

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แคดเมียม

แคดเมียม มีเลขอะตอม 48 เป็นโลหะทรานซิชันที่มีสีขาว-ฟ้า เนื้อมันวาว เนื้ออ่อน สามารถบิดโค้งงอได้และถูกตัดได้ง่ายด้วยมีด มักอยู่ในรูปแท่ง แผ่น เส้นลวด หรือเป็นผงเม็ดเล็ก ๆ มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 112 จุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 320.9 องศาเซลเซียส จุดเดือด 767 องศาเซลเซียส แคดเมียมบางรูปละลายน้ำได้ โดยที่แคดเมียมไม่ละลายตัวในสิ่งแวดล้อมแต่เปลี่ยนรูปได้ในดิน ในหิน และปุ๋ยจากแร่มีแคดเมียมอยู่บ้างในอากาศที่มีความชื้นแคดเมียมจะถูกออกซิไดซ์ช้า ๆ ให้แคดเมียมออกไซด์ แคดเมียมเป็นแร่ที่พบกระจายปนกับแร่ชนิดอื่น ไม่ได้เป็นแร่เอกเทศและมักปนอยู่กับสังกะสี ซึ่งปริมาณแคดเมียมมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณสังกะสีในแร่ สำหรับแร่สังกะสีในประเทศไทยที่ขุดได้ในจังหวัดตาก มีแคดเมียมประกอบอยู่ 0.23-0.38% และแคดเมียมที่อยู่ในแร่มักอยู่ในรูปสารประกอบ เช่น แคดเมียมออกไซด์ (CdO) แคดเมียมคลอไรด์ (CdCl₂) แคดเมียมซัลเฟต (CaSO₄) แคดเมียมซัลไฟต์ เป็นต้น ซึ่งในการทำเหมืองแร่มีแคดเมียมเป็นผลพลอยได้ แคดเมียมเป็นธาตุที่ไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ดีในกรดไนตริกและละลายใน Hydrochloric อย่างช้า ๆ แคดเมียมละลายได้ในกรดอ่อน จากคุณสมบัติข้อนี้ ทำให้แคดเมียมเป็นอันตรายต่อคนแบบเฉียบพลันเมื่อกินเข้าไป แต่อย่างไรก็ตามสารประกอบแคดเมียม เช่น แคดเมียมคลอไรด์ (CdCl₂) แคดเมียมซัลเฟต (CaSO₄) และแคดเมียมไนเตรต (Cd(NO₃)₂) นอกจากนี้แคดเมียมสามารถรวมกับสารอื่น ๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ โดยเฉพาะเมื่อรวมกับ cyanides และ amines โดยทั่วไปมนุษย์จะได้รับแคดเมียมผ่านเส้นทางการกินอาหารเป็นหลักและเฉลี่ยแล้วในแต่ละวันมนุษย์จะได้รับแคดเมียมประมาณ 30 µg (Sebastian and Pradad, 2015)

แคดเมียมถูกนำมาใช้ประโยชน์หลายด้านดังนี้ (Sebastian and Pradad, 2015; Jian *et al.*, 2013)

- ใช้ในการชุบโลหะ โดยใช้แคดเมียมเคลือบบนแผ่นเหล็ก ทองแดง อะลูมิเนียม โดยการชุบไฟฟ้า โลหะที่ได้จากการชุบนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน รถยนต์ อุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

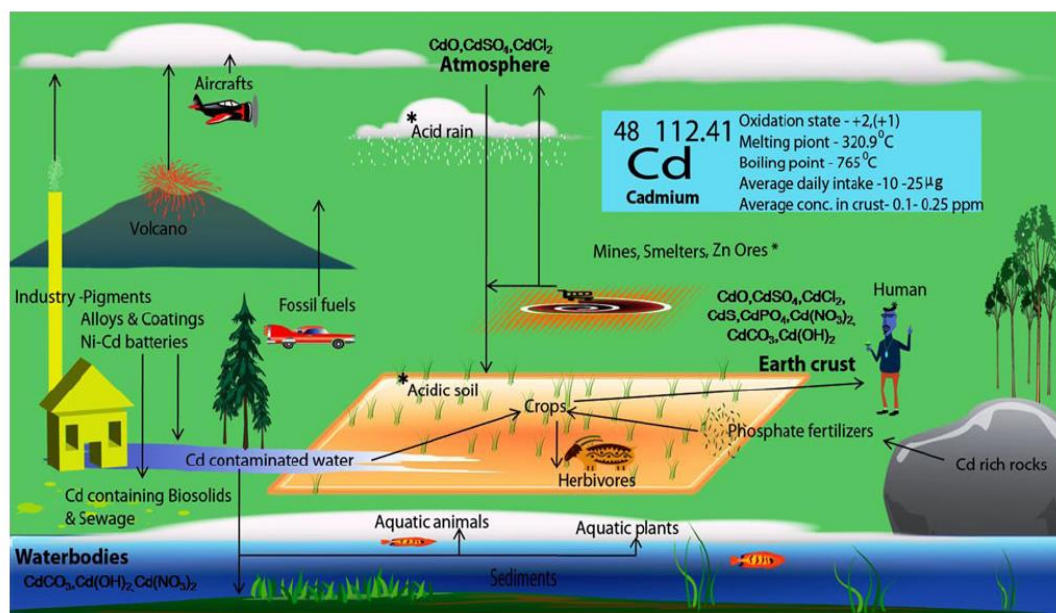
- ใช้ร่วมกับนิกเกิล เพื่อทำแบตเตอรี่ที่สามารถประจุไฟฟ้าใหม่ได้ (rechargeable battery) โดย

- ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเม็ดสีในอุตสาหกรรม สารประกอบแคดเมียมที่ใช้ในการให้สีในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น สีอีนาเมล (Enamels) เซรามิก ยาง แก้ว ผ้า เส้นใย หมึกพิมพ์ พลาสติก

- ใช้ผสมกับโลหะอื่นเป็นโลหะผสมอัลลอย (alloy) เพื่อเพิ่มความเหนียวและทนต่อการสึกกร่อน เช่น alloy ของทองแดงที่มี แคดเมียม 1% (cadmium bronze) ใช้ในการผลิตเส้นลวดโทรเลขโทรศัพท์

- ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ

จะเห็นว่าแคดเมียมสามารถปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมมาจากกิจกรรมของมนุษย์และมาจากแหล่งธรรมชาติซึ่งวัฏจักรของแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายมนุษย์แสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 แสดงวัฏจักรของแคดเมียม
(Sebastian and Pradad, 2015)

ความเป็นพิษของแคดเมียม

การที่แคดเมียมถูกนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม ทำให้แคดเมียมเกิดการปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อม บรรยากาศ และในอาหาร ทำให้เราได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายโดยไม่รู้ตัว คนทั่วไปส่วนใหญ่ได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายจากอาหารที่บริโภคเข้าไปเป็นหลัก โดยอาจปะปน มากับ พืช ผัก และผลไม้ แคดเมียมอาจจะละลายอยู่ในน้ำที่เราดื่มและได้รับจากอากาศโดยการหายใจเอาอากาศที่มีแคดเมียมฟุ้งอยู่ในบรรยากาศเข้าไป เมื่อร่างกายได้รับแคดเมียมเข้าไปมากอาจจะทำให้เกิดโรคไต-อิตาลี (Jian *et al.*, 2013; Bian *et al.*, 2013) ซึ่งทำให้สายตามีอาการผิดปกติและปวดกระดูกตามท้อง ซี่โครง และกระดูกสันหลัง เป็นต้น และแคดเมียมที่สะสมอยู่ในร่างกายสามารถแบ่งความเป็นพิษเป็นพิษ ได้ดังนี้

1) ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน

ก. ความเป็นพิษต่อระบบทางเดินอาหาร

ระบบทางเดินอาหารเป็นระบบแรกในร่างกายที่ได้รับพิษเมื่อร่างกายได้รับแคดเมียมโดยการกินซึ่งส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากการกินอาหารหรือเครื่องดื่มที่มีแคดเมียมปนเปื้อน อาการที่ปรากฏเริ่มแรกคือ รู้สึกคลื่นไส้อย่างรุนแรง ตามด้วยอาการอาเจียน ท้องร่วง เป็นตะคริว และน้ำลายฟูมปาก ในรายที่เป็นมากจะมีอาการตามมาใน 2 ลักษณะ คืออาจเกิดอาการช็อคเนื่องจากสูญเสียน้ำมาก และอาจทำให้ตายได้ภายใน 24 ชั่วโมง หรือ ระบบการทำงานของไตล้มเหลวและอาจถึงตายได้ภายใน 7 หรือ 14 วัน นอกจากนี้อาจมีผลไปทำลายตับด้วย โดยตารางที่ 2.1 แสดงความเป็นพิษแบบเฉียบพลันของแคดเมียมที่มีต่อมนุษย์โดยการกิน

ตารางที่ 2.1 ความเป็นพิษแบบเฉียบพลันของแคดเมียมที่มีต่อมนุษย์โดยการกิน (Sebastian and Pradad, 2015)

| ปริมาณแคดเมียม (mg) | อาการที่เกิด |
|---------------------|---|
| 3-90 | เกิดอาการอาเจียน แต่ไม่มีผลทำให้ถึงตาย |
| 15 | เกิดอาการอาเจียน |
| 10-326 | เกิดอาการความเป็นพิษอย่างรุนแรงแต่ไม่ถึงตาย |
| 350-3,500 | ปริมาณที่อาจทำให้ถึงตายได้ |
| 1,530-8,900 | ปริมาณที่ทำให้ถึงตายได้ |

ข. ความเป็นพิษต่อระบบทางเดินหายใจ

ความเป็นพิษที่เกิดขึ้นในระบบหายใจเนื่องจากการสูดไอหรือควันของแคดเมียม ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นเนื่องจากกิจกรรมอุตสาหกรรม โดยเฉพาะการเชื่อมโลหะด้วย ความร้อนสูง แต่โดยทั่วไปในขณะที่สูดหายใจจะไม่ปรากฏอาการหรือมีอาการเพียงเล็กน้อย และไอที่เกิดจากการใช้กระแสไฟฟ้าจะมีความเป็นพิษเป็น 2 เท่าของไอที่เกิดจากความร้อน อาการโดยรวมจะปรากฏหลังจากสูดไอเข้าไปแล้ว 2-3 ชั่วโมง คือเกิดอาการระคายเคืองที่หลอดลมและปอด ซึ่งรวมถึงอาการอื่น ๆ ด้วย เช่น ระคายเคืองที่จมูกและคอ ไอ ปวดศีรษะ อ่อนเพลีย หนาวสั่น มีไข้ เจ็บหน้าอก นอกจากนี้อาจมีอาการอย่างอื่นปรากฏด้วย เช่น คลื่นเหียน อาเจียน และท้องร่วง

2) ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง

โรคที่เกิดจากแคดเมียมครั้งแรกพบในประเทศญี่ปุ่น หลังสงครามโลกครั้งที่ 2 เมื่อปี ค.ศ. 1946 (พ.ศ. 2489) โดยผู้ป่วยมีอาการปวดกระดูกและกระดูกแตกหักง่าย ขณะเดินจะรู้สึกเจ็บ จึงเรียกโรคนี้ว่า “itai-itai” ที่แปลว่า “เจ็บ-เจ็บ” ในภาษาญี่ปุ่น และ พบว่า แคดเมียมยังปนอันตรายเป็นพิษของโรงงานในโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายแบบเรื้อรังจะส่งผลให้ท่อไตถูกทำลายโดยจะพบโปรตีนถูกขับออกมากับปัสสาวะจากทางท่อไต ส่วนอาการอย่างอื่นได้แก่

ตับถูกทำลาย ภาวะถุงลมโป่งพอง (emphysema) โรคกระดูก (osteomalacia) ระบบประสาทถูกทำลาย ทำให้มีความบกพร่องทางการเคลื่อนไหว (neurological impairment) อัมพาตผิดปกติ ต่อมหมวกไตถูกทำลาย (adrenal damage) โรคโลหิตจาง (anemia) และโรคกระดูก เนื่องจากไตสร้างวิตามินดีลดลงและขับแคลเซียมออกมากับปัสสาวะมากขึ้น ทำให้การสะสมของแคลเซียมในกระดูกและการดูดซึมแคลเซียมที่บริเวณลำไส้เล็กลดลง รวมทั้งรบกวนการสร้างโปรตีน collagen ที่เปปไทด์ ประกอบของเยื่อยึดข้อต่อกระดูกอีกด้วย ในปี ค.ศ. 1993 (พ.ศ. 2536) International Agency for Research on Cancer (IARC) ได้จัดให้แคดเมียมและสารประกอบ แคดเมียมเปปไทด์เป็นสารก่อมะเร็งต่อมนุษย์และสัตว์ กลุ่มที่ 1 (รจ. เกษตรสุวรรณ, 2552)

ข้าว

ข้าวเป็นพืชล้มลุกตระกูลหญ้า จัดอยู่ในวงศ์ Graminea สามารถเจริญเติบโตได้ทั้งในเขตร้อนและเขตอบอุ่น จำนวนชนิดทั้งหมดที่พบในสกุล Oryza มีประมาณ 20 ชนิด โดยส่วนใหญ่มีจำนวนโครโมโซมเป็น 2 ชุด (diploid, $2n = 24$) และส่วนที่มีโครโมโซม 4 ชุด (tetraploid, $2n = 48$) ข้าวที่นิยมปลูกในเอเชียในปัจจุบันแบ่งเป็น 3 พวก

ก. อินดิกา (Indica) เมล็ดยาวเรียวยาว ผลผลิตค่อนข้างต่ำ ทนร้อนต่อปุ๋ยน้อย แต่สามารถปรับตัวเข้ากับสิ่งแวดล้อมได้ดี

ข. จาปอนิกา (Japonica) เมล็ดป้อมสั้น ผลผลิตสูง ทนร้อนต่อปุ๋ยสูง

ค. จาวานิกา (Javanica) เมล็ดค่อนข้างป้อมสั้น ผลผลิตต่ำ

1. การเจริญเติบโตของข้าว

การเจริญเติบโตของข้าว สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระยะ ดังนี้ (รจ. เกษตรสุวรรณ, 2552)

1) การเจริญเติบโตทางลำต้น (Vegetative growth phase)

เริ่มตั้งแต่ข้าวงอกออกจากเมล็ดไปจนถึงข้าวเริ่มมีการสร้างรวงอ่อนหรือช่อดอก การเจริญเติบโตระยะนี้ต้นข้าวจะมีการสร้างใบ ลำต้น แตกกอ การขยายตัวของปล้องทำให้ต้นข้าวสูงขึ้น ขณะเดียวกันใต้ผิวดินก็จะมีสร้างระบบรากให้สมบูรณ์ สะสมอาหารไว้สำหรับการเจริญเติบโตในระยะสืบพันธุ์ต่อไป

2) การเจริญเติบโตระยะสืบพันธุ์หรือสร้างช่อดอกหรือรวง (Reproductive growth phase)

เริ่มตั้งแต่วันที่ต้นข้าวเริ่มสร้างดอกอ่อน จนถึงวันที่รวงเริ่มโผล่ออกจากใบธงกินเวลาประมาณ 30-40 วัน ในระยะนี้เมื่อเริ่มแรกภาษาชาวนาเรียกว่า ข้าวแตงตัว จนกระทั่งการสร้างรวงผ่านไประยะหนึ่ง รวงอ่อนมีขนาดใหญ่อยู่พอสมควรทำให้ต้นข้าวมีลักษณะกลมและป่องออก ระยะนี้เรียกข้าวตั้งท้อง ระยะที่รวงข้าวเริ่มโผล่ออกจากลำต้นเรียกว่า ข้าวโผล่ ภายในระยะเวลา 30-40 วัน ต้นข้าวจะมีการสร้างและพัฒนาส่วนต่าง ๆ ของรวงและดอก เช่น กลีบดอกส่วนต่าง ๆ ของเพศผู้และเพศเมีย เพื่อเตรียมไว้สำหรับการผสมพันธุ์ต่อไป

ภายหลังการเจริญเติบโต ระยะสืบพันธุ์ข้าวก็จะเริ่มผสมพันธุ์และสร้างเมล็ด ระยะนี้เรียกว่า ระยะสร้างเมล็ดและระยะข้าวสุกแก่ (grain formation and ripening stage) โดยจะเริ่มหลังจากการผสมเกสร ไปจนถึงเวลาที่เมล็ดข้าวแก่จัด หลังจากผสมเกสรประมาณ 7-10 วัน ข้าวก็จะเริ่มมีเมล็ดลักษณะเป็นแป้งน้ำเหมือนน้ำนม ระยะนี้จึงเรียกว่า ระยะน้ำนม ทั้งนี้ต้นข้าวใช้เวลาในการสร้างเมล็ดตั้งแต่การผสมเกสรจนถึงแก่จัดประมาณ 30 วัน

2. เมล็ดข้าว

เมล็ดข้าว หมายถึง ส่วนรวมที่เป็นแป้งที่เรียกว่า endosperm และส่วนที่เป็น embryo ซึ่งถูกห่อหุ้มไว้โดยเปลือกนอกที่เรียกว่า lemma และ palea แป้ง endosperm เป็นแป้งที่เราบริโภค embryo เป็นส่วนที่มีชีวิตและงอกออกมาเป็นต้นข้าวเมื่อเอาไปเพาะ การที่ละอองเกสรตัวผู้ตกลงบนที่รับละอองเกสรของเกสรตัวเมื่อนั้น เรียกว่า การผสมเกสร (pollination) หลังจากการผสมเกสรเล็กน้อย ละอองเกสรตัวผู้ก็จะงอกลงไปภายในก้านของเกสรตัวเมีย เพื่อนำนิวเคลียสจากละอองเกสรตัวผู้ลง ไปผสมเพื่อรวมตัวกับไข่และนิวเคลียสอื่น ๆ ในรังไข่ นิวเคลียสที่รวมตัวกับไข่ก็จะเจริญเติบโตเป็น embryo ส่วนนิวเคลียสที่รวมตัวกับนิวเคลียสอื่น ๆ (polarnuclei) ก็จะเจริญเติบโตเป็นแป้งที่เรียกว่า endosperm หลังจากการผสมเกสรประมาณ 30 วัน เมล็ดข้าวก็จะแก่พร้อมที่จะเก็บเกี่ยวได้ เมื่อได้แกะเปลือกที่เป็น lemma และ palea ของเมล็ดข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวมาก็จะได้เมล็ดข้าวที่เรียกว่า ข้าวกล้อง หรือ brown rice เมล็ดข้าวกล้องมักจะเป็นสีน้ำตาลอ่อน ๆ และเมื่อได้ผ่าตัดเมล็ดข้าวกล้องออกตามความยาวและศึกษาลักษณะของมันอย่างละเอียดก็พบว่าเมล็ดข้าวกล้องประกอบด้วย เยื่อชั้นนอกบาง ๆ เรียกว่า pericarp layers จำนวน 2 ชั้น เยื่อชั้นกลางหนึ่งชั้นเรียกว่า tegmen และเยื่อชั้นในบาง ๆ อีกหนึ่งชั้นเรียกว่า aleurone layer ถ้า pericarp layers เป็นสีแดง เมล็ดข้าวกล้องก็จะเป็นสีแดงส่วนภายในที่เป็น endosperm จะมีลักษณะเป็นแป้งสีขาวหรือใส เป็นจำนวนมากที่มี endosperm เป็นสีแดงข้าวเหนียวจะมี endosperm เป็นสีขาวขุ่น ส่วนข้าวเจ้ามี endosperm ใสกว่า อย่างไรก็ตาม endosperm ของเมล็ดข้าวเจ้าอาจมีสีขาวขุ่น เกิดขึ้นที่ด้านข้างหรือตรงกลางของเมล็ดก็ได้ ซึ่งเรียกว่า ท้องไข่ หรือท้องปลาชิว (chalkiness)

เมล็ดข้าวจะประกอบด้วย เยื่อหุ้มชั้นใน จมูกข้าว และส่วนที่เป็นแป้งอยู่ภายใน ซึ่งเรียกข้าวในลักษณะนี้ว่าข้าวกล้อง ข้าวกล้อง มีคุณค่าทางโภชนาการสูง ส่วนที่เป็นรำข้าวจะประกอบด้วยเยื่อหุ้มชั้นในซึ่งมีเส้นใยสูงและมีเกลือแร่อยู่บ้าง จมูกข้าวจะเป็นส่วนของเมล็ดข้าวที่คั่งงอ ห่อหุ้มบริเวณคัพพะ (embryo หรือ germ) ซึ่งเป็นส่วนที่จะงอกเป็นลำต้นของต้นข้าวเอาไว้ ดังนั้นจมูกข้าวจึงเป็นส่วนที่อุดมไปด้วยสารอาหารที่สมบูรณ์ที่สุดของเมล็ดข้าว มีสารที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย คือ วิตามินเอและวิตามินบีอีกหลายชนิดคือ บี 1 บี 2 บี 5 บี 9 บี 12 (รจ เกษตรสุวรรณ, 2552)

3. การปนเปื้อนแคดเมียมในข้าว

จมูกข้าวของเมล็ดข้าวเป็นแหล่งสะสมอาหารและแร่ธาตุต่าง ๆ จำนวนมาก จึงทำให้แคดเมียมสามารถสะสมในส่วนของจมูกข้าวและเนื้อเยื่อชั้นในมีเส้นใยสูงแต่มีการสะสมของสารอาหารและแร่ธาตุน้อยมีเพียงเกลือแร่อยู่บ้างเล็กน้อย แต่จมูกข้าวมักจะหลุดออกมาในระหว่างขัดสีในขบวนการผลิตข้าวขาว เนื่องจากจมูกข้าวเป็นส่วนประกอบของข้าวที่ยังไม่ได้ทำการขัดสี หรือที่

เรียกกันว่า ข้าวกล้อง เมื่อทำการขัดสีแล้วทำให้จมูกข้าวหลุดออกไปรวมทั้งเนื้อเยื่อชั้นนอกของข้าวด้วย แคดเมียมที่สะสมอยู่ในจมูกข้าวและเนื้อเยื่อชั้นนอกจึงติดออกไปกับส่วนดังกล่าว แต่ยังคงมีแคดเมียมสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อชั้นในของเมล็ดข้าว

แคดเมียมเป็นธาตุที่ละลายน้ำได้ดีกว่าธาตุโลหะอื่น ๆ ที่สามารถเปลี่ยนแปลงเคลื่อนย้ายได้รวดเร็ว ข้าวสามารถดูดแคดเมียมซึ่งมีวาเลนซ์ +2 หรืออยู่ในสภาพ Cd^{+2} เข้าไปในเนื้อเยื่อได้อย่างรวดเร็ว ถ้าความเป็นกรดหรือด่าง (pH) เหมาะสม เช่นในข้าว ดินที่มีสภาพเป็นกรดรุนแรง (pH 4.8-5.5) ข้าวจะสะสมแคดเมียมได้มากกว่าดินที่มีสภาพเป็นด่างเล็กน้อย (pH 7.4-7.8) ทั้งนี้เพราะที่ pH สูงกว่า 7.25 จะเกิดเกลือแคดเมียมคาร์บอเนต

4. มาตรฐานของแคดเมียมในข้าว

ค่ามาตรฐานของแคดเมียมในเมล็ดข้าวที่กำหนด ในมาตรฐานของ Codex Committee on Food Additives and Contaminant (CCFAC) กำหนดไว้ว่าปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวต้องไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

5. สถานการณ์การปนเปื้อนแคดเมียมในข้าวในประเทศไทย

การปนเปื้อนแคดเมียมในดินและในข้าวของประเทศไทยถูกพบเป็นมากและมีค่าเกินมาตรฐานในพื้นที่ บริเวณห้วยแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่บริเวณดังกล่าวมีอุตสาหกรรมผลิตเหมืองแร่สังกะสีอยู่ และแคดเมียมมักพบปะปนกับสังกะสีเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นเมื่อมีการเปิดหน้าดินในการทำเหมืองแร่จะทำให้แคดเมียมปะปนออกมาจากการชะล้างของน้ำฝน และไหลลงสู่ห้วยแม่ตาว ทำให้เกิดการสะสมในตะกอนท้องน้ำ เมื่อปล่อยน้ำเข้าสู่แปลงเกษตร ทำให้เกิดการแพร่กระจายแคดเมียมเข้าสู่ข้าว

Simmons และคณะ (2005) ได้ศึกษาการปนเปื้อนของแคดเมียมในลุ่มน้ำแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยได้ทำการตรวจวัดระดับแคดเมียมในดินและข้าวบริเวณอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยการศึกษาแบ่งเป็น 2 ช่วง ช่วงแรก เดือน มิถุนายน 2000-พฤศจิกายน 2000 ศึกษาแปลงนาบริเวณบ้านพะเต๊ะ ตำบลพระธาตุผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ซึ่งอยู่บริเวณแหล่งแร่สังกะสี (Zinc mineralized area) มากที่สุด พบว่า ปริมาณแคดเมียมในดิน (จำนวน 154 ตัวอย่าง) อยู่ในช่วง 3.4-284 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ส่วนในเมล็ดข้าวมีแคดเมียมปนเปื้อนอยู่ 0.1-4.4 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ซึ่งพบว่า 95% ของเมล็ดข้าวที่สุ่มตัวอย่าง มีค่าแคดเมียมอยู่ในเมล็ดข้าวเกินมาตรฐานของ Codex Committee on Food Additives and Contaminant (CCFAC) ที่ได้กำหนดไว้ที่ 0.2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ส่วนในช่วงที่สองทำการศึกษาระหว่างปี 2001-2002 ทำการศึกษาบริเวณท้ายน้ำของลำห้วยแม่ตาว ตำบลพระธาตุผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก พบว่ามีปริมาณแคดเมียมปนเปื้อนในดิน อยู่ในช่วง 0.5-218 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (จำนวน 334 ตัวอย่าง) และมีปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวสูงถึง 0.05-7.7 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (จำนวน 432 ตัวอย่าง) ซึ่งพบว่า 85% ของเมล็ดข้าวที่สุ่มตัวอย่างมีค่าแคดเมียมเกินค่ามาตรฐาน

ปัญหาของการปนเปื้อนของแคดเมียมในข้าวบริเวณพื้นที่ปลูกข้าวในลุ่มน้ำห้วยแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ส่งผลโดยตรงต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนในพื้นที่ดังกล่าวเนื่องจากมี

การนำข้าวที่ปลูกไปใช้บริโภคเป็นอาหาร และยังส่งผลกระทบต่อประชาชนทั่วไปที่มีการซื้อข้าว บริเวณแหล่งปลูกดังกล่าวไปใช้บริโภค ประชาชนมีความเสี่ยงที่จะเกิดโรคผิดปกติจากไต เพราะพิษของแคดเมียมที่สะสมในร่างกายมีผลทำให้เกิดภาวะไตวาย หรือป่วยเป็นโรคไต-อไต รวมทั้งส่งผลกระทบต่อเลือดและตับได้ ดังนั้นการหาแนวทางในการแก้ปัญหาในการลดการปนเปื้อนของแคดเมียมในข้าวเป็นวิธีที่มีประโยชน์มากสำหรับเกษตรกรในพื้นที่ดังกล่าว

การดูดตั้งโลหะหนักของพืช

1. รูปของแคดเมียมในดิน

แคดเมียมในหินอัคนี (Magmatic rocks) และหินตะกอน จะมีปริมาณไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ในการสลายตัวของดิน แคดเมียมจะอยู่ในสภาพละลายน้ำได้ง่าย และอยู่ในรูปแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) และสามารถอยู่ในรูปไอออนแคดเมียมเชิงซ้อน (Complex Ions) อื่นด้วย เช่น $CdCl^+$, $CdOH^+$, $CdHCO_3^+$, $CdCl_2^0$, $CdCl_3^-$, $CdCl_4^{2-}$, $CdOH_3^-$, $Cd(OH)_4^{2-}$ ยกตัวอย่างเช่น ความเข้มข้นของคลอไรด์ ไอออนสูง ทำให้การดูดตั้งแคดเมียมในพืชมีเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีรายงานว่า การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในดินทำให้ความเข้มข้นของแคดเมียมในพืชเพิ่มขึ้น การดูดตั้งแคดเมียมในพืชดังกล่าวเป็นผลมาจากเกลือของคลอไรด์ (Cl^- salinity) อย่างไรก็ตามวาเลนซ์ที่สำคัญที่สุดของแคดเมียมคือ +2 และปัจจัยสำคัญที่สุดในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแคดเมียมไอออนคือพีเอช และออกซิเดชัน (Oxidation potential) ภายใต้สภาวะที่เกิดออกซิเดชันอย่างแรง แคดเมียมจะอยู่ในรูปสารประกอบ เช่น แคดเมียมออกไซด์ (CdO) แคดเมียมคาร์บอเนต ($CdCO_3$) หรืออาจจะอยู่ร่วมกับฟอสเฟตได้เช่นเดียวกัน

2. กลไกการดูดซับแคดเมียมของพืช

กลไกการดูดแคดเมียมจากดินของพืช ประกอบด้วย 1) การดูดตั้งแคดเมียมจากสารละลายที่บริเวณผิวของราก 2) การดูดซึม (Absorption) และการลำเลียง (Transport) ของแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) ไปตามเยื่อหุ้มเซลล์ (Cell plasma membranes) ของเซลล์รากโดยถูกควบคุมโดยความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical potential) ของกิจกรรมแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) ระหว่างไซโตพลาสซึม ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมีของเซลล์พืช และเป็นที่เก็บสะสมของวัสดุสำหรับเซลล์ และอะโพพลาสซึม (Apoplasts) ของรากซึ่งกระบวนการดูดซึมธาตุโลหะโดยกระบวนการทางฟิสิกส์ ที่เรียกว่า Passive Adsorption ทำให้แคดเมียมถูกดูดผ่านในรากพืชทางช่องว่างระหว่างเซลล์ (Free space) นอกจากนี้ โลหะหนักที่ความเข้มข้นสูง สามารถเคลื่อนที่ผ่านอย่างรวดเร็วด้วย โดยมีการเคลื่อนที่ผ่านทางเอนโดเดอริส (Endodermis) ซึ่งเป็นเนื้อเยื่อที่อยู่ด้านนอกของเนื้อเยื่อลำเลียงของรากเพื่อเข้าสู่ท่อลำเลียงน้ำ (Xylem) หากแต่สารประกอบเชิงซ้อนที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์ (Organic) ส่วนใหญ่มีการเคลื่อนย้ายทางท่ออาหาร (Phloem) 3) การเคลื่อนที่ภายในระหว่างเซลล์แคดเมียม และ 4) ระยะการเคลื่อนย้ายและการสะสม (Deposition) ของแคดเมียมในส่วนของพืช เป็นต้น นอกจากนี้กิจกรรมต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในบริเวณราก ซึ่งแคดเมียมสามารถละลายเพิ่มได้ ในบริเวณนี้เรียก ไรโซสเฟียร์ (Rhizosphere) นั้นอาจมีผลทำให้ปริมาณ

แคดเมียม มีความสามารถในการแพร่กระจายออกไปยังผิวของรากด้วยเช่นกัน (McLaughlin and Singh, 1999)

การลดการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินโดยใช้ phytotechniques

การลดการปนเปื้อนของแคดเมียมหรือการลดการเคลื่อนที่ (mobility) ของแคดเมียมในดิน จะช่วยลดการเคลื่อนย้ายของแคดเมียมจากดินสู่ต้นพืช ซึ่งเทคนิค phytotechniques ได้แก่ 1) การใช้วัสดุปรับปรุงดิน (soil amendment) 2) การใช้พืชในการบำบัด (phytoremediation)

1. การใช้สารปรับปรุงดิน (soil amendment) การใช้สารปรับปรุงดินเพื่อปรับปรุงดิน ให้มีคุณสมบัติของดินที่ดีขึ้น เช่น การระบายอากาศ การซึมน้ำ การอุ้มน้ำ ดูดึงธาตุอาหาร และลดความเป็นกรดของดิน ตลอดจนลดการปนเปื้อนของโลหะหนักในดิน โดยสารปรับปรุงดินที่ใช้มี หลากหลาย เช่น ตะกอนน้ำเสีย, ปุ๋ยคอก, มูลไก่, มูลสุกร, ชังข้าว, ชังข้าวโพด, แร่ดินเหนียว, K_2HOP_4 , Zeolite, ปูนขาว, ยิปซัม, ฟอสเฟต, ออกไซด์ของเหล็ก, ออกไซด์ของอลูมิเนียม, ออกไซด์ของแมงกานีส และ ไบโอชาร์ (biochar) ส่วนใหญ่แล้วการใช้สารปรับปรุงดินจะช่วยลดปริมาณแคดเมียมที่จะถูกดูด ดึง (uptake) เข้าไปในพืชจะอาศัยกลไกหลากหลายได้แก่ การดูดซับ (adsorption) การตกตะกอน (precipitation) การตรึง (immobilization) และการทำให้เสถียร (stabilization) ของแคดเมียมใน ดิน (Mahar *et al.*, 2015; Sebastian and Pradad, 2015) ซึ่งเมื่อพืชมีการสะสมแคดเมียมลดลง จนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานมนุษย์สามารถนำพืชเหล่านั้นมาบริโภคได้

2. การใช้พืชในการบำบัด (Phytoremediation) เป็นการใช้พืชในการบำบัดสารมลพิษ ที่ปนเปื้อนทั้งอยู่ในรูปสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในดิน, ในน้ำ และอากาศ เพื่อลดอันตรายของสาร มลพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม การบำบัดสิ่งแวดล้อมโดยพืชจัดเป็นระบบบำบัดที่สามารถสร้างขึ้น ได้ในราคาที่ไม่สูงมากนัก เป็นการทำงานโดยอาศัยพลังงานทางธรรมชาติ ไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมี ในขณะที่กิจกรรมทางชีววิทยาของพืชสามารถเปลี่ยนสถานภาพของสารมลพิษไปเป็นสารที่มีความ เป็นพิษน้อยลงหรือไม่เป็นพิษได้

การบำบัดสิ่งแวดล้อมโดยพืช (Phytoremediation) สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภท ได้แก่ (อลิสสา, 2554)

1. กระบวนการ phytoaccumulation หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า phytoextraction คือ กระบวนการกำจัดสารมลพิษ เช่น สารประกอบเคมีอินทรีย์โลหะหนัก และธาตุกัมมันต์ (Radionuclide) เช่น ยูเรเนียม ซีเรียม เทลลูเรียม จากดินและหรือน้ำโดยการดูดซึม การลำเลียง การเคลื่อนย้าย สารมลพิษนั้นเข้าสู่พืชทางราก และการสะสมอยู่ในส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น ราก ใบ ลำต้น และกิ่งก้านต่าง ๆ สำหรับในกรณีนี้พืชจะสะสมมลพิษเหล่านี้โดยไม่มีกร่อยสลายต่อไป ซึ่ง

อาจจะเกิดจากพืชนั้น ๆ ขาดกลไกหรือวิธีการย่อยสลาย ที่เหมาะสมต่อสารมลพิษเหล่านี้ จากนั้นพืชที่มีการสะสมสารมลพิษในส่วนต่าง ๆ เหล่านี้ จะต้องนำไปบำบัดด้วยวิธีการต่างๆ ต่อไปได้แก่ การนำไปเผา ฝังกลบ หรือย่อยสลายโดยใช้จุลินทรีย์ เป็นต้น นอกเหนือจากนำไปบำบัดแล้ว ในกรณีของโลหะหนักที่สะสมอยู่ในพืชอาจนำไปผ่านกระบวนการเพื่อสกัด (recover/extract) โลหะหนักเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ กระบวนการโดยรวมแสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 กระบวนการโดยรวมของ Phytoaccumulation หรือ Phytoextraction (อลิสสา, 2554)

พืชที่จะนำมาใช้ในการบำบัดสารมลพิษและโลหะหนักด้วยวิธีนี้ต้องเป็นพืชที่มีความทนทานต่อความเป็นพิษของสารมลพิษนั้น ๆ ควรเป็นพืชที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว และเป็นพืชที่มีรากแขนงที่แผ่ออกไปได้กว้างเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการดูดซับสารมลพิษ นอกจากนั้นควรมีการสะสมสารพิษในส่วน of พืชที่มีการตัดเก็บแยกออกไปได้ง่ายโดยไม่ต้องตัดทิ้งทั้งต้น เช่น การสะสมที่ใบหิว บางส่วนของราก เป็นต้น นอกจากสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้แล้ว ปัจจัยหลักสองปัจจัยที่นำมาใช้ในการประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการ phytoaccumulation ของพืชชนิดต่างๆ ได้แก่ ผลผลิตมวลชีวภาพ (Biomass production) และ Bioconcentration factor

ปริมาณการผลิตมวลชีวภาพ หรืออีกนัยหนึ่งคือ การเจริญเติบโตของพืช ปัจจัยนี้เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อกระบวนการ phytoaccumulation/Phytoextraction เนื่องจากการเลือกใช้พืชที่มีอัตราการเติบโตสูงจะทำให้พืชสามารถดูดซับสารมลพิษต่าง ๆ ได้มากขึ้น ส่วนค่า bioconcentration factor หรืออีกชื่อหนึ่งเรียกว่า bioconversion factor คือค่าอัตราส่วนของความเข้มข้นของสารมลพิษที่สามารถสะสมอยู่ในส่วนของพืชต่อความเข้มข้นของสารมลพิษที่สามารถสะสมอยู่ในส่วนของพืชต่อความเข้มข้นของสารมลพิษนั้นในสิ่งแวดล้อมนั้น ค่านี้แสดงถึงความสามารถของพืชในการดูดซับและลำเลียงสารมลพิษไปสู่ส่วนต่าง ๆ ของพืช พืชตามธรรมชาติโดยทั่วไปมีค่า bioconversion

factor น้อยกว่า 1 ซึ่งหมายความว่า ค่าความเข้มข้นของสารมลพิษที่สามารถสะสมอยู่ในพืชมีค่าน้อยกว่าค่าความเข้มข้นของสารมลพิษรอบข้าง ซึ่งพืชมีค่า bioconversion factor น้อยกว่า 1 นี้ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในกระบวนการบำบัดสารมลพิษนี้ สมบัติของพืชโดยทั่วไปมีค่า bioconversion factor น้อยกว่า 1 นี้เป็นหลักธรรมชาติที่สมเหตุสมผล เนื่องจากสารมลพิษต่าง ๆ รวมถึงโลหะหนักเหล่านั้นมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต หากพืชตามธรรมชาติโดยทั่วไปไม่มีความสามารถในการทนทานต่อความเป็นพิษ หรือไม่มีวิถีหรือกลไกในการใช้หรือกำจัดสารมลพิษเหล่านี้ได้อย่างเหมาะสม ความเป็นพิษของสารเหล่านี้ก็จะอันตรายต่อพืชเอง ดังนั้นตามหลักการที่พืชตามธรรมชาติทั่วไปจะดูดซึมสารมลพิษเข้ามาในตัวในปริมาณที่น้อยและเป็นปริมาณที่น้อยกว่าปริมาณที่คงเหลือปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมรอบข้าง ดังนั้น ค่า bioconversion factor ซึ่งเป็นอัตราส่วนจึงคำนวณออกมามีค่าน้อยกว่า 1 อย่างไรก็ตามมีพืชบางประเภทที่มีความสามารถในการดูดซึมสารมลพิษและสามารถสะสมสารเหล่านี้ในตัวเองได้ในปริมาณที่มาก พืชเหล่านี้มีค่า bioconversion factor ที่สูง สำหรับพืชที่มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้สำหรับกระบวนการ phytoaccumulation ควรจะมีค่า bioconversion factor เท่ากับหรือมากกว่า 20

เนื่องจากการเลือกใช้พืชที่มีค่า Bioconversion factor สูงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการนำพืชมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารมลพิษและโลหะหนักที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีการศึกษาค้นคว้าอย่างมากมายเพื่อค้นคว้าพืชที่มีความสามารถที่ดีดังกล่าว พืชที่มีสมบัติการดูดซึมและสะสมสารพิษหรือโลหะหนักในระดับความเข้มข้นสูงนี้ เรียกว่า hyperaccumulator และเรียกกระบวนการสะสมสารมลพิษหรือโลหะหนักนี้ว่า hyperaccumulation ซึ่งระดับการสะสมสารพิษหรือโลหะหนักในพืชนี้อยู่ในช่วง 0.1-1% โดยน้ำหนักของน้ำหนักแห้งของพืชที่ถูกจัดอยู่ในกลุ่มนี้สามารถสะสมโลหะหนักได้มากกว่าพืชทั่วไปถึง 50-100 เท่า ในปัจจุบันพบพืชที่มีสมบัติดังกล่าวประมาณ 400 ชนิด ตัวอย่างของพืชในกลุ่มนี้ได้แก่ *Thlaspi caerulescens* และ *Cardaminopsis halleri* ซึ่งสามารถสะสมสังกะสีและแคดเมียมในปริมาณสูง *Alyssum lesbiacum* ซึ่งสามารถสะสมนิกเกิล รวมถึงเฟิร์นกูดหมาก (*Pteris vittata*) ซึ่งสามารถสะสมสารหนู (Arsenic) เป็นต้น ตัวอย่างของพืชอื่นๆ ที่จัดเป็น hyperaccumulator แสดงในตารางที่ 2.2 อย่างไรก็ตามพบว่าพืชในกลุ่ม hyperaccumulator เหล่านี้ส่วนใหญ่มีผลผลิตมวลชีวภาพ (Biomass) ต่ำ เช่น *Thlaspi-caerulescens* ซึ่งมีผลผลิตมวลชีวภาพเพียง 2-5 ตันต่อเฮกเตอร์ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม พบว่าพืชในกลุ่ม hyperaccumulator บางชนิดมีมวลชีวภาพสูงกว่านั้น เช่น *Alyssum bertoloni* และ *Berkheya coddi* ซึ่งมีผลผลิตมวลชีวภาพถึง 9 และ 22 ตันต่อเฮกเตอร์ ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 พืชชนิดต่าง ๆ ที่จัดเป็น hyperaccumulator (อลิสซา, 2554)

| ชื่อพืช | ชนิดของโลหะหนักที่พืชสามารถดูดซึม | ความเข้มข้นของโลหะหนักที่พืชดูดซึม (มิลลิกรัม/กิโลกรัม) |
|-----------------------------|-----------------------------------|---|
| พืชใบเลี้ยงคู่ | | |
| <i>Cystus ladanifer</i> | แคดเมียม | 309 |
| | โคบอลต์ | 2667 |
| | โครเมียม | 2667 |
| | นิกเกิล | 4164 |
| | สังกะสี | 7695 |
| <i>Thlaspi caerulescens</i> | แคดเมียม | 10000-15000 |
| | สังกะสี | 10000-15000 |
| <i>Arabidopsis halleri</i> | แคดเมียม | 5900-31000 |
| <i>Alyssum sp.</i> | นิกเกิล | 4200-24400 |
| <i>Braaaica junica</i> | ตะกั่ว | 10000-15000 |
| | สังกะสี | 2600 |
| <i>Betula</i> | สังกะสี | 528 |

2.กระบวนการ phytodegradation หรือ phytotransformation กระบวนการของ phytodegradation หรืออาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า phytotransformation ซึ่งหมายถึง กระบวนการเปลี่ยนรูปและหรือการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์โดยพืช กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายหลังที่สารมลพิษได้ถูกดูดซึมจากสิ่งแวดล้อมผ่านรากพืชและถูกลำเลียงเข้ามาในพืชแล้ว หลังจากนั้นสารมลพิษเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนรูปหรือสลายด้วยกระบวนการหรือวิถีเมตาบอลิซึมต่าง ๆ ในเซลล์พืชจนได้สารผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นพิษน้อยลงหรือไม่มีเลย

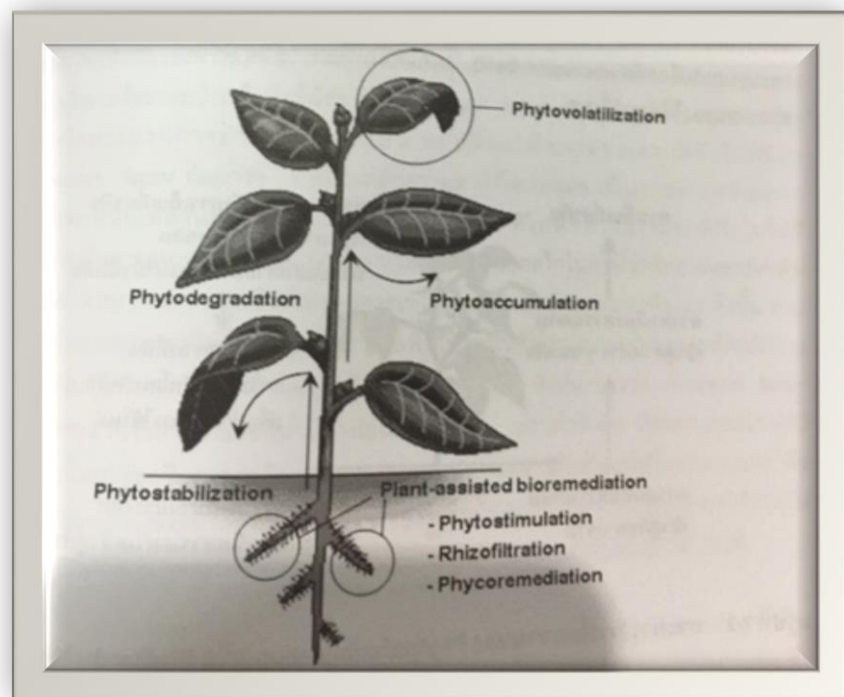
การเปลี่ยนรูปสารมลพิษโดยพืชเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปสารที่มีความเป็นพิษให้มีความเป็นพิษน้อยลง การเปลี่ยนรูปนี้นอกจากจะหมายถึงการเปลี่ยนรูปสารมลพิษไปเป็นสารตัวกลางอื่นหรือสารผลิตภัณฑ์อื่นด้วยปฏิกิริยาทางชีวภาพแล้ว ยังรวมถึงการเปลี่ยนสภาวะประจุของสารมลพิษนั้น ๆ รวมทั้งการเกิดปฏิกิริยาควบคู่ (conjugation) กับสารอินทรีย์บางชนิดในเซลล์พืชที่ทำให้สารมลพิษเหล่านั้นมีความเป็นพิษน้อยลงหรือไม่มีเลย สารมลพิษที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมที่มีรายงานว่าสามารถเปลี่ยนรูปได้ด้วยกระบวนการชีวภาพโดยพืชนี้ได้แก่ โลหะหนักบางชนิด เช่น สารหนู (Arsenic, As) สารปรอท (Mercury, Hg) เซเลเนียม (Selenium) โครเมียม (chromium) รวมทั้งสารอินทรีย์บางชนิด ได้แก่ ทีซีอี (Trichloroethylene) ทีเอ็นที (Trinitrotoluene)

3. กระบวนการ phytovolatilization ซึ่งกระบวนการ phytovolatilization จะเป็นกระบวนการการเปลี่ยนรูปสารมลพิษอินทรีย์และโลหะบางชนิดให้อยู่ในรูปที่สามารถระเหยได้ (Volatile) เป็นรูปที่มีความเป็นพิษน้อยลงและถูกกำจัดออกจากต้นพืชได้ง่าย ตัวอย่างของสารมลพิษที่ถูกกำจัดออกโดยการเปลี่ยนรูปสารให้เป็นไอโดยพืช เช่น โลหะหนักเซเลเนียมโดยผักกาดเขียว สาร methyl mercury โดยต้นยาสูบเพื่อให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ของไอปรอท สาร MTBE (methyl t-butyl ether) โดยต้นยูคาลิปตัส และสารประกอบอะโรมาติกในกลุ่ม polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) เช่น แนพทาซีน (Naphthalene) และทีอีซี (TCE) โดยใช้ต้น ไปหยาง (poplar tree) สำหรับต้นไปหยางนี้พบว่าเป็นพืชที่สามารถนำไปใช้ในการบำบัดสารมลพิษต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนทั้งในดินและน้ำบาดาล เนื่องจากเป็นพืชที่มีอัตราการดูดน้ำสูงจึงสามารถดูดซึมสารพิษต่าง ๆ ในอัตราที่สูงด้วยเป็นพืชที่เจริญเติบโตขยายพันธุ์ได้ง่ายและรวดเร็ว (ถึงแม้จะมีอายุยืนไม่มากนัก) มีระบบรากที่ลึก และสามารถทนทานต่อสารมลพิษได้หลายชนิดที่ความเข้มข้นสูง นอกจากนั้นแล้ว พบว่าต้นไปหยางมีกลไกการบำบัดสารหลายกลไกจึงทำให้มีประสิทธิภาพในการลดความเป็นพิษของสารมลพิษต่าง ๆ ได้ดี กลไกเหล่านี้ได้แก่ การดูดซึมสารมลพิษอย่างมีประสิทธิภาพ การเปลี่ยนรูปและ/หรือย่อยสลายสารมลพิษที่บริเวณราก รวมทั้งกลไกการเปลี่ยนรูปทำให้สารมลพิษเป็นสารระเหยง่าย ด้วยข้อดีเหล่านี้ปัจจุบันมีการนำต้นไปหยางและต้นไปหยางลูกผสม (hybrid poplar) มาใช้ในการบำบัดสารมลพิษต่าง ๆ อีกมากมาย เช่น สารผสม BTEX สารปราบศัตรูพืช atrazine สาร perchlorate และ สารระเบิดบางชนิด

4. กระบวนการ Phytostabilization ซึ่งเป็นการบำบัด (remediation) หรือการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมที่ปนเปื้อนด้วยสารมลพิษหรือโลหะหนักนั้นสามารถทำได้ด้วยหลากหลายวิธีด้วยกัน วิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยมได้แก่การขุดดิน (soil excavation) จากบริเวณที่มีการปนเปื้อนเพื่อขนย้ายนำมาบำบัดในบริเวณอื่นที่จัดเตรียมไว้ และเมื่อดินได้รับการบำบัดจนปราศจากสารมลพิษแล้ว (หรือมีปริมาณสารมลพิษน้อยมากในระดับตามข้อกำหนด) ดินที่สะอาดแล้วนั้นจะถูกกลับมากมแทนที่ลงไป อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ค่อนข้างยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายสูงหากการบำบัดดินในปริมาณมาก การปรับปรุงให้มีความเป็นไปได้มากขึ้นได้แก่ การสกัดสารมลพิษหรือโลหะหนักออกจากดินโดยใช้สารเคมีหรือสารชีวภาพบางประเภท เช่น สารละลายสังเคราะห์ หรือสารชะละลายชีวภาพ สารมลพิษหรือโลหะหนักที่ถูกสกัดออกจากดินถูกนำไปบำบัดด้วยวิธีการที่เหมาะสมต่อไป อย่างไรก็ตาม การสกัดสารมลพิษหรือโลหะหนักบางชนิดออกจากดินต้องอาศัยวิธีการที่ยุ่งยากซับซ้อน ดังนั้น วิธีการที่เหมาะสมสำหรับสารมลพิษหรือโลหะหนักที่ยากต่อการสกัดได้แก่ การตรึง (immobilization) สารพิษหรือโลหะหนักนั้นไว้ในบริเวณดังกล่าวเพื่อไม่ให้แพร่กระจายออกไป วิธีการนี้ยังรวมถึงการสร้างความเสถียรให้แก่สารพิษที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมโดยการเปลี่ยนรูปสารมลพิษให้ละลายน้ำได้น้อยลงหรือเปลี่ยนสถานะประจุเพื่อให้โลหะหนักตกตะกอนออกมา กระบวนการนี้เรียกว่า phytostabilization ตัวอย่างของการใช้พืชในการสร้างความเสถียรให้แก่สารมลพิษหรือโลหะหนักได้แก่ การปลูกพืชบางชนิดในบริเวณที่ปนเปื้อนเพื่อให้ดูดซึมสารมลพิษและสะสม (ตรึง) ที่บริเวณรากหรือการปล่อยสารบางชนิดออกมามากที่รากพืชและทำให้โลหะหนักตกตะกอน เช่น การเปลี่ยนประจุโครเมียม Cr^{6+} ซึ่งมีความเป็นพิษเป็น Cr^{3+} ซึ่งมีความเป็นพิษน้อยลง

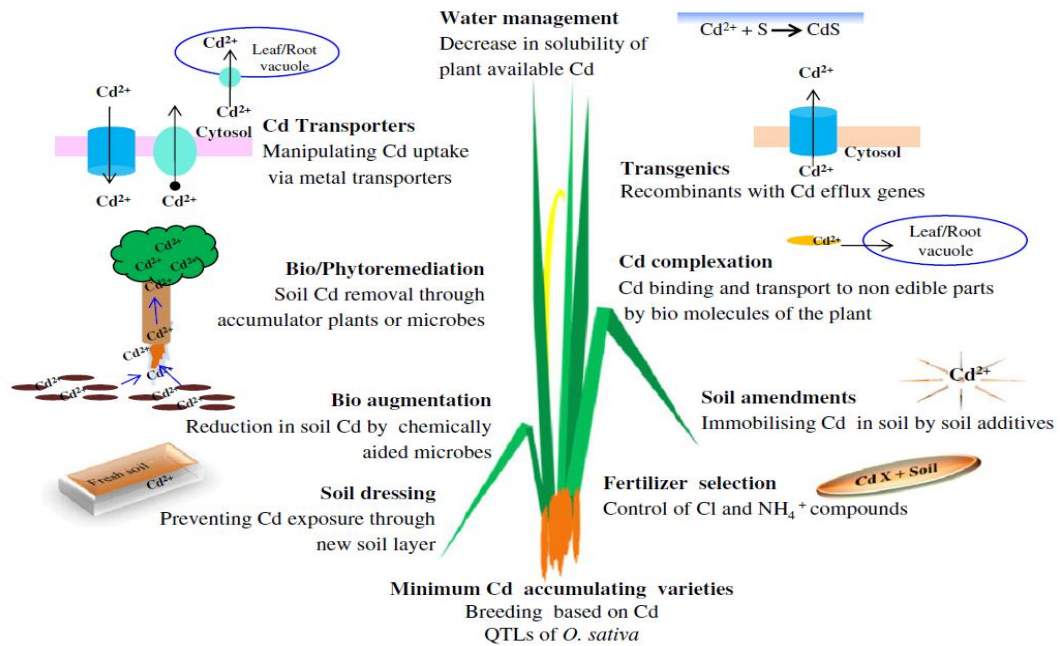
5.กระบวนการ phyto-assisted bioremediation การใช้พืชในการบำบัดมลพิษต่าง ๆ นอกเหนือจากกระบวนการข้างต้นที่พืชใช้กลไกการสะสม การเปลี่ยนรูป และหรือการย่อยสลายสารมลพิษ เพื่อให้สารนั้นมีความเป็นพิษน้อยลงแล้วนั้น พืชสามารถทำงานร่วมกับจุลินทรีย์ในดินที่อาศัยอยู่บริเวณรากพืชเพื่อเร่งการย่อยสลาย สารมลพิษเหล่านี้ กระบวนการนี้เรียกว่า phyto-assisted bioremediation

การบำบัดสิ่งแวดล้อมโดยพืช (Phytoremediation) แสดงดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 กระบวนการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ phytoremediation ซึ่งเป็นการใช้พืชเพื่อกำจัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนและตกค้างในสิ่งแวดล้อม (อลิสสา , 2554)

ตัวอย่างกลไกของการลดลงของปริมาณแคดเมียมที่สะสมในข้าว ได้แก่ การตกตะกอนของแคดเมียม (precipitation) phytoremediation การใช้สารปรับปรุงดิน (soil amendment) การใช้จุลินทรีย์ และ soil dressing แสดงดัง ภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 กลไกการลดแคดเมียมที่จะถูกดึงดูด (uptake) (Sebastian and Prada, 2015)

กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (Adsorption) เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ซึ่งอยู่ในสถานะของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะจับหรือดูดติดอยู่บนผิวของของแข็ง การดูดซับหรือการดูดติดผิวนี้นี้จะเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass Transfer) ระหว่างสถานะต่าง ๆ ทั้ง 3 สถานะ คือ ของเหลว ก๊าซ และของแข็ง ซึ่งมีได้ทั้งแบบ ของเหลว-ของเหลว ก๊าซ-ของเหลว ก๊าซ-ของแข็งและของเหลว-ของแข็ง

กลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นในระหว่างการดูดซับ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังนี้ :

ขั้นตอนที่ 1 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ เข้าหาตัวดูดซับ

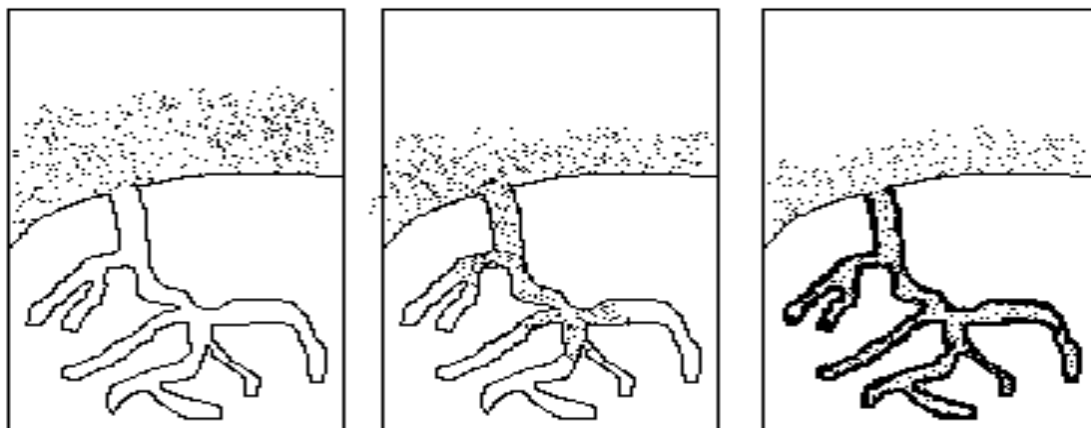
ขั้นตอนที่ 2 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ จะเกิดการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของน้ำ (Film diffusion) ซึ่งตามปกติตัวดูดซับจะมีฟิล์มของน้ำบาง ๆ ห่อหุ้มอยู่โดยรอบคล้ายเยื่อบาง ๆ และเกิดการแพร่เข้าสู่โพรงหรือช่องว่างภายในของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 เกิดการดูดซับระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวภายในโพรงหรือช่องว่างภายในของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 1 : ตัวถูกดูดซับ
แพร่ผ่านพื้นผิวตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 : ตัวถูกดูดซับ
เคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนของตัว
ดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 : เกิดการดูด
ซับของตัวดูดซับบน
พื้นผิวของตัวดูดซับ



ภาพที่ 2.5 กลไกการดูดซับ (Mackey, 1996)

1. ประเภทของการดูดซับ

แบ่งประเภทการดูดซับเป็น 3 ประเภท ได้แก่ (Faust and Aly, 1987 ; Noll *et al*, 1992)

1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เกิดจากแรงดึงดูดอย่างอ่อนระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ โดยตัวที่ถูกดูดซับและตัวดูดซับจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีใด ๆ การดูดซับแบบนี้สามารถผันกลับได้ (reversible) การดูดซับทางกายภาพบางที่เรียกว่า การดูดซับด้วยแรงแวนเดอร์วาล (van der waal's adsorption)

2) การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) จะเกี่ยวข้องกับพันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตำแหน่งดูดซับ (adsorption site) ที่ผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมีบางครั้งจะต้องการพลังงานเข้าร่วมด้วยเรียกว่า การดูดซับด้วยการกระตุ้น (activated adsorption) พันธะที่เกิดขึ้นแข็งแรงกว่าการดูดซับทางกายภาพ ตำแหน่งที่เกิดการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของตัวดูดซับในลักษณะชั้นเดียว (monolayer) ซึ่งต่างจากการดูดซับทางกายภาพที่การดูดซับเกิดในลักษณะหลายชั้น (multilayer) และพบว่า ค่า H ส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 40 to 1,000 kJmol^{-1}

3) การดูดซับด้วยประจุ (Ionic adsorption) เป็นการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่พื้นผิวด้วยแรงของประจุที่ตรงข้ามกัน (electrical attraction) ทำให้ไอออนของตัวถูกดูดซับติดอยู่ที่พื้นผิวตัวดูดซับในตำแหน่งที่มีประจุตรงข้ามกัน ไอออนที่มีประจุสูงจะถูกดูดซับได้ดีกว่าพวกที่มีประจุน้อย ๆ และไอออนที่มีขนาดเล็ก

2. ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยได้แก่ (Said, 1993; Solmaz et al., 2000)

1) ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของตัวดูดซับ คือ ขนาด และพื้นที่ผิว ขนาดของตัวดูดซับมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดซับในทางลบ กล่าวคืออัตราเร็วการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าขนาดใหญ่ ส่วนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) นั่นคือตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย

2) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง ต่ำ ๆ จะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูง ๆ ซึ่งจะมีผลต่อค่าการดูดซับหรือไม่ขึ้นขึ้นอยู่กับชนิดของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ กล่าวคือในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นบวกและตัวดูดซับมีตำแหน่งดูดซับที่มีประจุเป็นลบ ถ้าสารละลายมีค่าพีเอชต่ำ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากการแย่งกันที่จะถูกดูดซับของตัวถูกดูดซับที่มีประจุบวกกับไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ในสารละลาย แต่จะได้ผลในทางตรงกันข้ามกัน เมื่อการดูดซับอยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง ๆ เนื่องจากไฮโดรเนียมไอออนมีปริมาณน้อยลงและปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เพิ่มขึ้น จึงลดผลในการเข้าแย่งจับหรือดูดซับกับตัวถูกดูดซับ และในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นลบ ก็จะทำให้ผลตรงกันข้ามในทำนองเดียวกัน

3) อุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับขึ้นอยู่กับว่าการดูดซับในระบบเป็นประเภทใด คือ ถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพ อุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงไปในทางน้อยลงหรือคงที่ ถ้าเป็นการดูดซับทางเคมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นไปด้วย เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนจะช่วยเร่งการสร้างพันธะเคมีให้เร็วขึ้นและเพิ่มโอกาสที่ตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับของตัวดูดซับได้มากขึ้น

4) ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับต่อการดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะถูกดึงดูดออกจากน้ำก่อน แล้วจึงไปเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่มีความสามารถละลายน้ำได้ดีย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นมากกว่าสารที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยกว่า จึงทำให้ยากต่อการดูดซับมากกว่าสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยกว่า อย่างไรก็ตาม เกณฑ์ข้างบนไม่ได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้เพราะมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงไม่อาจกล่าวได้อย่างเต็มที่ว่า ความสามารถในการดูดซับและความสามารถในการละลายน้ำมีความสัมพันธ์กันอย่างแน่นอนในเชิงปริมาณ

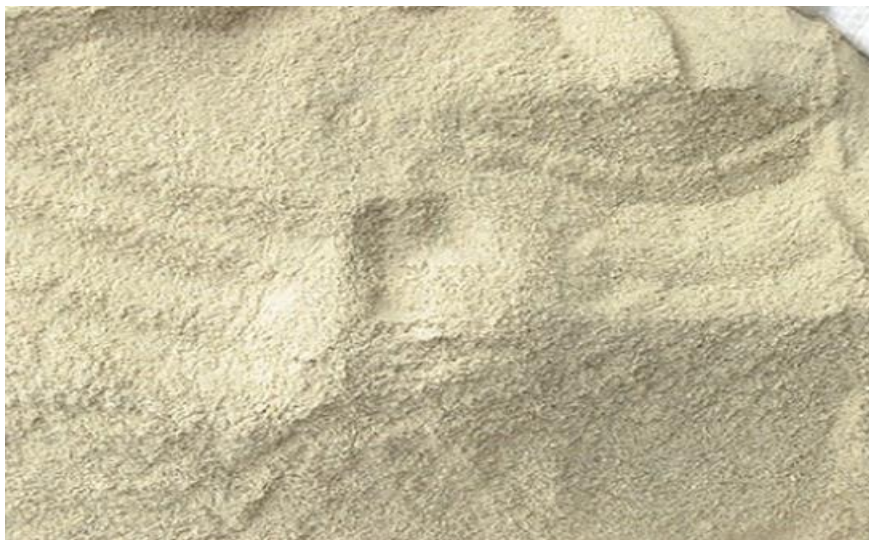
5) ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ

ขนาดของสารหรือโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะมีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการดูดซับ เมื่อน้ำหนักโมเลกุล และขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น เช่น การดูดซับกรดอินทรีย์โดยถ่านกัมมันต์ จะพบว่า ถ่านกัมมันต์ดูดซับ กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก กรดโพรพิอิก และกรดบิวเทอริกได้มากขึ้นตามลำดับของขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลต่อการละลายด้วยโดยสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างที่ยาวมักจะมีความสามารถในการละลายน้ำได้ลดลง จึงส่งผลทำให้เกิดการดูดซับโดยตัวดูดซับมากขึ้นตามขนาดที่เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่ตัวดูดซับมีรูพรุนมาก สารที่มีโมเลกุลเล็กกว่ารูพรุนมักจะถูกดูดซับได้ดีมากกว่าสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เนื่องจากสารโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สามารถเข้ารูพรุนได้ และพื้นที่ผิวภายนอกที่จะดูดซับมีอยู่น้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวภายนอกเป็นรูพรุน

เศษกระดูกอาหาร (Bone meal)

เป็นวัตถุดิบอาหารที่ให้ทั้งธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัส เป็นผลพลอยได้จากโรงฆ่าสัตว์โดยนำกระดูกมาต้มหรือนึ่งเพื่อฆ่าเชื้อโรครวมทั้งเป็นการทำให้ไขมันส่วนใหญ่ที่กระดูกละลายออกมา จากนั้นจึงอบหรือผึ่งกระดูกให้แห้งแล้วจึงนำมาบด มีธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบอยู่ประมาณ 24 และ 12 % ตามลำดับ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งหมด นอกจากนี้กระดูกยังมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบอยู่ 19% ไขมัน 7% และความชื้น 2% (Modin *et al.*, 2011) ซึ่งโปรตีนจะเป็นโปรตีนคุณภาพต่ำ แสดงดังภาพที่ 2.6

โดยทั่วไปกระดูกมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ 30 % และ สารอนินทรีย์เป็นองค์ประกอบ 70% (Kizilkaya *et al.*, 2010) ซึ่งสารอนินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบหลักคือ hydroxylapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{OH}_2$ (HAP) (Modin *et al.*, 2011; Kizilkaya *et al.*, 2010) ซึ่ง HAP มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักได้ดีด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักกับ Ca^{2+} บนผิวของกระดูก (Kizilkaya *et al.*, 2010)



ภาพที่ 2.6 กระดูกหมูป่น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Puga และคณะ (2015) ได้ศึกษาการใช้ไบโอชาร์ (biochar) ในการลดแคดเมียมและตะกั่วในดินและลดแคดเมียมและตะกั่วที่สะสมในพืชที่ปลูกในพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมและตะกั่ว โดยพืชที่ใช้ในการทดลอง 2 ชนิด ได้แก่ Jack bean และ *Mucana aterima* ส่วนไบโอชาร์ที่นำมาจากซังอ้อย เผา (pyrolysis) ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส การทดลองโดยนำดินมาจากเหมืองแร่ที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียมและตะกั่วมาผสมกับไบโอชาร์ โดยใส่ไบโอชาร์ที่ 1.5% (w/w) 3% (w/w) และ 5% (w/w) ซึ่งผลการทดลอง พบว่าไบโอชาร์สามารถลดปริมาณแคดเมียม ตะกั่ว และสังกะสีลง 56% และ 50% และ 54% ตามลำดับ และการทดลองยังพบว่า ความเข้มข้นของสังกะสีของน้ำที่อยู่ในช่องว่างในดิน (pore water) ลดลง โดยวัดครั้งที่ 1 ลดลง จาก 99 $\mu\text{g/l}$ เป็น 39 $\mu\text{g/l}$ ครั้งที่ 2 ลดจาก 97 เป็น 57 $\mu\text{g/l}$ ครั้งที่ 3 ลดจาก 71 เป็น 12 $\mu\text{g/l}$ และเมื่อคำนวณ ค่า Translocation index คือตัวบ่งชี้ความสามารถของพืชในการลำเลียงสารหนูจากรากสู่ลำต้นพบว่า ค่า Translocation index ของ Jack bean สูงกว่าของ *Mucana aterima*

Modin และคณะ (2011) ได้ศึกษาการบำบัดโลหะหนักจากน้ำชะจากหลุมฝังกลบขยะ (landfill leachate) โดยใช้ ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เศษกระดูกอาหาร (bone meal) และผงเหล็ก (iron fines) เป็นอาหาร การทดลองทำในห้องปฏิบัติการ ผลการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์สามารถบำบัด Co, Cr, Cu, Fe, Mn ได้มากกว่า 90% และประสิทธิภาพการบำบัด Ni, Ca, Pb, Sr and Zn ได้ต่ำ ส่วน เศษกระดูกอาหารสามารถบำบัด Cr, Fe, Hg, Mn and Sr ได้มากกว่า 80% และ ประสิทธิภาพการบำบัด Al, Ca, Cu, Mo, Ni, Pb and Zn อยู่ในช่วง 20-80% สำหรับ ผงเหล็กสามารถบำบัด As, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Pb, Sr and Zn ได้ แต่ประสิทธิภาพการบำบัดต่ำ

Xu และคณะ (2013) ได้ศึกษาผลของแคดเมียมต่อพารามิเตอร์ทางสรีรวิทยาของต้นมันฝรั่ง และจุดที่มีการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆในเซลล์พืช ผลการพบว่าในใบมันฝรั่ง (potato leaf) มีการสะสมของแคดเมียมสูงจึงทำให้ปริมาณของ Molondialdehyde (MDA) สูง แต่ทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) ลดลง และเมื่อวิเคราะห์ด้วย SEM-EDX พบว่า แคดเมียมจะตกตะกอนใน ชั้นเนื้อเยื่อพื้นใบชั้น spongy และ palisade นอกจากนั้นยังพบแคดเมียมอยู่ใน cortex และ ท่อลำเลียงอาหาร phloem แคดเมียมยังถูกพบในช่องว่างระหว่างเซลล์ (intercellular space) พลาสมาเมมเบรน (plasma membrane) และอยู่ในแป้งในหัวมันฝรั่ง ซึ่งการสะสมของแคดเมียมในหัวมันฝรั่งเกินมาตรฐาน ดังนั้นมันฝรั่งที่ปลูกในพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมจึงมีความเสี่ยงต่อการบริโภคของมนุษย์

Zheng และคณะ (2012) ได้ศึกษาผลการใช้ไบโอชาร์ (biochar) ที่มาจาก ชังข้าว แกลบ และรำข้าวในการปลูกข้าวในพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนัก ต่อการสะสมของ Cd Zn Pb และ As ในต้นข้าว ผลการทดลองพบว่าไบโอชาร์สามารถลดการสะสมของ Cd Zn Pb ในรากได้ดี ขณะที่ As มีปริมาณเพิ่มขึ้น และผลการทดลองยังพบว่าไบโอชาร์จากชังข้าวมีประสิทธิภาพการลดโลหะหนักได้ดีที่สุด โดยเมื่อใช้ไบโอชาร์จากชังข้าวเป็นวัสดุปรับปรุงดินสามารถการสะสม Cd Zn Pb ในรากข้าวได้สูงถึง 98% 83% และ 72% ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณ As เพิ่มขึ้นถึง 327% นอกจากนี้การทดลองได้ตรวจวัดปริมาณโลหะหนักในน้ำที่อยู่ในช่องว่างในดิน (pore water) ผลการทดลองพบว่า การใช้ไบโอชาร์เป็นวัสดุปรับปรุงดินจะทำให้ปริมาณ Cd Zn ในน้ำที่อยู่ในช่องว่างในดินลดลง ขณะที่ As ในที่อยู่ในช่องว่างในดิน ส่วนปริมาณ Pb ในที่อยู่ในช่องว่างในดินขึ้นกับชนิดของไบโอชาร์ ค่าพีเอช สารอินทรีย์ละลายน้ำ ฟอสฟอรัสละลายน้ำ (dissolved phosphorus) ซิลิกอนที่ละลายน้ำ (dissolved silicon) และ DCB-Fe (Iron plaque formation) เพิ่มขึ้นเมื่อใส่ไบโอชาร์เป็นสารปรับปรุงดิน และ ในสาร DCB-Fe ที่สกัดมารากราก พบว่าปริมาณ Cd และ Pb เพิ่มขึ้น 1.8-5.7 เท่า และ 1.4-2.8 เท่าตามลำดับ ไม่มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณ As ในสารสกัด DCB-Fe การใช้ไบโอชาร์จากชังข้าวจะทำให้ค่า Translocation Factor (ตัวบ่งชี้การลำเลียงโลหะหนักจากรากสู่ลำต้น) ของ Cd และ Pb ลดลง

Sato และ คณะ (2010) ได้ศึกษาการลดการดึงดูดแคดเมียมเข้าไปในผักโขมด้วยดินที่ปรับปรุงด้วยปุ๋ยคอก ซึ่งได้แก่มูลวัว มูลสุกร และมูลสัตว์ปีก โดยระยะเวลาการปรับปรุงดิน 4 ปี ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของแคดเมียมในใบของผักโขมเมื่อปรับปรุงดินด้วยมูลสัตว์ทั้งสาม จะทำให้ปริมาณแคดเมียมลดลง อยู่ในช่วง 34-38% เมื่อเปรียบเทียบกับแคดเมียมในใบผักโขมที่ใช้สารปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยเคมี แต่อย่างไรก็ตามการใช้สารปรับปรุงดินด้วยมูลสุกรและมูลสัตว์ปีกจะทำให้เกิดการสะสมของฟอสฟอรัสที่สะสมในดินสูงเมื่อเทียบกับการใช้สารปรับปรุงดินเป็นมูลวัว ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว ควรเลือกใช้สารปรับปรุงดินด้วยมูลวัว จะทำให้เกิดการสะสมฟอสฟอรัสในดินต่ำ และมีคุณสมบัติในการลดการดึงดูดแคดเมียมในผักโขมด้วย

Cho และคณะ (2012) ศึกษาการขาดแคลนธาตุแคลเซียมต่อความเป็นพิษของแคดเมียมในต้นข้าว ซึ่งผลการทดลองพบว่า การขาดแคลเซียมในดินจะทำให้ความสูงของต้นข้าว น้ำหนักเปียกและน้ำหนักแห้งของต้นข้าวลดลง และปริมาณแคลเซียมในรากและลำต้นลดลงด้วย นอกจากนี้จะพบว่า ปริมาณของ glutathione (GSH) อัตราส่วนของ glutathione/oxidized glutathione ลดลงของใบข้าวที่ขาดแคลนแคลเซียม ผลการทดลองยังพบว่า การขาดแคลนแคลเซียมจะทำให้แคดเมียม (Cd) ในต้นข้าวเพิ่มขึ้นทำให้ความเป็นพิษเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณแคดเมียมที่มากจะทำให้คลอโรฟิลล์และปริมาณโปรตีนลดลง

Fang และคณะ (2012) ได้ศึกษาการใช้แบคทีเรีย *Sphingobacterium sp.* D-6 และ ต้น *Sedum alferii* Hance (เป็นพืช hyperaccumulator) ในการบำบัด DDT และ แคดเมียม ในพื้นที่การเกษตร ผลการทดลองพบว่า หลังจากบำบัด 210 วัน พบว่า DDT ในดินลดลง 8.1-68% เมื่อใช้แบคทีเรีย *Sphingobacterium sp.* D-6 ในการบำบัดดินจะลดการดูดซับ (uptake) DDT ที่จะเข้าไปในต้น *Sedum alferii* Hance ลง ส่วนการสะสมของ Cd ในรากและลำต้นของ ต้น *Sedum alferii* Hance เพิ่มขึ้นเมื่อใส่แบคทีเรีย *Sphingobacterium sp.* D-6 ในดิน โดยอัตราการสะสมของแคดเมียมใน ราก/ลำต้นเท่ากับ 12.32- 21.75 แสดงว่าการเติมแบคทีเรียไปในดินทำให้การสะสมของ Cd ในต้น *Sedum alferii* Hance เพิ่มขึ้น และการทดลองยังพบว่า ปริมาณแคดเมียมในดินจะลดลง 65.8-71.8 % เมื่อปลูกต้น *Sedum alferii* Hance อย่างเดียว ขณะที่เมื่อเติมแบคทีเรีย *Sphingobacterium sp.* D-6 และปลูกต้น *Sedum alferii* Hance ปริมาณแคดเมียมในดินลดลง 14.1-58.2% และการทดลองพบว่า การใช้ แบคทีเรีย *Sphingobacterium sp.* D-6 และ ต้น *Sedum alferii* Hance ร่วมกันในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนจะช่วยลดปริมาณ DDT ในดินอย่างมีนัยสำคัญและช่วยเพิ่มการสะสม Cd ในต้น *Sedum alferii* Hance

Lu และคณะ (2014) ได้ศึกษาผลของไบโอชาร์จากไม้ไผ่และไบโอชาร์จากซังข้าวในการสะสมการ Cd Cu Pb และ Zn ในต้น *Sedum plumbizincicola* เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยดินที่ใช้ทดลองมีค่าพีเอช 5.7 และค่าอินทรีย์คาร์บอน (organic carbon) ต่ำเพียง 8.7 g/kg ขนาดของไบโอชาร์จากไม้ไผ่และซังข้าว มี 2 ขนาด <0.25 mm และ < 1 mm ปริมาณการเติมไบโอชาร์ในดิน คือ 1%, 5% และไม่เติมไบโอชาร์ ผลการทดลองพบว่า เมื่อเติมไบโอชาร์ในดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักในการปลูกต้น *Sedum plumbizincicola* จะทำให้น้ำหนักของต้นพืช (biomass) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าหลังเก็บเกี่ยว ดินมีค่าพีเอชสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มปริมาณไบโอชาร์ในดินและ การใช้ไบโอชาร์ที่มีขนาดเล็ก ผลการทดลองยังพบว่า การละลายของ Cd Cu Pb และ Zn ออกมาในดินที่เติมไบโอชาร์ (biochar-amended soil) มากกว่าการทดลองที่ไม่ได้เติมไบโอชาร์ (control) ซึ่งคู่ขนานกับการลดลงของ Cd Cu Pb และ Zn ใน Cd Cu Pb และ Zn ที่สะสมในต้น *Sedum plumbizincicola* เมื่อใช้ไบโอชาร์เป็นสารปรับปรุงดินอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) และเมื่อใช้ซังข้าวเป็นวัสดุปรับปรุงดินพบว่าสามารถลด Cu และ Pb ในรากสูงถึง 46 และ 71 % ตามลำดับ ขณะที่เมื่อใช้ไบโอชาร์จากไม้ไผ่เป็นวัสดุปรับปรุงดิน สามารถลดแคดเมียมในราก 49% และการใช้ไบโอชาร์ขนาดเล็ก <0.25 mm จะมีประสิทธิภาพการลดลงของ Zn ในลำต้นได้

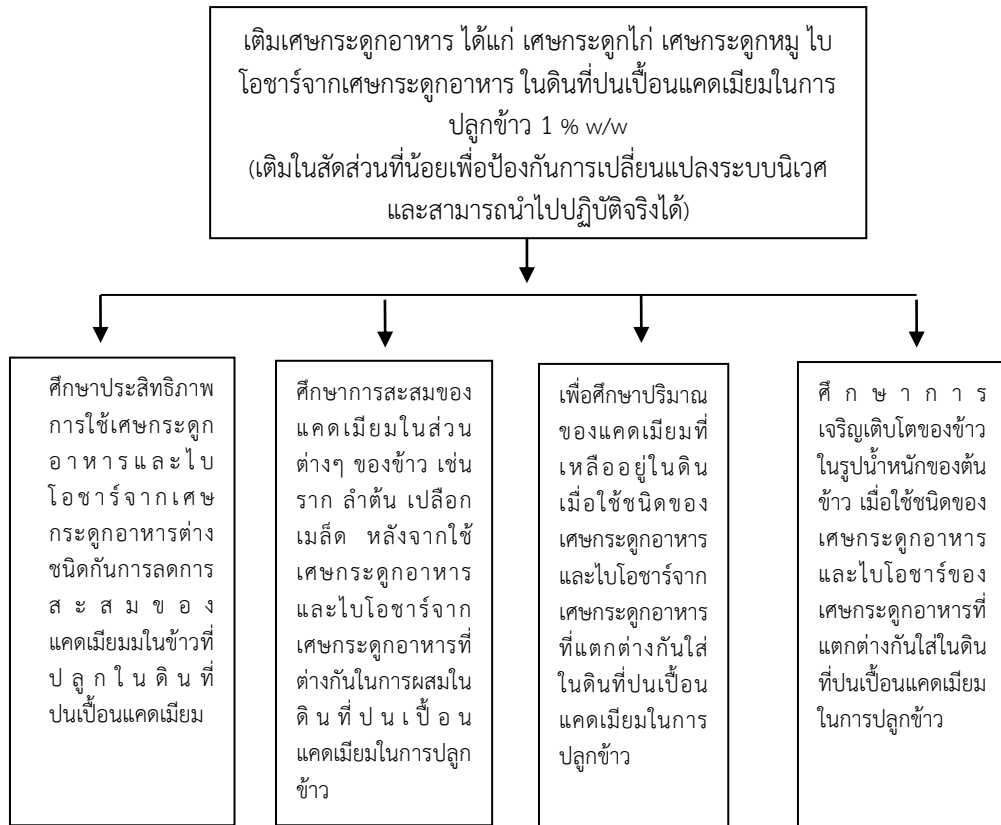
มากกว่าการใช้ไบโอชาร์ขนาด <1 mm ขณะที่ขนาดของไบโอชาร์ไม่มีผลต่อการลดลงของ Cd Cu และ Pb ในลำต้นของ *Sedum plumbizincicola*

Bian และคณะ (2013) ศึกษาไบโอชาร์ (biochar) จากซังข้าวสาลี เป็นสารปรับปรุงดินเพื่อลดแคดเมียมในข้าวในประเทศจีน โดยการศึกษาในพื้นที่จริง โดยใช้ไบโอชาร์ในอัตรา 20-40 ตัน/เฮกเตอร์ ในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมระหว่างปี 2010-2011 ผลการทดลองพบว่า การใช้ไบโอชาร์ในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมจะสามารถแคดเมียมสะสมในเมล็ดข้าวถึงร้อยละ 20-90 และปริมาณแคดเมียมที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวต่ำกว่ามาตรฐาน (<0.4 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) ดังนั้นการใช้ไบโอชาร์จากซังข้าวสาลีเป็นวัสดุปรับปรุงดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมจึงเหมาะสมในการปลูกข้าว เพื่อลดปริมาณแคดเมียมที่สะสมในเมล็ดข้าวให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

Chou และคณะ (2011) ศึกษาผลของการขาดแคลนแมกนีเซียมต่อระบบ antioxidant system ซึ่งคือระบบควบคุมความสมดุลของอนุมูลอิสระและความเป็นพิษของแคดเมียมในต้นข้าว ผลการทดลองพบว่า การขาดแมกนีเซียมจะทำให้ปริมาณของแมกนีเซียมในรากและลำต้นของต้นข้าวลดลง แต่การขาดแมกนีเซียมไม่มีผลต่อน้ำหนักแห้งและน้ำหนักเปียกของต้นข้าว และพบว่าปริมาณของ ascorbate, glutathione (GSH), อัตราส่วนของ GSH/ออกซิไดซ์ของ glutathione และ catalase ในใบข้าวที่ขาดแมกนีเซียมจะมีปริมาณที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับใบข้าวที่ไม่ได้ขาดแมกนีเซียม (control leave) ส่วนความเป็นพิษของแคดเมียม (Cd toxicity) พิจารณาจาก ค่าน้ำหนัก (biomass production) ของต้นข้าวลดลง และปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง และจะเกิดสภาวะ oxidative stress การทดลองยังพบว่าถ้ามีการขาดแมกนีเซียมจะทำให้ปริมาณของแคดเมียมที่สะสมในรากและใบของต้นข้าวสูงกว่าเงื่อนไขที่พืชไม่ขาดแมกนีเซียม แสดงว่าการขาดแคลนแมกนีเซียมไม่ได้ช่วยในการลดการสะสมของแคดเมียมในรากและลำต้นในพืช และยังทำให้ต้นข้าวได้รับพิษจากปริมาณแคดเมียมที่มากเกินไป

Zayed และคณะ (2013) ได้ศึกษาการใช้ก้างปลา (fish bone) ที่ปรับสภาพด้วยการกราฟต์ด้วยกรดอะคริลิก (grafted with acrylic acid) ในการบำบัด ตะกั่วและ แคดเมียมในน้ำ โดยการศึกษาพบว่าค่าความจุของตะกั่วและแคดเมียมบนก้างปลา (fish bone) ที่ปรับสภาพด้วยการกราฟต์ด้วยกรดอะคริลิกมีค่าสูงถึง 855 mg/g และ 785 mg/g ตามลำดับ ที่เงื่อนไข พีเอช 5 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้น (Cd²⁺) เท่ากับ 1000 mg/l แสดงว่าการกราฟต์ด้วยกรดอะคริลิกบนก้างปลาทำให้เพิ่มหมู่ ไฮดรอกซิล (hydroxyl) และ คาร์บอเนต (carbonate group) ทำให้การดูดซับโลหะหนักเพิ่มขึ้น

กรอบแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย



ภาพที่ 2.7 กรอบแนวคิดในการวิจัย