

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทองแดง (Copper)

ทองแดงเป็นธาตุ มีเลขอะตอม 29 น้ำหนักอะตอม 63.54 เป็นโลหะสีแดงมีความถ่วงจำเพาะ 8.96 จุดหลอมเหลว (Melting Point) 1,086 องศาเซลเซียส จุดเดือด (Boiling Point) 2,565 องศาเซลเซียส ไอของทองแดงเป็นสีเขียวทำปฏิกิริยากับกำมะถันได้ดีกว่าออกซิเจน ปกติไม่พบในรูปอิสระแต่พบในรูปแร่และสารประกอบ เช่น Cu_2O , Cu_2S , CuFeS_2 , CuSO_4 เป็นต้น ทองแดงนำไฟฟ้าได้ดีรองจากเงิน ทนการกัดกร่อนในอากาศได้ดีกว่าเหล็ก ทองแดงบริสุทธิ์มีความอ่อนปานกลาง ปัจจุบันจึงมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น ใช้ผลิตลวดสายไฟ ท่อน้ำ นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารเคมีทางการเกษตร สารกำจัดศัตรูพืช การทำสีย้อม เป็นต้น ส่งผลให้มีการแพร่กระจายของทองแดงสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้น ทองแดงเป็นธาตุที่จำเป็นต่อร่างกายของมนุษย์ที่ถ้าธาตุหนึ่งแต่ต้องได้รับในปริมาณที่เหมาะสมกับร่างกายโดยเป็นส่วนประกอบสำคัญของกระดูกและกล้ามเนื้อ (อรพิน โทณเดี้ยว, 2550)

ทองแดงสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้ 2 ทางด้วยกัน คือ

1. ทางเดินอาหาร โดยการรับประทานอาหารที่มีธาตุทองแดงเข้าไปซึ่งอาหารที่มีทองแดงมาก ได้แก่ ตับ (liver) เห็ด (mushroom) เนื้อสัตว์ อาหารทะเล เช่น หอยนางรม (oysters) ถั่ว และผลไม้เปลือกแข็งต่าง ๆ เช่น นัท (nut) เป็นต้น
2. ทางเดินหายใจ โดยการหายใจเอาฝุ่นของสารประกอบทองแดงและไอทองแดงอันเกิดจากโรงงานหลอมโลหะทองแดง และโลหะผสมของทองแดงเข้าไปซึ่งจะมีผลทำให้เกิดอันตรายต่อระบบหายใจได้

การเกิดพิษเนื่องจากทองแดง

ร่างกายมนุษย์สามารถควบคุมปริมาณทองแดงและยังสามารถบำบัดทองแดงออกจากร่างกายได้ แต่ก็อาจเกิดพิษเนื่องจากทองแดงแบบเฉียบพลันได้ในกรณีที่ร่างกายได้รับทองแดงในปริมาณมากเกินไปทันที โดยร่างกายบำบัดออกไม่ทัน การเกิดพิษเนื่องจากทองแดงแบบเฉียบพลันแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

1. การเกิดพิษจากระบบทางเดินอาหาร

การเกิดพิษเนื่องจากทองแดงจากระบบทางเดินอาหารเกิดจากรับประทานอาหารที่มีทองแดงปะปนอยู่ปริมาณสูงเข้าไป การเกิดพิษลักษณะนี้ทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียนและ

ท้องร่วง นอกจากนี้ยังเกิดอาการเม็ดเลือดแดงถูกทำลาย เกิดอาการตับวาย มีเลือดออกในทางเดินอาหาร ไม่มีไนโตรเจนในเลือด (azotemia) ความดันโลหิตสูง หัวใจเต้นเร็ว กล้ามเนื้อมีอาการหดเกร็งอย่างรุนแรง มีอาการโคม่า และตายในที่สุด ถ้าได้รับทองแดงมากเกินไป (อภิชาติ โพธิ์สุ, 2536)

2. การเกิดพิษจากระบบทางเดินหายใจ

การเกิดพิษเนื่องจากทองแดงในลักษณะนี้เกิดจากการที่ร่างกายได้รับสารประกอบทองแดง หรือไอทองแดงโดยการหายใจเข้าไปซึ่งทำให้เกิดการระคายเคือง และอักเสบในระบบทางเดินหายใจ ถ้าร่างกายได้รับไอทองแดงเป็นปริมาณมากจะทำให้เกิดอาการคลื่นไส้อาเจียนเป็นไข้ (metal fume fever) และบางครั้งทำให้ผมและผิวหนังเปลี่ยนสีได้ การหายใจเอาฝุ่นและสารประกอบทองแดง (dusts and mists of copper salts) ปริมาณมากพอสมควรเข้าร่างกายสามารถทำให้เกิดอาการเลือดคั่งในเยื่อจมูกและช่องคิวดอระหว่างจมูกและปาก (pharynx) บางครั้งทำให้เกิดแผลทะลุใน septum ของจมูก นอกจากนี้สารประกอบทองแดงเมื่อเข้าตาจะทำให้เกิดอาการระคายเคือง ตาอักเสบ และตาบอดได้ (สิทธิชัย ตันธนะสฤษฎ์, 2528)

ในแหล่งน้ำธรรมชาติจะพบทองแดงในปริมาณที่แตกต่างกันซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ซึ่งตามค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งผิวดินกำหนดให้มีทองแดงได้ไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร และตามค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดให้มีทองแดงได้ไม่เกิน 2 มิลลิกรัมต่อลิตร

วิธีวิเคราะห์ทองแดง

ทองแดงสามารถวิเคราะห์โดยใช้วิธี Atomic Absorption Spectrometry โดยอาศัยการดูดกลืนพลังงานที่มีความยาวคลื่นที่แตกต่างกันของอะตอมของโลหะหนักแต่ละชนิด เมื่อโลหะหนักต่าง ๆ ที่อยู่ในสารละลายถูกเผาด้วยความร้อนสูง (Flame) จะถูกทำให้เป็นอะตอมอิสระ เมื่ออะตอมอิสระถูกพลังงานแสงที่มีความยาวช่วงคลื่นเฉพาะตัว (จาก Hollow Cathode Lamp) จะดูดกลืนแสง เมื่อเราวัดการดูดกลืนพลังงานแสงที่ดูดกลืนจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณของอะตอมโลหะหนักนั้น ๆ โดยโลหะหนักแต่ละชนิดดูดกลืนพลังงานที่มีความยาวช่วงคลื่นแตกต่างกันซึ่งทองแดงดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 324.8 นาโนเมตร

การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในก๊าซหรือของเหลวให้มาเกาะจับติดบนผิว การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ

ชีวภาพ และเคมี ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิว หรือระหว่างพื้นผิว (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวของสองวัสดุภาค เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุล หรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่าตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับ ของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) (จรรยา คงฤทธิ์, 2546) คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของ ตัวดูดซับคือความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่น ๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้างการจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการ ดูดซับ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่เราต้องการออกมาโดยให้ตัว ดูดซับบนตัวดูดซับนั้นถูกดูดซับจนอิ่มตัวแล้วจากนั้นนำมาได้เอา โมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ ออกโดย การเปลี่ยนสภาพสมดุลเช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพ เดิม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก (สุภาพร คำธมา, 2551) กระบวนการดูดซับมีการนำมา ใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดทั้งน้ำดีและน้ำเสีย รวมไปถึงมีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ใน ด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้าน

กระบวนการดูดซับแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือกระบวนการดูดซับทางกายภาพ (physisorption) และกระบวนการดูดซับทางเคมี (chemisorption)

1. กระบวนการดูดซับทางกายภาพ (physisorption)

การดูดซับทางกายภาพเป็นการดูดซับที่ตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับจะยึดเกาะกันด้วยแรง ดึงดูดชนิดหนึ่ง โดยที่แรงดึงดูดที่เกิดขึ้น จัดเป็นแรงดูดค่อนข้างอ่อน เช่นแรงแวนเดอร์วาลส์ แรง ไดโพล-ไดโพล และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีทั้งของตัวถูกดูดซับ และตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนพื้นผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (multilayered) และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น การจัดเรียงตัวของโมเลกุล การ กระจายตัว และการเหนี่ยวนำ จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ ระบบมีความเสถียรมากขึ้น

แรงยึดเหนี่ยวที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับทางกายภาพมีดังนี้

แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) คือ แรงที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุล (โคเวเลนต์) ให้ อยู่ด้วยกันโดยโมเลกุล (โคเวเลนต์) ทุกชนิดทั้งโมเลกุลมีขั้วและโมเลกุลไม่มีขั้วต่างมีแรงแวนเดอร์ วาลส์ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุล เมื่อโมเลกุลเพิ่มขึ้นแรงแวนเดอร์วาลส์จะเพิ่มขึ้นแรง แวนเดอร์วาลส์มี 3 ประเภท ดังนี้

1. แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ซึ่งเรียกว่าแรงลอนดอน (London force) หรือแรงแผ่กระจาย (dispersion force) เกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนใน โมเลกุลเคลื่อนที่อยู่ที่

ตลอดเวลาในขณะที่ใดขณะหนึ่ง กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนใน โมเลกุลไม่ได้กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ ในลักษณะที่สมมาตร แต่จะเคลื่อนที่ไปหนาแน่นด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้ด้านนั้นมีอำนาจขั้วไฟฟ้าลบมากขึ้นกว่าปกติ อีกด้านก็จะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวก หรือกล่าวได้ว่า ทำให้โมเลกุลนั้น กลายเป็นโมเลกุลมีขั้วชั่วคราว (induced dipole) ขึ้น ขั้วของโมเลกุลที่เกิดขึ้นนี้ จะไปเหนี่ยวนำ โมเลกุลข้างเคียงมีขั้วชั่วคราวขึ้นมา ถ้าโมเลกุลมีขั้วหันขั้วบวกไปทางโมเลกุลใดก็จะเหนี่ยวนำให้ โมเลกุลนั้นเกิดขั้วลบขึ้นทางด้านที่ติดกัน โดยวิธีนี้โมเลกุลจะเกิดการเหนี่ยวนำกันต่อ ๆ ไปจนเกิด แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (induced dipole-induced dipole attraction) แรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าเพิ่มขึ้นตามมวล โมเลกุล เพราะเมื่อโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวน อิเล็กตรอนย่อมเพิ่มขึ้นด้วย เมื่ออิเล็กตรอนจำนวนมากไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งจะแสดง อำนาจไฟฟ้าลบมาก และด้านตรงข้ามก็จะมีอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกมากด้วยนอกจากจำนวน อิเล็กตรอนในโมเลกุลแล้วรูปร่างของโมเลกุลก็มีส่วนที่จะทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์มีความแข็งแรง มากหรือน้อย เป็นต้นว่า ถ้าโมเลกุล ไม่ซับซ้อน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปอยู่หนาแน่นทางด้านใด ด้านหนึ่งได้ง่าย การเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วของโมเลกุลจึงเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าโมเลกุลมีรูปร่างซับซ้อน อิเล็กตรอนที่ถูกเหนี่ยวนำจะเกิดการบดบังกัน สภาพขั้วจึงน้อย ทำให้แรงดึงดูดน้อยตามไปด้วย

2. แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับ โมเลกุล ไม่มีขั้ว กรณีเช่นนี้เกิดจาก โมเลกุลมีขั้วเข้าใกล้โมเลกุล ไม่มีขั้ว จะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำกลายเป็น โมเลกุลมีขั้วตามไปด้วย จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (dipole-induced dipole attraction)

3. แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้วด้านหนึ่งของโมเลกุลจะแสดงอำนาจ ขั้วไฟฟ้าบวกและอีกด้านหนึ่งแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าลบ ขั้วไฟฟ้าบวกกับขั้วไฟฟ้าลบจึงดูดกัน เรียกว่า แรงไดโพล-ไดโพล

ในกรณีที่โมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนกับอะตอมของธาตุอื่นที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง ได้แก่ ธาตุฟลูออรีน ออกซิเจน และไนโตรเจน ทำให้เกิดพันธะมีสภาพขั้วสูง โดย ด้านไฮโดรเจนอะตอมมีสภาพขั้วบวกจะเกิดแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอมที่มี อิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงใน โมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า พันธะ ไฮโดรเจน (hydrogen bond)

แรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นแรงที่ไม่แข็งแรงนักเมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวชนิดอื่น ๆ เช่น การทำลายแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลของคลอรีน (Cl_2) 1 โมล ใช้พลังงาน 25 กิโลจูล แต่ พลังงานที่ต้องใช้เพื่อทำลายพันธะ $\text{Cl}-\text{Cl}$ ในโมเลกุลของคลอรีนมีค่าถึง 244 กิโลจูลต่อโมล ความ แข็งแรงของแรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าระหว่างร้อยละ 0.01 - 0.1 ของพันธะโคเวเลนต์ ดังนั้นการ

ดูดซับทางกายภาพสามารถผันกลับ คือเกิดการคายหรือเกิดการคายสารออกมา (desorption) อันเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยว (แรงแวนเดอร์วาลส์) ที่ไม่แข็งแรงระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ

2. กระบวนการดูดซับทางเคมี (chemisorption)

การดูดซับทางเคมี เป็นการดูดซับที่โมเลกุลของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับดึงดูดกันด้วยแรงทางเคมีหรือเกิดปฏิกิริยาเคมีต่อกัน ทำให้เกิดเป็นพันธะที่แข็งแรง และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้เอง ดังนั้นการดูดซับทางเคมีจึงสามารถเกิดได้เพียงชั้นเดียวที่ผิวหน้าของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมีส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของระบบ และเกิดที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ แรงที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางเคมี คือแรงทางเคมี ซึ่งเกิดเนื่องจากการทำปฏิกิริยากันของหมู่ฟังก์ชัน ที่ผิวของตัวดูดซับกับ ไอออนของโลหะหนักแล้วเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน

แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี คือ การสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับซึ่งอาจเป็นพันธะไอออนิก (แรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบ) หรือพันธะโคเวเลนต์ การใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน โดยเกิดสมดุลทั้งแรงดูด (อิเล็กตรอนกับโปรตอน) และแรงผลัก (อิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอน และโปรตอนกับโปรตอน)

ประเภทของตัวดูดซับ (Adsorbent)

อรพิน โทนเคียว (2550) ได้รวบรวมตัวดูดซับโดยแบ่งได้เป็น 5 ประเภท ดังนี้

1. สารอนินทรีย์ ได้แก่ ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ซิลิกาแอมมอนด์ (activated silica) เป็นต้น สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50 - 200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่ตัวดูดซับประเภทสารอนินทรีย์นี้สามารถจับ โมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้มีการใช้ประโยชน์จากตัวดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีข้อจำกัดมาก
2. ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) อาจจัดเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์แต่เป็นตัวดูดซับที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่น ๆ จึงเป็นที่นิยมกันมาก เนื่องจากเป็นถ่านที่ผ่านการกระตุ้น เพื่อให้มีความพรุนมาก และมีพื้นที่ผิวภายในสูง โดยทั่วไปมีพื้นที่ประมาณ 450 - 1,500 ตารางเมตรต่อกรัมและมีขนาดรูพรุนตั้งแต่ 10-10,000 อังสตรอม ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากชิ้นส่วนของพืช และสัตว์ จะมีแร่ธาตุที่เป็นอันตรายน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหิน

3. ประเภทของสารอนินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion - exchange resin) สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อบำบัดสารอนินทรีย์ต่าง ๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งถือว่ามีค่าต่ำเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์แต่สามารถปรับสภาพนำมาใช้ใหม่ได้ง่ายและสารที่ใช้มีราคาถูก เช่น แกลีโอแกน เป็นต้น

4. วัสดุชีวภาพ (biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางด้านการเกษตร เช่น จีเลอซาน (chitosan) กาแฟที่ใช้แล้ว ชา และชาเขียวที่ใช้แล้ว ฟางข้าว (rice straw) เปลือกไม้ (bark) และเถาเถาวัลเป็นต้น

5. สารดูดซับชีวภาพ (biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรีย ยีสต์ หรือราสายพันธุ์ต่าง ๆ และสาหร่าย

กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. การแพร่ภายนอก (external diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

2. การแพร่ผ่านภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่กระจายเข้าสู่บริเวณพื้นที่ผิวภายในโพรงตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

3. ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่เร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นการคำนึงถึงกรณีการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

จรรยา คงฤทธิ์ (2546) ได้สรุปปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับไว้ดังนี้

1. พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ พื้นที่ผิวมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการดูดซับเนื่องจากการดูดซับส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของตัวดูดซับ ตัวดูดซับที่มีรูพรุนสูงจะทำให้มีประสิทธิภาพการดูดซับที่สูงเนื่องจากโครงสร้างของตัวดูดซับที่มีรูพรุนสูงเป็นการช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับให้สูงขึ้นด้วย ยกเว้นในกรณีที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของสารดูดซับ

2. ขนาดของตัวดูดซับ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ การลดขนาดของตัวดูดซับให้มีขนาดเล็กทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเร็วขึ้นกว่าสารที่มีขนาดใหญ่

3. ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ Film Diffusion และ Pore Diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้ Film Diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูงทำให้ Pore Diffusion เป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับทำให้อัตราการดูดซับเร็วขึ้น

4. ความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับ ตัวถูกดูดซับที่มีความสามารถในการละลายสูงจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำ เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูด

ซึบกับโมเลกุลของสารละลายจะมีค่าสูงกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับทำให้โมเลกุลของตัวดูดซับแยกออกจากสารละลายได้ยาก ส่วนตัวถูกดูดซับที่ละลายได้น้อยหรือไม่ละลายจะสามารถเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับได้ดีกว่า

5. ขนาดและน้ำหนักโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มสูงขึ้นตามขนาดและน้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดและน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับที่เป็นสารอินทรีย์ลดลง และการดูดซับในรูพรุนจะเกิดได้ดีเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของตัวดูดซับเล็กน้อย

6. พีเอช ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องจากค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีผลต่อการดูดซับมาก การดูดซับขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น หาก pH ลดลงส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) บนพื้นที่ผิวดูดซับเพิ่มขึ้นทำให้กระบวนการดูดซับ ไอออนลบเกิดได้มากขึ้น

7. อุณหภูมิ การเพิ่มของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของ ตัวดูดซับเร็วขึ้นแต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

สมดุลการดูดซับ

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น C_0 ในช่วงเริ่มต้น โมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อระยะเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา อัตราการคายจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล ณ ภาวะสมดุลการดูดซับ จำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่ (จิราวัฒน์ ศิริสกุลไพศาล, 2551)

พืชที่นำมาใช้ในการศึกษา

ยูคาลิปตัส (Eucalyptus) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. อยู่ในวงศ์ Myrtaceae เป็นพรรณไม้ที่มีถิ่นกำเนิดในทวีปออสเตรเลีย ลักษณะทั่วไป เป็นไม้ยืนต้นขนาดกลาง-ใหญ่ สูง 24-30 เมตร และอาจสูงได้ถึง 50 เมตร ไม้ผลัดใบ เป็นพันธุ์ไม้โตเร็ว ถ้าปลูกในประเทศไทยจะมีรูปทรงสูงเพรียว ลำต้นตรงมีกิ่งก้านน้อย ใบเดี่ยวเรียงเวียนสลับ ใบรูปหอกหรือรูปขอบขนานแกมหอก ดอกมีขนาดเล็กออกตามง่ามใบใกล้ปลายกิ่งเป็นช่อขนาดเล็กสีขาวไม่มี

กลิ่นออกดอกเกือบตลอดปี ผลเป็นแบบแห้งแข็งแล้วแตกอ้า มีขนาดเล็ก ภายในมีเมล็ดขนาดเล็กมาก (น้อยกว่า 1 มิลลิเมตร) ผลแก่เกือบตลอดปี สามารถขยายพันธุ์ได้โดยการเพาะเมล็ด การตัดกิ่ง การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ การเจริญเติบโตใช้เวลาเพียง 4-5 ปี

การนำไปใช้ประโยชน์ เนื้อไม้ลำต้นนำมาทำกระดาษ ใบสามารถนำมาสกัดเป็นน้ำมันได้ ทำน้ำยาหอมระเหย ใ้ระเหยแก้หวัด ลำต้นสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้าง เสาเข็ม ทำกระดาษ สร้างบ้านเรือน ทำเครื่องเรือน เครื่องใช้สอย เเผ่ถ่าน (พฤษภะ ณ อุรุยา, 2542)

ไม้ยูคาลิปตัสจัดว่าเป็นไม้โตเร็วเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย เนื่องจาก สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย และเป็นวัตถุดิบในการผลิตเชื้อกระดาษ จากรายงานของกรมพัฒนาที่ดินในปี พ.ศ. 2544 พบว่ามีพื้นที่ปลูกยูคาลิปตัสทั้งสิ้น 2,408,780 ไร่ ซึ่งสามารถผลิตไม้ยูคาลิปตัสได้ ประมาณ 6 ล้านตัน โดยนำมาใช้ผลิตเป็นเชื้อกระดาษ 60 % และเป็นเชื้อเพลิง 30 % ส่งผลให้ในปี 2553 เกิดการขยายพื้นที่การเพาะปลูกไม้ยูคาลิปตัสอย่างรวดเร็วและในปี 2556 คณะกรรมการการลงทุนเกษตรแบบมีสัญญากับประเทศเพื่อนบ้านได้กำหนดให้ยูคาลิปตัสเป็นพืชเป้าหมายในโครงการลงทุนเกษตรแบบมีสัญญากับประเทศเพื่อนบ้าน (เขาวนุช วิสุทธิพงศาภุค, 2556) จากการสำรวจพบว่ามีโรงงานสับไม้ยูคาลิปตัส 64 โรง จำนวนไม้ยูคาลิปตัสที่โรงงานรับซื้อไม้ปีละ 5,092,392 ตัน จะมีเปลือกไม้ยูคาลิปตัสประมาณ 1,043,940 ตันต่อปี และจากการประเมินพบว่าจำหน่ายให้โรงไฟฟ้าเป็นเชื้อเพลิง 49.82 % หรือ 520,130 ตันต่อปี และจำหน่ายให้แก่เกษตรกรแต่เป็นจำนวนที่น้อยมาก โดยยังมีปริมาณเปลือกไม้ยูคาลิปตัสเหลือ 50.18 % หรือ 523,810.18 ตันต่อปี (พินิจ จิรภักกุล, 2555)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รัตน มาหัช (2542) ได้ศึกษาการดูดซับโลหะหนักที่มีพิษบางตัว ได้แก่ แคดเมียม โครเมียม ทองแดง ตะกั่ว แมงกานีส นิกเกิล และสังกะสี ด้วยวัสดุธรรมชาติชนิดต่าง ๆ ที่หาง่ายและราคาถูก ได้แก่ แกลบเผา ถ่าน ถ่านกัมมันต์ ขี้เถ้า คาโอลิน เบนโทไนด์ กาบมะพร้าว รังไหม เชื้อไม้ไผ่ และใยข้าวโพด โดยพบว่าโลหะตะกั่วถูกดูดซับได้มากที่สุดในวัสดุเกือบทุกชนิด โดยอยู่ในช่วง 30 – 70 % ทองแดง แคดเมียม สังกะสีถูกดูดซับได้ 2-10 % และนิกเกิล โครเมียม แมงกานีสถูกดูดซับน้อยกว่า 1 % โดยขี้เถ้ามีความสามารถในการดูดซับมากที่สุดรองลงมาคือถ่านกัมมันต์ เบนโทไนด์ ส่วนแกลบเผา เชื้อไม้ไผ่ กาบมะพร้าวและใยรังไหมมีความสามารถในการดูดซับโลหะใกล้เคียงกัน

ชัชฎาพร องอาจ (2545) ได้ศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง ใบสับปะรด และกาบมะพร้าว พบว่า

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกามมะพร้าว มีประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสี จากน้ำเสียสังเคราะห์สูงกว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากดินมันสำปะหลังและสับปะรด โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละ 67.72, 22.55 และ 44.78 ตามลำดับ และผลการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งมีค่าความเข้มข้นของทองแดง นิกเกิล และสังกะสี เริ่มต้นเท่ากับ 3.930, 4.034 และ 0.567 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ พบว่ากามมะพร้าวชนิดไม่ได้ปรับสภาพสามารถบำบัดโลหะหนักได้สูงกว่าชนิดที่ทำการปรับสภาพ โดยสามารถบำบัดโลหะหนักได้เฉลี่ยร้อยละ 85.80, 65.13 และ 90.43 ตามลำดับ

เพชรพร เขวกิจเจริญ และนิริรัชต์ สงวนเดือน (2546) ได้ศึกษาการบำบัดโลหะหนัก โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากขี้ข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และก้านดอกทานตะวัน พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง ชนิดไม่ปรับสภาพ และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากก้านดอกทานตะวัน ชนิดไม่ปรับสภาพ มีแนวโน้มสามารถนำไปใช้ทดแทนเรซินสังเคราะห์ในการกำจัดทองแดงได้ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงสูงที่สุดที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากับ 97.98% และ 88.90% ตามลำดับ และเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงลดลง เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง ชนิดไม่ปรับสภาพ และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจาก ก้านดอกทานตะวัน ชนิดไม่ปรับสภาพ มีขีดความสามารถในการกำจัดทองแดง เท่ากับ 0.89 และ 1.05 meq/g ตามลำดับ

อรพิน โทนเดี่ยว (2550) ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสังกะสีและทองแดง ในน้ำเสียจากโรงงานโลหะ โดยใช้กากชา โดยทำการทดลองแบบเบทบัทซ์และแปรผันค่าพีเอชที่ 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ระยะเวลาการปั่นกววนที่ 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ระยะเวลาการสัมผัสที่ 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ปริมาณกากชา ที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 กรัม และความเข้มข้นของโลหะหนักที่ 25, 50, 75, 100, 150, 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสังกะสีคือที่พีเอช 5 ระยะเวลาในการปั่นกววน 120 นาที ระยะเวลาในการสัมผัส 120 นาที สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดของทองแดงคือที่พีเอช 6 ระยะเวลาในการปั่นกววน 120 นาที ระยะเวลาในการสัมผัส 60 นาที เมื่อปริมาณของกากชาเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดจะสูงขึ้นและถ้าความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการดูดซับโลหะหนักทั้งสองโดยใช้กากชาสอดคล้องกับสมการการดูดซับของฟรุนดลิช

ปรารธนา โป่งฟ้า (2551) ได้ศึกษาการกำจัดโลหะหนักสังกะสีและทองแดงด้วยเปลือกเมล็ด ใข ลำต้น เปลือกผล และเปลือกลำต้นของสบู่ดำ โดยศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ พีเอชของสารละลาย ระยะเวลาการสัมผัส ระยะเวลาการปั่นกววน ขนาดของวัสดุดูดซับ ปริมาณวัสดุดูดซับและความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก รวมทั้งลักษณะพื้นที่ผิวและ

องค์ประกอบทางเคมี พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด สังกะสีและทองแดง คือ พีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 และ 4 ตามลำดับ ระยะเวลาการสัมผัสของสังกะสีและทองแดงเท่ากับ 60 นาที ระยะเวลาการปั่นกววนในสังกะสีและทองแดงเท่ากับ 90 และ 60 นาที ตามลำดับ ขนาดของวัสดุดูดซับเล็กกว่า 0.25 มิลลิเมตร ปริมาณตัวดูดซับมากขึ้นประสิทธิภาพการกำจัด โลหะหนักจะเพิ่มขึ้นด้วย และความเข้มข้นของโลหะหนักสูงขึ้นความสามารถในการกำจัด โลหะหนักลดลง และความสามารถในการดูดซับสังกะสีจากน้ำเสียของโรงงานชุบ โลหะพบว่าไบและเปลือกเมล็ดสามารถดูดซับได้ใกล้เคียงกันเท่ากับ 71.84 % และ 70.98 % ตามลำดับ ในทองแดงพบว่าไบสามารถดูดซับได้ดีกว่าเปลือกเมล็ดคือ 76.57 % และ 68.83 % ตามลำดับ และพบว่าลิกนิน สารประกอบฟีนอลิกและพื้นที่ผิวสัมผัสของตัวดูดซับมีผลต่อการดูดซับ โลหะสังกะสีและทองแดง

ทรศนีย์ พัฒนเสรี และชูจิตร อนันต์โชค (นปป.) ได้วิเคราะห์หาชนิดของแทนนินจากเปลือกและใบยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส จากสวนป่าจังหวัดบุรีรัมย์ อายุ 3 ปี 5 ปี 7 ปี และ 10 ปี พบว่า ในเปลือกยูคาลิปตัสจะเป็นสารแทนนินชนิดคอนเดนส์แทนนิน และในใบจะเป็นแทนนินชนิดไฮโดรไลซาเบิลแทนนิน เมื่อวิเคราะห์หาปริมาณแทนนินจากใบยูคาลิปตัสที่อายุ 3 ปี 5 ปี 7 ปี และ 10 ปี มีปริมาณแทนนินเป็น 2.16 % 3.83% 7.40 % และ 4.34 % ตามลำดับ และในใบยูคาลิปตัสที่ช่วงอายุเดียวกันมีปริมาณแทนนิน 4.79% 5.94% 7.89% และ 5.32% ตามลำดับ

Saeed and Waheed (2005) ได้ศึกษาการเคลื่อนย้าย โลหะหนักจากสารละลายโดยใช้ดินมะละกอกเป็นตัวดูดซับและนำดินมะละกอกกลับมาใช้ใหม่ โดยทำการศึกษาทองแดง แคดเมียม และสังกะสีพบว่ามะละกอบริมาณ 5 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการสัมผัส 60 นาที ค่าพีเอชที่ 5 สามารถดูดซับได้ดีที่สุด ส่วนไอโซเทอร์มของแลงเมียร์สามารถดูดซับได้ดีกว่าไอโซเทอร์มของฟรุนดลิช

Prasanna, King, Srinivas and Prasad (2006) ได้ศึกษาการดูดซับทองแดงจากสารละลายโดยใช้ใบของต้นสัก พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดงคือค่าพีเอช 5.5 ระยะเวลาในการดูดซับ 180 นาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนัก 20 มิลลิกรัมต่อลิตรและปริมาณตัวดูดซับ 0.1 กรัม สามารถดูดซับทองแดงได้ 71.66 % และพบว่าการดูดซับสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์

Ghodbane (2008) ได้ศึกษาการกำจัดปรอทโดยใช้เปลือกยูคาลิปตัส โดยศึกษาปริมาณตัวดูดซับ ความเร็วในการคน อุณหภูมิ พีเอช ระยะเวลาการสัมผัสและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโดยพบว่าขีดความสามารถในการกำจัดปรอท (II) ไอออนสูงสุดมีค่า 33.11 mg/g ที่อุณหภูมิ 20 °C และพบว่าการดูดซับสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์

Anwar, Hassan, Fatima, Khalid and Ahmad (2009) ได้ศึกษาการกำจัดโครเมียม (VI) ไอออนด้วยเปลือกยูคาลิปตัส โดยทำการทดลองแบบเบส พบว่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของตัวดูดซับลดลง และสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับคือปริมาณตัวดูดซับ 2 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 ppm อุณหภูมิ 10°C ระยะเวลาการสัมผัส 90 นาที ความเร็วในการคน 300 รอบต่อนาทีและที่พีเอช 2

มหาวิทยาลัยบูรพา
Burapha University