บทที่ 2
แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะหนัก (Heavy metal)

โลหะหนักคือธาตุที่มีเลขอะตอมมากกว่า 20 และมีคุณสมบัติของโลหะ เช่น ถูกทำเป็นเส้นหรือแผ่นบางๆ ได้ สามารถนำไฟฟ้าได้ อยู่ในรูปของไอออนบวก เป็นต้น (Yan-de et al., 2007) โลหะหนักบางชนิดเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต (Essential element หรือ Trace element) ได้แก่ โคบอลต์ (Cobalt: Co) ทองแดง (Copper: Cu) แมงกานีส (Manganese: Mn) ซีลีเนียม (Selenium: Se) นิกเกิล (Nickel: Ni) โมลิบดินัม (Molybdenum: Mo) และสังกะสี (Zinc: Zn) พืชและสัตว์ต้องการธาตุอาหารที่จำเป็นเหล่านี้ในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อการเจริญเติบโตอย่างปกติ

โลหะหนักที่ไม่ได้เป็นธาตุอาหารของสิ่งมีชีวิต (Non-essential element หรือ Toxic elements) ได้แก่ ปรอท (Mercury: Hg) ตะกั่ว (Lead: Pb) แคดเมียม (Cadmium: Cd) สารหนู (Arsenic: As) หากพืชหรือสัตว์ได้รับธาตุเหล่านี้อาจทำให้เกิดความผิดปกติต่างๆ ขึ้น ความผิดปกติที่เกิดขึ้นอาจรุนแรงถึงตายได้ ธาตุเหล่านี้จึงถูกจัดเป็นมลพิษทางสิ่งแวดล้อม (Berglund et al., 1984) การปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม (ดิน น้ำ อากาศ) อาจเกิดขึ้นตามธรรมชาติเนื่องมาจากการผุพังของหินและแร่ที่มีธาตุโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ หรือกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การทำเหมือง การปนเปื้อนเนื่องจากอุตสาหกรรมที่ใช้โลหะหนักในการผลิต หรือแม้แต่ของเสียจากบ้านเรือนก็อาจมีการปนเปื้อนโลหะหนักได้ โลหะหนักที่ถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมไม่สามารถถูกย่อยสลายด้วยกระบวนการในธรรมชาติได้ แต่จะถูกเปลี่ยนรูปแบบหรือสถานะซึ่งอาจทำให้โลหะหนักละลายน้ำได้มากขึ้นส่งผลให้เกิดความเป็นพิษมากขึ้นและเกิดการชะล้างปนเปื้อนไปยังบริเวณอื่นเพิ่มขึ้น หรืออาจละลายน้ำได้น้อยลงและเกิดการตกตะกอนซึ่งจะทำให้มีความเป็นพิษลดลงแต่จะสะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมเป็นเวลายาวนาน (Garbisu & Alkorta, 1997; Garbisu & Alkorta, 2001) ในงานวิจัยชิ้นนี้จะกล่าวถึงโลหะหนัก 3 ชนิด แคดเมียม ตะกั่ว และสังกะสี ซึ่งโลหะหนักทั้งสามชนิดนี้มักพบอยู่ร่วมกันในแร่ธรรมชาติ

2.1.1 แคดเมียม (Cd)

แคดเมียมเป็นธาตุที่มีเลขอะตอม 48 และมวลอะตอม 112.40 อยู่ในกลุ่ม IIb ของตารางธาตุ อยู่ในกลุ่มเดียวกับธาตุสังกะสี (Zn) และปรอท (Hg) แคดเมียมเป็นธาตุที่พบน้อยในธรรมชาติ และไม่พบในรูปของธาตุบริสุทธิ์มักพบรวมอยู่กับแร่สังกะสี (Zn), ตะกั่ว (Pb), และทองแดง (Cu) คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของธาตุแคดเมียมแสดงดังตารางที่ 1 (IPCS, 2006)

ในธรรมชาติ แคดเมียมที่พบในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม นก และ ปลา มักรวมอยู่กับโมเลกุลของโปรตีน แคดเมียมจะถูกสะสมอยู่ในตับและไตโดยสร้างพันธะที่แข็งแรงกับซีสเตอีน (cysteine) ของเมทัลโลไทโอนีน (metallothionein) ไอออนบวกของแคดเมียม (Cd^{2+}) เป็นรูปแบบที่เสถียรของธาตุแคดเมียมในธรรมชาติ ไอออนบวกของแคดเมียมอาจส่งผลกระทบต่อเอนไซม์หลายชนิดที่มีไอออนบวกของโลหะเป็นองค์ประกอบหรือตัวเร่งปฏิกริยา เช่น เอนไซม์ที่มีสังกะสี (Zn) หรือแมกนีเซียม (Mg) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากแคดเมียมอาจแข่งขันกับไอออนบวกที่จำเป็นเหล่านั้นใน

การเข้าจับกับเอนไซม์ ซึ่งทำให้การทำงานของเอนไซม์ผิดปกติและส่งผลให้กระบวนการเมแทบอลิซึมต่างๆ ผิดปกติไป นอกจากนั้นแคดเมียมยังสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลต่างๆ หรือสารประกอบที่มีความสำคัญภายในเซลล์ได้

แคดเมียมสามารถเข้าสู่ร่างกายผ่านทางอาหาร น้ำ และการหายใจ การได้รับแคดเมียมผ่านทางผิวหนังเกิดขึ้นได้น้อย (Kuriakose & Prasad, 2008) คนที่อาศัยอยู่ในบริเวณที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมอาจได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายโดยการกินอาหารหรือดื่มน้ำที่มีแคดเมียมปนอยู่ เมื่อแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายจะถูกนำไปสะสมไว้ที่ตับและไต และอาจถูกขับออกจากร่างกายอย่างช้าๆ ผ่านทางปัสสาวะและอุจจาระ องค์การอนามัยโลกได้ประกาศระดับของการได้รับแคดเมียมที่คนสามารถทนได้โดยการกิน สำหรับผู้ชาย 60 ไมโครกรัมต่อวัน และผู้หญิง 70 ไมโครกรัมต่อวัน การได้รับแคดเมียมปริมาณมากกว่านี้อาจได้รับอันตรายเฉียบพลัน หรือหากได้รับในปริมาณน้อยแต่ได้รับติดต่อกันเป็นเวลานานทำให้เกิดการสะสมแคดเมียมปริมาณมากที่ไตนำไปสู่ความผิดปกติของไต และการสูญเสียโปรตีน กรดอะมิโน และกลูโคสผ่านทางปัสสาวะ แคดเมียมยังส่งผลให้เกิดโรคกระดูกพรุน (Osteoporosis) โดยแคดเมียมจะไปยับยั้งกระบวนการดูดซับแคลเซียมและกระบวนการเมแทบอลิซึมของวิตามินดีของร่างกายซึ่งเกี่ยวข้องกับการสร้างกระดูก (Jarup et al., 1998; McLaughlin et al., 1999) ในรายที่ได้รับพิษจากแคดเมียมอย่างรุนแรงจะแสดงอาการของโรคอิไต–อิไต ซึ่งพบครั้งแรกในประเทศญี่ปุ่นเนื่องจากประชากรในพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมบริโภคข้าวที่มีแคดเมียมเจือปน (Kuriakose & Prasad, 2008)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของแคดเมียมและเกลือของแคดเมียม (IPCS, 2006)

	Empirical formula	Atomic or molecular weight	Relative density ($g\ cm^{-3}$)	Melting point (°C)	Boiling point (°C)	Water solubility ($g\ l^{-1}$)
Cadmium	Cd	112.41	8.642	320.9	765	insoluble
Cadmium chloride	$CdCl_2$	183.32	4.047	568	960	1,400 (20 °C)
Cadmium acetate	$C_4H_6CdO_4$	230.50	2.341	256	decomposes	very soluble
Cadmium oxide	CdO	128.40	6.95	< 1426	900-1000 (decomposes)	insoluble
Cadmium hydroxide	$Cd(OH)_2$	146.41	4.79	300 (decomposes)		0.0026 (26 °C)
Cadmium sulfide	CdS	144.46	4.82	1750		0.0013 (18 °C)
Cadmium sulfate	$CdSO_4$	208.46	4.691	1000		755 (0 °C)
Cadmium sulfite	$CdSO_3$	192.46		decomposes		slightly soluble

โดยปกติแล้วแคดเมียมไม่ใช่ธาตุอาหารที่พืชต้องการ แต่พืชหลายชนิดสามารถดูดซับแคดเมียมผ่านรากและลำเลียงไปสู่เรือนยอดได้ พืชที่ได้รับแคดเมียมจะเจริญเติบโตช้าเนื่องจากแคดเมียมก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสรีรวิทยาต่างๆ ของพืช และส่งผลต่อปฏิกริยาชีวเคมีต่างๆ ในเซลล์พืช นอกจากนั้นแคดเมียมยังทำให้โครงสร้างระดับเซลล์ของพืชเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง การหายใจ การสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ และการดูดซึมแร่ธาตุของพืช (Mendelssohn et al., 2001) อาการทั่วไปของพืชที่ได้รับแคดเมียมปริมาณสูง ได้แก่ การเติบโตช้า แคระแกร็น ใบเล็กม้วน ใบเหลือง และมีจุดแดงหรือน้ำตาลบนขอบใบและเส้นใบ แคดเมียมอาจส่งผลต่อการงอกและพัฒนาการของเมล็ดอีกด้วย (Påhlsson, 1989; Shah&Dubey, 1997a; Shah et al., 2001; Fediuc & Erdei, 2002)

2.1.2 สังกะสี (Zn)

สังกะสีเป็นธาตุในกลุ่ม IIb ในตารางธาตุ กลุ่มเดียวกับแคดเมียม คุณสมบัติทางกายภาพของธาตุสังกะสีแสดงดังตารางที่ 2 (Irwin et al., 1997) สังกะสีเป็นธาตุที่พบมากในธรรมชาติ พบได้ทั้งในอากาศ น้ำ ดิน และในอาหาร สังกะสีถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย เช่น การเคลือบเหล็กเพื่อป้องกันการเกิดสนิมและการผุกร่อน สังกะสีถูกนำไปผสมกับโลหะอื่นๆ เพื่อให้ได้อัลลอยส์ (Alloys) เช่น ทองเหลือง และใช้ในการผลิตแบตเตอรี่ สังกะสีสามารถทำปฏิกิริยากับธาตุต่างๆ เช่น คลอรีน (chlorine), ออกซิเจน(oxygen) และ ซัลเฟอร์ (sulfur) ทำให้เกิดสารประกอบคลอไรด์ ออกไซด์ และ ซัลเฟตของสังกะสี (Irwin et al., 1997)

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของธาตุสังกะสี (Irwin et al., 1997)

คุณสมบัติ	
เลขอะตอม	30
มวลอะตอม	65.38 กรัมต่อโมล
จุดหลอมเหลว	419.5 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	908 องศาเซลเซียส

การปนเปื้อนของสังกะสีในดิน น้ำ และอากาศอาจเกิดขึ้นจากกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น การผุกร่อนของหินที่มีสังกะสีเป็นองค์ประกอบ ภูเขาไฟระเบิด เป็นต้น อย่างไรก็ตามกิจกรรมของมนุษย์มีส่วนสำคัญที่ทำให้การปนเปื้อนสังกะสีในสิ่งแวดล้อมมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น การปนเปื้อนสังกะสีส่วนมากมาจากกิจกรรมเหมือง การเผาถ่านหิน การผลิตอลูมิเนียม การเผาขยะ การปล่อยสังกะสีปนเปื้อนลงมากับน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม บ้านเรือน ทำให้สังกะสีปนเปื้อนในน้ำ การกำจัดขยะจากโรงงานที่ใช้สังกะสีเป็นวัตถุดิบอาจทำให้มีปริมาณสังกะสีในดินเพิ่มขึ้น และการใช้ปุ๋ยก็เป็นส่วนหนึ่งในการเพิ่มปริมาณสังกะสีในดินเช่นกัน (ATSDR, 2005)

สังกะสีเป็นธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชและสัตว์ เป็นธาตุที่พบในเนื้อเยื่อทุกชนิดของร่างกายมนุษย์ ธาตุสังกะสีเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเอนไซม์จำนวนมาก และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์หลายชนิดซึ่งมีความสำคัญต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมต่างๆ ทั้งของสัตว์

คน และพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งสังกะสีมีบทบาทสำคัญต่อการแสดงออกของยีนเพราะเป็นส่วนประกอบของ transcription factor ซึ่งใช้ในการแปลรหัสพันธุกรรมเป็นโปรตีน ในจีโนมของมนุษย์พบว่าประมาณ 10% ของโปรตีนทั้งหมดสามารถจับกับสังกะสีได้ (Andreini et al., 2006) การขาดธาตุสังกะสีจะส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของร่างกาย การสืบพันธุ์ ร่างกายอ่อนแอติดโรคได้ง่าย โดยปกติแล้วการขาดธาตุสังกะสีพบน้อยมาก ปริมาณของธาตุสังกะสีที่มนุษย์ควรได้รับในแต่ละวัน (Recommended Dietary Allowances; RDAs) ประมาณ 11 มิลลิกรัมต่อวันสำหรับผู้ชาย และ 8 มิลลิกรัมต่อวันสำหรับผู้หญิง หากได้รับปริมาณสังกะสีมากกว่านี้อาจทำให้เกิดความเป็นพิษเฉียบพลันได้ เช่น อาเจียน หมดสติ ปวดท้อง ท้องเสีย และอาจเป็นไข้ได้ การได้รับสังกะสีปริมาณสูงต่อเนื่องกันเป็นเวลานานหลายเดือนอาจทำให้เกิดภาวะโลหิตจาง ตับอ่อนถูกทำลาย เกิดการลดลงของระดับ เอชดีแอล (HDL; high density lipoprotein) และคลอเลสเตอรอล (cholesterol) (ATSDR, 2005)

แม้ว่าสังกะสีเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืช แต่พืชต้องได้รับในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อการเจริญเติบโต หากพืชได้รับสังกะสีมากเกินไปอาจจะยับยั้งการเจริญเติบโตของพืชได้ และพืชอาจแสดงอาการความเป็นพิษได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามสังกะสีมีความเป็นพิษต่อพืชน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับโลหะหนักชนิดอื่น สังกะสีเป็นองค์ประกอบและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์หลายชนิดในพืช เช่น คาร์บอนิกแอนไฮเดรส (carbonic anhydrases) แอลกอฮอลดีไฮโดรจีเนส (alcohol dehydrogenase) ซุปเปอร์ออกไซด์ ดีสมิวเตรส (superoxide dismutase) เป็นต้น สังกะสีมีบทบาทสำคัญในการควบคุมเมแทบอลิซึมของไนโตรเจน และมีผลต่อเสถียรภาพของโมเลกุลดีเอ็นเอ และอาร์เอ็นเอ การขาดธาตุสังกะสีอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเมแทบอลิซึมในพืช ส่งผลให้การเจริญเติบโตลดลงและแคระแกร็น เกิดการเหลืองซีดที่ใบ (Hagemeyer, 1999) พืชที่เจริญเติบโตบนดินที่มีสังกะสีปนเปื้อนปริมาณสูงมากอาจแสดงอาการความเป็นพิษได้ โดยทั่วไปอาการความเป็นพิษมักจะเหมือนกับอาการขาดธาตุ เช่น การเจริญเติบโตลดลง ใบเหลืองซีด การลดลงของคลอโรฟิลล์และอัตราการสังเคราะห์แสง ปริมาณสังกะสีที่มากเกินไปอาจไปจำกัดการขนส่งคาร์โบไฮเดรตผ่านโฟลเอมไปยังเนื้อเยื่อบริเวณที่มีการเจริญเติบโต และทำให้เกิดการสะสมแป้งและน้ำตาลที่ใบ อย่างไรก็ตามพืชบางชนิดอาจมีการปรับตัวให้ทนทานต่อสังกะสีได้ ซึ่งจะเจริญเติบโตบนพื้นดินที่มีการปนเปื้อนสังกะสีและสามารถดูดซับและสะสมสังกะสีปริมาณสูงได้ (Hagemeyer, 1999; Påhlsson, 1989)

2.1.3 ตะกั่ว (Pb)

ตะกั่วเป็นธาตุที่เลขอะตอมและมวลอะตอมเท่ากับ 82 และ 207.2 ตามลำดับ ตะกั่วเป็นโลหะอ่อนมีสีเงินแกมฟ้า พบได้ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งในดิน หิน น้ำ พืช และอากาศ แร่ที่มีตะกั่วผสมอยู่ได้แก่ แร่กาลีนา (Galean, PbS) แร่เซอรัสไซท์ (Cerrussite, $PbCO_3$) แร่อะไนลีไซท์ (Anylesite, $PbSO_4$)

โลหะตะกั่วเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือ การรับประทานอาหารและดื่มน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่ว การหายใจ โดยเฉพาะจากไอเสียรถยนต์ และการดูดซึมผ่านทางผิวหนัง การได้รับตะกั่วเข้าสู่ร่างกายมักเกิดกับบุคคลที่มีอาชีพเกี่ยวข้องกับตะกั่วเป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะตะกั่วอินทรีย์จะถูกดูดซึม

เข้าผิวหนังได้ดี การปนเปื้อนของตะกั่วในอาหารอาจเกิดจากผู้ผลิตอาหาร เช่น อาหารที่มีสีสันเนื่องจากการใช้สีย้อมผ้าหรือสีย้อมกระดาษแทนสีผสมอาหาร อาหารที่บรรจุถุงกระดาษหนังสือพิมพ์อาจมีสารตะกั่วปนเปื้อนเนื่องจากหมึกพิมพ์มีสารตะกั่วผสมอยู่ เป็นต้น อาหารที่ได้จากแหล่งตามธรรมชาติซึ่งมีการปนเปื้อนตะกั่วก็เป็นทางหนึ่งที่ทำให้คนได้รับสารตะกั่วเข้าสู่ร่างกาย เช่น สัตว์น้ำและผลิตภัณฑ์จากสัตว์น้ำ ที่ได้จากแหล่งน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่ว การปนเปื้อนตะกั่วในแหล่งน้ำอาจเกิดจากการปล่อยน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานทำแบตเตอรี่รถยนต์ หรือจากกิจกรรมเหมือง นอกจากนี้พืชที่ใช้เป็นอาหารซึ่งปลูกบนดินที่ปนเปื้อนตะกั่วอาจมีตะกั่วสะสมอยู่ (ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา, 2532)

การได้รับตะกั่วปริมาณมากอาจทำให้เกิดอาการปวดท้อง น้ำหนักลด เบื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียน ท้องผูก อาการทางประสาทและสมอง ทำให้ทรงตัวไม่อยู่ เกิดอาการประสาทหลอน ซึมไม่รู้สึกตัว ชัก มือ และเท้าตก เป็นอัมพาต สลบและอาจตายได้ตะกั่วไม่ใช่ธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืช แต่พืชที่เจริญเติบโตบนดินที่ปนเปื้อนตะกั่วสามารถดูดซับตะกั่วและสะสมโลหะไว้ในส่วนเรือนยอดได้ ตะกั่วจะส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช และพืชอาจแสดงอาการเกิดพิษได้ถ้าได้รับตะกั่วในปริมาณสูงมาก (ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา, 2532)

2.2 การปนเปื้อนโลหะหนักในประเทศไทย

2.2.1 การปนเปื้อนโลหะแคดเมียมและสังกะสี

ในประเทศไทยพบการปนเปื้อนแคดเมียมและสังกะสีปริมาณสูงในพื้นที่เกษตรกรรมโดยรอบเหมืองสังกะสี ในอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2547; Phaenark et al., 2009) ในพื้นที่ดังกล่าวได้มีการทำเหมืองสังกะสีมาตั้งแต่ปี 2520 ในปัจจุบันบริษัทผาแดงอินดัสทรีได้รับสัมปทานให้ทำเหมืองในบริเวณดังกล่าว ตั้งแต่ปี 2546 ได้มีรายงานที่แสดงให้เห็นว่าพื้นที่เกษตรกรรมซึ่งได้รับน้ำจากห้วยแม่ตาวและห้วยแม่กุ มีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีสูงมาก ซึ่งลำห้วยทั้งสองไหลผ่านพื้นที่ที่มีแร่สังกะสีปริมาณสูง และมีการทำเหมืองสังกะสีมานานกว่า 20 ปี โดยธรรมชาติแคดเมียมมักพบปนอยู่ในแร่สังกะสีดังนั้นจึงพบการปนเปื้อนโลหะทั้งสองชนิดร่วมกัน(International Water Management Institute, South East Asia Region, 2003; Simmons et al., 2005)

ในปี 2548 มีรายงานว่าพื้นที่ปลูกข้าวที่อยู่บริเวณรอบเหมืองสังกะสีมีการปนเปื้อนโลหะแคดเมียมและสังกะสี โดยมีแคดเมียมในดินประมาณ 0.5 – 284 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน และมีสังกะสีประมาณ 100 – 8036 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน และผลการศึกษายังบ่งชี้ว่าการปนเปื้อนแคดเมียมและสังกะสีในพื้นที่ปลูกข้าวมาจากการใช้น้ำจากลำห้วยที่ไหลผ่านพื้นที่ที่มีการทำเหมืองแร่ เมล็ดข้าวที่ได้จากพื้นที่ปนเปื้อนมีแคดเมียมปนเปื้อนอยู่ประมาณ 0.05 - 7.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม การปนเปื้อนดังกล่าวก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพของคนซึ่งมีการบริโภคผลผลิตทางการเกษตรที่ได้จากพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมและสังกะสี (Simmons et al., 2005) ต่อมาในปี 2550 ได้มีทีมนักวิจัยลงพื้นที่เพื่อสำรวจปริมาณแคดเมียมในปัสสาวะของประชาชนที่อาศัยอยู่ในบริเวณที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมและสังกะสี ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าคนที่บริโภคข้าวที่ปลูกในพื้นที่ปนเปื้อนมีปริมาณโลหะแคดเมียมในปัสสาวะสูงกว่าคนที่ไม่ได้บริโภคข้าวในพื้นที่ (Swaddiwudhipong et al., 2007)

ดังนั้นพื้นที่เกษตรกรรมที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักดังกล่าวจึงถูกห้ามปลูกข้าวและพืชผลทางการเกษตรเพื่อการบริโภค และรัฐบาลได้พยายามส่งเสริมการปลูกพืชทางเลือกชนิดอื่นที่ไม่ได้นำมาเป็นอาหาร

2.2.2 การปนเปื้อนโลหะตะกั่ว

ในปี พ.ศ. 2541 มีรายงานการปนเปื้อนโลหะตะกั่วในลำห้วยคลิตี้ อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี (กรมควบคุมมลพิษ, 2552) การปนเปื้อนเกิดจากการรั่วไหลของหางแร่จากบ่อเก็บกากตะกอนของโรงแต่งแร่คลิตี้ บริษัทตะกั่วคอนเซนเตรทส์ (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งรับแร่มาจากเหมืองบ่องาม การปนเปื้อนตะกั่วในแหล่งน้ำส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนอย่างรุนแรงในหมู่บ้านคลิตี้ล่าง เนื่องจากมีการใช้น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค การบริโภคอาหารที่ได้จากธรรมชาติซึ่งมีการปนเปื้อนโลหะตะกั่ว เช่น ปลาจากลำห้วยที่มีการปนเปื้อน หรือการบริโภคพืช ผัก หรือผลิตผลทางการเกษตรซึ่งปลูกบนดินที่มีการปนเปื้อนโลหะตะกั่วอยู่ เมื่อบริโภคอาหารที่ปนเปื้อนจะได้รับตะกั่วเข้าสู่ร่างกาย และตะกั่วจะถูกสะสมไว้ในร่างกายซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอย่างรุนแรงต่อชาวบ้านที่อาศัยในบริเวณที่มีการปนเปื้อน

จากกรณีตัวอย่างข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการปนเปื้อนโลหะหนักได้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของคนที่อยู่อาศัยในบริเวณที่มีการปนเปื้อนอย่างรุนแรง นอกจากนั้นยังส่งผลเสียต่อระบบนิเวศอีกด้วย ดังนั้นการบริหารจัดการพื้นที่ปนเปื้อนเพื่อลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้นจึงมีความสำคัญ การใช้พืชเพื่อบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนได้ โดยพืชจะช่วยลดการชะล้างโลหะหนักซึ่งจะช่วยลดการกระจายตัวของพื้นที่ปนเปื้อน นอกจากนั้นพืชที่นำมาใช้มีความสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีซึ่งอาจทำให้ปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในดินลดลง และการที่พืชสะสมโลหะหนักไว้ในเนื้อเยื่อเรือนยอดทำให้ง่ายต่อการนำไปกำจัดด้วยวิธีที่เหมาะสมต่อไป

2.3 ไฟโตเรมิดิเอชั่น (phytoremediation)

ไฟโตเรมิดิเอชั่น (phytoremediation) คือการใช้พืชดูดซับสารปนเปื้อน (โลหะหนัก) จากดิน น้ำ หรืออากาศ สารปนเปื้อนจะถูกสะสมไว้ในพืช การใช้พืชเพื่อบำบัดหรือฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักเป็นวิธีการที่ประหยัดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม พืชจะสามารถดูดซับโลหะหนักได้ในปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการ (Saxena et al., 1999)

(1) ความสามารถของพืชในการดูดซึมและสะสมโลหะหนัก พืชจะสะสมโลหะหนักในปริมาณสูงได้ต้องมีกลไกเพื่อลดความเป็นพิษของโลหะหนัก พืชบางชนิดมีกลไกลดความเป็นพิษที่ดีก็จะเจริญเติบโตดีและสะสมโลหะได้ปริมาณมาก

(2) ปริมาณโลหะหนักที่ละลายได้ในดิน หรือปริมาณโลหะหนักที่พืชสามารถดูดซับได้ (bioavailability) ซึ่งถูกควบคุมด้วยปัจจัยต่างๆ เช่น ความเป็นกรดด่างของดิน (pH) ค่าการแลกเปลี่ยนไอออนของดิน (Cation exchange capacity: CEC) ลักษณะเนื้อดิน (soil texture) ศักย์รีดอกซ์ (redox potential) เป็นต้น ถ้าโลหะหนักในดินไม่อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดซับได้ ไฟโตเรมิดิเอชั่นก็จะไม่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากพืชไม่สามารถดูดซับโลหะหนักจากดินได้ แม้ว่าพืชจะมีความสามารถทนทานต่อโลหะหนักได้มากก็ตาม

การใช้พืชเพื่อบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนสามารถทำได้หลายวิธีดังต่อไปนี้ (ภาพที่2.1) (Garbisu & Alkorta, 2001)

1. ไฟโตเอ็กแทรกชั่น (phytoextraction) เป็นการใช้พืชดูดซับโลหะหนักออกจากดิน พืชจะดูดซับโลหะหนักผ่านราก และลำเลียงไปสะสมไว้เนื้อเยื่อเรือนยอด (ลำต้นและใบ) จากนั้นจะทำการเก็บเกี่ยวลำต้นและใบที่มีโลหะหนักสะสมอยู่ไปกำจัดทิ้งด้วยวิธีการที่เหมาะสม ไฟโตเอ็กแทรกชั่นมีข้อจำกัดที่สำคัญ 2 ประการคือ (1) ความสามารถของพืชในการทนทานและการดูดซับโลหะหนักจากดิน (2) ปริมาณของโลหะหนักในดินซึ่งพืชสามารถดูดซับได้

2. ไฟโตสเตบิไลเซชั่น (phytostabilization) เป็นการใช้พืชเพื่อเพิ่มความเสถียรของโลหะหนักในดิน ลดการละลายของโลหะหนักในดิน ซึ่งเป็นการทำให้โลหะหนักไม่สามารถกระจายไปยังบริเวณอื่น พืชที่นำมาปลูกจะมีความสามารถในการหลั่งสารอินทรีย์บางชนิดหรือส่งผลให้ปัจจัยทางกายภาพและเคมีของดินเปลี่ยนไป เช่น ลดความเป็นกรดของดินส่งผลให้โลหะหนักไม่สามารถละลายได้ เกิดการตกตะกอน และจับกับอนุภาคของดินได้แน่นขึ้น จึงทำให้โลหะหนักไม่สามารถกระจายไปยังบริเวณอื่นหรือไม่รั่วไหลลงสู่น้ำใต้ดิน

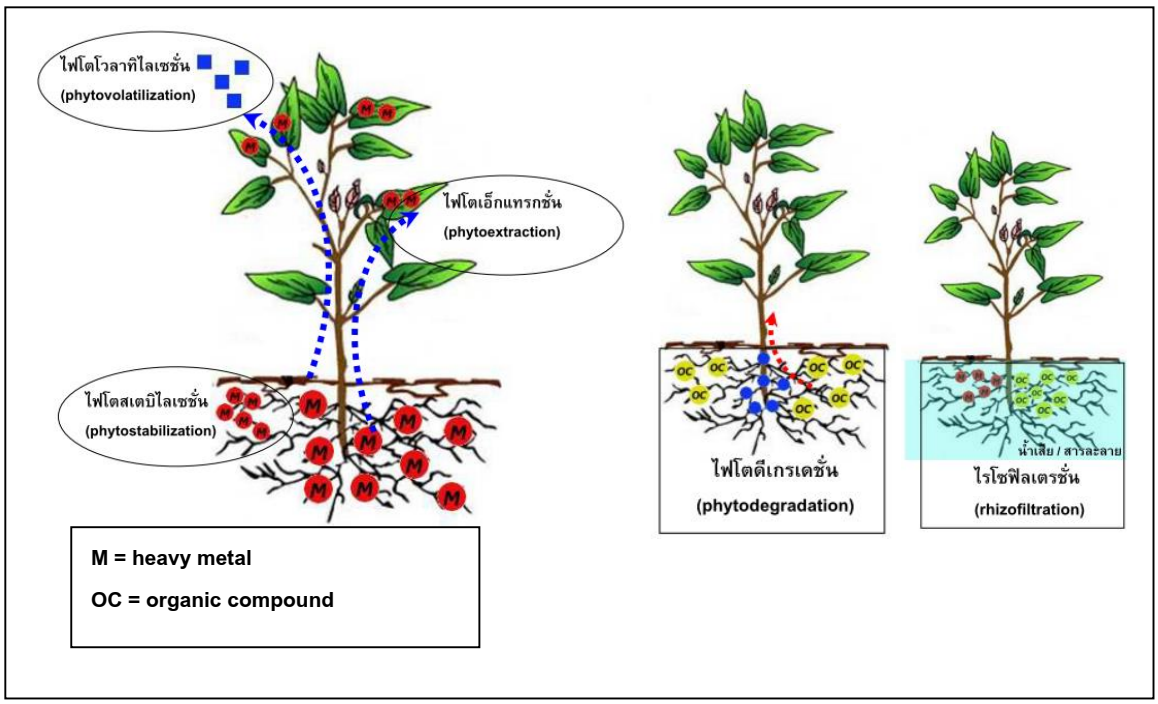
3. ไฟโตโวลาทิไลเซชั่น (phytovolatilization) เป็นการใช้พืชในการดูดซับโลหะหนักจากดิน และพืชมีความสามารถเปลี่ยนโลหะหนักให้อยู่ในรูปที่ระเหยและล่องลอยในอากาศได้ เช่น ซิลิเนียม (Se) ปรอท (Hg) เป็นต้น

4. ไฟโตดีเกรเดชั่น (phytodegradation) เป็นการใช้พืชร่วมกับจุลินทรีย์ในดินรอบรากพืช ซึ่งจะช่วยในการย่อยสลายสารปนเปื้อนในดิน วิธีการนี้จะใช้กับการปนเปื้อนสารอินทรีย์ซึ่งสามารถถูกย่อยสลายโดยกระบวนการตามธรรมชาติได้

5. ไรโซฟิลเตรชั้น (rhizofiltration) เป็นการปลูกพืชบนผิวน้ำ หรือพื้นที่ชุ่มน้ำ และรากพืชจะดูดซับโลหะหนัก หรือสารปนเปื้อนอื่นๆ จากน้ำเสียที่ไหลผ่าน พืชน้ำหลายชนิดมีความสามารถดูดซับโลหะหนัก และสารปนเปื้อนต่างๆ ในน้ำได้ดี

ข้อดีของการใช้พืชบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนัก (Saxena et al., 1999)

1. สามารถใช้กับพื้นที่ปนเปื้อนขนาดใหญ่ได้ เพราะการปลูกพืชมีค่าใช้จ่ายต่ำ
2. พืชที่ปลูกจะช่วยทำให้ภูมิทัศน์ของพื้นที่ปนเปื้อนสวยงาม
3. การปลูกพืชเพื่อดูดซับโลหะหนักเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมช่วยคงระบบนิเวศในดิน
4. พืชบางชนิดที่นำมาปลูกอาจให้มูลค่าทางเศรษฐกิจซึ่งจะช่วยชดเชยค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการฟื้นฟู
5. พืชจะสะสมโลหะหนักไว้ในเนื้อเยื่อของพืชซึ่งจะช่วยลดปริมาณของขยะที่เป็นพิษ (hazardous waste) ได้ (เทียบกับการบำบัดดินโดยตรงซึ่งมีขยะพิษปริมาณมาก)
6. ขยะพิษปริมาณน้อยที่เกิดขึ้นช่วยลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดหรือการสกัดเอาโลหะหนักออกจากขยะพิษ
7. การปลูกพืชจะช่วยฟื้นฟูสภาพดินซึ่งเป็นการฟื้นฟูระบบนิเวศของดินด้วย และรากพืชจะช่วยลดการชะล้างของหน้าดินเป็นการเร่งการฟื้นฟูและรักษาระบบนิเวศของดิน



ภาพที่ 2.1 แสดงการใช้พืชเพื่อบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนด้วยวิธีต่างๆไฟโตเอ็กแทรกชั่น (phytoextraction), ไฟโตสเตบิไลเซชั่น (phytostabilization), ไฟโตโวลาทิไลเซชั่น (phytovolatization), ไฟโตดีเกรเดชั่น (phytodegradation) ซึ่งมักใช้กับสารปนเปื้อนที่เป็นสารอินทรีย์ (organic compound; OC), และไรโซฟิลเตรชั่น (rhizofiltration) (Garbisu & Alkorta, 2001)

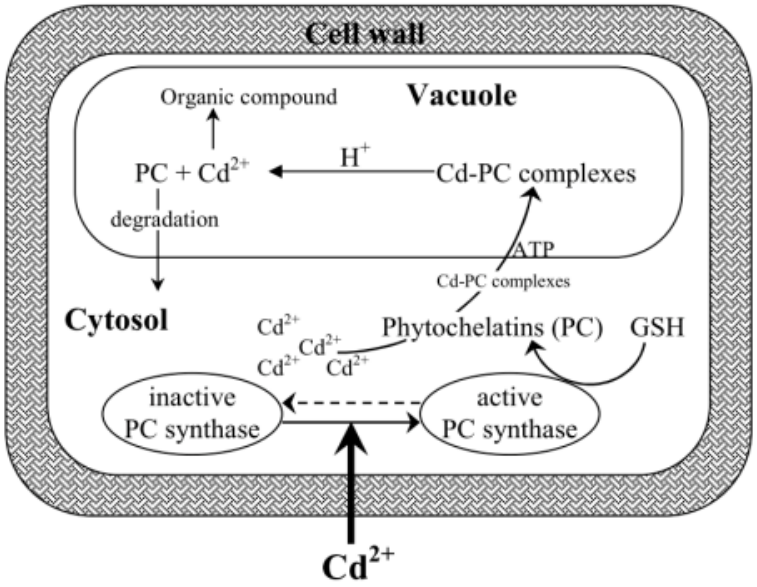
2.4 พืชทนโลหะหนัก (Metal tolerant plant) และพืชดูดซับโลหะหนักปริมาณสูง (Hyperaccumulator plant)

พืชทนโลหะหนัก (metal tolerant plant) หมายถึง พืชที่สามารถเจริญเติบโตบนดินที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ในปริมาณสูงได้ ซึ่งพืชทั่วไปไม่สามารถทนทานได้ โดยปกติแล้วโลหะหนักจะส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช แต่พืชทนโลหะหนักจะมีกลไกจำเพาะที่สามารถลดความเป็นพิษของโลหะหนักได้ จึงทำให้สามารถเจริญได้ดีแม้ว่าจะมีโลหะหนักอยู่ในปริมาณสูงก็ตาม พืชที่สามารถทนโลหะหนักได้สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ (1) pseudometallophyte คือพืชที่สามารถเจริญได้ดีทั้งพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนและไม่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก (2) absolute metallophyte คือพืชที่จะเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักปริมาณสูงเท่านั้น (Baker, 1987)

พืชทนโลหะหนักจะมีกลไกในการลดความเป็นพิษของโลหะหนักเพื่อปกป้องตัวเอง ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่คือ (1) การไม่ดูดซับโลหะหนัก (metal exclusion strategy) เป็นกลไกของพืชที่จะหลีกเลี่ยงการดูดซับโลหะหนัก และจำกัดการลำเลียงโลหะหนักไปยังเรือนยอดของพืช (2) การสะสมโลหะหนัก (metal accumulation) เป็นกลไกของพืชที่จะเก็บหรือสะสมโลหะหนักไว้ภายในเซลล์หรือเนื้อเยื่อ (Baker, 1981; 1987) พืชทนโลหะหนักที่มีกลไกลดความเป็นพิษแบบไม่ดูดซับ

(exclusion) มักถูกใช้ในการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนเสื่อมโทรมซึ่งไม่มีพืชชนิดอื่นสามารถขึ้นได้ (Dahmani-Muller et al., 2000) การหลีกเลี่ยงการดูดซับโลหะหนักเป็นการจำกัดการนำเข้าของโลหะหนักสู่เซลล์หรือเนื้อเยื่อ เช่น เปลือกหนาของเมล็ดเป็นเสมือนกำแพงกั้นไม่ให้แคดเมียมเข้าสู่เนื้อเยื่อเจริญได้ (Seregin & Ivanov, 2001) ในรากของพืช แคดเมียมอาจถูกทำให้ไม่สามารถเคลื่อนที่หรือถูกลำเลียงได้ (immobilization) โดยผนังเซลล์ เนื่องจากผนังเซลล์พืชมีองค์ประกอบที่สามารถจับกับไอออนโลหะได้ เช่น คาร์โบไฮเดรท (carbohydrates) มิวซิเลจ (mucilage) แคลโลส (callose) (Wagner, 1993; Nishizono et al., 1987) ในรากและใบของถั่วบางชนิด ไอออนแคดเมียมสามารถจับกับเพ็คทิค (pectic site) และฮิสทิดิล (histidyl groups) ของผนังเซลล์ได้ (Leita et al., 1996)

พืชบางชนิดสามารถดูดซับและสะสมโลหะในปริมาณที่สูงในเนื้อเยื่อ (accumulator) และพืชที่สามารถสะสมโลหะในเนื้อเยื่อในปริมาณที่สูงมากๆ ถูกเรียกว่า hyperaccumulator พืชเหล่านี้มีกลไกพิเศษที่จะลดความเป็นพิษของโลหะหนักและเก็บสะสมโลหะหนักไว้ในเนื้อเยื่อ เช่น ไอออนบวกของโลหะหนักอาจจับกับโปรตีนหรือเปปไทด์ที่จำเพาะในเซลล์ เช่น ไฟโตเคเลทิน (phytochelatins) ซึ่งเป็นเปปไทด์ขนาดเล็กซึ่งมีโครงสร้างทั่วไปคือ (-glutamic acid-cysteine)$_n$ -glycine เมื่อ n = 2–11 ไอออนบวกของแคดเมียมสามารถจับกับ thiol group ของซีสเตอีนที่อยู่ในโมเลกุลของไฟโตเคเลทินได้ เมื่อแคดเมียมจับกับไฟโตเคเลทินทำให้ไม่สามารถไปจับกับเอนไซม์หรือองค์ประกอบต่างๆ ภายในเซลล์พืชได้ซึ่งเป็นการลดความเป็นพิษของโลหะหนักที่จะเกิดกับพืชได้ (ภาพที่2.2) (Zenk, 1996)



ภาพที่ 2.2 แสดงกลไกการลดความเป็นพิษของโลหะแคดเมียมในพืช แคดเมียมที่เข้าสู่เซลล์พืชจะกระตุ้นกระบวนการสร้างไฟโตเคเลทิน (phytochelatin) โดยมีกลูทาไทโอน (GSH) เป็นสารตั้งต้น สารประกอบระหว่างไฟโตเคเลทินกับแคดเมียมจะถูกลำเลียงเข้าไปเก็บไว้ในแวคิวโอลของเซลล์ และแคดเมียมจะถูกเก็บสะสมไว้ในแวคิวโอลโดยการจับกับกรดอินทรีย์ (Zenk, 1996)

พืชดูดซับโลหะหนักปริมาณสูง (Hyperaccumulator) เป็นพืชที่มีการปรับตัวและมีพัฒนาการของกลไกทางสรีรวิทยาที่จำเพาะซึ่งทำให้สามารถทนทานและสะสมโลหะหนักในเนื้อเยื่อเรือนยอดได้ในปริมาณที่สูงมากโดยไม่แสดงอาการความเป็นพิษ อย่างไรก็ตามพืชเหล่านี้ต้องใช้พลังงานสูงมากไปกับกลไกลดความเป็นพิษของโลหะหนัก ดังนั้นพืชดูดซับโลหะหนักปริมาณสูง (Hyperaccumulator) มักจะเจริญเติบโตช้าและสร้างมวลชีวภาพ (biomass) น้อย (Baker et al., 2000; Barceló & Poschenrieder, 2003)

2.5 ต้นราชาวดีบ้าน (*Buddleja paniculata* Wall.)

ต้นราชาวดีบ้าน *Buddleja paniculata* Wall. (ภาพที่ 2.3) ชื่อสามัญ Butterfly bush อยู่ในวงศ์ Buddlejaceae เป็นไม้พุ่มสูง 2-6 เมตร กิ่งมีขน ใบเป็นใบเดี่ยว ออกตรงกันข้าม รูปไข่ปลายแหลม โคนมน ขอบใบหยัก ผิวใบหยาบ ด้านบนสีเขียว ด้านล่างมีขนสีเทา สากมือ (เกษตร, 2554)

ดอก ออกเป็นช่อตามซอกใบใกล้ปลายกิ่ง ยาว 6-10 ซม. กลีบดอกเป็นหลอดสั้น ปลายแยกเป็น 4 กลีบ มีเกสรตัวผู้ 4 ดอกเป็นสีขาว มีกลิ่นหอมแรง “ผล” เมื่อแก่แตกได้เป็น 2 ซีก ภายในมีเมล็ดเล็กเป็นจำนวนมาก ดอกออกตลอดทั้งปี ขยายพันธุ์ด้วยเมล็ด ปักชำกิ่ง และตอนกิ่ง (เกษตร, 2554)

การจัดลำดับอนุกรมวิธานของราชาวดีบ้าน (Scientific Classification)

Kingdom:	Plantae
Division:	Magnoliophyta
Class:	Magnoliopsida
Order:	Lamiales
Family:	Scrophulariaceae
Genus:	*Buddleja*
Species :	*Buddleja paniculata*Wall.

ภาพที่ 2.3 ก) ดอกราชาวดี ข) ใบราชาวดี ค) ต้นราชาวดี

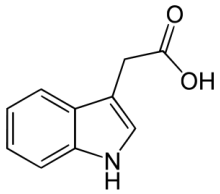
มีรายงานวิจัยพบว่าราชาวดีป่า wild species เป็นพืชสะสมตะกั่วปริมาณสูงซึ่งพบในบริเวณเหมืองบ่องาม จังหวัดกาญจนบุรี (Waranusantigul et al., 2008) ราชาวดีป่า (*Buddleja asistica*) สามารถสะสมตะกั่วในส่วนยอดสูงถึง 1,835.5-4,335.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมมวลแห้ง และสามารถเจริญเติบโตได้ดีบนดินที่มีโลหะตะกั่วปนเปื้อนสูงถึง 206,152 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน นอกจากนั้นยังมีการทดลองนำราชาวดีบ้าน (*Buddleja paniculata*) ซึ่งจัดเป็น closely related species มาศึกษาความสามารถในการดูดซับตะกั่วก็พบว่าสามารถสะสมตะกั่วได้ในปริมาณสูงเช่นกัน โดยสามารถสะสมตะกั่วในส่วนยอดและส่วนรากสูงถึง 3,485.5 และ 4,275.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมมวลแห้ง ตามลำดับ จากการทดลองนำไปปลูกบนพื้นที่บริเวณต่างๆ ของเหมืองบ่องาม จังหวัดกาญจนบุรี (Waranusantigul et al., 2008)

2.6 ฮอร์โมนพืช

ฮอร์โมนพืชเป็นสารเคมีภายในพืช ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเจริญของพืชไม่เพียงแต่การเจริญของพืชทั้งต้นเท่านั้น หากแต่ยังเกี่ยวข้องกับการเจริญของพืชแต่ละส่วนด้วย

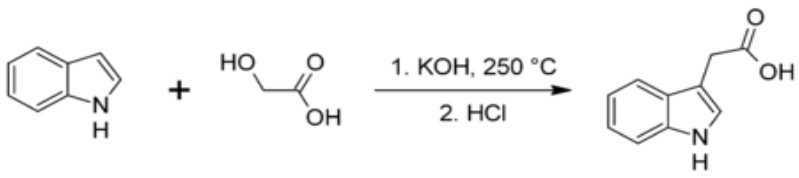
2.6.1 กรดอินโดล-3-อะซีติก (Indole-3-acetic acid) หรือ IAA

กรดอินโดล-3-อะซีติก (Indole-3-acetic acid) หรือ IAA (ภาพที่ 2.4) เป็นฮอร์โมนพืชในกลุ่มออกซิน เป็นของแข็ง ไม่มีสี และเป็นออกซินธรรมชาติที่สำคัญมาก เป็นอนุพันธ์ของ indole ที่มีหมู่ carboxymethyl group (หรือกรดอะซีติก) (Johnson and Crosby, 1973)



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของกรดอินโดล-3-อะซิติก (Indole-3-acetic acid) หรือ IAA

IAA สร้างจากเซลล์ที่ปลายยอดหรือตา และใบอ่อนของพืช โดยสังเคราะห์มาจาก tryptophan เป็นหลักแต่สร้างจากวิถีที่ไม่ใช้ tryptophan ได้เช่นกัน ในทางเคมี สังเคราะห์ IAA ได้จากปฏิกิริยาระหว่าง indole กับ glycolicacid ที่อุณหภูมิ 250 °C (Johnson and Crosby, 1973) (ภาพที่ 2.5)



ภาพที่ 2.5 การสังเคราะห์กรดอินโดล-3-อะซิติก (Indole-3-acetic acid) หรือ IAA

การออกฤทธิ์ทางชีวภาพและสารที่เกี่ยวข้อง

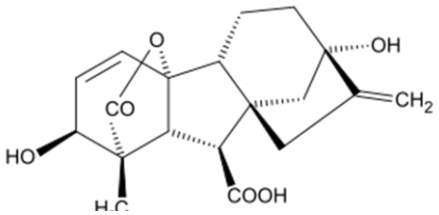
IAA มีผลกระทบต่อพืชที่แตกต่างกัน เช่นเดียวกับฮอร์โมนพืชกลุ่มออกซิน เช่น กระตุ้นการยืดตัวของเซลล์และการแบ่งเซลล์และการกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชและการพัฒนา IAA ยังสามารถควบคุมการซึมผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์ (Johnson and Crosby, 1973) ได้มีการสังเคราะห์สารคล้าย IAA ที่ราคาถูกกว่าและเสถียรภาพมากกว่าเพื่อใช้ในการเกษตร เช่น IBA (Indole-3-butyric acid), NAA (alpha-naphthaleneacetic acid)

การศึกษาผลของ IAA ในปี 1940 นำไปสู่การพัฒนาสารเคมีกำจัดวัชพืช 2,4-D และ 2,4,5-T ซึ่งมีความคงตัวในสิ่งแวดล้อมมากกว่า IAA แต่เมื่อฉีดพ่นบนใบพืชใบเลี้ยงคู่จะเหนี่ยวนำให้เกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วที่ควบคุมไม่ได้ ทำให้ตายในที่สุด จึงนำมาใช้งานเป็นสารกำจัดวัชพืชในด้านการเกษตรตั้งแต่ ค.ศ.1950 (Johnson and Crosby, 1973)

2.6.2 Gibberellic acid (GA_3)

กรด gibberellic acid หรือ จิบเบอเรลลิน (gibberellin) หรือ เรียกว่า GA_3 โครงสร้างทั่วไปของ GA_3 แสดงดังภาพที่ 2.6 เป็นฮอร์โมนพืชพวกหนึ่งในพืชชั้นสูง สร้างมาจากใบอ่อนและผลที่ยังไม่แก่ มีหลายชนิด มีคุณสมบัติดังนี้

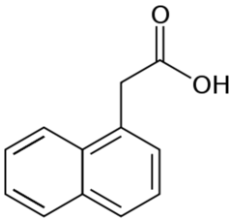
- กระตุ้นการเจริญเติบโตของเซลล์ระหว่างข้อปล้อง ทำให้ต้นไม้สูง
- กระตุ้นการงอกของเมล็ดและตา เพิ่มการเกิดดอก
- เปลี่ยนดอกตัวผู้ให้เป็นดอกตัวเมียในพืชตระกูลแตง
- ช่วยยืดช่อของผล



ภาพที่ 2.6 Gibberellic acid

2.6.3 Naphthalene acetic acid (NAA)

Naphthalene acetic acid (NAA) จัดเป็นฮอร์โมนพืชในกลุ่ม auxin ตัวหนึ่ง แต่จัดอยู่ในกลุ่ม Naphthyl group สารกลุ่มนี้มี naphtyl ring เป็นส่วนประกอบของโครงสร้างที่รู้จักกันดี คือ NAA (alpha-naphthaleneacetic acid) แสดงดังภาพที่ 2.7 ซึ่งเป็นสารที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทยและมีราคาถูกส่วนใหญ่ใช้ในการเร่งการออกราก การเปลี่ยนเพศในดอกเงาะ การใช้สำหรับปลิดดอกและผลอ่อนการเร่งการออกดอกในสับปะรด



ภาพที่ 2.7 Naphthalene acetic acid

2.7 สารคีเลต (Chelating agents)

สารคีเลตเป็นสารเคมีที่ได้จากธรรมชาติหรือการสังเคราะห์สารคีเลตสามารถรวมตัวกับโลหะหนักและเพิ่มการละลายของโลหะหนักได้ สารคีเลตจึงถูกนำมาใช้ในการเพิ่มการละลายของโลหะธาตุอาหารพืช และอาจนำมาใช้เพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักของพืชได้นอกจากสารคีเลตจะช่วยเพิ่มการการละลายของโลหะหนักในดินได้แล้ว ยังอาจช่วยเพิ่มการลำเลียงโลหะหนักที่ถูกดูดซับผ่านรากไปสะสมในส่วนยอดของพืชได้เพิ่มขึ้น ปัจจุบันมีการศึกษาการใช้สารคีเลตหลายชนิดเพื่อเพิ่มการดูดซับโลหะหนักของพืช (Ok & Kim, 2007; Cao et al., 2007; Najeeb et al., 2009) สารคีเลตที่นำมาใช้สามารถแบ่งออกเป็น

1. สารคีเลตสังเคราะห์ เช่น EDTA, EDDS, DTPA, HEDTA เป็นต้น
2. สารคีเลตธรรมชาติ เช่น Citric acid, Oxalic acid, Malic acid เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของสารคีเลต 3 ชนิดได้แก่ EDTA, EDDS และ citric acid

2.7.1 Ethylene diaminetetracetic acid (EDTA)

EDTA เป็นสารคีเลตสังเคราะห์ที่นำมาใช้ในการเพิ่มการละลายของโลหะหนักในดินอย่างแพร่หลาย มีงานวิจัยจำนวนมากที่ใช้ EDTA (ตารางที่ 2.3) ในการเพิ่มการดูดซับโลหะหนักของพืชและรายงานว่าสาร EDTA ช่วยให้โลหะหนักในดินละลายได้มากขึ้น และเพิ่มการดูดซึมโลหะและการสะสมโลหะในยอดของพืชมากขึ้น (Ok & Kim, 2007; Elkhatib et al., 2001)

2.7.2 Ethylenediamine disuccinic acid (EDDS)

EDDS เป็นสารคีเลตสังเคราะห์ที่สามารถถูกย่อยสลายได้ง่ายด้วยกระบวนการในธรรมชาติ ปัจจุบันได้มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย (ตารางที่ 2.4) และถูกพิจารณาว่าเป็นสารที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่า EDTA มีงานวิจัยจำนวนมากที่แสดงให้เห็นว่า EDDS ช่วยเพิ่มการละลายโลหะได้ และช่วยให้พืชดูดซับโลหะหนักได้มากขึ้น (Cao et al., 2007; Meers et al., 2005; Fässler et al., 2010)

2.7.3 Citric acid

Citric acid เป็นสารคีเลตที่พบได้ตามธรรมชาติปัจจุบัน Citric acid ถูกนำมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับโลหะหนักของพืช (ตารางที่ 2.5) และมีรายงานจำนวนมากที่

แสดงให้เห็นว่า Citric acid ช่วยเพิ่มการละลายโลหะหนัก และช่วยการลำเลียงโลหะหนักจากรากพืชไปสู่ยอดพืชได้ (Najeeb et al., 2009; Turgut et al., 2004; Muhammad et al., 2009)

ตารางที่ 2.3 การศึกษาที่ใช้สารคีเลต EDTA เพื่อเพิ่มการละลายของโลหะหนักและเพิ่มการดูดซับโลหะหนักของพืช (Evangelou *et al*., 2007a)

ปริมาณสาร EDTA ที่ใช้ในการศึกษา (mmol kg^{-1})	พืชที่ใช้ในการศึกษา	โลหะหนักที่พืชสามารถดูดซับเพิ่มขึ้น	ผลกระทบต่อพืช	แหล่งข้อมูล
3.00	Indian mustard (*B. juncea*)	Pb	ไม่พบผลกระทบต่อพืช (การใช้ EDTA ปริมาณมากกว่า 10 mmol kg^{-1}จะทำให้มวลชีวภาพและการคายน้ำของพืชลดลง)	Epstein *et al*., 1999
5.00	Corn (Z. mays)	Cu, Pb, Zn	การเจริญเติบโตของพืชลดลง	Luo *et al*., 2005
	White bean (*P. vulgaris*)	Cu, Pb, Zn, Cd	การเจริญเติบโตของพืชลดลง และเกิดใบเหลืองซีด (chlorosis) และการตายเป็นจุดบนใบ (necrosis)	
1.60	Sunflower (*H. annuus*)	Zn, Cu, Cd, Ni	ไม่พบผลกระทบต่อพืช	Meers *et al*., 2005
5.00	Rainbow pink (*D. chinesis*)	Cd, Pb	-	Lai and Chen, 2005
0.13	Indian mustard (*B. juncea*)	Cd	มวลชีวภาพลดลง	Jiang *et al*., 2003
3.00	Indian mustard (*B. juncea*)	Cu, Zn Pb	ไม่พบผลกระทบต่อพืช	Wu *et al*., 2004
1.39	Corn (*Z. mays*)	Pb	มวลชีวภาพลดลง	Huang *et al*., 1997
5.00	White mustard (*S. alba*)	Pb	-	Kos *et al*., 2003

ตารางที่ 2.4 การศึกษาที่ใช้สารคีเลต EDDS เพื่อเพิ่มการละลายของโลหะหนักและเพิ่มการดูดซับโลหะหนักของพืช (Evangelou *et al*., 2007a)

ปริมาณสาร EDDS ที่ใช้ในการศึกษา (mmol kg^{-1})	พืชที่ใช้ในการศึกษา	โลหะหนักที่พืชสามารถดูดซับเพิ่มขึ้น	ผลกระทบต่อพืช	แหล่งข้อมูล
5.00	Corn (*Z. mays*)	Cu, Pb, Zn, Cd	การเจริญเติบโตของพืชลดลง	Luo *et al*., 2005
	White bean (*P. vulgaris*)	Cu, Pb, Zn, Cd	การเจริญเติบโตของพืชลดลง และพืชมีอาการใบเหลืองซีด (chlorosis) และการตายของใบ (necrosis)	
1.60	Sunflower (*H. annuus*)	Zn, Cu, Cd, Ni	พืชไม่ได้รับผลกระทบ	Meers *et al*., 2005
0.5 (mmole l^{-1})	Sunflower (*H. annuus*)	Pb	-	Tandy *et al*., 2006

ตารางที่ 2.5 การศึกษาที่ใช้กรดซิตริกเพื่อเพิ่มการละลายของโลหะหนักและเพิ่มการดูดซับโลหะหนักของพืช (Evangelou *et al*., 2007b)

ปริมาณกรดซิตริกที่ใช้ในการศึกษา (mmol kg^{-1})	พืชที่ใช้ในการศึกษา	โลหะหนักที่พืชสามารถดูดซับเพิ่มขึ้น	ผลกระทบต่อพืช	แหล่งข้อมูล
10 – 20	Indian mustard (*B. juncea*)	Cd	พืชไม่ได้รับผลกระทบ	Quartacci *et al*., 2005
20.0	Indian mustard (*B. juncea*)	U	พืชไม่ได้รับผลกระทบ	Huang *et al*., 1998a
	Chinese cabbage (*B. chinesis*)	U	พืชไม่ได้รับผลกระทบ	
	Chinese mustard (*B. narinosa*)	U	พืชไม่ได้รับผลกระทบ	
	Cow pea (*P. sativum*)	U	พืชไม่ได้รับผลกระทบ	
	Bush bean (*P. vulgaris*)	U	พืชไม่ได้รับผลกระทบ	
	Corn (*Z. mays*)	U	พืชไม่ได้รับผลกระทบ	
5 - 10	Indian mustard (*B. juncea*)	Pb	พืชไม่ได้รับผลกระทบ	Blaylock *et al*., 1997

2.8 งานวิจัย Phytoremediation ในประเทศไทย

Visoottiviseth และคณะ (2002) ประเมินศักยภาพของพืชที่สามารถจะนำมาใช้สำหรับการบำบัดด้วยวิธี phytoremediation โดยทำการเก็บตัวอย่างพืชและดินจากแหล่งที่มีการปนเปื้อน arsenic มาสองแหล่งคือ จากอำเภอร่อนภิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราชและจากอำเภอบันนังสตาร์ จังหวัดยะลา พบว่าดินจากร่อนภิบูลย์มีปริมาณ arsenic 21-14,000 ไมโครกรัมต่อกรัม ในขณะที่ดินจากบันนังสตาร์มีปริ มาณ arsenic 540-16,000 ไมโครกรัมต่อกรัม เกณฑ์สำหรับเลือกพืชเหมาะสมสำหรับ phytoremediation คือ ทนต่อโลหะได้ในปริมาณสูง, สะสมโลหะได้ในปริมาณสูง, วงชีวิตสั้น , เพาะพันธุ์ได้อย่างรวดเร็ว, พบได้ทั่วไปและต้องมีมวลชีวภาพสูง จากตัวอย่างพืชจำนวน 36 สายพันธุ์ พบเฟิร์น 2 สายพันธุ์ คือเฟิร์นท้องเงิน และเฟิร์นกูดหมาก (*Pityrogramma calomelanos* and *Pteris vittata*) และต้นไมยราบ (*Mimosa pudica*) มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการนำมาใช้ด้วยวิธีการ phytoremediation ได้

Chantachon และคณะ (2004) ศึกษาเทคนิค phytoextraction ของตะกั่วโดยใช้หญ้าแฝก 2 สายพันธุ์ (*Vetiveria zizaniodes* และ *V. nemoralis*) จาการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่าการดูดซับตะกั่วจากดินโดยส่วนลำต้นและส่วนรากมีความสัมพันธ์กับสายพันธุ์ของหญ้าแฝก โดยพบว่าหญ้าแฝก*V. Zizanioides* สามารถทนต่อตะกั่วในปริมาณสูงและสะสมตะกั่วได้มากกว่าอีกสายพันธุ์ เมื่อนำไปทดลองปลูกนอกห้องปฏิบัติการก็พบว่า *V. zizanioides* ก็ยังสามารถทนต่อตะกั่วและสะสมตะกั่วได้มากกว่าอีกสายพันธุ์เช่นเดิม โดยตะกั่วมีการสะสมที่บริเวณส่วนรากมากกว่าส่วนของลำต้น

Rotkittikhun และคณะ (2006) ทำการเก็บตัวอย่างพืชและดินจากบริเวณเหมืองบ่องาม อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี พบว่าหน้าดินจากเหมืองมีปริมาณตะกั่วระหว่าง 325-142,400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยพบว่าตะกั่วในดินมีปริมาณสูงสุดที่บริเวณโรงแต่งแร่ ความเข้มข้นของตะกั่วในพืชต่างกันไปในบริเวณต่างๆ ของเหมือง พืช 48 สายพันธุ์ถูกเก็บมาจาก 5 สถานที่แตกต่างกันจากบริเวณเหมือง 26 สายพันธุ์พบว่าสามารถสะสมโลหะที่บริเวณส่วนของลำต้นได้มากกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มี 3 สายพันธุ์ทีสะสมตะกั่วได้ถึง 12,200–28,370 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมที่บริเวณส่วนของลำต้น และสะสมตะกั่วได้ถึง 14,580–128,830 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมที่บริเวณส่วนรากคือ *Microstegium ciliatum*, *Polygala umbonata*, และ *Spermacoce mauritiana*

Rotkittikhun และคณะ (2007) ศึกษาการเจริญเติบโต ความทนทานและการดูดซับสารตะกั่วของหญ้า 2 ชนิดคือ *Thysanolaena maxima* (ตองกง) และ *Vetiveria zizanioides* (หญ้าแฝก) 4 กลุ่มพันธุ์ และผลของวัสดุปรับปรุงดินต่อดินที่ปนเปื้อนด้วยสารตะกั่วพบว่าตองกงและหญ้าแฝกกลุ่มพันธุ์สุราษฎร์ธานีและสงขลามีความทนทานและสามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีสารตะกั่วความเข้มข้นสูง การผสมขี้หมูจะลดค่า EC และค่าความเข้มข้นของตะกั่วที่สกัดโดย DTPA ของดิน รวมทั้งลดการดูดซับสารตะกั่วของพืชทั้งสองชนิด ขี้หมูช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตของหญ้าแฝกแต่ไม่ช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตของตองกง การใส่ปุ๋ยอินทรีย์ช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตและการดูดซับสารตะกั่วของตองกงแต่ไม่ช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตและการดูดซับสารตะกั่วของหญ้าแฝก

Chintakovid และคณะ (2008) ได้ทดลองปลูกต้นดาวเรืองลูกผสมพันธุ์นักเก็ต (nugget marigold) ในบริเวณที่พบสาร arsenic ปริมาณสูง ที่อำเภอร่อนภิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช พบว่านอกจากต้นดาวเรืองจะสามารถสะสมarsenic ได้ในปริมาณสูงแล้ว ยังสามารถเจริญเติบโตได้เป็นอย่างดี พบ arsenic สะสมที่ใบ 46.2% ในขณะที่ดอกพบสะสม 5.8% และพบว่าการให้ปุ๋ยฟอสเฟตขณะที่พืชกำลังออกดอกจะทำให้สามารถสะสมarsenicได้มากขึ้น จากการทดลองสรุปว่าการปลูกต้นดาวเรืองลูกผสมพันธุ์นักเก็ตอาจเป็นทางเลือกในการบำบัดแหล่งที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก (arsenic) ได้ และเนื่องจากดอกดาวเรืองลูกผสมพันธุ์นักเก็ตสามารถขายได้จึงเป็นแรงเสริมให้ต้นไม้ชนิดนี้น่าสนใจในการบำบัดแหล่งปนเปื้อนโลหะหนัก

Waranusantigul และ 2008 พบว่าราชาวดีป่า wild species เป็นพืชสะสมตะกั่วปริมาณสูงซึ่งพบในบริเวณเหมืองบ่องาม จังหวัดกาญจนบุรี ราชาวดีป่า (*Buddleja asistica*) สามารถสะสมตะกั่วในส่วนยอดสูงถึง 1,835.5 -4,335.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมมวลแห้ง และสามารถเจริญเติบโตได้ดีบนดินที่มีโลหะตะกั่วปนเปื้อนสูงถึง 206,152 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน นอกจากนั้นยังมีการทดลองนำราชาวดีบ้าน (*Buddleja paniculata*) ซึ่งจัดเป็น closely related species มาศึกษาความสามารถในการดูดซับตะกั่วก็พบว่าสามารถสะสมตะกั่วได้ในปริมาณสูงเช่นกัน โดยสามารถสะสมตะกั่วในส่วนยอดและส่วนรากสูงถึง 3485.5 และ 4275.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมมวลแห้ง ตามลำดับ จากการทดลองนำไปปลูกพื้นที่บริเวณต่างๆ ของเหมืองบ่องาม จังหวัดกาญจนบุรี งานวิจัยแสดงให้เห็นว่าราชาวดี (*Buddleja* species) เป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับ phytoremediation