บทที่ 2
แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ตะกั่ว (Pb)

2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

ตะกั่วเป็นธาตุโลหะหนักในหมู่ 5A ของตารางธาตุ มีสัญลักษณ์ Pb ตะกั่วเป็นธาตุที่มีเลขอะตอมและมวลอะตอมเท่ากับ 82 และ 207.2 ตามลำดับ คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของโลหะตะกั่วแสดงดังตารางที่ 2.1 ตะกั่วเป็นโลหะอ่อนสีเงินแกมฟ้า ไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกริยาทางเคมี ทนต่อการผุกร่อน เมื่ออยู่ในรูปของสารประกอบจะมีเลขออกซิเดชั่น +2 และ +4

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของโลหะตะกั่ว (ศูนย์การเรียนรู้อุตสาหกรรมเหมืองแร่, 2556)

คุณสมบัติทางกายภาพ	
สัญลักษณ์	Pb
ระบบผลึก	FCC (face center cubic)
ความหนาแน่น (ที่ 20 ^{o}C)	11.34 g cm^{-3}
จุดหลอมเหลว	327 ^{o}C
จุดเดือด	1,749 ^{o}C
ความต้านทานไฟฟ้า (ที่ 20 ^{o}C)	208 nΩ.m
สัมประสิทธิ์การขยายตัว (ที่ 20 ^{o}C)	28.9 $\mu m.m^{-1}.K^{-1}$
Youngs modulus	16 GPa
Shear modulus	5.6 GPa
Brinnell hardness	38.3 MPa

โลหะตะกั่วถูกนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม เช่น แบตเตอรี่รถยนต์ เปลือกเคเบิลไฟฟ้าสื่อสารใต้ดิน ตะกั่วแผ่นเป็นวัสดุก่อสร้าง ท่อตะกั่ว โลหะบัดกรีสำหรับงานเชื่อมโลหะ หมึกพิมพ์ในอุตสาหกรรมการพิมพ์ โลหะผสมตะกั่วดีบุกใช้เคลือบผิวแผ่นเหล็ก ฟิวส์ระบบตัดไฟอัตโนมัติ ลูกปืน เป็นต้น (ศูนย์การเรียนรู้อุตสาหกรรมเหมืองแร่, 2556) นอกจากนี้ตะกั่วยังถูกนำไปใช้ในการผลิตสารเคมีกำจัดศัตรูพืชในทางการเกษตร เช่น เลดอาซีเนต ($PbHAsO_4$) เป็นต้น

ปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์จากโลหะตะกั่วอย่างแพร่หลาย ตะกั่วจึงจัดเป็นโลหะที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์สูงเป็นลำดับที่ 5 รองจาก เหล็ก อะลูมิเนียม ทองแดง และสังกะสี (ศูนย์การเรียนรู้อุตสาหกรรมเหมืองแร่, 2556) การใช้ประโยชน์จากตะกั่วในปริมาณมากส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนตะกั่วในสิ่งแวดล้อมจากการทำกิจกรรมเหมืองแร่เพื่อนำตะกั่วมาใช้ประโยชน์และจากการกำจัดของเสียซึ่งมีโลหะตะกั่วผสมอยู่อย่างไม่เหมาะสม

2.1.2 แหล่งที่มาของตะกั่ว

ตะกั่วเป็นธาตุที่พบได้ทั่วไปในธรรมชาติทั้งในดิน หิน น้ำ พืช และอากาศ ในหินทั่วไปพบตะกั่วโดยเฉลี่ย 13 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยอาจพบตะกั่วในหินอัคนีประมาณ 10 – 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และในหินตะกอนประมาณ 10 – 70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในดินอาจพบตะกั่วประมาณ 5 –25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และสามารถพบตะกั่วในน้ำบาดาลประมาณ 1 – 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ในทะเลสาบและแม่น้ำพบตะกั่วประมาณ 1–10 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตามจะพบตะกั่วในน้ำจืดสูงกว่าน้ำทะเล โดยพบประมาณ 0.08 – 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร ในอากาศบริเวณห่างไกลชุมชนอาจพบประมาณ 0.0006 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่ในชุมชนอาจพบตะกั่วในอากาศสูงถึง 0.001 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในพืชขนาดใหญ่ทั่วไปอาจพบตะกั่วประมาณ 1.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ของเนื้อไม้แห้ง) ในพืชผักอาจพบประมาณ 0.1 – 1.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมมวลแห้ง (กุลธิดา และ กิจชัย, 2532)

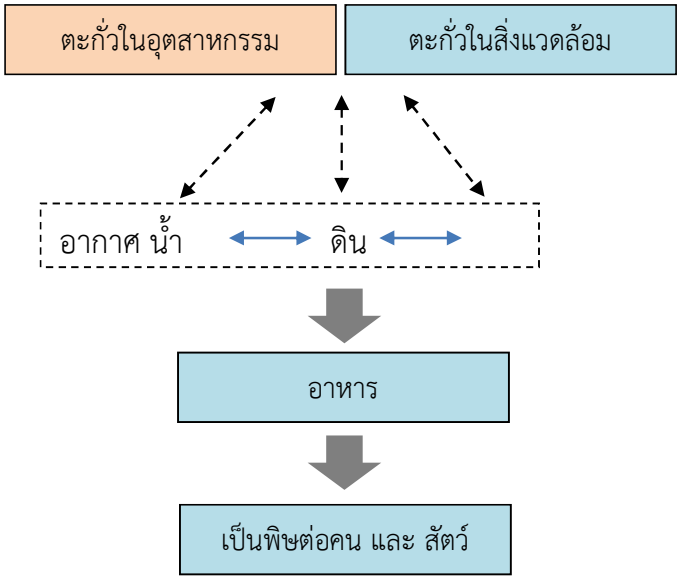
โดยธรรมชาติ ตะกั่วมักจะมีกำเนิดในสภาพแวดล้อมทางธรณีวิทยาเดียวกับสังกะสี แร่ตะกั่วที่พบ ได้แก่ แร่กาลีนา (Galena, PbS) และ แร่เซรัสไซต์ (Cerussite, $PbCO_3$) แร่สังกะสี ได้แก่แร่สฟาเลอไรต์ (Sphalerite, ZnS) เฮมิมอร์ไฟต์ [Hemimorphite, $Zn_4(Si_2O_7)(OH)_2.H_2O$)] ซิงค์ไคต์(Zincite, ZnO) และแร่สมิทซอไนต์ (Smithsonite, $ZnCO_3$) ในประเทศไทยพบแหล่งแร่ตะกั่วสังกะสีในหลายจังหวัด เช่น กาญจนบุรี เลย เชียงใหม่ ยะลา แม่ฮ่องสอน ลำพูน แพร่ พัทลุง เป็นต้น (กรมทรัพยากรธรณี, 2550) โดยจังหวัดกาญจนบุรีเป็นจังหวัดเดียวในปัจจุบันที่ยังคงมีการผลิตแร่ตะกั่วคาร์บอเนต และตะกั่วซัลไฟด์ โดยแหล่งผลิตแร่ตะกั่วที่สำคัญคือที่แหล่งสองท่อ บ่องาม บ่อใหญ่ และบ่อน้อย อำเภอทองผาภูมิ แร่ตะกั่วคาร์บอเนตจะส่งไปถลุงยังบริษัทโลหะตะกั่วไทย ที่อำเภอลาดหญ้า จังหวัดกาญจนบุรี ซึ่งเป็นผู้ผลิตโลหะตะกั่วจากสินแร่ตะกั่วคาร์บอเนตเพียงรายเดียวของประเทศ แหล่งผลิตแร่สังกะสีที่สำคัญคือ ที่ตำบลพระธาตุผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก เป็นแหล่งผลิตแร่สังกะสีซิลิเกตที่ใหญ่ที่สุดแห่งหนึ่งของโลก แร่สังกะสีที่ผลิตได้จะส่งไปถลุงยังโรงถลุงแร่สังกะสีของบริษัทผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) ที่อำเภอเมือง จังหวัดตาก (กรมทรัพยากรธรณี, 2550)

การทำอุตสาหกรรมเหมืองแร่เพื่อนำแร่ไปใช้ประโยนช์ส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมในบริเวณรอบเหมืองแร่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่เกษตรกรรม ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนที่อาศัยในพื้นที่โดยรอบแหล่งเหมือง เนื่องมาจากการรับโลหะหนักเข้าสู่ร่างกายโดยการอุปโภคบริโภคน้ำที่มีโลหะหนักปนเปื้อน และการบริโภคผลผลิตทางการเกษตรที่มีโลหะหนักปนเปื้อน เช่น การปนเปื้อนตะกั่วในห้วยคลิตี้ จังหวัดกาญจบุรี เนื่องจากกิจกรรมเหมืองแร่ตะกั่ว ซึ่งทำให้ชาวบ้านที่อาศัยในหมู่บ้านที่ใช้ประโยชน์จากห้วยคลิตี้ได้รับผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย (กรมควบคุมมลพิษ, 2556)

2.1.3 ผลกระทบของตะกั่วต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์

ในสิ่งแวดล้อมตะกั่วสามารถพบได้ในแหล่งต่างๆ ทั้งในดิน น้ำ และอากาศ โดยตะกั่วสามารถเปลี่ยนแปลงสถานะและส่งผ่านระหว่างแหล่งต่างๆ ได้ ถ้าแหล่งใดแหล่งหนึ่งเกิดการปนเปื้อนตะกั่วหรือโลหะหนักอื่น ๆ (ปรอท แคดเมียมทองแดง สังกะสี โครเมียม เป็นต้น) อาจก่อให้เกิดการ

ปนเปื้อนในแหล่งอื่นๆ ด้วย (ภาพที่ 2.1) การปนเปื้อนโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ไม่มากก็น้อย (ปิยะ, ม.ป.ป.: ระบบออนไลน์)

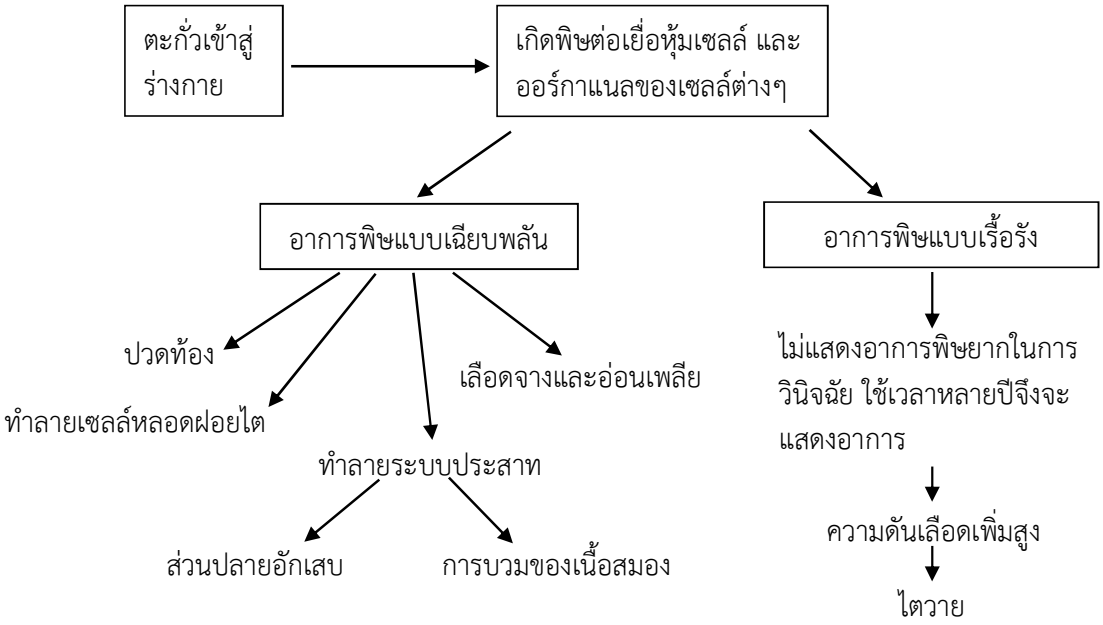


ภาพที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ของโลหะตะกั่วที่พบได้ในแหล่งต่างๆ ในสิ่งแวดล้อมซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ (ปิยะ, ม.ป.ป.: ระบบออนไลน์)

2.1.4 กลไกการเกิดพิษและผลกระทบต่อสุขภาพ

ความเป็นพิษของตะกั่วขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่สัมผัส (Exposture time) ชนิด (ตะกั่วอินทรีย์ หรือ ตะกั่วอนินทรีย์) และปริมาณ (Dose) ของตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกายเกิดขึ้นได้ทั้งในคนที่ทำงานในสถานที่ประกอบการที่มีการใช้ตะกั่ว (Industrial) และคนที่ไม่ทำงานในสถานที่ประกอบการที่มีการใช้ตะกั่ว (Non-industrial) แต่ได้รับตะกั่วจากสิ่งแวดล้อม เช่น เด็กเล็ก ๆ ที่ชอบเก็บของตกพื้น เช่นเก็บสะเก็ดสีที่ทาบ้านกินหรือเอาของเล่นที่มีสีเข้าปากผู้ใหญ่ที่ใช้ภาชนะที่ทำด้วยตะกั่วต้มเหล้าเถื่อนรับประทาน ใช้เครื่องสำอางที่มีสารตะกั่ว ใช้หนังสือพิมพ์ห่ออาหาร หรือรับประทานอาหารหรือยาบางอย่างที่มีสารตะกั่วปนเปื้อนหรืออยู่ใกล้บริเวณที่มีกิจการเคาะ พ่นสีรถยนต์ เป็นต้น

ตะกั่วเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะทำลายเซลล์โดยไปรวมกับหมู่ซัลไฮดริล (Sulhydryl , -SH) ของโปรตีนและเอนไซม์ที่เยื่อหุ้มเซลล์และออร์แกเนลล์ต่างๆทำให้เซลล์ต่างๆ เกิดความเสียหาย หากได้รับในปริมาณสูงมากอาจก่อให้เกิดอาการพิษแบบเฉียบพลัน เช่น ปวดท้อง เลือดจางและอ่อนเพลีย ทำลายเซลล์หลอดฝอยไต ทำลายระบบประสาท หากได้รับตะกั่วเข้าสู่ร่ายกายในปริมาณน้อยเป็นเวลานานอาจก่อให้เกิดพิษแบบเรื้อรัง (ภาพที่ 2.2)



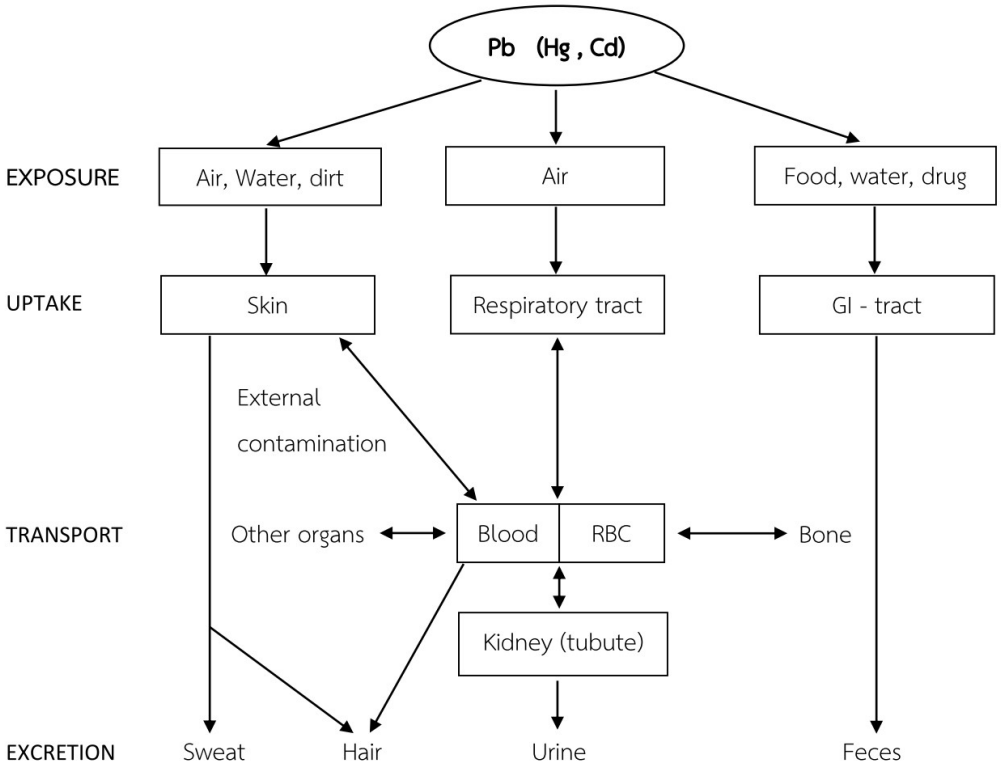
ภาพที่ 2.2 แสดงผลกระทบของสารตะกั่วต่อสุขภาพ (ปิยะ, ม.ป.ป.: ระบบออนไลน์)

2.1.5 เมตาบอลิสมของตะกั่วเมื่อเข้าสู่ร่างกาย

ร่างกายมีโอกาสได้รับตะกั่วได้ 3 ทาง คือ การหายใจ การกิน และ ผิวหนัง (ภาพที่ 2.3) ถ้าเป็นตะกั่วอนินนทรีย์จะถูกดูดซึมผ่านทางระบบหายใจหรือปอดและทางลำไส้ส่วนตะกั่วอินทรีย์จะถูกดูดซึมผ่านทางผิวหนังได้ดี เมื่อตะกั่วเข้าสู่ระบบไหลเวียนโลหิตจะถูกพาไปสะสมในส่วนต่างๆ ของร่างกาย ตะกั่วร้อยละ 1 จะจับกับเม็ดเลือดแดง ตะกั่วร้อยละ 4 จะถูกดูดซึมเข้าสู่ Soft tissues และตะกั่วร้อยละ 90 – 95 จะถูกสะสมอยู่ในกระดูกต่างๆ ที่กำลังเจริญเติบโตและฟัน จากนั้นตะกั่วในระบบไหลเวียนของโลหิตจะถูกกำจัดออกจากร่างกายอย่างช้าๆ ทางเหงื่อ ผม เล็บ ปัสสาวะ และอุจจาระ ถ้าร่างกายได้รับตะกั่วมากเกินกว่าที่จะขับออกได้ทันจะเกิดการสะสมของตะกั่วในร่างกาย

สารประกอบอินทรีย์ของตะกั่วจะถูกขับออกนอกร่างกายช้าและสามารถเข้าไปสะสมในเซลล์สมองได้มากกว่าสารประกอบอนินทรีย์ของตะกั่วตะกั่วมีค่าครึ่งชีวิต (Bioloogical half-life) ในเลือด 35 วันนอกจากนี้ยังพบว่าเด็กจะได้รับตะกั่วจากแม่ผ่านรก (Placenta) ได้และพบตะกั่วเล็กน้อยในต่อมน้ำนมและนมแม่โดยทั่วไปคนเราไม่ควรได้รับตะกั่วมากกว่า 5 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมต่อวัน มีผู้วิเคราะห์ว่าผู้ใหญ่ปกติที่กินอาหาร 1.5 กิโลกรัมต่อวัน น้ำ 2.5 ลิตรต่อวันถ้ามีโอกาสได้รับตะกั่วในชีวิตประจำวันประมาณ 225 – 250 ไมโครกรัมต่อวันสามารถที่จะเมตาบอไลซ์และขับถ่ายออกทางปัสสาวะได้ แต่ถ้ามีโอกาสได้รับตะกั่วมากกว่านี้ร่างกายจะขับออกไม่ทันและกระจายไปสะสมที่เนื้อเยื่อต่างๆ คือ ไขกระดูก เม็ดเลือดแดง สมอง ตับ ไต และกระดูก และมีค่าครึ่งชีวิตที่ร่างกายจะใช้เวลาขับตะกั่วและแคดเมียม ที่สะสมไว้ในกระดูกออกนอกร่างกายได้ครึ่งหนึ่งกินเวลาประมาณ

20 – 30 ปี (ซึ่งต่างจากอาร์เซนิคโคบอล โครเมียม และปรอท ที่จะใช้เวลาเป็นชั่วโมงเป็นวัน หรือเป็นเดือนเท่านั้น)



ภาพที่ 2.3 แสดงเมแทบอลิสมของตะกั่วและโลหะหนักอื่นๆ เมื่อเข้าสู่ร่างกาย (ปิยะ, ม.ป.ป.: ระบบออนไลน์)

2.1.6 ความเป็นพิษของตะกั่ว (Lead Poisoning) (ปิยะ, ม.ป.ป.: ระบบออนไลน์)

(1) พิษของตะกั่วต่อระบบเลือด

ตะกั่วทำให้เกิดความผิดปกติของระบบเลือดและทำให้เกิดอาการซีด (Anemia) เหนื่อย อ่อนเพลีย ปวดศีรษะมึนงง และตัวเหลืองได้ ตะกั่วก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อระบบเลือดด้วยสาเหตุดังต่อไปนี้

- **เม็ดเลือดแดงมีอายุสั้นและแตกง่าย** ตะกั่วสามารถจับกับหมู่ Thiol หรือ Sulhydryl (SH) ของเอนไซม์โปรตีนหรือเมมเบรนโปรตีนที่เยื่อหุ้มเซลล์ของเม็ดเลือดแดงหรือพลาสมาโปรตีน คือ Albumin, Transferrin (Fe carrier protein) และ Ceruloplasmin (Cu carrier protein) ส่งผลให้ Fe หรือ Cu จับพลาสมาโปรตีนของมันลดลง เช่น มีการศึกษาในคนงานที่มีตะกั่วในเลือดสูงพบว่ามีปริมาณ Fe อิสระในพลาสมาสูงกว่าคนปกติเป็นต้น ผลต่อร่างกายที่สำคัญคือ ตะกั่วจับกับหมู่ Thiol ของ ปั๊มโซเดียม (Na,K-ATPase) ที่เยื่อหุ้มเซลล์ของเซลล์หลายชนิดและยับยั้งการทำงานมีผลให้มีความผิดปกติของสมดุลของ Na และ K ในเม็ดเลือดแดงและในพลาสมาและการ

ทำงานของระบบประสาทเป็นต้นนอกจากนี้ตะกั่วยังยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ Glucose 6 phosphate dehydrogenase (G6PD) ที่เป็นเอนไซม์ในขบวนการ Pentose phosphate pathway (PPP) ทำให้ยับยั้งการสังเคราะห์โคเอนไซม์ NADPH สำหรับสังเคราะห์ Glutathione (GSH) ให้ทำงานได้ GSH สามารถกำจัดสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเมแทบอลิสมในสภาวะปกติโดยเปลี่ยนให้เป็นน้ำ ทำให้ลดการสลายของเซลล์โดยเฉพาะเซลล์เม็ดเลือดแดง ยังมีการศึกษาพบว่าตะกั่วทำให้สัดส่วนของ Phospholipid ที่เป็นส่วนประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์ผลิตเม็ดเลือดแดงที่ผิดปกติมีทำให้เม็ดเลือดแดงแตกง่ายหรืออายุเฉลี่ยสั้นลง ถ้ามีการแตกของเม็ดเลือดแดงมากกว่าปกติทำให้พบระดับของบิลิรูบินในเลือดสูงได้

- **ตะกั่วทำให้มีความผิดปกติของการสร้างฮีมและพอร์ฟัยริน** ตะกั่วจะยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่ใช้สร้างฮีม มีผลกระทบต่อการสร้างฮีโมโกลบินในเซลล์ของเม็ดเลือดแดง

- **เกิด Basophilic stippling ของเม็ดเลือดแดง** จากการเสมียร์เลือดในโรคพิษตะกั่วเรื้อรัง พบลักษณะของ Basophilic stipping ได้บ่อย เพราะตะกั่วยับยั้งเอ็นไซม์ Pyrimidine 5 ,- nucleotidase ปกติเอนไซม์จะสลาย rRNA แต่เมื่อทำงานไม่ได้ทำให้ rRNA aggregate ทำให้เกิดตะกอนของ Pyrimidine nucleotide และ RNA มากผิดปกติเมื่อย้อมด้วยสีไรท์จะเห็นตะกอนสีน้ำเงินได้ ความผิดปกติของเอนไซม์นี้ยังส่งผลให้การผลิตพลังงานในเซลล์และโครงสร้างของเซลล์เมมเบรนเปลี่ยนแปลงไปทำให้เม็ดเลือดแดงอายุสั้นนอกจากนี้ถ้าได้รับตะกั่วนานๆ จะยับยั้งการสร้าง Globin ด้วย

(2) พิษของตะกั่วต่อไต (Nephrotoxicity)

ตะกั่วจะไปสะสมที่ไตทำให้เกิดความผิดปกติของ Tubular marker หลายชนิดมากกว่าที่จะเกิดกับ Glomerular marker และแบ่งออกได้ทั้งแบบเฉียบพลันซึ่งเปลี่ยนแปลงกลับสู่ปกติได้ (Reversible) และแบบเรื้อรัง ซึ่งถ้ามากอาจเปลี่ยนแปลงกลับสู่ปกติไม่ได้

กรณีของ Acute lead nephropathy เนื่องจากตะกั่วจะไปจับกับส่วนต่างๆ ของเซลล์หลอดฝอยไตทำให้มีการทำลายของเซลล์ และการทำงานของเซลล์จะเสียไป กระบวนการสร้างพลังงานที่ใช้ในการขนส่งสารลดลงส่งผลให้โปรตีนขนส่งหลายชนิดทำงานไม่เหมือนเดิม การดูดกลับของแร่ธาตุกรดอะมิโน กลูโคสและสารที่จำเป็นต่างๆ เสียไป เรียกว่าเกิด Fanconi syndrome เกิดภาวะ Aminoaciduria, Glycosuria และ Hyperphosphaturia เป็นต้น

กรณีที่เกิดพิษตะกั่วเรื้อรังเนื่องจากตะกั่วไปสะสมที่เนื้อไต ทำให้เกิดการอักเสบในบริเวณ Tubulointerstitium ของเนื้อไต ผู้ป่วยจะมีการทำงานของไตลดลง เพิ่มการดูดกลับของกรดยูริกทำให้เกิดภาวะ Hyperuricemia ก่อให้เกิดโรคเก๊าท์ได้

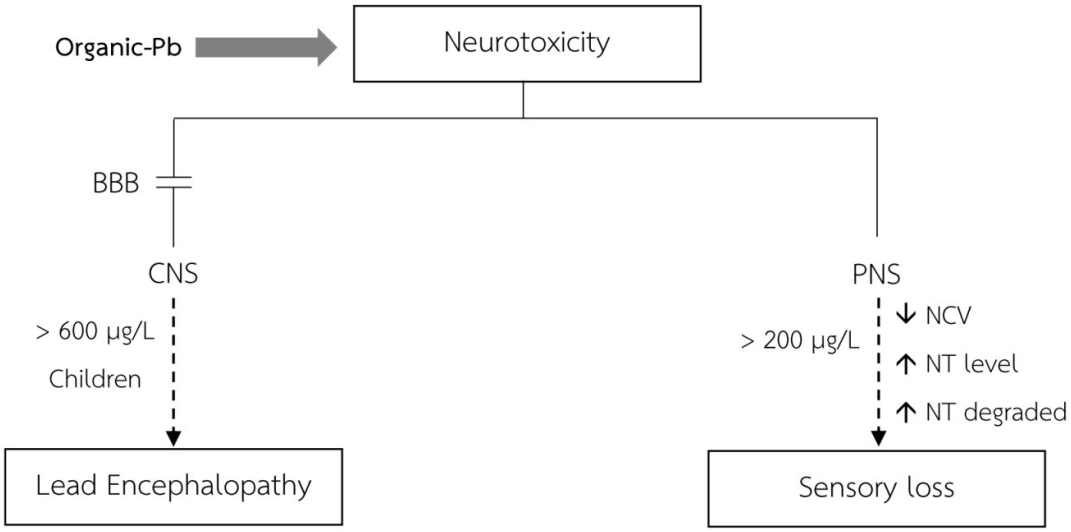
(3) พิษของตะกั่วต่อระบบประสาท (Neurotoxicity)

ตะกั่วมีผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง (Central nervous system , CNS) และส่วนปลาย (Peripheral nervous systems ,PNS) เนื่องจากตะกั่วสามารถผ่าน Blood brain barrier (BBB) ได้ และยังสามารถทำลาย BBB ส่งผลต่อการแพร่ของสารเช่น อัลบูมิน (Albumin) ทำให้มีความผิดปกติของสารการสะสมของน้ำในสมองทำให้เกิดสมองบวม (Edema) ทำให้มีการแสดงอาการตั้งแต่

น้อยเช่น ซึม ปวดศีรษะ งง กระวนกระวาย เชื่องช้า ตื่นเต้นง่าย น้ำหนักลดอาเจียน จนถึงอาการรุนแรง ได้แก่ ชัก หมดสติ อัมพาต (Encephalopathy) นอกจากนี้ยังพบว่าเด็กที่ได้รับตะกั่วเข้าสู่ร่างกายในปริมาณน้อยแต่เป็นเวลานานจะส่งผลให้มีระดับสติปัญญา (IQ) ต่ำกว่าเด็กปกติ นอกจากนี้ตะกั่วจากแม่สามารถผ่านรกไปสู่เด็กทารกได้และเด็กทารกจะมีความไวต่อพิษของตะกั่วมากเนื่องจากการพัฒนาของ BBB ยังไม่เต็มที่

สำหรับกลไกของความเป็นพิษของตะกั่วต่อระบบประสาทพบว่าตะกั่วมีผลต่อรูปร่างของเซลล์และเปลี่ยนแปลง Neuronal circuitry ตะกั่วยับยั้งการทำงานของ Na,K-ATPase โดยจับกับ Sulhydryl (SH) ที่เยื่อเซลล์และการสร้างพลังงานในเซลล์ยับยั้งการหลั่ง Ca จากไมโตคอนเดรีย และมีผลต่อศักย์ไฟฟ้าที่เยื่อหุ้มเซลล์นอกจากนี้ผลของตะกั่วต่อระบบประสาทส่วนกลางทำให้มีการบวมของเนื้อสมองและเกิด Lead encephalopathy ได้ในเด็กที่มี B-Pb มากกว่า 600 ไมโครกรัมต่อลิตร (ภาพที่ 2.4) ในขณะที่ผู้ใหญ่จะเกิดเมื่อ B-Pb มากกว่า 1000ไมโครกรัมต่อลิตร

ตะกั่วยังมีผลต่อระบบประสาทส่วนปลายและกล้ามเนื้อทำให้เกิดประสาทส่วนปลายอักเสบ (Peripheral neuropathy) แต่พบในผู้ใหญ่มากกว่าเด็กโดยทำให้การทำงานของ Motor nerve ผิดปกติไป ซึ่งทางคลีนิกจะตรวจได้ โดย Electrophysiological measuremert ของ Nerve conduction velocity (NCV) จะพบความผิดปกติตั้งแต่ระดับ B-Pb 400 μg/L ในผู้ใหญ่และ 200 μg/L ในเด็ก การวัด NCV ถือว่าเป็น Neurotoxicity marker ได้ และนิยมวัดในภาวะตะกั่วเป็นพิษ



ภาพที่ 2.4 แสดงพิษของตะกั่วต่อระบบประสาท (ปิยะ, ม.ป.ป.: ระบบออนไลน์)

(4) พิษของตะกั่วต่อระบบทางเดินอาหาร

ตะกั่วปริมาณสูงอาจทำให้มีอาการปวดท้องมากจะบิดตัว (Lead colic) เนื่องจากมีการหดเกร็งของลำไส้โดยเฉพาะพิษของตะกั่วเฉียบพลันจะพบมาก และมีอาการท้องผูก

ท้องเสียนำ คลื่นไส้อาเจียน เบื่ออาหาร ซีดและเหงื่อออกมาก มีความต้องการถ่ายแต่ไม่อุจจาระ นอกจากนี้จะพบ Lead line ซึ่งเกิดจากกรานูลเล็กๆ ของตะกั่วซัลไฟด์ มาจับอยู่บริเวณขิดเหงือกที่ต่อกับฟันลักษณะจะเป็น Bluish color ถ้ากดเบาๆ ที่เหงือก ส่วนที่ตับไม่พบหลักฐานที่แน่นอน เนื่องจากการสร้างของฮีโมโกลบินลดลง และเม็ดเลือดแดงแตกง่าย อาจมีตัวเหลืองจากการมี Bilirubin ในเลือดสูง

(5) พิษของตะกั่วต่อระบบกระดูก

ตะกั่วจะสะสมในกระดูกที่กำลังเจริญ (Growing long bone) เมื่อเอกซเรย์จะเห็นลักษณะทึบที่เรียกว่า Lead line ในภาพรังสี แถบนี้ขึ้นกับระยะเวลาและปริมาณของตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกาย

(6) พิษของตะกั่วต่อระบบสืบพันธุ์

การได้รับตะกั่วติดต่อกันเป็นเวลานาน (Prolonged exposure) จะทำให้ความรู้สึกทางเพศผิดปกติ Sperm ผิดปกติ

(7) ตะกั่วเป็นสารชักนำให้เกิดมิวเตชั่นและสารก่อมะเร็ง

ตะกั่วอาจทำให้โครโมโซมผิดปกติ (มีการแตกของโครโมโซมและโครมาติด) และการแบ่งตัวในระยะ Metaphase ผิดปกติ นอกจากนี้ตะกั่วยังเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogen) โดยจัดเป็น Carcinogen class 2B ซึ่งสามารถทำให้เกิดเนื้องอก ทั้งชนิดธรรมดาและร้ายแรงได้ แต่ยังไม่มีข้อสรุปที่แน่นอน

2.1.7 เกณฑ์มาตรฐานปริมาณตะกั่วในสิ่งแวดล้อม

ประเทศไทยมีการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานสำหรับปริมาณโลหะตะกั่วในสิ่งแวดล้อม (ตารางที่ 2.2) เพื่อป้องกันผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน

ตารางที่ 2.2 เกณฑ์มาตรฐานปริมาณตะกั่วในสิ่งแวดล้อม

มาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม	เกณฑ์มาตรฐาน	แหล่งที่มา
ดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม	400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547)
ดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอื่นนอกเหนือจากการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม	750 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547)
น้ำในแหล่งน้ำผิวดิน	0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537)
น้ำใต้ดิน	0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543)
อากาศในบรรยากาศทั่วไป	1.5 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 10 (พ.ศ.2538)
อาหารที่มีสารปนเปื้อน	1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 98 (พ.ศ. 2529)

2.2 การปนเปื้อนโลหะหนักในประเทศไทย

ในประเทศไทยพบการปนเปื้อนโลหะหนักในบริเวณโดยรอบของพื้นที่ที่มีกิจกรรมเหมืองแร่ ตัวอย่างเช่นมีรายงานการปนเปื้อนแคดเมียมและสังกะสีปริมาณสูงในพื้นที่เกษตรกรรมโดยรอบเหมืองสังกะสี ในอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ในพื้นที่ดังกล่าวได้มีการทำเหมืองสังกะสีมาตั้งแต่ปี 2520 ในปัจจุบันบริษัทผาแดงอินดัสทรีได้รับสัมปทานให้ทำเหมืองในบริเวณดังกล่าว ตั้งแต่ปี 2546 ได้มีรายงานที่แสดงให้เห็นว่าพื้นที่เกษตรกรรมซึ่งได้รับน้ำจากห้วยแม่ตาวและห้วยแม่กุ มีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีสูงมาก ซึ่งลำห้วยทั้งสองไหลผ่านพื้นที่ที่มีแร่สังกะสีปริมาณสูง และมีการทำเหมืองสังกะสีมานานกว่า 20 ปีโดยธรรมชาติแคดเมียมมักพบปนอยู่ในแร่สังกะสีดังนั้นจึงพบการปนเปื้อนโลหะทั้งสองชนิดร่วมกัน (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 และผลการศึกษายังบ่งชี้ว่าการปนเปื้อนแคดเมียมและสังกะสีในพื้นที่ปลูกข้าวมากจากการใช้น้ำจากลำห้วยที่ไหลผ่านพื้นที่ที่มีการทำเหมืองแร่ เมล็ดข้าวที่ได้จากพื้นที่ปนเปื้อนมีแคดเมียมปนเปื้อนอยู่ประมาณ 0.05 – 7.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม การปนเปื้อนดังกล่าวก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพของคนซึ่งมีการบริโภคผลผลิตทางการเกษตรที่ได้จากพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมและสังกะสี (Simmons et al., 2005) ต่อมาในปี 2550 ได้มีทีมนักวิจัยลงพื้นที่เพื่อสำรวจปริมาณแคดเมียมในปัสสาวะของประชาชนที่อาศัยอยู่ใน

บริเวณที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมและสังกะสี ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าคนที่บริโภคข้าวที่ปลูกในพื้นที่ปนเปื้อนมีปริมาณโลหะแคดเมียมในปัสสาวะสูงกว่าคนที่ไม่ได้บริโภคข้าวในพื้นที่ (Swaddiwudhipong et al., 2007) ดังนั้นพื้นที่เกษตรกรรมที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักดังกล่าวจึงถูกห้ามปลูกข้าวและพืชผลทางการเกษตรเพื่อการบริโภค และรัฐบาลได้พยายามส่งเสริมการปลูกพืชทางเลือกชนิดอื่นที่ไม่ได้นำมาเป็นอาหาร

ในปี พ.ศ. 2541 พบการปนเปื้อนโลหะตะกั่วในลำห้วยคลิตี้ อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี (กรมควบคุมมลพิษ, 2556) การปนเปื้อนเกิดจากการรั่วไหลของหางแร่จากบ่อเก็บกากตะกอนของโรงแต่งแร่คลิตี้ บริษัทตะกั่วคอนเซนเตรทส์ (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งรับแร่มาจากเหมืองบ่องาม มีรายงานพบการปนเปื้อนตะกั่วในตะกอนดินท้องน้ำในลำห้วยคลิตี้สูงถึง 5,427 – 146,100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (กรมควบคุมมลพิษ, 2556) นอกจากนี้ดินในพื้นที่เกษตรกรรมมีตะกั่วปนเปื้อนในปริมาณ 405 – 34,209 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมซึ่งมีค่าสูงเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและการเกษตรกรรมที่กำหนดให้มีตะกั่วปนเปื้อนไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (กรมควบคุมมลพิษ, 2556) ผลผลิตทางการเกษตร ได้แก่ พริก ผักกูด ใบมะกรูด ตะไคร้ ข่า โหระพา ผักชีฝรั่ง ตำลึง และมะระหวาน จากพื้นที่ปนเปื้อนมีตะกั่วสะสมสูงถึง 2.037 – 23.556 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานอาหารมีสารปนเปื้อนตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 98 (พ.ศ. 2529) ที่กำหนดให้มีตะกั่วปนเปื้อนไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก (กรมควบคุมมลพิษ, 2556) และสัตว์น้ำ (กุ้ง ปู และหอย) จากลำห้วยคลิตี้มีตะกั่วปนเปื้อน 2.727 – 743.10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานอาหารมีสารปนเปื้อน (กรมควบคุมมลพิษ, 2556) การปนเปื้อนตะกั่วในแหล่งน้ำส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนอย่างรุนแรงในหมู่บ้านคลิตี้ล่าง เนื่องจากมีการใช้น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค การบริโภคอาหารที่ได้จากธรรมชาติซึ่งมีการปนเปื้อนโลหะตะกั่ว เช่น สัตว์น้ำจากลำห้วยที่มีการปนเปื้อน หรือการบริโภคผลิตผลทางการเกษตรซึ่งปลูกบนดินที่มีการปนเปื้อนโลหะตะกั่วอยู่ เมื่อบริโภคอาหารที่ปนเปื้อนจะได้รับตะกั่วเข้าสู่ร่างกาย และตะกั่วจะถูกสะสมไว้ในร่างกายซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ

จากกรณีตัวอย่างข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการปนเปื้อนโลหะหนักได้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของคนที่อยู่อาศัยในบริเวณที่มีการปนเปื้อนอย่างรุนแรง นอกจากนั้นยังส่งผลเสียต่อระบบนิเวศอีกด้วย ดังนั้นการบริหารจัดการพื้นที่ปนเปื้อนเพื่อลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้นจึงมีความสำคัญ การใช้พืชเพื่อบำบัดพื้นที่ปนเปื้อน (Phytoremediation) เป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยพื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนได้ โดยในพื้นที่ที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์เพื่อการเกษตรกรรมอาจนำพืชที่มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักปริมาณสูงไปปลูกเพื่อให้พืชดูดซับโลหะหนักออกจากดินที่ปนเปื้อนและนำพืชไปกำจัดด้วยวิธีที่เหมาะสมซึ่งจะทำให้ดินมีปริมาณโลหะหนักปนเปื้อนลดลงและยังช่วยลดการชะล้างของโลหะหนักไม่ให้กระจายไปปนเปื้อนในบริเวณกว้าง นอกจากนี้อาจใช้การสร้างเสถียรภาพของโลหะหนักในดินซึ่งน่าจะเป็นวิธีการที่เหมาะสมกับพื้นที่เกษตรกรรมที่ปนเปื้อนโลหะหนักเพื่อลดการดูดซับโลหะหนักของพืชที่ปลูกบนดินปนเปื้อนซึ่งอาจนำพืชไปใช้ประโยชน์ได้

2.3 เทคโนโลยีการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนัก

2.3.1 การบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยวิธีทางกายภาพและเคมี

การบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยวิธีทางกายภาพและเคมีเป็นเทคนิคที่อาจนำมาใช้ในการจัดการพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยอาจบำบัดฟื้นฟูในพื้นที่จริง (*In situ*) หรืออาจนำดินปนเปื้อนออกไปบำบัดนอกพื้นที่ (*Ex situ*) ด้วยวิธีการต่างๆ (Saxena *et al*., 1999) ดังนี้

Soil flushing เป็นวิธีการที่ใช้สารละลาย (น้ำหรือสารละลาย Chelotors) มาชะล้างโลหะหนักออกจากดินปนเปื้อน และรวบรวมสารละลายที่ปนเปื้อนโลหะหนักไปบำบัดด้วยวิธีการที่เหมาะสมต่อไป

Pneumatic fracturing เป็นกระบวนการที่เติมอากาศโดยใช้แรงดันสูงเข้าไปในดินปนเปื้อนเพื่อทำให้เกิดรอยแยกในดินปนเปื้อนซึ่งมีความพรุนน้อย วิธีการนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัดโลหะหนักออกจากดินปนเปื้อนด้วยวิธีการต่างๆ (เช่น Soil flushing)

Solidification/Stabilization เป็นการทำให้โลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินมีเสถียรภาพด้วยวิธีทางกายภาพหรือการเติมสารเคมีที่ทำให้โลหะหนักตกตะกอนหรือลดการละลายของโลหะหนัก เพื่อป้องกันการรั่วไหลของโลหะหนักไปปนเปื้อนในพื้นที่อื่นๆ

Vitrification เป็นเทคนิกที่ใช้ความร้อนสูงในการหลอมละลายดินปนเปื้อนเพื่อส่งเสริมการทำให้เกิดเสถียรภาพของโลหะหนักในดิน

Electrokinetics เป็นการแยกโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินด้วยขั้วไฟฟ้าโดยวางขั้วไฟฟ้าลงในดิน ซึ่งจะทำให้โลหะหนักจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วไฟฟ้า แล้วแยกหรือสกัดโลหะหนักที่รวบรวมที่ขั้วไปกำจัดด้วยวิธีการที่เหมาะสม

Chemical reduction/oxidation เป็นการเติมสารเคมีลงในพื้นที่ปนเปื้อนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นและรีดักชั่น ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารปนเปื้อนหรือโลหะหนักจากสารที่มีความเป็นพิษรุนแรงเป็นสารที่มีความเป็นพิษลดลงหรือไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษ นอกจากนี้สารปนเปื้อนจะมีความเสถียรมากขึ้นซึ่งจะช่วยลดการชะล้างของสารมลพิษไปปนเปื้อนบริเวณอื่น

Soil washing เป็นกระบวนการใช้สารละลายแยกสารมลพิษหรือโลหะหนักที่ยึดเกาะกับอนุภาคของดินด้วยหลักการของ Size separation, Gravity separation, หรือ Attrition scrubbing

Excavation, retrieval and off-site disposal เป็นการขุดดินในพื้นที่ปนเปื้อนและขนส่งไปกำจัดนอกพื้นที่ปนเปื้อน

การบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยวิธีทางกายภาพและเคมี จะใช้ได้กับพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักขนาดเล็ก เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูงมาก มีประสิทธิภาพต่ำ และทำลายโครงสร้าง คุณสมบัติ และความอุดมสมบูรณ์ของดิน การเสื่อมคุณภาพของดินจึงทำให้ไม่สามารถนำดินที่ผ่านการบำบัดมาใช้ประโยชน์ได้อีก หรืออาจทำให้พื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักที่ผ่านการบำบัดสูญเสียศักยภาพทางการเกษตรไป ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพและไม่ทำลายคุณสมบัติของดินเพื่อใช้จัดการพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง (Ali et al., 2013; Saxena et al., 1999)

การใช้พืชบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนัก (Phytoremediation) เป็นเทคโนโลยีทางเลือกหนึ่งที่จะนำมาใช้ในการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักเป็นเทคโนโลยีที่ใช้การปลูกพืชบนดินปนเปื้อนโลหะหนักเพื่อให้พืชสกัดโลหะหนักออกจากดินหรือช่วยเพิ่มเสถียรภาพของโลหะหนักในดินเพื่อป้องกันการชะล้างของโลหะหนักไปปนเปื้อนในบริเวณอื่น เป็นวิธีการที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ สามารถใช้ได้กับพื้นที่ปนเปื้อนขนาดใหญ่ ไม่ต้องใช้เครื่องจักรกล และที่สำคัญที่สุดการใช้พืชบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักนอกจากจะไม่ทำลายโครงสร้าง คุณสมบัติของดิน แล้วยังช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน และยังมีประโยชน์ทางอ้อมด้วย เช่น การทำให้ทัศนียภาพของพื้นที่ปนเปื้อนสวยงามและอาจนำพืชไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ได้ด้วย

2.3.2 ไฟโตเรมิดิเอชั่น (Phytoremediation)

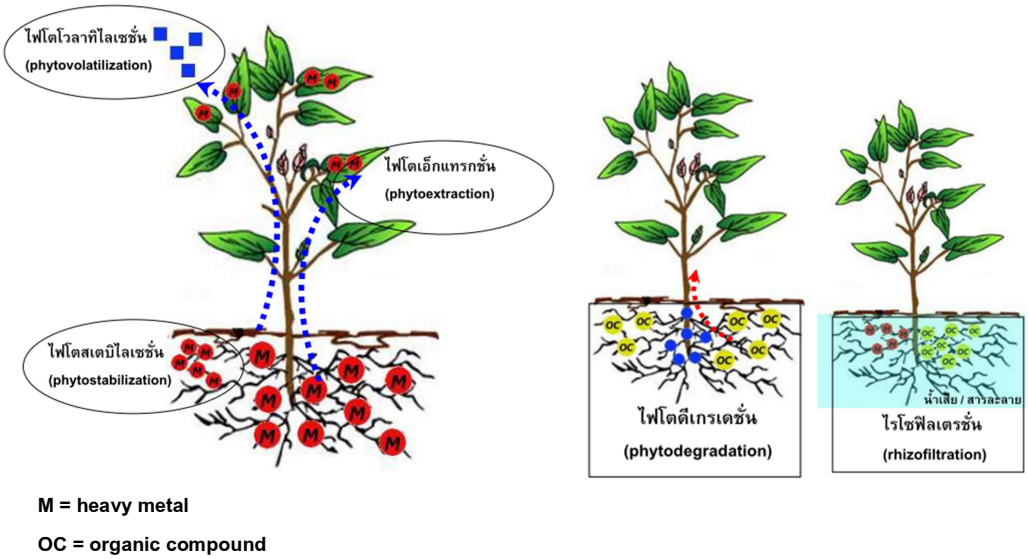
ไฟโตเรมิดิเอชั่น (Phytoremediation) คือกระบวนการใช้พืชเพื่อดูดซับ สะสม และ/หรือ ลดความเป็นพิษของสารมลพิษที่ปนเปื้อนในสารตัวกลางที่พืชเจริญเติบโต (ดิน น้ำ หรืออากาศ) ด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ เคมี และชีววิทยา (Ali et al., 2013) ไฟโตเรมิดิเอชั่นสามารถนำมาใช้กับสารปนเปื้อนทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ซึ่งปนเปื้อนในดินหรือแหล่งน้ำ ไฟโตเรมิดิเอชั่นหรือการใช้พืชบำบัดสิ่งแวดล้อมปนเปื้อนสารมลพิษเป็นเทคนิคที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Ali et al., 2013) ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี (ภาพที่ 2.5) ดังนี้

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



ภาพที่ 2.5 แสดงการใช้พืชเพื่อบำบัดสิ่งแวดล้อมปนเปื้อนด้วยวิธีต่างๆไฟโตเอ็กแทรกชั่น (Phytoextraction), ไฟโตสเตบิไลเซชั่น (Phytostabilization), ไฟโตโวลาทิไลเซชั่น (Phytovolatization), ไฟโตดีเกรเดชั่น (Phytodegradation) ซึ่งมักใช้กับสารปนเปื้อนที่เป็นสารอินทรีย์ (Organic compound; OC), และไรโซฟิลเตรชั่น (Rhizofiltration) (Ali et al., 2013)

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

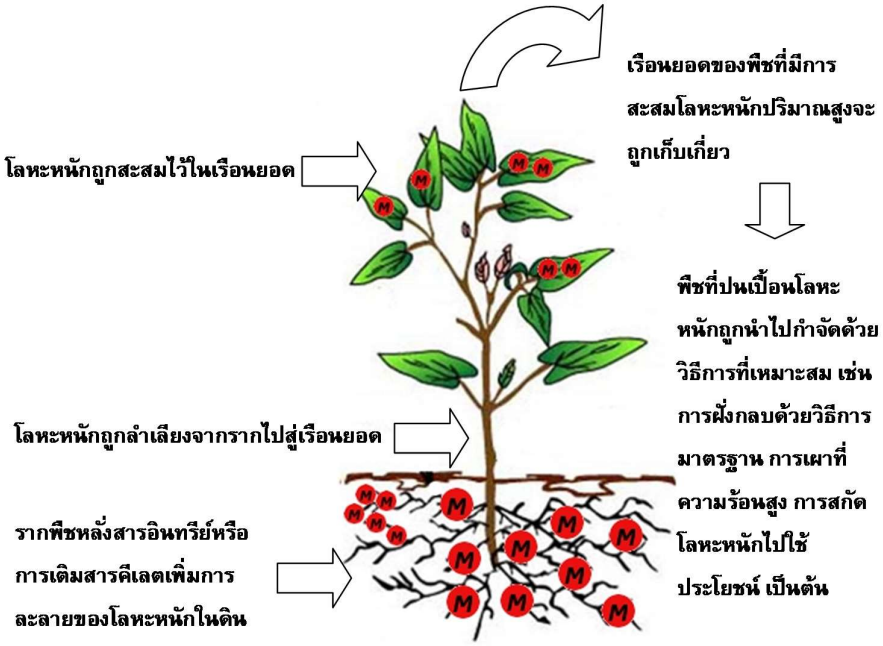
การใช้พืชบำบัดสิ่งแวดล้อมปนเปื้อนสารมลพิษหรือไฟโตเรมิดิเอชั่นมีข้อดีหลายประการ (Ali et al., 2013; Saxena *et al*., 1999) ดังนี้

1. การปลูกพืชมีค่าใช้จ่ายต่ำจึงสามารถใช้บำบัดพื้นที่ปนเปื้อนขนาดใหญ่ได้
2. พืชที่นำมาปลูกจะช่วยทำให้ภูมิทัศน์ของพื้นที่ปนเปื้อนสวยงาม
3. การใช้พืชบำบัดสิ่งแวดล้อมปนเปื้อนสารมลพิษเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการปลูกพืชจะช่วยคงระบบนิเวศในดิน (การใช้วิธีทางกายภาพและเคมีทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนไปจนไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้) การปลูกพืชจะช่วยฟื้นฟูสภาพดินซึ่งเป็นการฟื้นฟูระบบนิเวศของดินด้วย และรากพืชจะช่วยลดการชะล้างของหน้าดินเป็นการเร่งการฟื้นฟูและรักษาระบบนิเวศของดิน
4. พืชบางชนิดที่นำมาปลูกอาจให้มูลค่าทางเศรษฐกิจซึ่งจะช่วยชดเชยค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการฟื้นฟู

5. การสะสมสารมลพิษปริมาณสูงไว้ในเนื้อเยื่อพืชและเก็บเกี่ยวพืชไปกำจัดด้วยวิธีการที่เหมาะสมจะช่วยลดปริมาณของขยะพิษ (Hazardous waste) เมื่อเทียบกับการบำบัดดินโดยตรงซึ่งมีขยะพิษปริมาณมากขยะพิษปริมาณน้อยจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดหรือการสกัดเอาสารมลพิษออก

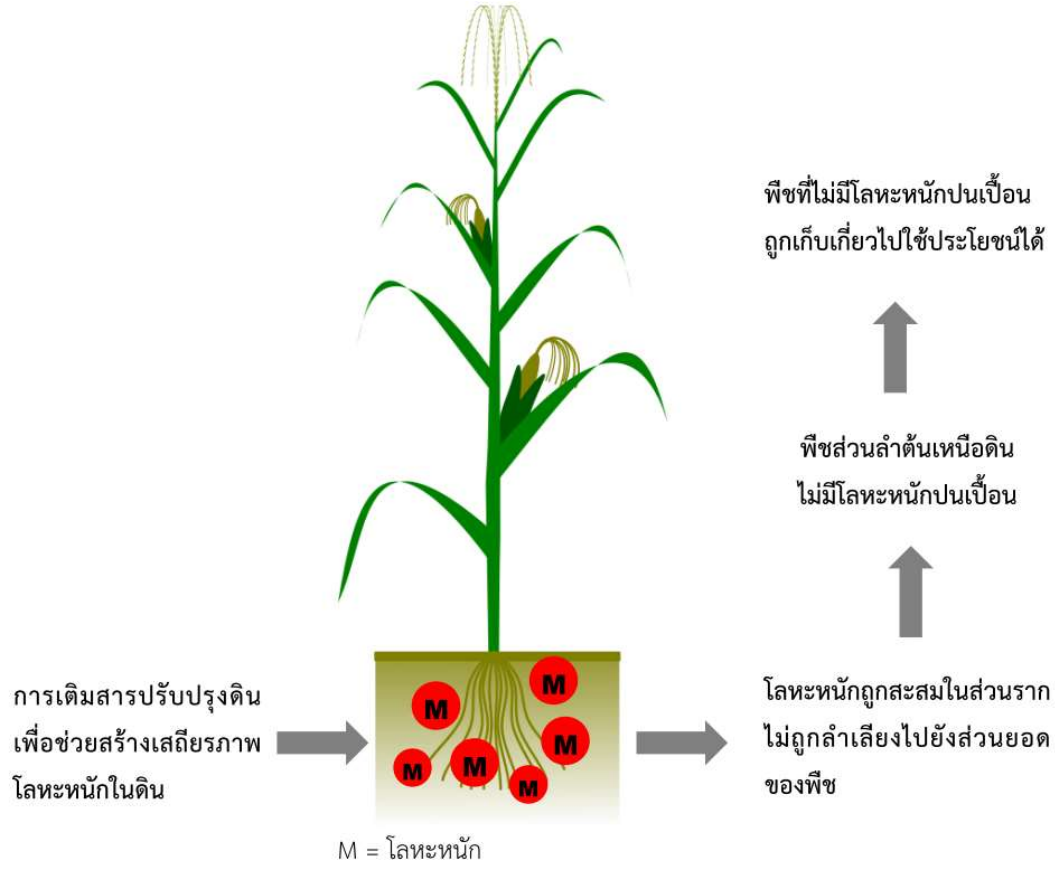
2.3.3 การจัดการพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยวิธีไฟโตเอ็กแทรกชั่นและไฟโตสเตบิไลเซชั่น

ไฟโตเอ็กแทรกชั่น (Phytoextraction) เป็นวิธีการใช้พืชที่มีความสามารถดูดซับโลหะหนักในดิน และพืชจะสะสมโลหะหนักในส่วนลำต้น แล้วจึงเก็บเกี่ยวลำต้นพืชที่มีโลหะหนักปนเปื้อนไปกำจัดด้วยวิธีการที่เหมาะสม (ภาพที่ 2.6) การบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนด้วยวิธีนี้ต้องใช้พืชที่มีความสามารถในการดูดซับและสะสมโลหะหนักในเนื้อเยื่อปริมาณสูง (Hyperaccumulator) อย่างไรก็ตามวิธีการนี้อาจจะเหมาะสมกับการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักที่ถูกทิ้งล้างเพื่อลดปริมาณโลหะหนักในดินหรือลดการชะล้างโลหะหนักไปปนเปื้อนในบริเวณอื่น ประสิทธิภาพของการใช้พืชบำบัดดินปนเปื้อนโลหะหนักด้วยวิธีไฟโตเอ็กแทรกชั่นขึ้นอยู่กับชนิดของพืชซึ่งต้องทนทานต่อโลหะหนักและเก็บสะสมโลหะหนักในเนื้อเยื่อส่วนลำต้นปริมาณสูง เจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว มีระบบรากที่กว้าง และสามารถเก็บเกี่ยวได้ง่าย นอกจากนี้ปัจจัยที่สำคัญซึ่งเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของวิธีการไฟโตเอ็กแทรกชั่นคือปริมาณโลหะหนักที่ละลายได้ในดินซึ่งพืชสามารถดูดซับได้ (Bioavailability) และอาจสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของวิธีการไฟโตเอ็กแทรกชั่นได้ด้วยการเพิ่มการละลายโลหะหนักในดินด้วยการใช้สารเคมีที่เหมาะสมในการเพิ่มการละลายโลหะหนักในดิน



ภาพที่ 2.6 กระบวนการใช้พืชบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยวิธีไฟโตเอ็กแทรกชั่น (Phytoextraction)

ไฟโตสเตบิไลเซชั่น (Phytostabilization) เป็นการปลูกพืชที่มีความสามารถทนกับโลหะหนักได้ดี และดูดซับโลหะหนักในปริมาณน้อย โดยการปลูกพืชจะช่วยเพิ่มเสถียรภาพของโลหะหนักในดินซึ่งจะช่วยลดการแพร่กระจายของโลหะหนักยังบริเวณอื่นๆ (ภาพที่ 2.7) การบำบัดด้วยวิธีการนี้สามารถเกิดขึ้นโดยผ่านกระบวนการดูดซับ (Sorption) การตกตะกอน (Precipitation) การเกิดสารเชิงซ้อน (Complexation) และการรีดิวซ์ (Metal reduction) พืชที่จะนำมาใช้บำบัดควรเป็นพืชที่มีความสามารถทนทานต่อโลหะหนักได้ดี และพืชกลุ่มนี้จำกัดการลำเลียงโลหะหนักไปยังเซลล์ต่างๆ ให้น้อยที่สุด หรือจำกัดการเคลื่อนที่โลหะหนักไปยังส่วนยอดโดยอาจสะสมโลหะหนักปริมาณสูงไว้ในส่วนราก (Mench et al, 2006) หากสามารถพัฒนาวิธีการเพิ่มเสถียรภาพของโลหะหนักในดินจะช่วยลดการดูดซับโลหะหนักของพืช อาจทำให้พืชไม่มีโลหะหนักปนเปื้อนหรือการปนเปื้อนต่ำกว่าค่ามาตรฐานซึ่งทำให้สามารถนำพืชไปใช้ประโยชน์ได้ วิธีการนี้จึงเหมาะกับการนำไปใช้ในพื้นที่เกษตรกรรมที่ปนเปื้อนโลหะหนัก



ภาพที่ 2.7 กระบวนการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยวิธีไฟโตสเตบิไลเซชั่น (Phytostabilization) (Mench et al, 2006)

การจัดการพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยวิธีไฟโตเอ็กแทรกชั่นและไฟโตสเตบิไลเซชั่นเป็นวิธีการที่ประหยัดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยพืชจะสามารถดูดซับโลหะหนักได้ในปริมาณสูง (ไฟโตเอ็กแทรกชั่น) หรือดูดซับโลหะหนักในปริมาณต่ำ (ไฟโตสเตบิไลเซชั่น) ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการ (Ali et al., 2013; Bhargava et al., 2013; 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 ไฟโตเอ็กแทรกชั่นก็จะไม่มีประสิทธิภาพเนื่องจากพืชไม่สามารถดูดซับโลหะหนักได้แม้ว่าพืชจะสามารถทนทานต่อโลหะหนักได้มากก็ตาม ในขณะที่การเพิ่มเสถียรภาพของโลหะหนักในดินซึ่งทำให้พืชดูดซับโลหะหนักได้ลดลงจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของไฟโตสเตบิไลเซชั่น

2.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการละลายของโลหะหนักในดิน

(1) ความเป็นกรดด่างของดิน (pH)

ความเป็นกรดด่างในดินมีอิทธิพลต่อการละลายได้ของโลหะหนักในดิน ถ้าค่าความเป็นกรดด่างของดินสูงจะทำให้การละลายของโลหะหนักในดินลดลง ซึ่งทำให้การดูดซับโลหะหนักของพืชลดลงด้วยแม้ว่าพืชจะสามารถดูดซับโลหะหนักได้ในปริมาณสูงก็ตาม ขณะที่ค่าความเป็นกรดด่างในดินต่ำจะทำให้โลหะหนักที่ละลายได้ในดินเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้พืชสามารถดูดซับโลหะหนักได้สูงขึ้น โลหะหนักสามารถละลายได้ดีเมื่อค่าความเป็นกรดด่างต่ำกว่า 5 ในขณะที่การละลายของโลหะหนักจะลดลงเมื่อค่าความเป็นกรดด่างสูงกว่า 7 (Bhargava et al., 2012; Saxena et al., 1999)

(2) อินทรีย์วัตถุ

ผิวของอนุภาคสารอินทรีย์ในดินมักมีประจุลบ ซึ่งสามารถจับกับโลหะหนักซึ่งเป็นไอออนที่มีประจุบวกได้ดี การเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์วัตถุจึงเป็นการตรึงโลหะหนักไว้ในดิน ซึ่งจะเป็นการลดปริมาณโลหะที่ละลายได้ในดิน ทำให้ปริมาณโลหะที่พืชดูดซับได้ลดต่ำลงโดยทั่วไปโลหะหนักที่ละลายได้มักมีประจุบวก ดังนั้นการมีอินทรีย์วัตถุในดินสูงก็จะลดการละลายของโลหะหนักในดิน และลดการดูดซับโลหะหนักของพืชด้วย (Bhargava et al., 2012; Saxena et al., 1999)

(3) ศักย์รีดอกซ์ (Redox potential)

สภาพออกซิเดชันของโลหะหนักจะถูกกำหนดด้วยศักย์รีดอกซ์ โลหะที่มีเลขออกซิเดชันต่างกันจะส่งผลต่อคุณสมบัติการละลายของโลหะหนัก เช่น โครเมียมที่สภาพออกซิเดชันเท่ากับ +6 จะละลายได้ดีกว่าโครเมียมที่สภาพออกซิเดชันเท่ากับ +3 (Bhargava et al., 2012; Saxena et al., 1999)

(4) ค่าการแลกเปลี่ยนไอออน (Cation exchange capacity, CEC)

ค่าการแลกเปลี่ยนไอออนแสดงความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของดินซึ่งจะสะท้อนความสามารถของดินในการดูดซับไอออนบวก (แคตไอออน) ดังนั้นการที่ดินมีค่าการแลกเปลี่ยนไอออนสูงอาจทำให้ปริมาณโลหะหนักที่ละลายได้ในดินลดลง โลหะหนักจะถูกซึมซับโดยประจุลบในดินได้มาก โลหะหนักในดินเกิดการตกตะกอน พืชจึงไม่สามารถดูดซับได้ (Bhargava et al., 2012; Saxena et al., 1999)

(5) ลักษณะของเนื้อดิน (soil texture)

ขนาดอนุภาพของดินและลักษณะของดินแต่ละประเภท จะส่งผลต่อการดูดซับโลหะหนัก เช่น ดินเหนียวจะมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในดินได้ดี (Bhargava et al., 2012; Saxena et al., 1999

(6) ชนิดและความเข้มข้นของโลหะหนักในดิน

โลหะหนักแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการละลายแตกต่างกัน และขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดิน หากความเข้มข้นของโลหะหนักในดินสูงการละลายของโลหะหนักในดินจะเพิ่มสูงขึ้น (Bhargava et al., 2012; Saxena et al., 1999)

2.5 สารปรับปรุงบำรุงดิน (Soil amendments)

สารปรับปรุงดิน (Soil Conditioners) หมายถึง สารปรับปรุงสมบัติของดินที่เน้นการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพหรือสมบัติทางฟิสิกส์ของดินมากกว่าสมบัติทางด้านอื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สมบัติที่เกี่ยวกับโครงสร้างของดิน สารปรับปรุงดินมีความหมายแคบกว่าสารปรับปรุงบำรุงดิน (ปิยะ, 2556) สารปรับปรุงบำรุงดิน (Soil amendments) หมายถึงสารใดๆ ก็ได้ที่เมื่อใส่ลงดินไปแล้วสามารถช่วยปรับปรุงดินให้มีสภาพเหมาะสมต่อการเติบโตของพืชให้ดีขึ้น ทั้งนี้ไม่ว่าจะเป็นการปรับปรุงทางด้านกายภาพ เคมีและความอุดมสมบูรณ์ของดินหรือสภาพทางชีวภาพในดินและยกเว้นปุ๋ยเคมี (ปิยะ, 2556) ตัวอย่างของสารปรับปรุงบำรุงดินบางชนิด ได้แก่ ปูนขาว ยิปซัม ปุ๋ยอินทรีย์ชนิดต่างๆ เช่น ปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก กากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น การใช้สารปรับปรุงบำรุงดินมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้ายกายภาพ เคมี และทางชีวภาพมากกว่าการปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของธาตุอาหารพืชในดิน

สารปรับปรุงบำรุงดิน (Soil amendments) อาจเป็น (1) สารอินทรีย์ที่ได้จากธรรมชาติ เช่น ปุ๋ยอินทรีย์ เศษพืชและผลพลอยได้จากผลผลิตพืช กรดฮิวมิก (2) สารอนินทรีย์ที่ได้จากธรรมชาติในรูปหินหรือแร่ เช่น หินปูน ยิปซัม แร่ดินเหนียวชนิดต่างๆ เช่น มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorilonite) ในกลุ่มสเมกไทต์ (Smectite) เวอร์มิคูไลท์ (Vermicultite) ซีโอไลท์ (Zeolie) เป็นต้น (3) แร่หรือสารที่แปรรูปโดยการเผา เช่น แคลไซด์ เคลย์ (Calcined clay) ไอโซไลต์ (Isolite) เป็นต้น (4) สารอินทรีย์สังเคราะห์ชนิดต่างๆ เช่น สารพอลิเมอร์ทั้งชนิดที่ไม่ละลายน้ำและละลายน้ำ (5) สารอนินทรีย์สังเคราะห์ เช่น สารเคมีในรูปสารประกอบแอมโมเนียมไทโอซัลเฟต แคลซียมพอลิซันไลด์ เป็นต้น

2.6 ประเภทของสารปรับปรุงดิน

การจำแนกประเภทของสารปรับปรุงดินขึ้นกับเกณฑ์ที่ใช้ในการจำแนก เช่น องค์ประกอบ ที่มา วัตถุประสงค์ของการใช้ประโยชน์ (ปิยะ, 2556)

2.6.1 การจำแนกประเภทตามองค์ประกอบ

สารปรับปรุงดินที่ใช้ในการเกษตรอาจจำแนกตามองค์ประกอบของตัวสารออกได้เป็น 3 ประเภท (ปิยะ, 2556) คือ

(1) สารอนินทรีย์

สารปรับปรุงดินในรูปสารอนินทรีย์ สารที่ไม่มีคาร์บอน ยกเว้น CO CO_2 และ CO_3^2 อาจได้จากธรรมชาติโดยตรงหรือมีการนำมาปรุงแต่งโดยใช้ความร้อนตัวอย่างเช่น หินโดโลไมต์ (Dolomite) หินและแร่ประเภทวัสดุปูนไลม์ (Liming materials) ยิปซัม (Gypsum) แร่ซีโอไลท์ที่ได้จากธรรมชาติ (Natural zeolite) พัมมิซ (Pumice) เวอร์มิคูไลท์ (Vermiculite) แคลไซด์ เคลย์ (Calcined clay) ไอโซไลต์ (Isolite) ฯลฯ และรวมทั้งสารเคมีที่มีการสังเคราะห์ขึ้น เช่น สารซีโอไลท์สังเคราะห์ (Synthetic zeolite) สารประกอบแคลเซียมพอลิซัลไฟด์ (Calcium polysuifide) หรือสารเคมีที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ฟอสโฟยิปซัม (Phosphoypsum) เป็นต้น (ตารางที่ 2.3)

(2) สารอินทรีย์

สารปรับปรุงดินในรูปสารอินทรีย์มีมากมายหลายชนิดทั้งประเภทสารอินทรีย์ธรรมชาติสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีการปรุงแต่งหรือทำให้เกิดการแปรสภาพ เช่น โดยการหมัก ฯลฯ สารอินทรีย์ที่เป็นผลพลอยได้ทางการเกษตรโดยตรง ผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมเกษตร และโรงงานนอกภาคเกษตร รวมทั้งสารอินทรีย์สังเคราะห์ที่มีการสังเคราะห์ขึ้นโดยกระบวนการทางเคมี ตัวอย่างของสารปรับปรุงดินในรูปสารอินทรีย์ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงดิน ได้แก่ ปุ๋ยอินทรีย์ชนิดต่างๆ เช่น ปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก ผลพลอยได้จากผลิตผลการเกษตร เช่น ขุยมะพร้าว แกลบดิน ผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น กากอ้อยจากโรงงานน้ำตาล สารฮิวมัสและจีเอ็มแอล (GML หรือ Glutamic mother liquor) ที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานผลิตผงชูรส สารฮิวมัสในรูปต่างๆ เช่น กรดฮิวมิก และสารดูดน้ำพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ที่สังเคราะห์ขึ้น (ตารางที่ 2.3)

(3) สารอนินทรีย์ผสมสารอินทรีย์

สารปรับปรุงดินผสมระหว่างวัสดุสารอนินทรีย์กับสารอินทรีย์เพื่อการใช้ประโยชน์ในลักษณะผสมผสาน เช่น การผลิตสารอินทรีย์เคมีโดยการผสมสารอินทรีย์หรือปุ๋ยอินทรีย์กับปุ๋ยเคมีและ/หรือแร่บางชนิด ตัวอย่างเช่นการทำปุ๋ยหมักโดยการผสมปุ๋ยเคมีและแร่พัมมิซ (Pumice) หรืออาจผลิตสารปรับปรุงดินโดยการผสมวัสดุหลายชนิดทั้งในรูปสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์เข้าด้วยกัน เช่น สารปรับปรุงดินทีซี (TC) ที่ประกอบด้วยสารดูดน้ำพอลิเมอร์ ปุ๋ยเคมี ปุ๋ยอินทรีย์และสารเร่งการเติบโตของพืช (Growth regulators) เป็นต้น (ตารางที่ 2.3)

2.6.2 การจำแนกประเภทตามแหล่งที่มา

สารปรับปรุงดินชนิดเดียวกันแต่อาจมีแหล่งที่มาแตกต่างกันได้ จึงอาจจำแนกประเภทสารปรับปรุงดินตามแหล่งที่มาได้ 3 ประเภท (ปิยะ, 2556) คือ

(1) สารที่ได้จากแหล่งธรรมชาติ

สารปรับปรุงดินที่ได้จากธรรมชาติโดยอาจนำมาใช้โดยตรงหรือนำมาปรุงแต่งด้วยกระบวนการต่างๆ ก่อนนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งอาจเป็น (1) สารประกอบอนินทรีย์ เช่น หินและแร่ที่มีการนำมาใช้โดยตรงหรือมีการปรับแต่งโดยการนำมาเผาหรือการปรุงแต่งอื่นๆ และ (2) สารประกอบอินทรีย์ เช่น พีต (Peat) ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้โดยตรง หรือมีการปรุงแต่งก่อนนำไปใช้ประโยชน์

(2) สารในรูปผลพลอยได้หรือวัสดุเหลือทิ้ง

วัสดุที่เป็นผลพลอยได้และเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น ขุยมะพร้าว แกลบดิน กากละหุ่ง เปลือกมันค้างปี ปุ๋ยคอก (ปุ๋ยมูลไก่ มูลสุกร มูลวัว เป็นต้น) หรืออาจเป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ตะกอนน้ำเสียจากโรงงานผลิตเบียร์ กากน้ำตาล จีเอ็มแอล (GML หรือ Glutamic mother liquor) โรงงานผลิตผงชูรส กากกระดาษ (Paper sludge) ตะกอนน้ำเสีย (Sewage sludge) จากชุมชน ฟอสโฟยิปซัม (Phosphogypsum) จากโรงงานผลิตปุ๋ยเคมี เศษอิฐมวลเบา เป็นต้น

(3) สารที่ได้จากการสกัดหรือจากการสังเคราะห์ทางเคมี

สารปรับปรุงดินที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีหรือจากการสกัดหรือแยกออกมาจากสารตั้งต้น อาจจำแนกออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1. สารปรับปรุงดินในรูปสารเคมีหรือสารประกอบอนินทรีย์ เช่น สารเคมีในรูปสารประกอบแคลเซียมพอลิซัลไฟด์ (Calcium polysulfide) ฯลฯ

2. สารอินทรีย์สังเคราะห์ในรูปสารแอมโมเนียม ลอเร็ท ซัลเฟต (Ammonium laureth sulfate) สารพอลิเมอร์ทั้งชนิดที่มีสมบัติละลายน้ำได้ เช่น สารพอลิอครีลามีด (Polyacrylamide) และที่ไม่ละลายน้ำแต่ดูดน้ำได้ในปริมาณมาก เช่น สารครอส-ลิ้งด์ พอลิอครีลามีน (Cross-linked polyacrylamide)

3. สารอินทรีย์สกัดในรูปกรดฮิวมิก (Humic acid) หรือสารอนุพันธ์ของกรดฮิวมิกที่สกัดออกมาจากแร่บางชนิด เช่น แร่ลีโอนาไดต์ (Leonardite)

2.6.3 การจำแนกประเภทตามวัตถุประสงค์ของการใช้ประโยชน์

สารที่นำมาใช้ปรับปรุงสมบัติของดินให้ดีขึ้นอาจจำแนกตามวัตถุประสงค์ของการใช้ประโยชน์เพื่อปรับปรุงสมบัติของดิน เช่น ทางกายภาพ ทางเคมี ทางชีวภาพและความอุดมสมบูรณ์ของดิน หรือปรับปรุงดินหลายด้านในลักษณะผสมผสาน ออกเป็น 4 ประเภท (ปิยะ, 2556) คือ

(1) สารที่ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดิน

สารที่ใช้ปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดินคือสารที่ใช้เพื่อปรับสภาพการเคลื่อนที่ของน้ำและการถ่ายเทอากาศของดินที่มีโครงสร้างไม่เหมาะสม การเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของดินและการป้องกันหรือลดการเกิดแผ่นแข็งปิดผิว (Surface crust) เมื่อดินเปียกแล้วแห้ง ทั้งนี้เพื่อลดการสูญเสียดินและน้ำโดยกระบวนการกร่อนดิน (Soil erosion) และการไหลบ่าของน้ำที่อาจจะเกิดตามมา สารปรับปรุงประเภทนี้มีทั้งในรูปสารอินทรีย์ เช่น ปุ๋ยอินทรีย์ชนิดต่างๆ ผลพลอย

ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมในภาคเกษตร เช่น เปลือกมันสำปะหลัง กากอ้อย ขุยมะพร้าว และนอกภาคการเกษตร เช่น ฟอสโฟยิปซัม สารอินทรีย์ที่ได้จากธรรมชาติ เช่น หินและแร่บางชนิด เช่น ซีโอไลท์ ยิปซัม และในรูปสารเคมีทั้งในรูปสารอนินทรีย์สังเคราะห์ เช่น สารประกอบแคลเซียมพอลิซัลไฟด์ และในรูปสารอินทรีย์สังเคราะห์ เช่น สารพอลิเมอร์ดูดน้ำในรูปสารคลอส-ลิ๊งค์ พอลิอครีลามีด หรือ สารประกอบในรูปแอมโมเนียม ลอเร็ท ซัลเฟต

(2) สารที่ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติทางเคมีของดิน

สารที่ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติทางเคมีของดินสามารถจำแนกออกได้ค่อนข้างชัดเจน ได้แก่ หินปูนโดโลไมต์ และวัสดุปูนไลม์ชนิดต่างๆ เช่น หินปูน ปูนขาว ปูนมาร์ลและเปลือกหอยบด หรือ สารที่มีสมบัติใกลเคียงกันสำหรับแก้ความเป็นกรดของดิน เช่น เศษอิฐมวลเบา สารปรับปรุงดินชนิดอื่นๆ เช่น กำมะถันผงที่อาจใช้เพื่อแก้ความเป็นด่างของดินบางประเภท การใช้ยิปซัมเพื่อลดระดับความเค็มของดินเกลือ การใช้สารอินทรีย์สกัดบางชนิด เช่น สารฮิวมัสชนิดต่างๆ แร่บางชนิด เช่น แร่พัมมิช ซีโอไลท์เพื่อเพิ่มความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดินบางชนิดที่มีความจุน้อยเกินไป เช่น ดินทราย และหรือเพื่อเพิ่มความจุบัฟเฟอร์ (Buffering capacity) ของดินให้สูงขึ้นพร้อมๆ กันไปด้วย

(3) สารที่ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติทางชีวภาพและความอุดมสมบูรณ์ของดิน

สารหลายชนิดที่มีคุณค่าต่อการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน ในขณะเดียวกันอาจมีคุณสมบัติช่วยปรับปรุงสภาพทางชีวภาพและความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชไปพร้อมๆ กัน เช่น สารอินทรีย์ชนิดต่างๆ ทั้งในรูปวัสดุเหลือใช้ (Wastes) และผลพลอยได้ (By-products) จากผลิตผลการเกษตร จากโรงงานอุตสาหกรรม และในรูปปุ๋ยอินทรีย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ที่ค่อนข้างชัดเจนทางด้านการปรับปรุงสภาพทางชีวภาพของดิน ได้แก่ สารอินทรีย์สกัดชนิดต่างๆ เช่น กรดฮิวมิกหรือสารประกอบอนุพันธ์ของกรดฮิวมิกชนิดต่างๆ หรือในรูปที่เป็นส่วนผสมอย่างผสมผสานของสารชนิดต่างๆ ข้างต้น สำหรับคุณค่าของกลุ่มสารปรับปรุงดินประเภทนี้ต่อการปรับปรุงกิจกรรมที่เป็นประโยชน์ของจุลินทรีย์ในดินหรือต่อการเพิ่มปริมาณธาตุอาหารพืชในดิน จะมีมากหรือน้อยก็ขึ้นกับสมบัติของสารผสมชนิดนั้นๆ ว่าเมื่อใช้แล้วจะมีผลต่อการปรับปรุงสภาพความเหมาะสมของสิ่งแวดล้อมในดินมากน้อยเพียงไร เช่น สภาพปฏิกิริยาดิน หรือ pH ของดิน สภาพการถ่ายเทอากาศ และความมากน้อยของระดับปริมาณธาตุอาหารพืชในดินที่จะได้มาจากการใช้สารปรับปรุงดินชนิดดังกล่าว

(4) สารที่ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติของดินแบบผสมผสาน

สารปรับปรุงดินหลายชนิดมีสมบัติแบบเอนกประสงค์สามารถนำมาใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของดินได้ทั้งด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ อาจนำมาใช้กับดินบางประเภทที่มีสมบัติไม่เหมาะสมหลายด้านพร้อมกัน ตัวอย่างสารปรับปรุงดินในรูปของสารอินทรีย์ เช่น ปุ๋ยอินทรีย์ สารอินทรีย์ในรูปผลพลอยได้ชนิดต่างๆ อาจช่วยเพิ่มระดับการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน (CEC) และปรับปรุงสภาพทางกายภาพของดินโดยการเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของดินด้วย นอกจากนั้น สารปรับปรุงดินบางชนิดมีการผลิตเพื่อใช้ประโยชน์ต่อการปรับปรุงดินในหลายๆ ด้านในการใส่ครั้งเดียว เช่น สารทีซี (TC) ที่มีคุณค่าทั้งในด้านการปรับปรุงสมบัติการอุ้มน้ำของดิน เพิ่มธาตุ

อาหารพืช มีสารเร่งการเติบโต (growth regulators) ของพืช และสารอินทรีย์บางชนิดสำหรับสนับสนุนกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินด้วย

ตารางที่ 2.3 ประเภทของสารปรับปรุงดินจำแนกตามเกณฑ์ต่างๆ (ปิยะ, 2556)

เกณฑ์ที่ใช้ในการจำแนกประเภท	ประเภทของสารปรับปรุงดิน	ตัวอย่างสารปรับปรุงดิน
1. องค์ประกอบของสาร	1. สารอนินทรีย์	สารปรับปรุงดินในรูปแร่ เช่น ซีโอไลต์ เวอร์มิคิวไลต์ วัสดุปูนไลม์ โดโลไมต์ ยิปซัม สเมกไทต์ และสารเคมี เช่น ไลม์ซัลเฟอร์ กำมะถันผง ฯลฯ
	2. สารอินทรีย์	ปุ๋ยอินทรีย์ชนิดต่างๆ สารอินทรีย์ที่เป็นผลพลอยได้หรือวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ สารอินทรีย์สังเคราะห์ เช่น แอมโมเนียมลอเร็ทซัลเฟต สารพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำได้ สารพอลิเมอร์ที่ดูดน้ำได้ในปริมาณมาก ฯลฯ
	3. สารอนินทรีย์ผสมสารอินทรีย์	สารปรับปรุงดินที่มีส่วนผสมของสารหลายชนิด
2. แหล่งที่มา	1. สารที่ได้จากธรรมชาติโดยตรง	เศษพืชที่เหลือตกค้างหลังการเก็บเกี่ยว พีต (peat) หินและแร่ที่ได้จากธรรมชาติ ปุ๋ยอินทรีย์บางชนิด เช่น ปุ๋ยคอก ฯลฯ
	2. ผลพลอยได้ วัสดุเหลือใช้ วัสดุเหลือทิ้ง ตะกอนน้ำเสีย	ผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น เปลือกมันสำปะหลัง ฟอสโฟยิปซัม เศษอิฐมวลเบา ตะกอนน้ำเสียหมัก ฯลฯ
	3. สารสกัดและสารสังเคราะห์	กรดฮิวมิก สารพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ แอมโมเนียมลอเร็ทซัลเฟต ฯลฯ
3. การใช้ประโยชน์	1. สารปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดินเป็นหลัก	สารปรับปรุงดินในรูปหิน แร่ แอนไอโอนิกพอลอครีลามีด สารพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ แอมโมเนียมลอเร็ทซัลเฟต ฟอสโฟยิปซัม ยิปซัม ฯลฯ
	2. สารปรับปรุงสมบัติทางเคมีของดินเป็นหลัก	วัสดุปูนไลม์ หินและแร่นอกเหนือจากวัสดุปูนไลม์ที่มีค่าการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (CEC) สูง เศษอิฐมวลเบา กรดฮิวมิก ฯลฯ
	3. สารปรับปรุงสัมบัติทางชีวภาพและความอุดมสมบูรณ์ของดินเป็นหลัก	ปุ๋ยอินทรีย์ชนิดต่างๆ กรดฮิวมิก ฯลฯ
	4. สารปรับปรุงสมบัติของดินแบบผสมผสานหรือแบบเอนกประสงค์	สารปรับปรุงดินชนิดต่างๆ ที่มีส่วนผสมของสารหลายชนิด

2.7 เวอร์มิคูไลท์ (Vermiculite)

2.7.1 แหล่งที่มาและคุณสมบัติ (ปิยะ, 2556)

เวอร์มิคูไลท์ (Vermiculite) เป็นแร่ประกอบหินที่มีผลึกขนาดใหญ่ ไม่ได้เกิดจากการแข็งตัวของแมกมา (Magma) แต่เกิดจากการแปรสภาพของแร่ไมกา (Mica) หรือแร่กลีบหิน เวอร์มิคูไลท์จึงมีสมบัติคล้ายแร่ไมกา แร่เวอร์มิคูไลท์ประกอบหินที่มีขนาดใหญ่ เป็นแร่ในรูปแร่บริสุทธิ์ ส่วนแร่เวอร์มิคูไลท์ในรูปแร่ดินเหนียวที่พบในดินมีผลึกขนาดเล็กที่ไม่บริสุทธิ์ เพราะมีสิ่งเจือปนต่างๆ มากมายหลายชนิด แร่เวอร์มิคูไลท์ที่พบในธรรมชาติ มี 2 ชนิด คือ ชนิดไตรออกตาฮีดรอล (Trioctahedral) และไดออกตาฮีดรอล (Dioctahedral) โดยชนิดไตรออกตาฮีดรอลที่มีขนาดผลึกใหญ่กว่าเกิดมาจากแปรสภาพของแร่ไมกาชนิดไตรออกตาฮีดรอลในรูปแร่ไบโอไทต์ (Biotite) ส่วนแร่เวอร์มิคูไลท์ชนิดไดออกตาฮีดรอล (Dioctahedral) เกิดจากการแปรสภาพของแร่ไมกาชนิดไดออกตาฮีดรอลในรูปแร่มัสโคไวต์ (Muscovite) สำหรับแร่เวอร์มิคูไลท์ในรูปแร่ดินเหนียวในดินจะไม่พบในรูปใดหนึ่งโดยเฉพาะ แต่จะพบเป็นส่วนผสมของแร่เวอร์มิคูไลท์ทั้ง 2 รูป และจะพบในดินในแถบกึ่งร้อนชื้นมากกว่าในแถบร้อนชื้น รูปแบบการเปลี่ยนสภาพอย่างง่ายของแร่ไมกาไปเป็นแร่เวอร์มิคูไลท์และแร่อื่นๆ ประเภท 2:1 ที่มีสมบัติในการขยายตัวได้ดี เช่น แร่สเมกไทต์ (Smectite) อาจเขียนเป็นสมการง่ายๆ ได้ดังนี้

ไมกา (Mica) + แคตไอออนในรูปไฮเดรต (Hydrated cation) ที่แลกเปลี่ยนได้ $\xrightarrow{-K}$ เวอร์มิคูไลท์ และ สเมกไทต์ (Vermiculite and Smectite)

ในการแปรสภาพของแร่ไมกาแบบอยู่กับที่จะมีการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมออกมาจากตำแหน่งชั้นภายใน (Interlayer) ในแร่ไมกาพร้อมๆ กับการถูกแทนที่โดยไอออนประจุบวกในรูปไฮเดรต (Hydrated cation) อื่นๆ มีผลทำให้แร่ไมกาเปลี่ยนสภาพไปเป็นแร่เวอร์มิคูไลท์ หรือแร่สเมกไทต์พร้อมๆ กัน ปะปนกัน หรืออาจเปลี่ยนแปลงกับไปกลับมาจากแร่ไมกาไปเป็นแร่เวอร์มิคูไลท์ และแร่สเมกไทต์ ดังสมการการแปรสภาพ ต่อไปนี้

ไมกา (Mica) $\rightleftharpoons$ เวอร์มิคูไลท์ (Vermiculite) $\rightleftharpoons$ สเมกไทต์ (Smectite)

เวอร์มิคูไลท์ที่เกิดจากแร่ไมกา (Mica minerals) มีองค์ประกอบสำคัญคือ ธาตุอะลูมินัม (Al) ซิลิคอน (Si) แมกนีเซียม (Mg) และเหล็ก (Fe) ในรูปไฮเดรตของอะลูมินัม-เหล็ก-แมกนีเซียม ซิลิเกต (Hydrated Al-Fe-Mg silicate) ยกตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบของแร่เวอร์มิคูไลท์ชนิดไตรออกตาฮีดรอล ซึ่งมีสูตรทั่วไปคือ $(MgFe)_3 (Al_x Si_{4-x})O_{10}(OH)_2 4H_2O.Mg_x$ (เมื่อ X=0.5-1.5)

แร่เวอร์มิคูไลท์ในรูปแร่ดินเหนียวเป็นแร่ที่มีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (ค่า CEC) สูงมากที่สุดชนิดหนึ่งในดินโดยทั่วไปจะมีค่า CEC ระหว่าง 144-207 มิลลิสมมูลต่อ 100 กรัม และมีค่าเฉลี่ย 159 มิลลิสมมูลต่อ 100 กรัม

แร่เวอร์มิคูไลท์ในรูปแร่ประกอบหินที่บริสุทธิ์ซึ่งขุดออกมาจากเหมือง ประกอบด้วยชิ้นสินแร่ในรูปอนุภาคแผ่นบางๆ ที่มีน้ำแทรกปะปนอยู่ในระหว่างแผ่นบางๆ ของอนุภาพ และเมื่อนำสินแร่ชนิดนี้ไปเผาที่ระดับอุณหภูมิประมาณ 1,090 องศาเซลเซียส น้ำที่ถูกประกบไว้ในระหว่างแผ่นอนุภาพจะร้อนจนกลายเป็นไอ แล้วเกิดแรงผลักดันให้แผ่นอนุภาพของแร่ที่ประกบกันและกักเก็บน้ำอยู่ถ่างออกหรือแยกตัวออกจากกัน หลังจากการสูญเสียน้ำในรูปไอน้ำและเนื้อแร่เย็นตัวลงแล้ว จะทำให้เกิดเม็ดคล้ายฟองน้ำเล็กๆ แร่จึงมีลักษณะโปร่งเป็นรูพรุน ดังนั้นเนื้อแร่ที่ผ่านการเผาและเย็นตัวแล้วจะมีปริมาตรเพิ่มขึ้นจากเดิมสูงถึงประมาณ 15-20 เท่าตัว แร่เวอร์มิคูไลท์ที่เผาแล้ว สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในทางการเกษตรได้อย่างกว้างขวาง

แร่เวอร์มิคูไลท์ที่นำมาผ่านขั้นตอนการเผาแล้วดังกล่าวข้างต้นมีคุณสมบัติโดยทั่วๆ ไปดังนี้คือ

1. มีสีน้ำตาลคล้ายสีทอง (Gold-brown) แห้งเกือบสนิท (ความชื้นไม่เกินร้อยละ 0.5) สะอาด ไม่มีกลิ่น คงทนต่อการแปรสภาพ และไม่เกิดการเน่าเสียหรือเกิดเชื่อรา

2. ไม่เป็นพิษเป็นภัย และปราศจากเชื้อโรคต่างๆ ทั้งนี้เพราะผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมาแล้ว

3. มีความหนาแน่นรวมต่ำ ทำให้มีน้ำหนักเบามาก กล่าวคือมีน้ำหนักเพียงระหว่าง 90-150 กิโลกรัมต่อคิวบิกเมตรเท่านั้น โดยน้ำหนักจะผันแปรขึ้นกับขนาดของเม็ดเวอร์มิคูไลท์ กล่าวคือ เม็ดยิ่งมีขนาดเล็กลงเท่าไหร่น้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรก็จะสูงขึ้นตามขนาดของเม็ดที่ละเอียดขึ้น

4. ไม่ละลายน้ำและมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูง เนื่องจากมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวรวมต่อปริมาตรสูง ทำให้สามารถอุ้มน้ำได้ประมาณ 40-50 ลิตร ต่อคิวบิกเมตร

5. มีปฏิกิริยาเป็นกลางถึงเป็นด่าง (pH 7.0-9.5) ขึ้นกับวิธีการเผาและปริมาณความชื้นในตัวแร่แต่ส่วนใหญ่จะมีปฏิกิริยาเป็นด่าง เพราะมีสารประกอบคาร์บอเนตปนอยู่ด้วย

6. ดังที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น แร่เวอร์มิคูไลท์ เป็นแร่ดินเหนียวชนิดหนึ่งที่มีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (ค่า CEC) สูงมากที่สุดชนิดหนึ่ง กล่าวคือ โดยเฉลี่ยมีค่า CEC ประมาณ 160 มิลลิสมมูลต่อดิน 100 กรัม ทั้งนี้ เนื่องจากโครงสร้างของแร่มีลักษณะเป็นแผ่น ทำให้สามารถดูดซัมธาตุอาหารพืชประจุบวกได้ในปริมาณมาก เช่น ธาตุประจุบวกในรูปไอออน เช่น NH^{+}_{4}, K^{+} Ca^{2+}, Mg^{2+}ฯลฯ ทำให้มีสมบัติเป็นสารบัฟเฟอร์ (Buffering material) ที่ดี อย่างไรก็ตาม แร่เวอร์มิคูไลท์ ในรูปแร่บริสุทธิ์ที่เผาแล้ว และมีการผลิตออกมาจำหน่าย โดยทั่วๆ ไปจะมี CEC ระหว่าง 100-150 มิลลิสมมูลต่อ 100 กรัม ซึ่งถือว่ามาก

7. แร่เวอร์มิคูไลท์โดยเฉลี่ย มีโพแทสเซียมในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้ระหว่างร้อยละ 5-8 และมีแมกนีเซียมร้อยละ 9-12 แร่เวอร์มิคูไลท์ดูดซับฟอสเฟต (Phosphate) แต่ไม่สามารถดูดซับไนเตรต (Nitrate) คลอไรด์ (Chloride) หรือ ซัลเฟต (Sulfate) ได้ นอกจากนั้นยังดูดตรึงแอมโมเนียม-ไนโตรเจน (NH_4^-N) ให้อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ไม่ได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง หลังจากนั้น แอมโมเนียม-ไนโตรเจนที่ถูกดูดตรึงไว้จึงค่อยๆ เปลี่ยนรูปโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน ไปเป็นไนเตรด-ไนโตรเจน (NO_3^-N) ที่พืชสามารถดูดใช้ประโยชน์ได้ดียิ่งขึ้น

2.7.2 ประโยชน์ต่อการเกษตร (ปิยะ, 2556)

จากคุณสมบัติต่างๆ ทั้ง 7 ประการดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทำให้สามารถนำแร่เวอร์มิคูไลท์ที่ผ่านกระบวนการเผาแล้วมาใช้ประโยชน์ในทางการเกษตรได้ในกิจกรรมต่างๆ โดยเฉพาะ การปรับปรุงสมบัติของดิน ดินผสม การเตรียมเครื่องปลูกไร้ดิน (Soilless media) หรือใช้โดยตรงโดยไม่ต้องผสมอะไรอีก สำหรับการผลิตพืชในโรงเรือนหรือนอกโรงเรือน โดยเฉพาะการใช้พืชสวนโดยทั่วไป

เวอร์มิคูไลท์ที่นิยมใช้แบ่งเกรดตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดได้ 4 เกรด ด้วยกันคือเกรด 1 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง5–8 มิลลิเมตร เกรด 2 มีขนาด 2–3 มิลลิเมตร เกรด 3 มีขนาด 1–2 มิลลิเมตรและเกรด 4 มีขนาด 0.75–1.0 มิลลิเมตร สำหรับเกรด 3 และ 4 ที่มีความละเอียดมากและมากที่สุดตามลำดับนั้น นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับการเพาะเมล็ดพืชมากที่สุด หรือใช้ในการคลุมผิวหน้าดิน หรือวัสดุปลูก (Surface mulching) เพื่อป้องกันหรือลดการระเหยของน้ำ ส่วนเกรดของเม็ดที่มีขนาดใหญ่กว่านี้ (เกรด 1 และเกรด 2) นิยมใช้ผสมดินหรือเครื่องปลูกเพื่อปรับสภาพการระบายอากาศ น้ำ และเพิ่มความจุในการกักเก็บน้ำมากกว่า เวอร์มิคูไลท์ทั้ง 4 เกรดมีสมบัติสำคัญที่แตกต่างกัน 2 ประการคือ สภาพการระบายอากาศและความสามารถในการอุ้มน้ำ เกรดที่มีขนาดเม็ดใหญ่จะมีสภาพการระบายอากาศได้ดีในขณะที่มีความสามารถในการอุ้มน้ำได้น้อยดังนั้นในการใช้ประโยชน์ ผู้ใช้จึงต้องพิจารณาโดยคำนึงถึงความสัมพันธ์ในทางกลับกันของสมบัติที่สำคัญทั้ง 2 ประการข้างต้นไว้ด้วย แล้วเลือกใช้เกรดที่เหมาะสมกับพืชที่จะปลูกให้มากที่สุด

2.7.3 วิธีการใช้ประโยชน์ (ปิยะ, 2556)

แร่เวอร์มิคูไลท์ที่ผ่านการเผาแล้วอาจนำมาใช้ประโยชน์ได้ดังนี้

(1) ใช้เป็นสารปรับปรุงดิน (Soil conditioners) สำหรับดินเหนียวที่มีลักษณะโครงสร้างแน่นทึบอุ้มน้ำได้มากและมีการระบายน้ำและอากาศไม่ดี แนะนำให้ใช้ แร่เวอร์มิคูไลท์ผสมดิน ในอัตราส่วนอย่างละครึ่งโดยปริมาตร การผสมในสัดส่วนนี้จะทำให้ดินผสมที่ได้มีการ ระบายอากาศและน้ำดีขึ้น ในทางกลับกัน สำหรับดินทรายจัดที่อุ้มน้ำได้ไม่ดี การใช้แร่ชนิดนี้จะทำให้ ดินที่ผสมได้ มีสมบัติอุ้มน้ำได้มากขึ้นจึงประหยัดเวลาและแรงงานในการให้น้ำแก่พืชในระยะยาว แต่ก็มีข้อควรระวังก็คือ การใช้แร่เวอร์มิคูไลท์ ผสมกับดินทรายเพื่อใช้ในการปลูกพืชติดต่อกันยาวนาน อาจทำให้ดินผสมเกิดการอัดตัวกันแน่นเมื่อแร่เวอร์มิคูไลท์แปรสภาพมากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งในที่สุด อาจมีผลทำให้ดินผสมมีความแน่นทึบมากขึ้นและมีสมบัติในการระบายน้ำและระบายอากาศเลวลงกว่าเดิมก็ได้

(2) การตัดชำ (Root cuttings) นอกจากจะใช้เป็นสารปรับปรุงดินแล้ว แร่เวอร์มิคูไลท์สามารถ ใช้ได้โดยตรงในการตัดชำกล้าไม้ได้ดี ขนาดเกรด (Grade size) มาตรฐานที่นิยมใช้ในเรือนเพาะชำคือ เกรด 2 ที่มีเสนผ่านศูนย์กลางของเม็ดระหว่าง 2-3 มิลลิเมตร สามารถนำมาใช้ได้โดยตรง โดยไม่ต้องผสมอะไรอีก ในการตัดชำน้นหลังจากใส่ตัวแร่ลงในภาชนะปลูกและรดน้ำให้เปียกอย่างทั่วถึงแล้ว จึงค่อยปักกิ่งชำ ถ้าภาชนะปลูกมีระบบการระบายน้ำดี การรดน้ำแม้จะให้น้ำมากไปก็ไม่มีปัญหาต่อการใช้เพื่อตัดชำแต่อย่างใด

(3) การเพาะเมล็ด (Seed germination) แร่เวอร์มิคูไลท์ที่ไม่ต้องผสมกับ วัสดุอื่นๆ สามารถนำมาใช้ในการเพาะเมล็ดพืชโดยตรง ซึ่งช่วยให้เมล็ดพืชงอกได้ดีและเร็ว นอกจากนั้นอาจใช้ผสมกับดินหรือกับพีต (Peat) ในอัตราส่วนครึ่งต่อครึ่งโดยปริมาตรเพื่อใช้เพาะเมล็ด ในกรณีนี้

ไม่จำเป็นต้องให้ปุ๋ยเคมีเพิ่มเติม แต่ถ้าใช้แร่เวอร์มิคูไลท์เพียงอย่างเดียวควรใช้ปุ๋ยน้ำในระยะที่เมล็ดเริ่มแตกใบจริงใบแรก โดยอาจใช้ปุ๋ยเคมีชนิดที่เหมาะสมในปริมาณ 1 ช้อนโต๊ะ หรือประมาณ 15 กรัม ผสมกับน้ำ 1 แกลลอน (3.785 ลิตร) แร่เวอร์มิคูไลท์ปกติจะสะอาดและปราศจากเชื้อโรค ทำให้ต้นกล้าอ่อนที่ได้จากการเพาะเมล็ดไม่เกิดปัญหาโรคเน่าคอดิน (Damping-off) นอกจากนั้นกล้าอ่อนที่ได้ยังสามารถถอนได้ง่ายโดยไม่เกิดความกระทบกระเทือนหรือความเสียหายต่อระบบรากมากนัก

(4) การปลูกพืชกระถางในบ้าน เวอร์มิคูไลท์เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการปลูกไม้ดอกกระถางในบริเวณบ้านหรือภายในบ้านหรืออาคาร การผสมเครื่องปลูกควรผสมวัสดุครึ่งต่อครึ่งโดยปริมาตรระหว่างเวอร์มิคูไลท์กับดิน เวอร์มิคูไลท์กับพีต (Peat) หรือเวอร์มิคูไลท์กับปุ๋ยหมัก ส่วนผสมที่ได้จะเป็นเครื่องปลูกที่มีการระบายอากาศดีและอุ้มน้ำได้ดี นอกจากนั้นยังมีน้ำหนักเบา สามารถใช้ปลูกพืชในกระถางที่มีขนาดใหญ่กว่าที่ต้องการจะปลูกเพื่อวางบนหิ้งหรือชั้นต่างๆ ภายในบ้านหรือแขวนจากเพดานบ้านได้ดี ดินที่ผสมเวอร์มิคูไลท์ช่วยให้การเติบโตทางระบบรากของไม้ดอกมีการพัฒนาได้ดี เร็วสม่ำเสมอ และยังมีสมบัติอุ้มน้ำได้ดีกว่าการปลูกในดินอย่างเดียว จึงไม่ต้องรดน้ำบ่อย

(5) การเก็บรักษาหัวพันธ์แร่เวอร์มิคูไลท์สามารถใช้ประโยชน์ในการเก็บรักษาหัวพันธุ์ เช่น หัวหอม ฯลฯ และหัวพืชหัว เช่น มันฝรั่ง ฯลฯ ได้ดี โดยทำให้สามารถเก็บรักษาได้ยาวนานกว่าปกติ วิธีการเก็บรักษาหัวพันธุ์และหัวพืชหัว อาจทำได้โดยการบรรจุพันธุ์หรือหัวของพืชหัวลงในภาชนะที่จะใช้เก็บรักษาแล้วคลุมผิวหน้าด้วยแร่เวอร์มิคูไลท์ แร่นี้จะทำหน้าที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงของระดับอุณหภูมิภายนอกที่อาจมีความปรวนแปรสูง และควบคุม ระดับความชื้นของแร่ที่ใช้คลุมไม่ให้มีความชื้นมากหรือน้อยเกินไป รวมทั้งระดับการระบายอากาศที่จะป้องกัน หัวพันธุ์พืชไม่ให้เกิดราแป้ง หรือเกิดการเน่าเสียได้ง่าย อย่างไรก็ตาม ในการเก็บรักษาหัวพันธุ์พืชโดยการใส่ แร่เวอร์มิคูไลท์ลงคลุมทางด้านบนของภาชนะบรรจุหัวพันธุ์นั้น ไม่ควรกออัดแร่ให้แน่นเกินไป หรือรดน้ำในระหว่างการเก็บรักษา

(6) การปลูกหญ้าสนาม การใช้เวอร์มิคูไลท์ในการเตรียมดินเพื่อปลูกหญ้าสนามจะมีผลทำให้เมล็ดหญ้าที่หว่าน งอกเร็วและแน่น ควรหว่านเวอร์มิคูไลท์ในอัตรา 4 ลิตรต่อตารางเมตร แล้วพรวนคลุกเคล้ากับดิน ต่อมาจึงหว่านเมล็ดหญ้าแล้วหว่านเวอร์มิคูไลท์คลุมผิวหน้า ให้มีความหนาประมาณครึ่งเซ็นติเมตร หลังจากนั้นให้น้ำด้วยระบบให้น้ำแบบฝอยละเอียด เวอร์มิคูไลท์ที่ใช้ผสมดินเพื่อปลูกหญ้าสนามจะช่วยปรับสมบัติทางกายภาพของดินโดยจะทำให้ดินอุ้มน้ำได้ดีและในขณะเดียวกันก็ทำให้ดินมีการระบายอากาศดีขึ้นด้วย

(7) การปลูกไม้ยืนต้น แร่เวอร์มิคูไลท์อาจใช้ประโยชน์ในการปลูกไม้ยืนต้นชนิดต่างๆ โดยการย้ายกล้าไม่ว่าจะเป็นไม้ผล ไม้ป่าหรือไม้เศรษฐกิจอื่นๆ การใช้ประโยชน์อาจปฏิบัติโดยการผสมเวอร์มิคูไลท์กับดินที่ขุดจากหลุมปลูกแล้วย้ายกล้าไม้ปลูกโดยใช้ดินผสมดังกล่าว ใส่รอบบริเวณตุ้มราก (Rootball) และคลุมปากหลุมแล้วรดน้ำหรือรอฝน การใช้เวอร์มิคูไลท์ปรับปรุงดินเนื้อละเอียดที่มีโครงสร้างแน่นทึบจะมีส่วนช่วยปรับปรุงการระบายอากาศของดินในบริเวณหลุมปลูกทำให้รากเจริญเติบโตและหยั่งรากลึกลงไปในดินล่างได้เร็ว กล้าไม้จะตั้งตัวได้เร็ว ทนแล้งได้ดีกว่าและมีจำนวนต้นรอดตายสูงขึ้น

2.7.4 ข้อควรระวังในการใช้พืชการปลูกพืช (ปิยะ, 2556)

1. แร่เวอร์มิคูไลท์ที่จะใช้ปลูกพืชโดยการบรรจุภาชนะหรือกระถาง ไม่ควรกดอัดให้เกิดการ แน่นตัวเวลาเปียก ทั้งนี้เพราะการอัดตัวกันแน่นจะทำลายโครงสร้างของช่องว่างของมวลแร่ ทำให้ระบายน้ำและอากาศได้น้อยลงจนเกิดปัญหากับพืชได้

2. ไม่ควรใช้แร่เวอร์มิคูไลท์ชนิดที่ใช้สำหรับงานก่อสร้าง (Construction grade) ทั้งนี้เพราะแร่เวอร์มิคูไลท์ชนิดนี้มีการปรุงแต่งเพิ่มเติมโดยการผสมสารเคมีบางชนิดที่เป็นพิษต่อพืช

3. ไม่ควรใช้แร่เวอร์มิคูไลท์ผสมทราย วัสดุผสมชนิดอื่นๆ ที่มีน้ำหนักมากกว่า หรือใช้ไวอร์มิคิวไลต์อย่างเดียวอย่างยาวนานตลอดเวลา ทั้งนี้เพราะเมื่อเนื้อแร่เกิดการแปรสภาพ จะเกิดการอัดตัวกันแน่นขึ้นเป็นลำดับ มีผลทำให้เนื้อแร่หรือส่วนผสมมีช่องว่างอากาศลดลง และมีการระบายน้ำเลวลงเช่นกัน ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงนิยมหรือแนะนำให้ใช้แร่เวอร์มิคูไลท์สำหรับ การขยายพันธุ์พืชมากกว่าการใช้เครื่องปลูกสำหรับพืชกระถาง อย่างไรก็ตาม ถ้าจำเป็นหรือถ้าต้องการ จะใช้เวอร์มิคูไลท์ในการปลูกพืชกระถางควรใช้เวอร์มิคูไลท์ผสมกับวัสดุอื่นๆ ด้วย โดยเฉพาะพีต (Peat) หรือแร่เพอไลต์ ทั้งนี้เพื่อให้แน่ใจได้ว่าเครื่องปลูกจะมีสภาพการระบายอากาศดีอย่างยาวนาน

2.8 ซีโอไลท์ (Zeolites)

2.8.1 แหล่งที่มาและองค์ประกอบทางเคมี (ปิยะ, 2556)

ซีโอไลท์เป็นแร่ซิลิเกตในรูปสารประกอบไฮดรัส อะลูมิโนลซิลิเกต (Hydrous aluminosilicate) ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน มีโพรงหรือช่องว่างขนาดตั้งแต่ 2–10 แองสตรอม (Angstrom) หรือระหว่าง 0.002–0.01 มิลลิเมตรติดต่อถึงกันภายในโครงผลึกโดยมีโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่เป็นจำนวนมากซึ่งเป็นคุณสมบัติพิเศษของซีโอไลท์

แร่ซีโอไลท์ นอกจากจะเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติแล้ว ยังอาจสังเคราะห์ขึ้นเองได้ด้วย เช่น โดย การใช้สารประกอบหลายชนิดผสมกัน เช่น โซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) และอะลูมินัมซัลเฟต (Aluminum sulfate) หรือโซเดียมอะลูมิเนต (Sodium aluminate) หรืออาจผลิตผลิตภัณฑ์ซีโอไลท์ในห้องปฏิบัติการโดยใช้หินภูเขาไฟเนื้อแก้ว หรือหินเพอไลต์ (Perlite) ที่มีองค์ประกอบของซิลิคอน (Si) และธาตุอะลูมินัม (Al) สูงใกล้เคียงกับหินแกรนิต (Granite) และหินไรออไลต์ (Rhyolite) เป็นวัสดุตั้งต้น ซึ่งในประเทศไทยพบที่จังหวัดลพบุรี โดยการนำมาบดและรีฟลักซ์ (Reflux) หรือการทำให้เกิดการกลั่นไหลกลับกับสารละลายที่มีภาวะเป็นเบส (เป็นด่าง) โดยให้ความร้อนในระยะเวลานานพอสมควร จะได้วัสดุที่มีความพรุนตัวสูง และมีสมบัติโดยทั่วๆไปเหมือนซีโอไลท์ที่เกิดตามธรรมชาติ

2.8.2 สมบัติและประโยชน์ (ปิยะ, 2556)

สมบัติทางกายภาพของแร่ซีโอไลท์ที่ได้จากแหล่งธรรมชาติ โดยทั่วๆไป มีสีขาว เหลือง ชมพูหรือแดง มีความแข็งโดยวัดจากความแข็งโมธ์สเกล (Mohs scale of hardness) ระหว่าง 3.5–5.0 ซึ่งมีความแข็งใกล้เคียงกับแร่ฟลูออไรต์ (Fluorite) และอะพาไทต์ (Apatite) ที่สามารถใช้มีดขูดเป็นรอยได้ ส่วนสมบัติทางเคมีที่สำคัญคือ มีความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation) สูงระหว่าง 100–300 มิลลิสมมูลต่อ 100 กรัม มีความจุในการดูดก๊าซแอมโมเนีย ประมาณ 7 มิลลิโมล

ต่อกรัม และมีฤทธิ์เป็นกรด ซีโอไลท์ไม่ว่าจะได้จากแหล่งแร่ในธรรมชาติหรือสังเคราะห์ขึ้นเองสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง ทั้งนี้เพราะตัวเนื้อแร่ที่ได้จากธรรมชาติหรือที่สังเคราะห์ขึ้นเองเป็นสารที่มีความพรุนตัวสูง มีความสามารถในการดูดซับธาตุประจุบวกได้ในปริมาณมากหรือมีค่าซีอีซี (CEC) สูงมาก เช่น ธาตุที่มีประจุบวกในรูปโซเดียม (Na^+) และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ธาตุอาหารพืชนิดต่างๆที่มีประจุบวก (Nutrient cations) เช่น แคลเซียม (Ca^{2+}) แมกนีเซียม (Mg^{2+}) แอมโมเนียม (NH^+_4) โพแทสเซียม (K^+) สังกะสี (Zn^{2+}) ฯลฯ รวมทั้งธาตุโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว (Pb^{2+}) แคดเมียม (Cd^{2+}) สทรอนเซียม (Sr^{2+}) ฯลฯ นอกจากนั้น ยังสามารถดูดซับโมเลกุลของน้ำและก๊าซต่างๆ เช่น ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) และก๊าซอื่นๆได้เป็นอย่างดี ทำให้มีคุณสมบัติในการช่วยบำบัดน้ำเสียหรือช่วยปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยการบำบัดธาตุโลหะหนักในน้ำเสีย เช่น แคดเมียม (Cd) ตะกั่ว (Pb) ฯลฯ แก้ไขความกระด้างของน้ำหรือทำน้ำอ่อน (Water softening) โดยการกำจัดเฉพาะไอออนบวกที่ก่อให้เกิดความกระด้างของน้ำ เช่น $Ca^{2+}Mg^{2+}Fe^{2+}$ ใช้ในอุตสาหกรรมเลี้ยงสัตว์น้ำโดยช่วยลดปริมาณก๊าซพิษต่างๆ (NH_3, NO_2ฯลฯ) ในน้ำ เช่น ในบ่อเลี้ยงกุ้ง ฯลฯ ใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมกระดาษ ใช้เป็นตัวกรองในอุตสาหกรรมน้ำตาล ยา และเคมีภัณฑ์ ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมัน ฯลฯ นอกจากนั้น ยังสามารถใช้ขจัดไอโซโทปกัมมันตรังสีจากกากนิวเคลียร์ได้อีกด้วย ในภาพรวมอย่างกว้างๆ สารซีโอไลท์มีคุณสมบัติหลักๆที่สำคัญรวม 3 ประการใหญ่ๆด้วยกันคือ

1. มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) โดยเฉพาะไอออนประจุบวกหรือแคตไอออน (Cations)

2. มีความสามารถในการดูดซับ (Adsorption) สารต่างๆโดยเฉพาะสารที่ไม่พึงประสงค์รวมทั้งการนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการทำให้แห้ง กระบวนการทำให้บริสุทธิ์และกระบวนการแยกสาร

3. มีคุณสมบัติในการเร่งปฏิกิริยา (Catalysis) ได้ดี เช่น ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเปลี่ยนแปลงเมธานอล (Methanol) เป็นสารไฮโดรคาร์บอน เช่น สารโอเลฟิน (Olefin) ฯลฯ และการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking) ฯลฯ เป็นต้น

2.8.3 ประโยชน์ต่อการเกษตร

สารซีโอไลท์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางทั้งในด้านการประมง การปศุสัตว์ การปรับปรุงดินเพื่อการผลิตพืช รวมทั้งการอนุรักษ์สภาพแวดล้อม ประโยชน์ในทางการเกษตรของสารซีโอไลท์อาจจำแนกเป็นหัวข้อใหญ่ๆได้ดังนี้ (ปิยะ, 2556)

1. ใช้บำบัดน้ำเสีย โดยการใช้สารซีโอไลท์ดูดซับแอลกอฮอล์ ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2)ในบ่อปลาหรือบ่อเลี้ยงกุ้ง

2. ใช้ผสมปุ๋ยเคมีเพื่อใส่ลงดิน โดยที่เนื้อสารซีโอไลท์จะทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับธาตุอาหารในรูปประจุบวกที่มีในปุ๋ยเคมี โดยเฉพาะไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียม-ไนโตรเจน (NH_4-N) ทำให้เกิดการสูญเสียธาตุอาหารพืชที่มีในปุ๋ยเคมีน้อยลงและเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยเคมีให้สูงขึ้น หรืออีกนัยหนึ่ง เป็นการช่วยเพิ่มปริมาณการดูดใช้ธาตุอาหารของพืชจากปุ๋ยเคมีที่ใส่ โดยลดการสูญเสียปุ๋ยจากกระบวนการต่างๆในดิน เช่น การสูญเสียโดยการชะละลาย (Leaching) เนื้อปุ๋ยใน

ชั้นดินบนโดยน้ำ การสูญเสียไนโตรเจนในรูปก๊าซ เช่น โดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ของไนโตรเจนในดินในรูปไนเตรต-ไนโตรเจน (NO_3-N) เป็นต้น

3. ใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องปลูกที่ไม่มีดินโดยนำแร่ซีโอไลท์มาใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องปลูกที่ไม่มีดินได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในกรณีที่ใช้ส่วนผสมอื่นๆที่มีความสามารถในการดูดยึดธาตุอาหารพืชได้น้อยหรือส่วนผสมต่างๆดังกล่าวมีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนต่ำ มีคุณสมบัติดูดน้ำได้น้อย ทั้งนี้เพราะซีโอไลท์มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูง โดยมีค่าสูงกว่าดินทรายถึงประมาณ 100 เท่าตัว และสูงกว่าดินเหนียวโดยทั่วไปถึงประมาณ 10–20 เท่าตัว ทำให้สามารถดูดธาตุอาหารพืชในรูปไอออนประจุบวก เช่น แอมโมเนียม (NH_4^+) แทสเซียม (K^+) แคลเซียม (Ca^{2+}) ฯลฯ ได้ดี ไม่ว่าธาตุอาหารพืชเหล่านี้จะมีอยู่แล้วในวัสดุที่จะใช้เป็นส่วนผสมของเครื่องปลูกหรือจากปุ๋ยเคมีที่จะผสมเสริมเข้าไป เมื่อนำเครื่องปลูกที่ผสมได้ไปใช้ประโยชน์เพื่อการปลูกพืช พืชสามารถใช้ประโยชน์จากธาตุอาหารต่างๆเหล่านี้ได้ดีขึ้น นานขึ้น และมีการสูญเสียธาตุอาหารจากปุ๋ยเคมีที่ผสมไว้แล้วหรือที่จะแยกใส่ในภายหลังน้อยลง โดยเฉพาะการสูญเสียโดยการชะละลายโดยน้ำ

4. ใช้เป็นสารปรับปรุงดิน สารซีโอไลท์สามารถใช้ปรับปรุงดินที่มีสมบัติไม่เหมาะสมต่อการผลิตไม่อย่างใดก็อย่างหนึ่งหรือหลายๆอย่างพร้อมๆกันได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ดินที่มีเนื้อหยาบ เช่น ดินทรายร่วน ดินร่วนทราย ฯลฯ เพราะจะเพิ่มความสามารถในการกักเก็บธาตุอาหารประจุบวกของดินทรายที่มีความสามารถดูดยึดต่ำ ซึ่งจะมีผลให้เกิดการสูญเสียธาตุอาหารพืชที่พืชไม่มีโอกาสได้ดูดใช้น้อยลง หรือเท่ากับเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ปุ๋ยเคมีของพืชถ้าจะมีการใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับซีโอไลท์ในอัตราและสัดส่วนที่เหมาะสม ดังนั้น ในการใช้ซีโอไลท์เพื่อปรับปรุงดินนั้น จึงมีบทบาทและเป้าหมายในการปรับปรุงสมบัติของดินทั้งทางด้านเคมีและด้านความอุดมสมบูรณ์ของดินหรือความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชในดินเป็นสำคัญ

2.9 ข้าวโพด (*Zea mays* L.)

ข้าวโพด (ภาพที่ 2.8) เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวมีการจัดลำดับอนุวิธานดังนี้

Kingdom : Plantae
Division : Magnoliophyta
Class : Liliopsida
Order : Cyperales
Family : Poaceae
Genus : Zea
Species : *Zea mays*

ภาพที่ 2.8 ลักษณะทั่วไปของข้าวโพด (*Zea mays*) ที่ปลูกในพื้นที่เกษตรกรรมซึ่งพบได้ทั่วไปในประเทศไทย

จากลักษณะภายนอกของเมล็ดและพฤกษศาสตร์ของข้าวโพด จำแนกประเภทได้ (กุลชา, 2550) ดังนี้

1. ข้าวโพดไร่ชนิดหัวบุบ (Dent corn) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays indentata* เป็นข้าวโพดที่เมล็ดตอนบนมีรอยบุบสีขาว เนื่องจากตอนบนเป็นแป้งชนิดอ่อน (Soft starch) และด้านข้างเมล็ดเป็นแป้งชนิดแข็ง (Corneous starch) เมื่อตากให้แห้งส่วนที่เป็นแป้งอ่อนจึงหดยุบตัวและเกิดลักษณะหัวบุบดังกล่าว มีลำต้นสูงตั้งแต่ 2.5–4.5 เมตร ฝักยาวตั้งแต่ 15–30 เซนติเมตร และมีเมล็ดระหว่าง 8–24 แถว

2. ข้าวโพดไร่ชนิดหัวแข็ง (Flint corn) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays indurate* เป็นข้าวโพดที่มีลักษณะเมล็ดค่อนข้างแข็งแรง กลม เรียบ หัวไม่บุบ เพราะมีแป้งชนิดอ่อนอยู่ตรงกลางแต่ด้านนอกถูกห่อด้วยแป้งชนิดแข็ง เมื่อตากให้แห้งจึงไม่หดตัว มีขนาดฝักและจำนวนแถวน้อยกว่าชนิดหัวบุบ

3. ข้าวโพดหวาน (Sweet corn) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays saccharata* เป็นข้าวโพดปลูกรับประทานฝักสดโดยเฉพาะ เมล็ดเมื่ออ่อนจะมีลักษณะใสโปร่งแสงและมีรสหวาน เนื่องจากมีน้ำตาลมาก เมื่อเมล็ดแก่จะหัวตัวและเหี่ยวย่น

4. ข้าวโพดคั่ว (Pop corn) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays everta* เมล็ดมีขนาดค่อนข้างเล็ม มีแป้งประเภทแข็งอยู่ภายใน ภายนอกถูกห่อหุ้มด้วยสารที่ค่อนข้างเหนียวและยืดตัวได้ ฉะนั้น เมื่อเมล็ดที่มีความชื้นอยู่ภายในพอสมควร ถูกความร้อน จะเกิดแรงดันภายในเมล็ดและเมื่อถึง

สุดก็จะระเบิดตัวออกมา โดยทั่วๆ ไป อาจแบ่งได้ตามรูปร่างเมล็ดอีก 2 พวก คือ พวกหับแหลม Rice pop con และพวกเมล็ดกลม Pearl pop เมล็ดมีสีต่างๆ กัน เช่น เหลือง ขาว ส้ม ม่วง เป็นต้น

5. ขาวโพดข้าวเหนียว (Waxy corn) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays certain* มีลักษณะเมล็ดเหนียวคล้ายขี้ผึ้ง ซึ่งเป็นแป้งที่มีลักษณะคล้ายแป้งมันสำปะหลัง ปลูกกันเล็กน้อยในสหรัฐอเมริกา เพื่อใช้ทำแป้งที่มีคุณภาพคลายแป้งมัน กล่าวกันว่าข้าวโพดพันธุ์นี้พบครั้งแรกในประเทศจีน

6. ข้าวโพดแป้ง (Flour corn) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays amylacea* เมล็ดประกอบด้วยแป้งชนิดอ่อนมาก มีรูปร่างและลักษณะเมล็ดคล้ายขาวโพดไร่ชนิดหัวแข็งมากแต่หัวไม่บุบ หรือบุบเล็กน้อยโดยสม่ำเสมอทั่วเมล็ด มีเมล็ดประมาณ 8–12 แถว ปลูกมากในบางท้องที่ของอเมริกาใต้ อเมริกากลาง และสหรัฐฯ ทางภาคตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งค่อนข้างแห้งแล้ง ชาวอินเดียวแดงใช้เป็นอาหาร ทั้งฝักสดและฝักแก่

7. ข้าวโพดป่า (Pod corn) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า Zea mays *tunicate* เป็นขาวโพดที่มีลักษณะแปลก ใกล้เคียงกับพืชป่า เมล็ดมีเปลือกหุ้มทุกเมล็ด และยังมีเปลือกฝักอีกชั้นหนึ่ง ส่วนเมล็ดมีลักษณะต่างๆ กัน คือ มีทั้งพวกหัวบุบ หัวแข็ง ข้าวโพดแป้ง ข้าวโพดหวาน ข้าวโพดคั่ว

2.9.1 การแปรรูปและการใช้ประโยชน์ (กุลชา, 2550)

ข้าวโพดเป็นธัญพืชที่นำมาใช้ประโยชน์หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นอาหารมนุษย์หรืออาหารสัตว์ ได้แก่ สัตว์ปีกและปศุสัตว์ เนื่องจากเมล็ดข้าวโพดมีองค์ประกอบที่สำคัญหลายชนิด ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน วิตามิน นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมด้วย ส่วนสำคัญของเมล็ดข้าวโพดคือ ต้นอ่อน (Germ) แป้ง และเปลือก (Hull) ซึ่งในส่วนของต้นอ่อนนำมาสกัดน้ำมัน แป้งนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์แป้ง เอทานอล น้ำตาลฟรุกโตส หรือใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ในส่วนของลำต้นก็สามารถนำมาทำอาหารหยาบสำหรับสัตว์ได้

1. เป็นอาหารมนุษย์

ข้าวโพดสามารถใช้เป็นอาหารมนุษย์ เนื่องจากเมล็ดประกอบด้วยแป้ง โปรตีน น้ำมันเยื้อใย และน้ำตาล สามารถนำเอาเมล็ดข้าวโพดมาบดละเอียดทำเป็นอาหารได้โดยตรง เช่น ทำเป็นขนมปัง หรือ ทรอริลล่า นอกจากนี้แป้งข้าวโพดยังเป็นส่วนประกอบในอาหารสำเร็จรูปหลายประเภท เช่น เนยถั่ว ไส้กรอก และอาหารเด็กอ่อน

2. เป็นอาหารสัตว์

เมล็ดสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ได้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาหารสัตว์ปีก เพราะมีสารคาโรตีนนอยด์มากกว่าอาหารสัตว์ชนิดอื่น ที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ดีขึ้น เช่น ช่วยให้ไข่แดงมีสีเข้มเป็นที่ต้องการของตลาดในการนำไปทำขนม ทำให้ผิวหนังของไก่มีสีเหลืองน่ารับประทาน จึงใช้เป็นวัตถุดิบในอาหารสัตว์ โดยมีสัดส่วนตั้งแต่ร้อยละ 20-60 ของสูตรอาหารแตกต่างกันไปตามประเภทของสัตว์เลี้ยงหญ้าหมัก ในส่วนของลำต้นก็ยังสามารถนำมาทำเป็นอาหารสัตว์ สำหรับวัวนมได้ หญ้าหมักที่ทำจากต้นข้าวโพดเป็นแหล่งพลังงานสูงและเมื่อเทียบกับหญ้าชนิดอื่นแล้วยังทำให้น้ำหนักแห้งมากกว่าด้วย อย่างไรก็ตามคุณค่าทางโภชนาการของหญ้าหมักจากข้าวโพดอาจแตกต่างกันได้เนื่องจากตามระยะการเจริญเติบโต แต่เดิมการทำหญ้าหมักนั้นใช้ข้าวโพด

พันธุ์ใดก็ได้ที่เก็บเกี่ยวในระยะที่เหมาะสม ซึ่งมักจะให้สัดส่วนของแป้งสูง แต่อาจไม่เหมาะสมในส่วนของเยื่อใยและแป้งที่ย่อยได้ (Starch digestibility) ในระยะหลังจึงได้มีการใช้ข้าวโพดพันธุ์ที่ปลูกสำหรับทำหญ้าหมักโดยเฉพาะ เพื่อเพิ่มในส่วนของเยื่อใยและแป้งที่ย่อยได้ในต่างประเทศมีการปรับปรุงพันธุ์ข้าวโพดเพื่อทำหญ้าหมัก นอกจากนี้ยังมีการศึกษาระยะเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมต่อคุณภาพหญ้าหมักด้วย

3. ใช้ในอุตสาหกรรมแป้ง

การแยกแป้งออกจากเมล็ดในอุตสาหกรรมทำได้ 2 วิธี ได้แก่ วิธีบดแห้ง (Dry milling process) และวิธีบดเปียก (Wet miling process)

(1) วิธีบดแห้ง เป็นวิธีที่บดข้าวโพดโดยไม่ต้องนำเมล็ดไปแช่น้ำก่อน แบ่งเป็น 2 วิธีย่อย คือ การบดโดยไม่แยกเอา Germ ออก และการบดโดยแยกเอา Germ ออก และการบดโดยแยก Germ ออกจะให้ Grit, Meal และ Flour รวมทั้งไขมันและกากที่ใช้เป็นอาหารสัตว์

(2) วิธีบดเปียก เป็นวิธีบดโดยนำเมล็ดไปแช่น้ำ (Soaking) มักเป็นสารละลายกรดกำมะถันเจือจางให้เมล็ดอ่อน แล้วจึงแยก Germ ออก การผลิตแป้งข้าวโพดโดยวิธีบดเปียกนอกจากจะได้แป้งข้าวโพดแล้ว ยังได้ส่วนเหลืออื่นอีก คือ Gluten meal มีโปรตีนรวมอยู่ด้วย การบดเปียกจะทำให้ได้สารประกอบที่ใช้ในอุตสาหกรรมหลายรูปแบบ ได้แก่ Corn gluten feed และ Gluten meal ใช้ประโยชน์ในการทำอาหารสัตว์ แป้งข้าวโพด น้ำตาลข้าวโพด Steep water ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยา น้ำมันข้าวโพด Soap starch เป็นผลพลอยได้จากการกลั่นใสของน้ำมันใช้ประโยชน์อุตสาหกรรมทำสบู่ Cake เป็นกากที่เหลือจากการสกัดน้ำมันใช้ทำอาหารเลี้ยงสัตว์ Corn meal flour และ Grit ใช้ทำกาว ดินระเบิดแป้งลงผ้า และสบู่ Corn syrup ใช้ทำยาขัดรองเท้า เรยอง และส่วนผสมในยาสูบ ใช้ทำแอลกอฮอล์ เครื่องดื่ม และส่วนผสมของอาหาร

4. ใช้ผลิตเชื้อเพลิง

แหล่งเชื้อเพลิงที่สำคัญในอดีตจนถึงปัจจุบันคือปิโตรเลียม ซึ่งนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในยานพาหนะ แต่ในระยะ 20 ปีที่ผ่านมามีแหล่งเชื้อเพลิงใหม่ที่มนุษย์เริ่มนำมาใช้คือเอทานอล โดยนำมาใช้เป็นส่วนผสมของน้ำมันเชื้อเพลิงในอัตราต่ำร้อยละ 5-10 หรือ ในอัตราสูงร้อยละ 85 (อาจมีใช้ในบางประเทศ) เอทานอลทำให้เครื่องยนต์เผาไหม้ได้ดี มีคาร์บอนมอนนอกไซด์น้อย ประสิทธิภาพเครื่องยนต์ดีขึ้น ใช้แทนเบนซินซึ่งเป็นส่วนประกอบของน้ำมันเชื้อเพลิงที่อันตราย ข้าวโพดสามารถนำมาทำเอทานอลได้โดยบดเมล็ดให้ละเอียดเป็นแป้ง เติมเอนไซม์เพื่อเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาล แล้วหมักน้ำตาลที่ได้ด้วยยีสต์เพื่อเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอลและคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากการนำไปผลิตเป็นเอทานอลแล้วยังใช้น้ำมันขาวโพดผสมโดยตรงกับน้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อใช้กับเครื่องยนต์ เนื่องจากคุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิและความหนืดดี ลดการสึกหรอและยืดอายุของเครื่องยนต์ ลดมลภาวะและสลายได้ในธรรมชาติ

5. ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันข้าวโพด

ในอุตสาหกรรมทำแป้ง ซึ่งมีการบดเปียกและบดแห้ง เมื่อแยกเอา Germ ออกจะได้ส่วนประกอบของน้ำมันใน Germ ประมาณร้อยละ 85 วิธีการคือ นำ germ ไปเข้าเครื่องสกัดน้ำมัน ซึ่งอาจทำได้โดยใช้เครื่องบีบ (Screw press) หรือใช้สารเคมีสกัดน้ำมันที่ได้จากการสกัดจะมีสารพวกฟอสฟอรัสหรือที่เรียกว่า Phosphatides และกรดอิสระอยู่ที่จะต้องนำไปสกัดเอาสารเหล่านี้ออกก่อน

วิธีการเรียกว่า Degumming น้ำมันที่ได้จากกระบวนการ Degumming จะเป็นน้ำมันดิบที่มีความเป็นกรดซึ่งต้องทำให้เป็นกลางด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้วเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันดิบให้สูงขึ้น จะทำให้น้ำมันแยกตัวจากกรดไขมัน ซึ่งกรดไขมันนี้สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมทำสบู่ ส่วนน้ำมันที่แยกออกมาเมื่อล้างด่างด้วยน้ำร้อนและกำจัดสีและกลิ่นอันเกิดจากธาตุต่างๆ จะทำให้ได้น้ำมันข้าวโพดบริสุทธิ์

6. ใช้ประโยชน์จากซังข้าวโพด

ซังข้าวโพด สามารถใช้ประโยชน์ทำเป็นก้อนเชื้อเพลิงสำหรับหุงต้มอาหารหรือบดเป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์ หรือใช้ในการเพาะเห็ด สำหรับในส่วนซังที่เป็น Wood ring ซึ่งเป็นชั้นที่มีสีขาวละเอียด มีความยืดหยุ่นมากใช้ประโยชน์ในงานที่ค่อนข้างละเอียดได้แก่ ทำฉนวนไฟฟ้า ตลับลูกปืนในเครื่องยนต์ ส่วนผสมของจาระบี สารฆ่าแมลงชนิดผง ส่วนชั้นที่อยู่ในสุดของซัง หรือ Pith ไม่มีความสำคัญในเชิงอุตสาหกรรมแต่อาจใช้เพื่อทำความสะอาดขนสัตว์ เช่น ขนมิงค์ ใช้ทำสบู่ผงเครื่องสำอาง ส่วนผสมของไวตามิน เป็นต้น นอกจากนี้มีการนำซังข้าวโพดมาผลิตก๊าซชีวมวลและความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถนำมาลดความชื้นเมล็ดพืชซึ่งโดยทั่วไปใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้และนำพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ไปอบ แต่เนื่องจากปัจจุบันราคาน้ำมันสูงขึ้นจึงต้องหาพลังงานทดแทน ซังข้าวโพดเป็นชีวมวลราคาถูกและมักเป็นปัญหาในการกำจัดทิ้ง การนำซังมาใช้ยังเป็นการลดการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศอีกด้วย กระบวนการผลิตก๊าซชีวมวลได้จากชีวมวลถกสันดาปอย่างสมบูรณ์และบางส่วนถูกสันดาปไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะทำให้ได้ก๊าซที่ติดไฟได้โดยมีการใช้ก๊าซออกซิเจนอย่างจำกัด ก๊าซที่เกิดขึ้นเป็นคาร์บอนมอนนอกไซด์ ไฮโดรเจนและมีเทน ที่ใช้ในการเผาไหม้ได้ และอาจมีไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ปนอยู่บ้างเล็กน้อย สามารถนำเอาความร้อนชีวมวลจากซังมาอบเมล็ดข้าวโพดให้แห้งได้

7. ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ

อุตสาหกรรมสิ่งทอในสหรัฐอเมริกาสามารถนำเอาข้าวโพดมาผลิตเป็นเส้นใยสังเคราะห์เพื่อทอเป็นผ้าที่มีความยืดหยุ่น คุณสมบัติคล้ายโพลีเอสเตอร์แต่ย่อยสลายได้ในธรรมชาติและติดไฟยาก เนื่องจากปัจจุบันราคาน้ำมันมักไม่คงที่กลับมีแนวโน้มราคาสูงขึ้นภายใน 10 ปี แต่ราคาข้าวโพดค่อนข้างคงที่ ดังนั้นการนำเอาข้าวโพดมาทำผลิตภัณฑ์สิ่งทอ จึงมีความเป็นไปได้ นอกจากทอเป็นผ้าแล้วยังสามารถทอเป็นพรมหรือวัสดุประเภทพลาสติกได้ด้วยวิธีการทำเส้นใยสังเคราะห์จากข้าวโพด ทำได้โดยสกัดน้ำตาลจากข้าวโพดแล้วหมักให้เกิดกรดแลคติก แล้วทำให้เป็นเส้นโดยผ่านวิธีการเดียวกับการทำเส้นใยโพลีเอสเตอร์ แล้วบิดให้เป็นเส้นเหนียวหลังจากนั้น จึงนำไปถักหรือทอตามความต้องการ

8. ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม

ปัจจุบันเครื่องดื่มสำเร็จรูปเป็นที่นิยมในการบริโภคในชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องดื่มผงที่สามารถเตรียมได้ภายในระยะเวลาอันสั้น เหมาะสำหรับผู้ที่ไม่มีเวลาในการเตรียมอาหาร ข้าวโพดสามารถนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์อาหารสำเร็จรูปที่สามารถละลายน้ำได้ดี วัตถุดิบที่ใช้คือ ข้าวโพดบด หยาบ (Corn grit) โปรตีนสกัดจากถั่วเหลืองและแป้งถั่วเหลืองเต็มไขมัน นำมาผ่านขั้นตอนในการทำให้ร้อนและสุกแล้วลดความชื้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้นำมาปรุงแต่งกลิ่น รส และเสริมคุณค่าทางอาหารด้วยการผสมกับวัตถุดิบอื่นใช้ชงกับน้ำร้อนแล้วบริโภคทันที

2.10 ทานตะวัน (*Helianthus annuus*)

ทานตะวัน (ภาพที่ 2.9) เป็นพืชใบเลี้ยงคู่ที่มีการจัดลำดับอนุวิธานดังนี้

Kingdom : Plantae
Division :Tracheophyta
Class :Magnoliopsida
Order :Asterales
Family :Asteraceae
Genus :Helianthus
Species :*Helianthus annuus*

ภาพที่ 2.9 ลักษณะทั่วไปของทานตะวัน (*Helianthus annuus*) ที่พบในพื้นที่เกษตรกรรมของประเทศไทย

ทานตะวันเป็นพืชวงศ์เดียวกับเบญจมาศคำฝอยดาวเรืองเป็นพืชล้มลุกไม่ไวแสงสามารถออกดอกติดเมล็ดได้ในทุกสภาพช่วงแสงระบบรากแก้วหยั่งลึกประมาณ 150–270 เซนติเมตรรากแขนงค่อนข้างแข็งแรงแผ่ขยายไปด้านข้างสามารถใช้ความชื้นระดับผิวดินได้อย่างมีประสิทธิภาพลำต้นใหญ่ไม่มีแขนงความสูงของลำต้นอยู่ระหว่าง 50–200เซนติเมตรใบเป็นใบเดี่ยวเกิดแบบตรงข้ามใน 5 คู่แรกส่วนใบที่เกิดหลังจากนั้นจะมีการเรียงตัวรอบลำต้นแบบเวียนรอบต้น (Spiral) จำนวนใบต่อต้นมีตั้งแต่ 8–70 ใบรูปร่างใบแตกต่างกันตามพันธุ์ดอกออกเป็นช่อรูปจานเกิดจากตาดอกของลำต้นหรือแขนงลำต้นเส้นผ่าศูนย์กลางดอกอยู่ระหว่าง 6–37 เซนติเมตรขึ้นกับพันธุ์ประกอบด้วยดอกย่อย

700–3,000 ดอกที่อยู่รอบนอกจะเป็นหมันส่วนดอกที่อยู่ด้านในจะเป็นดอกสมบูรณ์เพศเป็นพืชผสมข้ามมีการผสมตัวเองน้อยมากเมล็ดและผลเป็นแบบเอคิน (Achene)

ทานตะวันเป็นพืชน้ำมันที่มีความสำคัญเป็นอันดับ 3 ของโลกรองจากถั่วเหลืองและปาล์มน้ำมัน โดยที่มีน้ำมันในเมล็ดสูงถึงประมาณ 40 เปอร์เซนต์ และมีโปรตีนสูงประมาณ 24 เปอร์เซ็นต์ น้ำมันทานตะวันเป็นน้ำมันที่มีคุณภาพสูง เหมาะสำหรับใช้ในการบริโภค มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรด Linoleic และ Oleic นอกจากนั้นยังมีวิตามิน เอ ดี อี และเค การที่มีโปรตีนสูงทำให้สามารถใช้กากเป็นอาหารสัตว์ได้ดี (ไพศาล, 2542)

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.11.1 งานวิจัยด้าน phytoremediation ในประเทศไทย

ประเทศไทยพบปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักในหลายพื้นที่โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณรอบเหมืองแร่ จึงมีการศึกษาเพื่อค้นหาแนวทางในการใช้พืชบำบัดสิ่งแวดล้อมที่ปนเปื้อนโลหะหนัก อย่างไรก็ตามรายงานการศึกษาส่วนใหญ่เน้นการค้นหาพืชดูดซับโลหะหนักปริมาณสูง การพัฒนาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของพืช เพื่อนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยวิธีไฟโตเอ็กแทรกชัน (Phytoextraction) หรือการใช้พืชดูดซับโลหะหนักจากสิ่งแวดล้อมปนเปื้อน

Visoottiviseth และคณะ (2002) สำรวจการปนเปื้อนสารหนู (Arsenic) ในสองพื้นที่คืออำเภอร่อนภิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราชและอำเภอบันนังสตาร์ จังหวัดยะลา และเก็บตัวอย่างดินและพืชจากพื้นที่ปนเปื้อนมาวิเคราะห์ปริมาณสารหนู เพื่อประเมินศักยภาพของพืชที่สามารถนำไปใช้ในการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนสารหนู ผลการศึกษาพบว่าดินในอำเภอร่อนพิบูลย์มีสารหนูปนเปื้อน 21–14,000ไมโครกรัมต่อกรัม ในขณะที่ดินจากอำเภอบันนังสตาร์มีสารหนูปนเปื้อน540–16,000 ไมโครกรัมต่อกรัมและพบว่าพืชที่เจริญเติบโตบนดินปนเปื้อนสารหนูจำนวน 36 สายพันธุ์มีการสะสมสารหนูและพบเฟิร์น 2 สายพันธุ์ คือเฟิร์นท้องเงิน และเฟิร์นกูดหมาก (*Pityrogramma calomelanos* and *Pteris vittata*) และต้นไมยราบ (*Mimosa pudica*) มีคุณสมบัติเหมาะสมในการนำไปใช้บำบัดพื้นที่ปนเปื้อนได้ โดยเกณฑ์สำหรับเลือกพืชเหมาะสมสำหรับ Phytoremediation คือ ทนต่อโลหะได้ในปริมาณสูง, สะสมโลหะได้ในปริมาณสูง, วงชีวิตสั้น, เพาะพันธุ์ได้อย่างรวดเร็ว, พบได้ทั่วไปและต้องมีมวลชีวภาพสูง

Chantachon และคณะ (2004) ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วของหญ้าแฝก 2 สายพันธุ์ (*Vetiveria zizaniodes* และ *V. nemoralis*) ภายในห้องปฏิบัติการ พบว่าหญ้าแฝกสายพันธุ์*V. Zizanioides* สามารถทนต่อตะกั่วในปริมาณสูงและสะสมตะกั่วได้มากกว่าอีกสายพันธุ์และการทดลองปลูกหญ้าแฝกในสภาพแวดล้อมจริงนอกห้องปฏิบัติการก็ยังยืนยันว่าหญ้าแฝกสายพันธุ์ *V. zizanioides* สามารถทนต่อตะกั่วและสะสมตะกั่วได้มากกว่าอีกสายพันธุ์ โดยหญ้าแฝกจะสะสมตะกั่วในส่วนรากมากกว่าส่วนลำต้น คณะผู้วิจัยสรุปว่าการดูดซับตะกั่วของหญ้าแฝกมีความสัมพันธ์กับสายพันธุ์ของหญ้าแฝกที่นำมาใช้

Rotkittikhun และคณะ (2006) ศึกษาการสะสมตะกั่วของพืชในบริเวณเหมืองบ่องาม อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี โดยเก็บตัวอย่างดินและพืชจากบริเวณต่างๆ เพื่อนำมา

วิเคราะห์ปริมาณตะกั่ว ผลการศึกษาพบว่าดินจากเหมืองบ่องามมีตะกั่วปนเปื้อน 325-142,400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยดินจากโรงแต่งแร่ตะกั่วปนเปื้อนสูงที่สุด ตัวอย่างพืชจำนวน48 สายพันธุ์ถูกเก็บรวบรวมจาก 5 พื้นที่แตกต่างกันตามกิจกรรมของเหมือง พบว่าพืชจำนวน 26 สายพันธุ์สามารถสะสมตะกั่วในส่วนของลำต้นได้สูงกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีพืช3 สายพันธุ์ ได้แก่ *Microstegium ciliatum*, *Polygala umbonata* และ *Spermacoce mauritiana* สามารถสะสมตะกั่วในส่วนลำต้นและส่วนรากปริมาณสูงถึง 12,200–28,370 และ 14,580–128,830 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

Rotkittikhun และคณะ (2007) ศึกษาผลของสารปรับปรุงดินต่อการเจริญเติบโต ความทนทานและการดูดซับตะกั่วของพืชตระกูลหญ้า 2 ชนิดคือตองกง (*Thysanolaena maxima*) และหญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides*) 4 สายพันธุ์ ที่ปลูกบนดินปนเปื้อนตะกั่ว ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าตองกงและหญ้าแฝกสายพันธุ์สุราษฎร์ธานีและสงขลาสามารถทนทานและสามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีตะกั่วปนเปื้อนปริมาณสูง การผสมขี้หมูส่งผลให้ค่า EC และปริมาณตะกั่วที่ละลายได้ในดิน (DTPA Extraction) ลดลง ซึ่งส่งผลให้การดูดซับตะกั่วของพืชทั้งสองชนิดลดลงด้วย ขี้หมูช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตของหญ้าแฝกแต่ไม่ช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตของตองกง การใส่ปุ๋ยอินทรีย์ช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตและการดูดซับตะกั่วของตองกงแต่ไม่ช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตและการดูดซับตะกั่วของหญ้าแฝก

Waranusantigul และคณะ (2008) พบว่าราชาวดีป่า wild species เป็นพืชสะสมตะกั่วปริมาณสูงซึ่งพบในบริเวณเหมืองบ่องาม จังหวัดกาญจนบุรี ราชาวดีป่า (*Buddlejaasistica*) 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 และการทดลองนำราชาวดีไปปลูกในพื้นที่ต่างๆของเหมืองบ่องาม จังหวัดกาญจนบุรี แสดงให้เห็นว่าราชาวดี (*Buddleja* species) เป็นพืชที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้บำบัดพื้นที่ปนเปื้อนตะกั่วได้

Chintakovid และคณะ (2008) ศึกษาการปลูกต้นดาวเรืองลูกผสมพันธุ์นักเก็ต (Nugget marigold) ในบริเวณที่มีการปนเปื้อนสารหนูปริมาณสูงในอำเภอร่อนภิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช ผลการศึกษาพบว่าดาวเรืองสามารถเจริญเติบโตได้ดีและสามารถสะสมสารหนูได้ในปริมาณสูง โดยสะสมในใบ 46.2% และในดอก 5.8% นอกจากนี้พบว่าการให้ปุ๋ยฟอสเฟตขณะที่พืชกำลังออกดอกจะทำให้พืชสามารถสะสมสารหนูได้สูงขึ้นได้มากขึ้น คณะผู้วิจัยจึงสรุปว่าดาวเรืองลูกผสมพันธุ์นักเก็ตเป็นพืชทางเลือกหนึ่งที่อาจนำไปปลูกในพื้นที่ปนเปื้อนสารหนูได้ และดอกของดาวเรืองลูกผสมพันธุ์นักเก็ตสามารถขายได้จึงอาจเป็นแรงเสริมให้ต้นไม้ชนิดนี้น่าสนใจในการบำบัดแหล่งปนเปื้อนโลหะหนัก

Phaenark และคณะ (2009) ศึกษาการสะสมโลหะหนักของพืชที่เจริญเติบโตบนดินปนเปื้อนแคดเมียมและสังกะสีในพื้นที่โดยรอบเหมืองสังกะสี เพื่อค้นหาชนิดพันธุ์พืชที่สามารถ

ทนทานและสะสมโลหะหนักได้สูงซึ่งอาจนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักได้ จากการสำรวจพบพืช 4 ชนิดพันธุ์ (*Chromolaena odoratum*, *Gynura pseudochina*, *Impatiens violaeflora* และ *Justicia procumbens*) เป็นพืชสะสมแคดเมียมปริมาณสูง เนื่องจากสามารถเจริญเติบโตบนดินปนเปื้อนแคดเมียมได้ดี สามารถดูดซับแคดเมียมและลำเลียงไปเก็บสะสมในส่วนยอดได้ดี (Translocation factor > 1) และสะสมแคดเมียมในส่วนยอดได้สูงกว่า 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ค่าที่ใช้จำแนกพืชสะสมแคดเมียมปริมาณสูง) นอกจากนี้ยังพบว่า *Justicia procumbens* สามารถดูดซับสังกะสีและลำเลียงไปเก็บสะสมในส่วนยอดในปริมาณสูงเกินกว่า 10,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ค่าที่ใช้จำแนกพืชสะสมสังกะสีปริมาณสูง) นอกจากพืชดังกล่าวจะสามารถสะสมโลหะหนักปริมาณสูงแล้วพืชดังกล่าวซึ่งเป็นพืชที่พบได้ในท้องถิ่นของประเทศไทย สามารถเจริญเติบโตได้ดีในภูมิอากาศของประเทศไทย จึงอาจนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมและสังกะสีได้

จากตัวอย่างรายงานการศึกษาด้าน Phytoremediation ในประเทศไทยที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าการศึกษาส่วนใหญ่มุ่งเน้นการค้นหาพืชดูดซับโลหะหนักปริมาณสูงการประเมินศักยภาพของพืช และการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของพืช เพื่อจะนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาไปประยุกต์ใช้บำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยวิธีไฟโตเอ็กแทรกชัน (Phytoextraction) จากรายงานการศึกษาข้างต้นพบว่ามีพืชหลายชนิดที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักปริมาณสูงและมีคุณสมบัติเหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักได้ อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้พืชดูดซับโลหะหนักปริมาณสูงเหล่านั้นในการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น พืชที่สามารถดูดซับโลหะหนักปริมาณสูงไม่ก่อให้เกิดประโยชน์หรือไม่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจ การใช้พืชดูดซับโลหะหนักจากดินปนเปื้อนต้องใช้เวลานานมาก นอกจากนี้พืชที่นำไปปลูกจะมีโลหะหนักปนเปื้อนในเนื้อเยื่อซึ่งต้องมีวิธีการกำจัดที่เหมาะสมซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการกำจัด เป็นต้น ด้วยข้อจำกัดดังกล่าวการเลือกใช้การจัดการพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยวิธีไฟโตสเตบิไลเซชันเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ โดยใช้การสร้างเสถียรภาพของโลหะหนักในดินเพื่อลดการดูดซับโลหะหนักของพืช ซึ่งทำให้พืชไม่มีโลหะหนักปนเปื้อนหรือมีโลหะหนักในปริมาณต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งหากมีการพัฒนาประสิทธิภาพของวิธีการไฟโตสเตบิไลเซชันอาจสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่เกษตรกรรมที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักได้ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มศักยภาพของพื้นที่เกษตรกรรมที่ปนเปื้อนโลหะหนักให้สามารถผลิตพืชที่ปลอดภัย มีมูลค่าทางเศรษฐกิจ สามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการบริโภค อุตสาหรรมต่างๆ หรือการผลิตพลังงานชีวมวล

2.11.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้สารปรับปรุงบำรุงดินเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของโลหะหนักในดินและเพิ่มประสิทธิภาพของวิธี Phytostabillization

Herwijnen et al. (2007) ศึกษาเปรียบเทียบการใช้สารปรับปรุงดิน Green waste และ Sewage sludge ต่อการเพิ่มเสถียรภาพของโลหะหนักในดินและลดการดูดซับของโลหะหนักในพืช (*Loliumperenne* L.) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยปลูกพืชบนดินปนเปื้อนโลหะหนักที่เติมสารปรับปรุงดินสองชนิดพบว่าสารปรับปรุงดินที่ได้จาก Green waste ช่วยสร้างเสถียรภาพของแคดเมียมและสังกะสีในดินได้ในขณะที่สารปรับปรุงจาก Sewage

sludge เพิ่มการละลายของสังกะสี อย่างไรก็ตามการใช้สารปรับปรุงดินที่ได้จาก Sewage sludge มีประสิทธิภาพในการลดการดูดซับแคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสีของพืช ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโลหะหนักในดินจะถูกยึดเกาะกับวัตถุอินทรีย์ (Organic matter) ซึ่งช่วยเพิ่มเสถียรภาพของโลหะหนักในดินและลดการดูดซับโลหะหนักของพืช

Fässler et al. (2010) ศึกษาการใช้พืชมวลชีวภาพสูงสามชนิด ได้แก่ ทานตะวัน ข้าวโพด และยาสูบ ในการจัดการพื้นที่เกษตรกรรมที่ปนเปื้อนโลหะหนักในปริมาณไม่สูงมากนักเพื่อให้พืชดูดซับโลหะหนักจากพื้นที่และทำให้พื้นที่ปนเปื้อนมีโลหะหนักลดลงที่ละน้อย โดยทำการปลูกพืชสามชนิดสลับกันในพื้นที่ปนเปื้อนเป็นเวลา 6 ปี พบว่าการเติมซัลเฟอร์ (Sulphur) ในปริมาณ 2,136 กิโลกรัมต่อเฮกแตร์ต่อปี จะทำให้ pH ของดินลดลงจาก 7.4 เป็น 6.7 และทำให้การดูดซับและสะสมสังกะสีของพืชทั้งสามชนิดเพิ่มขึ้น และเพิ่มการดูดซับแคดเมียมของยาสูบ อย่างไรก็ตามผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่าการใช้พืชดูดซับโลหะหนักจากพื้นที่ปนเปื้อนจะต้องใช้เวลานานมาก คณะผู้วิจัยจึงแนะนำว่าควรพัฒนาให้พื้นที่เกษตรกรรมที่มีโลหะหนักปนเปื้อนในปริมาณไม่สูงนักถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการเกษตรเพื่อปลูกพืชให้ได้ผลผลิตที่ปลอดภัย (มีโลหะหนักปนเปื้อนในปริมาณต่ำ) หรือผลิตพืชเพื่อทำปุ๋ยหมักหรือผลิตพืชเพื่อทำพลังงาน

Houben et al. (2012) ศึกษาผลของสารปรับปรุงบำรุงดิน (Soil amendments) แตกต่างกัน 6 ชนิด ได้แก่ $CaCO_3$, Iron grit, Fly ash, Manure, Bentonite และ Bone meal ต่อการสร้างเสถียรภาพของโลหะหนัก (แคดเมียม สังกะสี และตะกั่ว) ในดินและการลดการดูดซับโลหะหนักของพืช *Lupiusalbus* L. พบว่าสารปรับปรุงบำรุงดินทุกชนิดสามารถเพิ่มเสถียรภาพหรือลดการละลายของแคดเมียมและสังกะสีได้ ในขณะที่การใช้ $CaCO_3$และ Iron grit เพิ่มเสถียรภาพของตะกั่วได้ นอกจากนี้พบว่าสารปรับปรุงบำรุงดินทุกชนิดช่วยลดการดูดซับสังกะสีของพืช $CaCO_3$, Manure และ Bone meal ช่วยลดการดูดซับแคดเมียมและตะกั่วของพืช ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสารปรับปรุงบำรุงดินแต่ละชนิดมีประสิทธิภาพในการสร้างเสถียรภาพให้กับโลหะหนักในดินแตกต่างกันและส่งผลต่อการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิดของพืชแตกต่างกันด้วย คณะผู้วิจัยจึงแนะนำว่าการจะนำสารปรับปรุงบำรุงดินชนิดใดก็ตามไปใช้ในการเพิ่มเสถียรภาพของโลหะหนักในพื้นที่ปนเปื้อนเพื่อลดการดูดซับโลหะหนักของพืชควรจะต้องศึกษาประสิทธิภาพของสารปรับปรุงบำรุงดินต่อการสร้างเสถียรภาพของโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินและการลดการดูดซับโลหะหนักของพืชก่อนจะนำไปใช้ในพื้นที่ปนเปื้อน

Tang และคณะ (2015) ศึกษาการดูดซับตะกั่วจากดินที่มีภาวะความเป็นกรดของกะหล่ำปลีจีน (*Brassica chinensis*) โดยใช้สารปรับปรุงบำรุงดินชนิดอินทรีย์และอนินทรีย์ร่วมกันในการปลูก พบว่าการใช้สารปรับปรุงบำรุงดินพวกอินทรีย์ช่วยเพิ่มค่า pH ของดิน นอกจากนั้นพบว่าการใช้สารปรับปรุงบำรุงดินทั้งชนิดอินทรีย์และอนินทรีย์สามารถลดการดูดซับตะกั่วของกะหล่ำปลีจีนแต่พวกสารอินทรีย์จะให้ผลที่ดีกว่าพวกสารอนินทรีย์ โดยการสะสมตะกั่วส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ส่วนรากมากกว่าส่วนลำต้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้สารปรับปรุงบำรุงดินอาจจะช่วยเพิ่มศักยภาพในการใช้พืชบำบัดพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนตะกั่ว