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุล (mg/l)

V คือ ปริมาตรสารละลาย (ml)

W คือ น้ำหนักวัสดุดูดซับ (g)

สัดส่วนของพื้นที่ผิวที่ถูกปกคลุมด้วยโมเลกุลที่ถูกดูดซับ

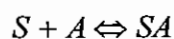
$$\theta = \frac{q}{q_{\max}} \quad (2.2)$$

โดย q คือ ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อกรัมของวัสดุดูดซับ (mg/g)

$q_{\max}$ คือ ปริมาณโลหะหนักมากที่สุดที่ถูกดูดซับต่อกรัมของวัสดุดูดซับ (mg/g)

θ คือ สัดส่วนของพื้นที่ผิวที่ถูกปกคลุมด้วยโมเลกุลที่ถูกดูดซับ

ถ้าให้ A แทนโมเลกุลของตัวถูกละลาย และ S แทนตำแหน่ง binding sites ที่ว่างอยู่ในตัวดูดซับ และ SA แทนโมเลกุลของตัวถูกละลายบน binding sites จะสามารถเขียนสมดุลของการดูดซับได้ดังนี้



อัตราการดูดซับต่อหน่วยพื้นที่ผิวทั้งหมด (rate of adsorption; r_{ax})

$$R_{ax} = k_a C_e (1 - \theta) \quad (2.3)$$

โดย k_a คือ ค่าคงที่ของการดูดซับ ($l/m^2.s$)

C_e คือ ค่าความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุล (mg/l)

อัตราการคายการดูดซับต่อหน่วยพื้นที่ผิวทั้งหมด (rate of desorption)

$$R_{dx} = k_d \theta \quad (2.4)$$

โดย k_d คือ ค่าคงที่ของการคายการดูดซับ ($mg/m^2.s$)

การดูดซับที่สมดุล

$$k_a C_e (1 - \theta) = k_d \theta \quad (2.5)$$

กำหนดให้ $b = \frac{k_a}{k_d}$ = Langmuir Adsorption equilibrium constant (l/mg)

$$\frac{\theta}{(1 - \theta)} = \frac{k_a C_e}{k_d} = b C_e$$

$$\theta = b C_e (1 - \theta) = b C_e - b C_e \theta$$

$$\theta + b C_e \theta = b C_e$$

$$\theta(1 + bC_e) = bC_e$$

$$\theta = \frac{bC_e}{1 + bC_e}$$

จาก $\theta = \frac{q}{q_{\max}}$ จะได้

$$\frac{q}{q_{\max}} = \frac{bC_e}{1 + bC_e}$$

$$q = \frac{q_{\max} b C_e}{1 + b C_e} \quad (2.6)$$

เมื่อนำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้น

$$\frac{C_e}{q} = \frac{1}{b q_{\max}} + \frac{C_e}{q_{\max}} \quad (2.7)$$

ซึ่งค่าคงที่ $q_{\max}$ และ b ได้จากค่าความชันของกราฟ และจุดตัดแกน y ตามลำดับของกราฟ

ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{C_e}{q}$ กับ C_e

Freundlich Adsorption Isotherm

สมการของ Freundlich นี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่า

1. การดูดซับมีลักษณะเป็น monolayer
2. ใช้กับกรณีการถ่ายเทพลังงานผ่านพื้นผิวแบบไม่เป็นเนื้อเดียว
3. ใช้ได้ดีกับตัวดูดซับที่มีแนวโน้มถูกดูดได้ง่ายและมีความเข้มข้นต่ำถึงปานกลาง

สมการของ Freundlich แสดงได้ดังนี้

$$q = k C_e^{1/n} \quad (2.8)$$

หรือเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง

$$\log q = \log k + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.9)$$

โดย k คือ Adsorption Capacity (mg/g)

$1/n$ คือ Adsorption Intensity

C_e คือ ค่าความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุล (mg/l)

q คือ ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อกรัมของวัสดุดูดซับ (mg/g)

เมื่อนำค่า $\log q$ กับ $\log C_e$ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ โดยให้ $\log C_e$ เป็นแกน y และ $\log C_e$ เป็นแกน x จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log k$ เมื่อ $1/n$ มีค่าเข้าใกล้ 1 หรือมีความชันมากจะแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยก็จะมีผลต่ออัตราการดูดซับมาก คือ เมื่อความเข้มข้นต่ำอัตราการดูดซับก็จะต่ำและจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น แต่เมื่อ $1/n \ll 1$ หรือความชันต่ำมากจนบางครั้งเกือบจะชิดแกน x นั้น แสดงว่า อัตราการดูดซับเมื่อความเข้มข้นต่ำหรือสูงจะไม่แตกต่างกันมากนัก หรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นจะไม่มีผลต่ออัตราการดูดซับ อย่างไรก็ตามจากลักษณะของ Freundlich Isotherm จะสังเกตเห็นว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นเรื่อย ๆ ตราบเท่าที่ความเข้มข้นของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายมีสูงขึ้น ซึ่งก็เป็นข้อเสียของสมการ Freundlich ที่สำคัญข้อหนึ่งคือ ไม่สามารถทำนายการดูดซับสูงสุดได้

คุณสมบัติของวัสดุชีวมวลในการเป็นวัสดุดูดซับที่ดี

การกำจัดไอออนโลหะหนักออกจากสารละลายโดยใช้วัสดุชีวมวลเป็นตัวดูดซับนั้น วัสดุชีวมวลควรมีคุณสมบัติดังนี้

1. สามารถดูดซับไอออนโลหะหนักออกจากสารละลายได้ในปริมาณสูงและรวดเร็ว
2. มีความสามารถในการดูดซับไอออนโลหะหนักได้หลายชนิด ไม่จำเพาะเจาะจงต่อไอออนโลหะหนักชนิดใดชนิดหนึ่งเท่านั้น เพราะในน้ำทิ้งส่วนใหญ่มีไอออนโลหะหนักหลายชนิดปะปนกันอยู่
3. สามารถแยกออกจากสารละลายได้ง่าย รวดเร็ว และมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำ

4. กระบวนสกัดไอออนโลหะหนักออกจากวัสดุชีวมวล ควรทำได้ง่ายและรวดเร็ว ส่วนสารเคมีที่ใช้ควรมีราคาถูกและหาได้ง่าย

5. วัสดุชีวมวลที่ถูกสกัดไอออนโลหะหนักออกแล้ว ควรสามารถนำกลับมาใช้เป็นวัสดุดูดซับได้อีกหลาย ๆ ครั้ง (อรพิน ภูมิภมร และปิยะพันธ์ อัครดิษฐเลิศ, 2527)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tee & Khan (1988) ได้ทำการศึกษาความสามารถของเศษใบชาในการดูดซับโลหะหนักตะกั่ว แคดเมียมและสังกะสี โดยเศษใบชาที่ใช้ทดลองจะต้องมีการบำบัดขั้นต้นด้วยการต้มในน้ำร้อน 10 นาที และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 60-80 เมช นำไปกระจายในสารละลายกรด HNO_3 0.01 M เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กรองและล้างด้วยน้ำกลั่น อบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส โดยความเข้มข้นเริ่มต้นที่ใช้เท่ากับ 0-1,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร โดยตัวอย่างจะถูกกวนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง และวัดปริมาณโลหะหนักที่เหลือด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชัน ส่วนการศึกษาผลของค่า pH จะใช้สารละลาย HNO_3 ในการปรับ pH 1-3 และ 0.01 M. acetate buffer ในการปรับค่า pH 4-7 จากการทดลองพบว่าปริมาณของการดูดซับโลหะหนักขึ้นอยู่กับค่า pH ความเข้มข้นของโลหะหนัก ionic strength ความเข้มข้นของสารรบกวน ความสามารถในการดูดซับตะกั่ว แคดเมียมและสังกะสีเท่ากับ 0.38, 0.28 และ 0.18 มิลลิโมลต่อกรัม ส่วนการทดลองโดยใช้คอลัมน์ ซึ่งประสิทธิภาพในการดูดซับได้เกือบ 100% สำหรับตะกั่วที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า pH เท่ากับ 6 โดยใช้ใบชา 1.8 กรัม อัตราการไหลเท่ากับ 25 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งใบชามีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้มากกว่าแคดเมียมและสังกะสีตามลำดับ

Okieimen & Onyenkpa (1989) ได้ศึกษาความสามารถของเปลือกเมล็ดเมล่อน (*Citrullus vulgaris*) ในการดูดซับไอออนโลหะหนักแคดเมียม ทองแดง และตะกั่วโดยศึกษาผลของพลศาสตร์และสมดุลการดูดซับ ซึ่งจะทำการทดลองที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าปริมาณไอออนโลหะหนักที่ดูดซับได้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะหนักแต่ละชนิดและประสิทธิภาพ การดูดซับสามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้โดยการเปลี่ยนแปลง EDTA ของเปลือกเมล็ดเมล่อน ค่าการแพร่ กระจายของไอออนโลหะระหว่าง Absorbent phase กับ Bulk phase ที่ปรากฏเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย กับความเข้มข้นสมดุลของไอออนโลหะยกเว้นไอออนของตะกั่วซึ่งค่าการแพร่กระจายจะเปลี่ยนแปลงไป 5 เท่ากับความเข้มข้นสมดุล การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับด้วยสมการ langmuir Isotherm พบว่าเปลือกเมล็ดเมล่อนสามารถดูดซับแคดเมียมและ



ทองแดงได้เท่ากับ 23.3 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัม และ 11.4 มิลลิกรัมทองแดงต่อกรัม จากการศึกษาในคอลัมน์พบว่า เปลือกเมล็ดเมล่อนสามารถดูดซับไอออนตะกั่วได้ในปริมาณสูง และสามารถทำให้คืนสภาพดั้งเดิมได้โดยการบำบัดด้วยกรดเจือจาง

Orhan & Buyukgungor (1993) ศึกษาความสามารถของกากใบชา (waste tea) เปลือกกาแฟ (exhausted coffee) และเปลือกถั่ว (walnut shell) ในการดูดซับโครเมียม(+6) แคดเมียม และอลูมิเนียม โดยวัสดุดูดซับจะถูกล้างน้ำและทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักของตัวดูดซับคงที่ ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับจะทำการทดลองแบบทีละเท (batch experiments) โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของโลหะหนัก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำหนักตัวดูดซับหนัก 0.3 กรัม ปริมาตรน้ำเสีย 100 มิลลิลิตร เขย่าเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง แยกตัวดูดซับด้วยเครื่องเหวี่ยงแยกวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่เหลือด้วยเครื่อง อะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ จากผลการศึกษาพบว่า เวลาที่เหมาะสมของการดูดซับเท่ากับ 120 นาที โลหะหนักที่ดูดซับได้ดีที่สุด คือ อลูมิเนียม 98% สำหรับใบชา 96% สำหรับเปลือกกาแฟ และเปลือกถั่ว รองลงมาคือ โครเมียม (+6) และแคดเมียม ผลที่ได้จากการทดลองพบว่า การนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสามารถนำมาใช้ได้และมีประสิทธิภาพดี

Gand & Weixing (1998) ได้ศึกษาการใช้ก้านดอกทานตะวัน (sunflower stalks) ในการดูดซับโลหะหนักทองแดง แคดเมียม สังกะสีและโครเมียม โดยศึกษาสภาวะสมดุลของการดูดซับ และจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ จากการศึกษาพบว่าความสามารถในการดูดซับของโลหะหนักทองแดง เท่ากับ 29.3 มิลลิกรัมทองแดงต่อกรัม สังกะสี 30.73 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัม แคดเมียม 42.18 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัม และโครเมียม 25.07 มิลลิกรัมโครเมียมต่อกรัม โดยพบว่าขนาดของตัวดูดซับมีผลต่อการดูดซับไอออนของโลหะหนัก โดยที่ตัวดูดซับขนาดเล็กจะสามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักได้ดีกว่าขนาดใหญ่ อุณหภูมิจะมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับต่างกัน คือ ทองแดง สังกะสี และ แคดเมียม ความสามารถในการดูดซับจะต่ำที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่โครเมียม ประสิทธิภาพในการดูดซับจะสูงเมื่ออุณหภูมิต่ำ และอัตราการดูดซับ ทองแดง แคดเมียม และโครเมียมจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ 60 นาทีแรก ประมาณ 60-80%

Lee et al. (1998) ศึกษาความสามารถของกากแอปเปิลในการกำจัดโลหะหนัก ทองแดง แคดเมียม และตะกั่ว ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกากแอปเปิลที่ไม่ได้ปรับสภาพ และกากแอปเปิลที่ปรับสภาพด้วย Phosphorous Oxychloride กากแอปเปิลที่นำมาศึกษาทดลอง ได้จากโรงงานผลิตน้ำแอปเปิลซึ่งประกอบด้วย ผิว เมล็ด และก้าน อบแห้งที่

อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ร้อนเพื่อคัดขนาด และล้างด้วย HCl 0.5 M. ล้างน้ำจนค่า พีเอช คงที่ โดยจะทำการทดลองแบบทีละเท ใช้ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 200 มิลลิลิตร ความเข้มข้นโลหะหนัก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำหนักตัวดูดซับ 0.2 กรัม เวลาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง กรองและวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ จากการทดลองพบว่า การดูดซับโลหะหนักเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ใน 30 นาทีแรก และเวลาการดูดซับเข้าสู่ สมดุลย์ เท่ากับ 1 ชั่วโมง หากแอปเปิลสามารถดูดซับทองแดงได้ 91.2% ที่ pH 5.9 ตะกั่ว 95.3% ที่ pH 5.7 และแคดเมียม 91% ที่ pH 7 ส่วนการศึกษาแบบคอลัมน์ โดยใช้คอลัมน์ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 1.5 เซนติเมตร บรรจุสารตัวอย่างสูง 30 เซนติเมตร อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที เก็บน้ำตัวอย่างทุก 30 นาที จากการศึกษพบว่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของกากแอปเปิล ที่ไม่ได้ปรับสภาพเท่ากับ 7.5 มิลลิกรัมทองแดงต่อกรัม 20.9 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมและ 2.89 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัม ส่วนกากแอปเปิลที่ปรับสภาพ เท่ากับ 29.9 มิลลิกรัมทองแดงต่อกรัม 59.5 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมและ 17.8 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัม สรุปได้ว่ากากแอปเปิลที่ปรับสภาพด้วยขบวนการเคมี มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักเพิ่มขึ้น 3-4 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับกากแอปเปิลที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพด้วยขบวนการเคมี

Ajmal et al. (2000) ศึกษาความสามารถของเปลือกส้ม (*Citrus reticulata*) ในการดูดซับโลหะหนักนิกเกิล โดยทำการศึกษาถึงผลของค่า pH เริ่มต้นของสารละลาย (pH 2-10) ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 20-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการดูดซับระหว่าง 10-300 นาทีและการเปรียบเทียบการดูดซับไอออนของทองแดง ตะกั่ว สังกะสี โครเมียม การเตรียมวัสดุดูดซับโดยการนำเปลือกส้มมาบดและล้างน้ำ นำไปอบที่อุณหภูมิ 100-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ร้อนให้ขนาดผ่านตะแกรงขนาด 150 เมช การศึกษาประสิทธิภาพดูดซับจะทำแบบทีละเท โดยใช้ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตร น้ำหนักตัวดูดซับ 5 กรัม ปรับ pH ด้วย HCl และ NaOH เขย่าและกรองด้วยกระดาษกรอง วัดค่าความเข้มข้นโลหะหนักที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องอะตอมมิค แอปซอบชั่น จากการศึกษพบว่าค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับนิกเกิลของเปลือกส้มเท่ากับ 6 โดยเวลาการดูดซับเข้าสู่สมดุลคือ 2 ชั่วโมงและความเข้มข้นสูงสุด 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเปลือกส้มสามารถดูดซับนิกเกิลได้สูงสุด 158.73 มิลลิกรัมนิกเกิลต่อกรัม จากสมการ langmuir Isotherm ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส รองลงมาคือทองแดง ตะกั่ว สังกะสี และโครเมียมตามลำดับ

Low et al. (2000) ได้ศึกษาความสามารถของกากเบียร์ (spent grain) ในการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมและตะกั่ว โดยทำการศึกษาถึงผลของค่า pH ระยะเวลาในการดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย อุณหภูมิ โดยการนำวัสดุดูดซับล้างด้วยน้ำกลั่น อบแห้งที่อุณหภูมิ

60 องศาเซลเซียส ร้อนคัตขนาดให้มีขนาด 1 มิลลิเมตร นำวัสดุดูดซับบำบัดด้วยไฮโดรอกไซด์ 0.5 M เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ล้างน้ำและวัดค่าไนโตรเจนจากน้ำล้าง ให้อยู่ที่ 5.83 โดยการวัดด้วยวิธีเคมีไมโครเจดาร์ห์ ซึ่งการทดลองจะทำแบบที่ละเท ความเข้มข้นของสารละลาย 50-450 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณวัสดุดูดซับ 0.1 กรัม ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 20 มิลลิลิตร ปรับค่า pH ด้วย NaOH และ HCl 0.1 M เขย่าด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง ($28 \pm 2^\circ\text{C}$) และแยกวัสดุดูดซับด้วยเครื่องเหวี่ยงแยก วิเคราะห์โลหะหนักด้วยเครื่องพาสมาสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ จากการทดลองพบว่าค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับแคดเมียมและตะกั่วเท่ากับ 4 โดยมีเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ 120 นาที ตัวดูดซับสามารถลดปริมาณแคดเมียมได้ 95.6% และตะกั่ว 77.8% ในสภาวะที่สารละลายแคดเมียมและตะกั่วมีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับด้วยสมการ langmuir Isotherm พบว่าตัวดูดซับสามารถดูดซับได้สูงสุดเท่ากับ 17.3 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัม และ 35.5 มิลลิกรัมปรอทต่อกรัม ผลของอุณหภูมิพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณการดูดซับจะสูงขึ้นตามไปด้วย โดยสามารถดูดซับแคดเมียมได้ถึง 80.9% และตะกั่ว 91.7% ที่อุณหภูมิของสารละลายเท่ากับ 55 องศาเซลเซียส

Senthikumaar et al. (2000) ศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมน้ำผลไม้ ในการดูดซับโลหะหนัก ปรอท ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง สังกะสี และนิเกิล โดยทำการศึกษเปรียบเทียบ วัสดุดูดซับที่ไม่ผ่านการบำบัดกับวัสดุที่ผ่านการบำบัดด้วย phosphorous oxychloride และค่า pH เริ่มแรกที่เหมาะสม วัสดุดูดซับที่ใช้ในการทดลองได้แก่ สัม แอปเปิล สับปะรด อินทผาลัม องุ่น ซึ่งประกอบด้วยเปลือก เมล็ด ก้าน ปริมาณร้อยละ 9 ของน้ำหนัก ที่เหลือส่วนใหญ่จะประกอบด้วยเส้นใย ลิกนิน การเตรียมวัสดุดูดซับ นำไปล้างด้วยน้ำกลั่นและอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง ร้อนผ่านตะแกรงเพื่อคัตขนาดให้ได้ระหว่าง 0.15-0.25 มิลลิเมตร ล้างด้วย HCl 0.5 M และน้ำกลั่นจนค่า pH ในน้ำล้างคงที่บำบัดวัสดุดูดซับด้วย phosphorous oxychloride โดยการทดลองจะทำแบบที่ละเท ใช้ความเข้มข้นของโลหะหนัก 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตร น้ำหนักวัสดุดูดซับ 500 มิลลิกรัมแห้ง ปรับ pH ด้วย HCl และ NaOH 0.001 M เขย่าด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง แยกวัสดุดูดซับออกจากน้ำเสียด้วยเครื่องเหวี่ยงแยก 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที วัดปริมาณโลหะหนักที่เหลือด้วยเครื่อง UV-VIS สเปกโตรโฟโตมิเตอร์จากการทดลองพบว่าร้อยละของการดูดซับจะเกิดขึ้นดีที่สุดที่ pH เท่ากับ 4 และประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับที่ผ่านการบำบัดจะสูงกว่าวัสดุดูดซับที่ไม่ผ่านการบำบัดคือ สามารถดูดซับทองแดงได้ 96.2% รองลงไปคือตะกั่ว 90.6% สังกะสี 87.9% แคดเมียม 86.6% ปรอท 85.5% และนิเกิล 85% สรุปได้ว่าของ

เสียจากอุตสาหกรรมน้ำผลไม้ไม่สามารถนำมาเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพ การบำบัดด้วย phosphorous oxychloride เป็นการเพิ่ม phosphate group ทำให้วัสดุดูดซับมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นด้วย

Dakiky et al. (2002) ศึกษาการดูดซับโลหะหนักโครเมียม (+6) โดยใช้วัสดุดูดซับราคาถูก ได้แก่ ไม้ มะกอก ขี้เลื่อย สนเข็ม เปลือกอัลมอนด์ กระบองเพชร และถ่านเผา โดยทำการศึกษาดังประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักโครเมียม ของวัสดุดูดซับชนิดต่าง ๆ ค่า pH เวลาสัมผัส ปริมาณ วัสดุดูดซับ อัตราส่วนของไอออนโลหะหนักต่อวัสดุดูดซับ โดยวัสดุดูดซับที่นำมาศึกษามีขนาด ความยาว 1 เซนติเมตรและมีขนาด 200 ไมครอน โดยการศึกษาเวลาสัมผัสจะเริ่มที่ 30-300 นาที ค่า pH 1-10 ความเข้มข้นโลหะหนัก 20-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณวัสดุดูดซับ 2-24 กรัมต่อ ลิตร โดยจะทำการทดลองแบบที่ละเท ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับเท่ากับ 2 โดยมีเวลาดูดซับเข้าสู่สมดุล 120 นาที ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 16 กรัมต่อลิตร วัสดุดูดซับได้ดีที่สุดคือไม้ โดยสามารถดูดซับได้ 81.3 % การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับด้วยสมการ langmuir Isotherm ได้ผลดังนี้ การดูดซับโครเมียมด้วยไม้เท่ากับ 41.15 มิลลิกรัมต่อกรัม มะกอก 33.4 มิลลิกรัมต่อกรัม ขี้เลื่อย 15.823 มิลลิกรัมต่อกรัม สนเข็ม 21.50 มิลลิกรัมต่อกรัม เปลือกอัลมอนด์ 10.616 มิลลิกรัมต่อกรัม ถ่านเผา 6.78 มิลลิกรัมต่อกรัม และกระบองเพชร 7.082 มิลลิกรัมต่อกรัม จึงสรุปได้ว่าไม้มีประสิทธิภาพดีที่สุด ในการดูดซับ โลหะหนักโครเมียม ซึ่งเป็นวัสดุที่มีอยู่มากมายและมีราคาถูก ทำให้เกิดขึ้นได้เปรียบทางด้าน เศรษฐศาสตร์

Johnson et al. (2002) ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับทองแดงของเปลือกถั่วลิสง (peanut hull) โดยเปรียบเทียบกับเปลือกถั่วลิสง ที่ผ่านการอัดให้เป็นเม็ด (peanut hull pellets) โดยจะทำการศึกษามวลของเวลาสมดุลในการดูดซับ ขนาดของวัสดุดูดซับ ค่า pH ความสามารถ และประสิทธิภาพในการดูดซับ โดยวัสดุดูดซับจะถูกอบแห้งและร่อนคัดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 25 และค้ำบนตะแกรงเบอร์ 40 วัสดุดูดซับซึ่งเป็นเม็ดจะถูกอัดให้มีความหนาแน่น 640 กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร สมดุลของการดูดซับจะทำการทดลองแบบที่ละเท โดยใช้ตัวอย่าง 50 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 0-400 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาที่ความเร็รรอบ 250 รอบต่อนาที 24 ชั่วโมง แยกวัสดุ ดูดซับด้วยกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน วัดค่าโลหะหนักที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง ICP-OES ส่วนการทดลองแบบต่อเนื่องจะใช้แบบคอลัมน์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 5.175 เซนติเมตร ความสูงของวัสดุดูดซับ 25 เซนติเมตร อัตราการไหล 11 มิลลิลิตรต่อนาที จากการศึกษาพบว่า เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับเท่ากับ 40 นาที โดยเปลือกถั่วลิสงดูดซับได้ 78% เปลือกถั่วลิสงอัดเม็ด

ดูดซับได้ 77% ค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 6.5-7.5 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับด้วยสมการ Langmuir Isotherm พบว่าเปลือกถั่วและเปลือกถั่วอัดเม็ดดูดซับทองแดงได้เท่ากับ 9 มิลลิกรัมต่อกรัมและ 2 มิลลิกรัมต่อกรัมส่วนการทดลองแบบต่อเนื่องพบว่าค่า BreakThrough เท่ากับ 40 bed volume จึงสรุปได้ว่า เปลือกถั่วลิสงที่ผ่านการอัดเม็ดมีความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงสูงกว่าเปลือกถั่วที่ไม่ได้ผ่านการอัดเม็ด การดูดซับอาจเกิดจากคาร์โบไฮเดรต สารประกอบ Phenolic และโปรตีน ซึ่งมีหมู่ functional group ส่วนการดูดซับจะเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวและรูพรุนของวัสดุดูดซับ

Kadirvelu & Namasivayam (2003) ได้ทำการศึกษาความสามารถของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ กากมะพร้าว (coconut coirpith) ในการดูดซับโลหะหนักแคดเมียม โดยทำการศึกษาถึงผลของระยะเวลาในการดูดซับ ความเข้มข้นของโลหะหนัก ปริมาณวัสดุดูดซับและค่า pH โดยทำการทดลองการดูดซับแบบที่ละเท อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ขนาดของวัสดุดูดซับเท่ากับ 250-500 ไมครอน จากการทดลองพบว่า เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับเท่ากับ 60 นาที ปริมาณวัสดุดูดซับที่เหมาะสมเท่ากับ 70 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยร้อยละของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณวัสดุดูดซับ การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับด้วยสมการ langmuir Isotherm พบว่าสามารถดูดซับแคดเมียมได้ 93.4 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัม ที่ pH เริ่มต้นเท่ากับ 4 และการสกัดแคดเมียมด้วยกรดไฮโดรคลอริก สามารถสกัดแคดเมียมได้ 100% ที่ความเข้มข้นของกรด 0.075 M จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าขบวนการในการดูดซับเป็นแบบการแลกเปลี่ยนประจุไอออนโลหะหนักซึ่งกากมะพร้าวเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการบำบัดแคดเมียมจากน้ำเสียได้ เป็นผลให้ต้นทุนการบำบัดถูกลง

Kim (2003) ศึกษาความสามารถเปลือกและกระดองปู (*Chinonecetes opilio*) ในการดูดซับโลหะหนัก ตะกั่ว แคดเมียม และโครเมียม โดยจะทำการศึกษาถึงผลของเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับโลหะองค์ประกอบเดี่ยวและโลหะองค์ประกอบคู่ ประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับโดยการทดลองจะควบคุมค่า pH เท่ากับ 5 โดยใช้ความเข้มข้นโลหะหนักเท่ากับ 10 mM. สำหรับโลหะองค์ประกอบเดี่ยว และ 0.5 mM. สำหรับโลหะองค์ประกอบคู่ วัสดุดูดซับเป็นของเสียที่ได้จากโรงงานแกะเนื้อปู โดยจะถูกนำมาต้มและล้างน้ำทิ้งให้แห้ง บดและร่อนผ่านตะแกรงคัดขนาดให้มีขนาด 20-40 เมช วัสดุดูดซับประกอบด้วยโปรตีน 29.19% ไขมัน 40.60% ของเหลว 1.35% ไคติน 26.65% โดยน้ำหนัก โดยการทดลองการดูดซับจะทำแบบที่ละเท ใช้น้ำตัวอย่าง 250 มิลลิลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.25 กรัม เขย่าด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส แยกวัสดุดูดซับด้วยเครื่องเหวี่ยงแยก วัดปริมาณโลหะหนักที่เหลือด้วยเครื่องอะตอม

มิกแอบซอบชัน จากการทดลองพบว่า ไครเมียม และตะกั่ว มีเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับ 3 ชั่วโมง ส่วนแคลเมียมเข้าสู่สมดุลการดูดซับ 10 ชั่วโมง ความสามารถในการดูดซับไครเมียมเท่ากับ 0.49 มิลลิโมลต่อกรัม ประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ 98% ความสามารถในการดูดซับตะกั่ว 0.47 มิลลิโมลต่อกรัม ประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ 94% และความสามารถของการดูดซับแคลเมียม 3 ชั่วโมงเท่ากับ 0.3 มิลลิโมลต่อกรัม ประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ 60% แต่การดูดซับจะเพิ่มขึ้น เป็น 0.48 มิลลิโมลต่อกรัม ประสิทธิภาพเท่ากับ 96% เวลา 10 ชั่วโมง ส่วนการทดลองกับโลหะ องค์ประกอบคู่พบว่า ตะกั่วกับแคลเมียมเวลา 3 ชั่วโมง มีความสามารถดูดซับเท่ากับ 0.47 มิลลิโมลต่อกรัม ตะกั่วกับไครเมียมเท่ากับ 0.14 มิลลิโมลต่อกรัม ส่วนแคลเมียมกับตะกั่วเท่ากับ 0.21 มิลลิโมลต่อกรัม แคลเมียมกับไครเมียมเท่ากับ 0.09 มิลลิโมลต่อกรัม และไครเมียมกับแคลเมียม เท่ากับ 0.29 มิลลิโมลต่อกรัม ไครเมียมกับตะกั่วเท่ากับ 0.19 มิลลิโมลต่อกรัม จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ตะกั่วและไครเมียม สามารถดูดซับได้ดีกว่าแคลเมียม ทั้งแบบโลหะองค์ประกอบเดี่ยวและองค์ประกอบคู่

Ajmal et al. (2003) ศึกษาความสามารถของเปลือกข้าวในการดูดซับแคลเมียม โดยศึกษาถึงผลของระยะเวลาในการดูดซับ ความเข้มข้นของโลหะหนัก อุณหภูมิ ปริมาณตัวดูดซับ ในสารละลาย โดยเปลือกข้าวที่ใช้ในการศึกษาทดลองนำมาจากโรงสีในชุมชน ร่อนคัดขนาดด้วย ตะแกรงขนาด 50-60 เมช ล้างน้ำและอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำวัสดุดูดซับดังกล่าวมาปรับสภาพด้วยฟอสเฟต โดยใช้ตัวดูดซับ 5 กรัมแห้งใส่ใน 1.0 M K_2HPO_4 100 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง กรองและล้างน้ำอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง โดยจะทำการทดลองแบบทีละเท (batch experiments) จากการทดลองพบว่า เวลาที่ใช้ในการดูดซับแคลเมียมเข้าสู่สมดุลคือ 1 ชั่วโมง การดูดซับจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 18 ถึงร้อยละ 99 เมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 0.5 กรัมถึง 3 กรัม แต่ในขณะเดียวกันความหนาแน่น การดูดซับแคลเมียมจะลดลงจาก 90 มิลลิกรัมแคลเมียมต่อกรัมเป็น 16.5 มิลลิกรัมแคลเมียมต่อกรัม ความเข้มข้นเริ่มแรกจะอยู่ที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นการดูดซับค่อนข้างคงที่ และเมื่ออุณหภูมิเริ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับแคลเมียมของเปลือกข้าวจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

Gupta et al. (2003) ศึกษาการใช้เถ้าจากขานอ้อยที่เหลือจากอุตสาหกรรมน้ำตาล ดูดซับ แคลเมียมและนิเกิล เถ้าลอยจากขานอ้อยจะถูกนำมาบำบัดโดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ จากนั้นล้างด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ร่อนที่คัดขนาดและเก็บในโถสุญญากาศ ความชื้น โดยจะทำการทดลองแบบทีละเท (batch experiments) เพื่อศึกษาระยะเวลากักพักระหว่าง 0-150 นาที ความเข้มข้นของ

โลหะหนัก 2-20 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า pH 2-9 ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 2-20 กรัมต่อลิตร ขนาดของตัวดูดซับเท่ากับ 100-150, 150-200 และ 200-250 ไมครอน โดยจะทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าระยะ เวลาที่กักักที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 60-80 นาที ความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 14 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 12 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับนิเกิล ค่า pH อยู่ระหว่าง 6.0-6.5 ปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมเท่ากับ 10 กรัมต่อลิตร ความสามารถในการดูดซับซึ่งวิเคราะห์ด้วย Freundlich Isothem พบว่าซีเถ้าลอยจากขานอ้อยมีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมได้ 12.5 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัม และนิเกิลเท่ากับ 14.0 มิลลิกรัมนิเกิลต่อกรัม และยังพบอีกว่าประสิทธิภาพการดูดซับจะดีเมื่ออุณหภูมิสูง และตัวดูดซับที่มีขนาดเล็ก จะดูดซับได้ดีกว่าขนาดใหญ่ โดยวัสดุดูดซับขนาด 100-150 ไมครอนสามารถดูดซับแคดเมียมได้ถึง 99%

จันทร์นา สงวนรุ่งเรือง และคณะ (2540) ได้ศึกษาการนำเถ้าลอยซึ่งเป็นสารดูดซับราคาถูก มาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ นิเกิล แคดเมียม และ ตะกั่ว โดยหาสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดโลหะหนักที่มีความเข้มข้นต่างกัน 3 ระดับ แต่ละระดับความเข้มข้นนี้จะทำการปรับค่า พีเอช ให้เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 3 ถึง 10 แล้วนำซีเถ้าลอยที่ดูดซับโลหะหนักมาศึกษาความเสถียร จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอย พบว่า อนุภาคเถ้าลอยมีลักษณะกลม มีขนาดอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 10-100 ไมครอน และพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดของโลหะต่างๆ จะขึ้นอยู่กับ พีเอช เวลา และความเข้มข้นเริ่มต้น ดังนี้ ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดนิเกิลคือ 10 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลา 10 นาที โดยประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 99.52% สำหรับการกำจัดแคดเมียม ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดคือ 10 ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลา 30 นาที โดยประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 99.12% สำหรับการกำจัดตะกั่ว ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดตะกั่วคือ 10 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลา 5 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 99.55%

วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา และธีรวิทย์ ทับทอง (2540) ได้ศึกษาการดูดซับโลหะหนักโดยวัสดุชีวมวลประเภท Activated Sludge และกากชีวมวลเหลือทิ้งเช่น *Aspergillus*, *Streptomyces*, ยีสต์ จากโรงงานผลิตอาหาร วัสดุชีวมวลถูกเตรียมโดยการนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้ง ปรับพีเอชให้ได้ประมาณ 7 อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส แล้วจึงบดและแยกขนาดอนุภาคให้มีขนาดต่ำกว่า 425 ไมครอน วัสดุชีวมวลที่ได้ 1 กรัม นำมาใช้ในการดูดซับโลหะหนักจากสารละลายปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่มีโลหะหนักผสมอยู่ที่ความเข้มข้น 25, 50, 100 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากนั้นจึงนำสารละลายที่มีวัสดุชีวมวลผสมอยู่ไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า(Shaker) ที่ความเร็ว

200 รอบ/นาที ตัวอย่างสารละลายจะถูกเก็บที่เวลา 0, 2, 5, 10, 15 และ 30 นาที จากนั้นจึงนำไปกรองและนำสารละลายส่วนใสไปวัดปริมาณโลหะหนักโดยเครื่อง AAS ผลการทดลองสรุปได้ว่า Activated Sludge จากโรงงาน N สามารถดูดซับโลหะแคดเมียม ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ปริมาณสูงสุด 37, 40, 16 และ 21 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนตะกั่ว Activated Sludge จากโรงงาน A สามารถดูดซับได้ 106 มิลลิกรัมต่อกรัม

วรรณิ์ ตันกิตยานนท์ และจันทนา พยุงวงศ์ (2540) ได้ศึกษาการกำจัดโลหะหนัก สังกะสี นิกเกิล ตะกั่ว และแคดเมียม ในน้ำเสียโดยวัสดุชีวมวลจากโรงงานผลิตอาหารด้วยวิธีการดูดซับ นอกจากนี้ยังศึกษาถึงความสามารถในการนำกลับมาดูดซับโลหะหนักใหม่ของวัสดุชีวมวล จากผลการทดลองพบว่าวัสดุชีวมวลที่มีลักษณะเป็นผงมีความสามารถในการกำจัดโลหะ ตามลำดับดังนี้ คือ สังกะสี > ตะกั่ว > นิกเกิล > แคดเมียม โดยสามารถดูดซับสังกะสีได้สูงถึง 20.24 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัมของวัสดุชีวมวล และสำหรับวัสดุชีวมวลแบบเป็นเม็ดมีความสามารถในการดูดซับโลหะต่าง ๆ ตามลำดับดังนี้คือ ตะกั่ว > สังกะสี > นิกเกิล > แคดเมียม โดยดูดซับตะกั่วได้สูงถึง 16.21 มิลลิกรัม ตะกั่วต่อกรัมของวัสดุชีวมวล นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุชีวมวลแบบเป็นเม็ดขนาดแตกต่างกันมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักไม่เท่ากัน โดยพบว่าวัสดุชีวมวลแบบเป็นเม็ดซึ่งมีขนาดเล็กสามารถดูดซับโลหะหนัก ได้ดีกว่าขนาดใหญ่และจากการศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของวัสดุชีวมวลแบบเป็นเม็ดโดยการสกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.6 N. จะเห็นได้ว่าหลังจากที่วัสดุชีวมวลถูกสกัดแล้วสามารถดูดซับโลหะหนักได้เช่นเดิม โดยมีประสิทธิภาพการสกัดสูงถึง 99%

รัตนา มหาชัย (2542) ได้ศึกษาการดูดซับโลหะหนัก แคดเมียม โครเมียม ทองแดง ตะกั่ว แมงกานีส นิกเกิล และสังกะสี ด้วยวัสดุธรรมชาติชนิดต่าง ๆ ที่หาง่ายและราคาถูกดังนี้ แกลบเผา ถ่าน ถ่านกัมมันต์ ชีวถ่าน คาร์บอน เบนโทไนต์ กาบมะพร้าว รั้วไหม เยื่อไม้ไผ่ และใยข้าวโพด จากการศึกษาพบว่าโลหะตะกั่วถูกดูดซับได้มากที่สุด ในวัสดุเกือบทุกชนิด เมื่อแยกกลุ่มปริมาณการดูดซับเป็นร้อยละ(กรัม/กรัม) (ก) ตะกั่วอยู่ในช่วง 30-70% (ข) ทองแดง แคดเมียม สังกะสี อยู่ในช่วง 2-10% และ (ค) นิกเกิล โครเมียม แมงกานีส น้อยกว่า 1% และ เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะของวัสดุเรียงลำดับมากไปหาน้อยได้ดังนี้ ชีวถ่าน ถ่านกัมมันต์ เบนโทไนต์ ส่วนถ่าน แกลบเผา เยื่อไม้ไผ่ กาบมะพร้าว และใยรั้วไหม มีความสามารถในการดูดซับโลหะใกล้เคียงกัน เมื่อศึกษาวิธีการกำจัดโลหะหนักที่มีพิษทั้ง 7 ตัวผสมกันพบว่าวิธีการแบบต่อเนื่องมีประสิทธิภาพในการกำจัดได้ดีกว่าวิธีการแบบไม่ต่อเนื่องประมาณ 5 เท่าแต่เมื่อนำทั้งสองวิธีมาทำร่วมกันโดยใช้วัสดุชีวะถ่านได้ผลเหมาะสมที่สุด

วัลภา อาชีวะปรีสุทธิ และคณะ (2543) ทำการศึกษาพัฒนาเม็ดวัสดุชีวมวลจากกากตะกอนเร่งระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตภัณฑ์อาหารประเภทนมของบริษัทเนสเล่ (ประเทศไทย) จำกัด ให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักให้ดีขึ้น โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมีและวิธีการกายภาพต่าง ๆ เพื่อจะทำให้ไม่มีสิ่งปกคลุมต่อหมู่ประจุที่จะใช้จับโลหะหนัก พบว่าการใช้ไฮเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.75 M. อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักได้ดีที่สุด โดยเพิ่มค่าการดูดซับทั้ง 5 โลหะหนัก คือ เพิ่มค่าการดูดซับแคดเมียม นิกเกิล ตะกั่ว สังกะสี และทองแดงขึ้น 18.15%, 65.67%, 9.76%, 32.56% และ 20.09% ตามลำดับ

ยุวรัตน์ ปรมิตนามารณ์ (2544) ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับไอออนแคดเมียมของเปลือกไข่ 2 ชนิด คือ เปลือกไข่ธรรมชาติ และเปลือกไข่ปลอดโปรตีน โดยทำการศึกษา พฤติกรรม การดูดซับของเปลือกไข่แบบกะโดยแบ่งเป็น 2 การทดลองคือ การศึกษาการดูดซับสภาวะสมดุลด้วยเปลือกไข่ขนาด 20-40, 40-60 และ 60-80 เมช และศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ พบว่า ณ สภาวะสมดุลที่ 120 นาที เปลือกไข่ธรรมชาติ และเปลือกไข่ปลอดโปรตีนขนาด 60-80 เมช มีค่าปริมาณโลหะหนักแคดเมียมที่ถูกดูดซับต่อกรัมของเปลือกไข่ (q_{max}) มากที่สุดเท่ากับ 1.6028 และ 1.3170 มิลลิโมลต่อกรัมของเปลือกไข่ ตามลำดับ ตามสมการ Langmuir Isotherm โดยเปลือกไข่ขนาดเล็กดูดซับแคดเมียมได้ดีกว่าเปลือกไข่ขนาดใหญ่ และการดูดซับของเปลือกไข่ทั้งสองชนิดเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออน แต่เปลือกไข่ธรรมชาติอาจจะมีเยื่อโปรตีนในเปลือกไข่ที่ประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิล หมู่เอมีน และกลุ่มซัลเฟตของโปรตีน ร่วมจับโลหะหนักแคดเมียม จึงทำให้เปลือกไข่ธรรมชาติดูดซับแคดเมียมได้มากกว่าเปลือกไข่ปลอดโปรตีน สำหรับจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ พบว่า การดูดซับแคดเมียมของเปลือกไข่ทั้ง 2 ชนิด เป็นปฏิกิริยาอันดับ 1 มีขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับอยู่ในขั้นการแพร่ภายในอนุภาค ตั้งแต่เวลา 30-90 นาที โดยอัตราเร็วการแพร่แคดเมียมผ่านชั้นฟิล์มและภายในอนุภาคเปลือกไข่จะแปรผันตรงกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียมและอุณหภูมิ และพบว่าการละลายของเปลือกไข่ ทำให้ค่า พีเอชของสารละลายสูงขึ้น และทำให้สารละลายมีความเป็นบัฟเฟอร์มากขึ้น จึงช่วยให้การดูดซับแคดเมียมมีประสิทธิภาพดีขึ้นด้วย

กฤษณ์ เทียมรมประสิทธิ์ และจันทร์ฉาย อึ้งอุดรภักดี (2545) ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการใช้รูปธาตุซีและฟางข้าวที่ปรับสภาพแล้วกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานแบตเตอรี่ โดยระบบการกรองแบบคอลัมน์ โดยทำการศึกษาอัตราการไหลของน้ำเสีย ความสูงของชั้นสารกรองและความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในน้ำเสีย ผลการศึกษาได้แสดงให้เห็นว่า รูปธาตุซีมีประสิทธิภาพในการ

กำจัดตะกั่วดีกว่าและฟางข้าวและสามารถนำมาใช้กำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานแบตเตอรี่มากกว่า 98%

กฤษณ์ เทียรฆประสิทธิ์ และดวงกมล พรหมสุวรรณ (2545) ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมและนิเกิลในน้ำเสียโดยใช้เส้นใยปาล์มปรับปรุงสภาพ โดยทำการศึกษาถึงอัตราการไหลของน้ำเสีย ความเข้มข้นของโครเมียมและนิเกิล และความสูงของชั้นดูดซับ จากการศึกษาพบว่า เมื่ออัตราการไหลและ ความเข้มข้นของโครเมียมและนิเกิลเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมและนิเกิลจะลดลงในขณะที่เมื่อความสูงของชั้นดูดซับเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมและนิเกิลจะเพิ่มขึ้น และยังพบอีกว่า ในชุดการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นของโครเมียม : นิเกิล 0.5 : 5 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหล 5 มิลลิลิตร/นาที และบรรจุเส้นใยปาล์มสูง 60 ซม. มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมและนิเกิลดีที่สุด คือใน 4 ซม. แรก ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมและนิเกิลเท่ากับ 47.34% และ 100% เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชม.มีค่าเป็น 21.45% และ 97.57% ตามลำดับ น้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์แล้วมีโครเมียม 0.29 มิลลิกรัมต่อลิตร และนิเกิล 0.11 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าเกินมาตรฐานน้ำทิ้งที่โรงงานอุตสาหกรรมกำหนดให้มีโครเมียม (VI) ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร และนิเกิลไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นในการกำจัดโครเมียม และนิเกิลในน้ำเสียโดยวิธีนี้ ควรเลือกใช้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นมาแล้ว

เพชรพร ชาวกิจเจริญ และ นิธิรัชต์ สงวนเดือน (2546) ได้ศึกษาการกำจัดทองแดงโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลืองชนิดไม่ปรับปรุงสภาพ และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากก้านดอกทานตะวันชนิดไม่ปรับปรุงสภาพ จากการทดลองพบว่ามีแนวโน้มสามารถนำไปใช้ทดแทนเรซินสังเคราะห์ในการกำจัดทองแดงได้ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงสูงที่สุดที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากับ 97.98% และ 88.90% ตามลำดับ และเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงลดลง เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลืองชนิดไม่ปรับปรุงสภาพ และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากก้านดอกทานตะวันชนิดไม่ปรับปรุงสภาพมีขีดความสามารถในการกำจัดทองแดงเท่ากับ 0.89 และ 1.05 meq/g. ตามลำดับ

เพชรพร ชาวกิจเจริญ และ ชัชฎาพร งามอาจ (2546) ได้ทำการศึกษารเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทองแดงโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรได้แก่ ต้นมันสำปะหลัง ใบสับปะรด และกากมะพร้าว ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ กระบวนการปรับปรุงสภาพทางเคมี และความเข้มข้นของทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยกระบวนการปรับปรุงสภาพทางเคมีมี 3 ชนิด คือ ชนิดที่ปรับปรุงสภาพด้วย 1 N. กรดไฮโดรคลอริก ชนิดที่ปรับปรุงสภาพด้วย 5% ฟอรั่มัลดีไฮด์ และชนิดที่ปรับปรุงสภาพด้วย 37% ฟอรั่มัลดีไฮด์ นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบ

เทียบกับชนิดที่ไม่ได้ปรับสภาพ ด้วยความเข้มข้นของโลหะหนักเท่ากับ 5, 10, 20 และ 50 มิลลิกรัม ต่อลิตร ผลการศึกษาพบว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกาบมะพร้าวชนิดที่ไม่ได้ปรับสภาพ มีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงสูงกว่าเรซินที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง และใบสับปะรด โดยสามารถกำจัดทองแดงได้สูงถึง 97.7% ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของทองแดงเท่ากับ 5 มิลลิกรัม ต่อลิตร นอกจากนี้ยังพบว่าความสามารถในการกำจัดทองแดงจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของ ทองแดงเพิ่มขึ้น โดยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกาบมะพร้าวชนิดที่ไม่ได้ปรับสภาพมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในการกำจัดทองแดงในน้ำเสียได้

ดวงรัตน์ อินทร และคณะ (2547) ได้ทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนักปรอท แคดเมียม และตะกั่ว โดยใช้สาหร่าย *Nostoc paludosum* และ *Phormidium angustissimum* โดยทำการ คัดเลือกสาหร่ายที่สามารถกำจัดโลหะหนักปรอท แคดเมียม และตะกั่ว ในสารละลายโลหะหนัก 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สภาวะพีเอช 7 จากสาหร่าย 43 ชนิด ผลการศึกษาพบว่า สาหร่ายหลายชนิดมีความสามารถในการกำจัดแคดเมียม และตะกั่วได้สูง เช่นสาหร่ายสีเขียว *Chlorella vulgaris* var. *vulgaris* มีค่าการกำจัดปรอท แคดเมียม และตะกั่ว เท่ากับ 94% 89% และ 88% ตามลำดับ *Chlorococcum* sp. มีค่าการกำจัด 96% 94% และ 71% ตามลำดับ ส่วนในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Nostoc paludosum* และ *Phormidium angustissimum* สามารถกำจัดแคดเมียมได้ 92% และ 81% กำจัดตะกั่วได้ 92% และ 77% ตามลำดับในการศึกษาได้เลือก *Nostoc paludosum* และ *Phormidium angustissimum* เพื่อทำการศึกษาเพราะสามารถกำจัดโลหะหนักได้สูง มีอัตราการเจริญสูง และสามารถแยกออกจากระบบหลังจากการกำจัดโลหะหนักได้ง่าย ซึ่งการกำจัดโลหะหนักเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 20 นาที พบว่า *Nostoc paludosum* สามารถในการกำจัดแคดเมียม และตะกั่วได้สูงสุดที่พีเอช 6.5 และ 4 ส่วน *Phormidium angustissimum* ที่พีเอช 6.5 และ 4.5 ตามลำดับ และศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโดยปรับสภาพเซลล์ด้วยหลายวิธี พบว่า การปรับสภาพเซลล์ด้วยด่าง (NaOH) ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียม และตะกั่วสูงขึ้นและเข้าสู่สมดุลได้เร็วขึ้นภายในเวลา 10 นาที ส่วนการศึกษการดูดซับในสภาวะน้ำกระด้าง พบว่า ในสารละลายที่มี Ca^{2+} และ Mg^{2+} สาหร่ายทั้ง 2 ชนิดสามารถดูดซับแคดเมียม และตะกั่วได้เพิ่มขึ้น และจากการศึกษาการดูดซับโดย Langmuir isotherm พบว่า ค่าการดูดซับสูงสุดของสาหร่าย *Nostoc paludosum* เท่ากับ 101.01 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัม และ 166.67 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัม ส่วน *Phormidium angustissimum* เท่ากับ 116.28 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัม และ 93.46 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัม และเมื่อปรับสภาพเซลล์ด้วยด่างพบว่า ค่าการดูดซับสูงสุดเพิ่มขึ้น