

การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะหนัก 7 ธาตุ

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นมากกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (Stoker และ Seagers, 1976) สำหรับงานวิทยานิพนธ์นี้มุ่งศึกษาโลหะหนัก 7 ธาตุ คือ แคดเมียม (Cadmium) ทองแดง (Copper) เหล็ก (Iron) แมงกานีส (Manganese) นิกเกิล (Nickel) ตะกั่ว (Lead) และสังกะสี (Zinc) ทั้งที่มีในกากตะกอน สะสมในดินและพืช การศึกษาถึงการดูดซับของ โลหะหนักนับว่าเป็นสิ่งที่จำเป็นในการประเมินถึงอันตรายจากโลหะหนักในดิน เนื่องจากมีผลโดยตรงกับความเป็นพิษต่อพืช และการเข้าไปมีบทบาททางชีวอาหาร (Davis, 1984) แม้ว่า เหล็ก แมงกานีส สังกะสี และทองแดง จะจัดเป็นจุลธาตุอาหาร (Trace Elements) ของพืชโดยตรงก็ตาม แต่ถ้ามีปริมาณการสะสมในดินและพืชสูง ก็อาจเกิดความไม่เหมาะสม ส่วน นิกเกิล ตะกั่ว และแคดเมียม ซึ่งจัดเป็นโลหะหนักที่เป็นพิษโดยตรงนั้น ยังมีความจำเป็นต้องพิจารณาถึงความเหมาะสม และความปลอดภัยอย่างรอบคอบ ดังนั้นหัวข้อนี้จึงขอรวบรวมข้อสรุปและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับธาตุทั้ง 7 ชนิด ทั้งงานแง่การดูดซับ (Uptake) การเคลื่อนย้าย (Translocation) และการที่ธาตุนั้นจะถูกนำไปใช้ เป็นธาตุอาหารพืช ดังต่อไปนี้

2.1.1 โลหะหนักที่จัดเป็นจุลธาตุอาหาร

งานที่นี้ได้แก่ เหล็ก แมงกานีส สังกะสี และทองแดง ซึ่งพืชจะดูดซับไปใช้ประโยชน์ได้ดีหรือไม่เพียงใดนั้น ขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ หลายประการ แต่ปัจจัยหนึ่งที่น่าสนใจเกี่ยวกับบทบาทในการที่พืชจะนำธาตุนั้นไปใช้ประโยชน์ได้มากหรือน้อย ก็คือ รูปของสารประกอบของธาตุอาหารเหล่านั้นในดิน

รูปของสารประกอบของธาตุอาหารในดินเมื่ออาศัยความเป็นประโยชน์ได้ของธาตุอาหารพืชเป็นหลัก อาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. รูปที่พืชใช้ประโยชน์ไม่ได้ทันที (Relatively Unavailable Forms) ได้แก่สารประกอบของธาตุเหล่านี้ที่มีโมเลกุลใหญ่มีหลายธาตุ โครงสร้างซับซ้อนและอนุภาคจับกันแน่น ไม่อาจจะละลายน้ำได้ง่าย ได้แก่ หิน และแร่ ที่เป็นต้นกำเนิดดิน หรือ อินทรีย์สารที่มีโครงสร้างซับซ้อน

2. รูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้ทันที (Relatively Available Forms) ได้แก่สารประกอบของธาตุอาหารที่มีโมเลกุลเล็ก โครงสร้างไม่ซับซ้อน แยกเป็นอนุมูลหรือไอออนได้ง่าย จึงละลายน้ำได้ดี โดยทั่วไปจะมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างรูปเกลือของธาตุกับรูปไอออนบวกและลบ แต่มีแนวโน้มที่กลายเป็นไอออนมากกว่า ซึ่งพืชสามารถนำใบใช้ประโยชน์ได้ (พาบุลย์ ประพตธรรม, 2528)

ต่อไปจะ ได้กล่าวถึงรายละเอียดของโลหะหนักที่เป็นจุลธาตุอาหารแต่ละธาตุ ดังนี้

2.1.1.1 เหล็ก (Iron)

การดูดตั้งและการเคลื่อนที่ในพืช

เหล็กสามารถดูดตั้งโดยรากพืชในรูปของเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) หรือสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนของเหล็ก (Fe-chelates) ส่วนเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) นั้นนับว่ามีความสำคัญน้อย เนื่องจากสารประกอบของเหล็ก (III) มีความสามารถในการละลายในสารละลายดินโดยทั่วไปได้น้อย การที่รากพืชจะนำเหล็กในรูปสารอินทรีย์ใบใช้ประโยชน์นั้นขึ้นกับความสามารถของรากในการลดระดับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) และรีดิวซ์ Fe^{3+} เป็น Fe^{2+} (Marschner et al., 1974; Brown, 1978) ในทางตรงข้ามเหล็กในรูปสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนสามารถละลายในสารละลายดิน รากจึงนำใบใช้ประโยชน์ได้ แต่อย่างไรก็ตามอัตราการดูดตั้งของเหล็กจากสารประกอบเชิงซ้อนเป็นไปได้น้อยมาก สำหรับประสิทธิภาพของการนำใบใช้ประโยชน์ ของสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนของเหล็กขึ้นกับการแยกกันระหว่างเหล็กและสารอินทรีย์ซึ่งเกิดขึ้นที่บริเวณผิวราก โดยที่สารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนของเหล็กต้องอยู่ในระดับความเข้มข้น

ปกติที่พืชต้องการ การดูดดึง เหล็กของพืชได้รับอิทธิพลจากประจุบวกอื่น ๆ เช่น Mn^{2+} , Cu^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ และ Zn^{2+} โลหะหนักโดยเฉพาะทองแดงและสังกะสี สามารถไล่ที่เหล็กออกจากสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน เกิดเป็นสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนของโลหะหนักนั้นแทน ซึ่งอาจเป็นปัจจัยจำกัดที่สำคัญต่อการดูดดึงและการนำไปใช้ประโยชน์ได้ของเหล็ก (Mengel และ Kirkby, 1982)

การเป็นธาตุอาหารเพื่อการเพาะปลูก

ปริมาณเหล็กในเนื้อเยื่อพืชสีเขียวนับว่าต่ำถ้าเปรียบเทียบกับธาตุอาหารหลัก โดยทั่วไปจะพบว่าพืชมีเหล็กประมาณ 100 ppm. ของน้ำหนักแห้ง ในเมล็ดธัญพืช หัวใต้ดินและราก จะมีปริมาณที่ต่ำกว่า (Mengel และ Kirkby, 1982) โดยทั่วไปปริมาณเหล็กทั้งหมดในดินจะมีปริมาณมากเกินไปสำหรับความต้องการพืช Lindsay (1974) รายงานว่าพืชโดยทั่วไปมีความต้องการเหล็กน้อยกว่า 0.5 ppm. ในดินชั้นบน แม้ว่าปริมาณเหล็กทั้งหมดในดินจะไม่ได้ถึง 2% หรือ 20,000 ppm. ก็ตาม ปัญหาเกี่ยวกับเหล็กในดินสำหรับการเพาะปลูกจึงเป็นปัญหาการนำเหล็กมาใช้ประโยชน์มากกว่า

การละลายของเหล็กอินทรีย์ขึ้นกับระดับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ของดินอย่างมาก ความเข้มข้นของเหล็กอินทรีย์ที่ละลายได้อยู่ในระดับที่เพียงพอต่อความต้องการของพืช ณ ระดับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) เท่ากับ 3 ถ้า pH สูงกว่า 4 จะมีเหล็กอินทรีย์ที่ละลายได้เพียง 1% ของปริมาณเหล็กที่ต้องการ และ ณ ระดับความเป็นกรดเป็นด่างที่เป็นกลางความเข้มข้นของเหล็กอินทรีย์ในสารละลายดินจะยิ่งต่ำกว่าระดับที่พืชต้องการมากขึ้น ดังนั้นการที่พืชยังสามารถเจริญเติบโตได้ก็เนื่องจากเหล็กในดินที่รวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์เกิดเป็นสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนนั้นสามารถเป็นแหล่งธาตุอาหารพืชได้ โดยที่รากพืชสามารถดูดดึงเหล็กจากอินทรีย์วัตถุโดยขบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในดิน และ/หรือ จากการใช้ปุ๋ยที่มีเหล็กในรูปสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนลงในดิน (Mengel และ Kirkby, 1982) รากพืชจะขับสาร α -Ketogluconic Acid จากขนราก ซึ่งสามารถละลายเหล็กที่รวมตัวกับสารอินทรีย์เป็นสารประกอบเชิงซ้อน และดูดดึงเหล็กนำไปใช้ประโยชน์ได้ ส่วนสารประกอบอินทรีย์ที่ปลดปล่อยเหล็กให้รากแล้วสามารถปรวมตัวกับเหล็กหรือโลหะอื่นในดินเกิดเป็นสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน และปลดปล่อยเหล็กหรือโลหะอื่นให้กับรากพืชได้อีก (Lindsay, 1974) ดังนั้นเหล็กในรูปสาร

ประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนจึงสามารถนำมาใช้เป็นปุ๋ยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งน่าจะเป็นเหตุผลหนึ่ง
ที่เหล็กในกากตะกอนสามารถเป็นแหล่งธาตุอาหารพืชได้ดี

ลักษณะการขาดธาตุเหล็กและแมงกานีสเชื่อมค่อนข้างจะคล้ายกัน จะ
ปรากฏลักษณะอันเนื่องมาจากการถูกยับยั้งการสร้างคลอโรฟิล แต่อย่างไรก็ตามการขาดเหล็กก็ไม่
เหมือนกับการขาดแมงกานีส เชื่อม คือโดยมากจะปรากฏอาการขาดคลอโรฟิล (Chlorosis) ในใบ
อ่อน (Mengel และ Kirkby, 1982)

2.1.1.2 แมงกานีส (Manganese)

การดูดตั้งและการเคลื่อนที่ในพืช

อัตราการดูดตั้งแมงกานีสแตกต่างกันไปตามชนิดของพืช และเนื่อง
จาก Mn^{2+} ก็จัดเป็นประจุบวกสอง (Divalent Cation) ดังนั้นจึงเกิดการแข่งขันกับประจุบวก
สองอื่น ๆ โดยเฉพาะ Mg^{2+} จะมีผลต่อการลดการดูดตั้ง Mn^{2+} ส่วนการใส่ปุ๋ยนั้นนอกจากจะลด
การดูดตั้งของ Mn^{2+} โดยอิทธิพลของ Ca^{2+} โดยตรงในสารละลายดินแล้ว ยังเกิดจากผลของ
pH ที่เพิ่มขึ้นด้วย และเนื่องจากแมงกานีสมีลักษณะสมบัติทั้งความเป็น Alkali Earth Cation
(เช่น Mg^{2+} , Ca^{2+}) และความเป็นโลหะหนัก จึงพบว่าอิออนทั้ง Alkali Earth และอิออน
ของโลหะหนักต่างมีผลต่อการดูดตั้งและการเคลื่อนที่ของแมงกานีสในพืช ในทางตรงข้ามแมงกานีส
(Mn^{2+}) ก็มีผลลดการดูดตั้งของประจุบวกอื่น ๆ เช่นกัน (Mengel และ Kirkby, 1982)

Tiffin (1972) ได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในมะเขือเทศ
พบว่า แมงกานีสที่สามารถเคลื่อนที่ได้อยู่ในรูป Mn^{2+} ไม่ใช้รูปสารประกอบอินทรีย์ โดยทั่วไปใน
ส่วนต่าง ๆ ของต้นอ่อนจะมีแมงกานีสค่อนข้างสูง (Amberger, 1973)

การเป็นธาตุอาหารเพื่อการเพาะปลูก

ในดินส่วนมากจะมีแมงกานีสที่นำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเพียงพอ
ดังนั้นการเติมแมงกานีสจึงมีความจำเป็นค่อนข้างน้อย แต่ในดินอินทรีย์ และมีระดับความเป็นกรด
เป็นด่างสูง จะมีแมงกานีสในรูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ต่ำ และอาจพบการขาดแมงกานีสในพืชได้

โดยทั่วไปการเติมแมงกานีสลงในดินมักเติมในรูปเกลือแมงกานีส เช่น แมงกานีสซัลเฟต ($MnSO_4$) ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการเติมในรูปสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน อัตราเติมโดยทั่วไป สำหรับแมงกานีสประมาณ 30 กิโลกรัม/เฮกตาร์ และอาจใช้ 100-200 กิโลกรัม/เฮกตาร์ ในกรณีขาดแมงกานีสมาก (Mengel และ Kirkby, 1982)

พืชที่ขาดแมงกานีสจะปรากฏอาการคลอโรซิส (Chlorosis) ที่ใบ เซลล์มีขนาดเล็ก เนื่องจากเม็ดคลอโรพลาสต์เป็นส่วนที่ไวต่อการขาดแมงกานีสมากที่สุด และอาการขาดแมงกานีสนั้นคล้ายอาการขาดแมกนีเซียม แต่อาการขาดแมงกานีสจะปรากฏให้เห็นตั้งแต่ตอนที่ยังเป็นใบอ่อน ใบที่ใบเลี้ยงคู่อาการขาดแมงกานีสจะปรากฏเป็นจุดสีเหลืองเล็ก ๆ ขึ้นที่ใบ สำหรับพืชใบเลี้ยงเดี่ยวจะปรากฏจุดหรือแนวสีเทาที่ใบ ระดับวิกฤตของการขาดแมงกานีสสำหรับพืชโดยทั่วไปอยู่ในช่วง 15-25 ppm. ของน้ำหนักแห้งพืช (Farey และ Draycott, 1973)

2.1.1.3 สังกะสี (Zinc)

การดูดตั้งและการเคลื่อนที่ในพืช

ปริมาณสังกะสีในพืชค่อนข้างต่ำคือโดยทั่วไปมักไม่เกิน 100 ppm. ของน้ำหนักแห้งพืช และปริมาณที่พืชต้องการก็น้อยเช่นกัน การดูดตั้งสังกะสีของพืชจะถูกยับยั้งโดยอิทธิพลของทองแดง ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าอิออนทั้งสองนี้เกิดการแข่งขันกันจับกับ Carrier Site เดียวกัน (Mengel และ Kirkby, 1982) เหล็กและแมงกานีสก็สามารถรบกวนการดูดตั้งสังกะสีของต้นข้าว (Giordano et al., 1974) แม้อิออนบวกของ alkali earths เช่น Mg^{2+} , Ca^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} ก็สามารถลดการดูดตั้งสังกะสีของต้นข้าวสาส์ได้ (Chaudhry และ Loneragan, 1972) ฟอสฟอรัสที่มีความเข้มข้นสูงจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดการขาดสังกะสีในพืชได้เช่นกัน (Mengel และ Kirkby, 1982)

รูปของสังกะสีซึ่งเคลื่อนที่จากรากไปยังส่วนบนของพืชยังไม่ทราบอย่างแน่ชัด แต่ตรวจพบสังกะสีในท่อลำเลียงน้ำ (Xylem) ของมะเขือเทศและถั่วเหลืองในระดับความเข้มข้นซึ่งสูงกว่าในสารละลายรอบ ๆ ราก (Ambler et al., 1970) สังกะสีสามารถสะสมในรากถ้าปริมาณที่ให้กับพืชอยู่ในระดับสูง ใบแก่ของพืชจะพบการเคลื่อนที่ของสังกะสีน้อยมาก ส่วนอัตราและการเคลื่อนที่ไปยังใบอ่อนจะลดลงในพืชที่ขาดสังกะสี (Loneragan, 1975)

การเป็นธาตุอาหารเพื่อการเพาะปลูก

ดินส่วนมากจะมีปริมาณสังกะสีทั้งหมดมากเกินพอแก่ความต้องการของพืช แต่ปัจจัยที่สำคัญคือการนำใบใช้ประโยชน์ในดินที่เป็นกรดสูงมาก จะมีสังกะสีทั้งหมดเพียง 10-30 ppm. ส่วนความเข้มข้นในสารละลายดินโดยทั่วไปพบว่ามีระดับต่ำ และอาจพบการขาดสังกะสีขึ้นได้ การเคลื่อนที่ของสังกะสีในดินมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการนำสังกะสีใบใช้ประโยชน์ (Mengel และ Kirkby, 1982) Elgawhary และคนอื่น ๆ (1970) รายงานว่า 95% ของปริมาณสังกะสีทั้งหมด เคลื่อนที่ได้โดยการแพร่ Lindsay (1972) เสนอว่าปัจจัยซึ่งจำกัดอัตราการแพร่ของสังกะสีใบยังราก (เช่นสภาวะของดินที่อัดตัวกันแน่น) นับว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลลดการนำสังกะสีใบใช้ประโยชน์ของพืช

สำหรับสังกะสีในรูปที่พืชสามารถนำใบใช้ประโยชน์ได้นั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่เป็นสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนในดิน เช่นเดียวกับเหล็กซึ่งเป็นผลจากการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุ (Lindsay, 1974) จึงเห็นได้ว่าสังกะสีในรูปที่พืชสามารถนำใบใช้ประโยชน์ได้กับอินทรีย์วัตถุในดินมีความสัมพันธ์กันอย่างมาก ดังจะพบการขาดสังกะสีอยู่เสมอในดินที่สูญเสียชั้นผิวดินซึ่งมีอินทรีย์วัตถุอยู่มาก (Follett และ Lindsay, 1970) Lindsay (1974) พบว่าอิออนของโลหะจะแข่งขันกันจับกับสารประกอบอินทรีย์ Zn^{2+} ในสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนของสังกะสีกับ Ethylene Diamine Tetraacetate (Zn-EDTA Complex) จะถูกไล่ที่โดย Ca^{2+} เมื่อ pH มีค่าสูง การถูกไล่ที่นี้ทำให้เกิดการนำสังกะสีใบใช้ประโยชน์เกิดได้น้อยในดินที่เป็นด่างจัด Haq และ Miller (1972) รายงานว่าตรวจพบปริมาณสังกะสีในดินอ่อนของข้าวโพดซึ่งสุ่มตัวอย่างจาก 85 แหล่งใน Ontario มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณสังกะสีในรูปที่สามารถสกัดได้จากดิน โดยใช้ Chelating agent (Ethylene-Diamine-Tetraacetate = EDTA และ Diethylene-Triamine-Pentaacetate = DTPA) ซึ่งแสดงว่าสังกะสีที่ถูกนำใบใช้ประโยชน์นั้นมาจากสังกะสีที่อยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนในดินเป็นส่วนใหญ่

สำหรับฟอสฟอรัสในรูปที่พืชสามารถนำใบใช้ได้ (Available Phosphorus) ที่มีความเข้มข้นสูง ๆ ในดิน สามารถลดการนำสังกะสีใบใช้ของพืชได้ เนื่องจากฟอสฟอรัสจะรวมตัวกับสังกะสีเป็นสังกะสีฟอสเฟต $[Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O]$ ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายดินจึงลดลง อิทธิพลของอัตราส่วน Zn/p จึงนับว่ามีความสำคัญต่อการนำสังกะสีใบใช้ (Mengel และ Kirkby, 1982)

การเพาะปลูกโดยทั่วไปพืชจะดูดตั้งสังกะสีในอัตราที่น้อยกว่า 0.5 กิโลกรัม/เฮกตาร์/ปี ในทางปฏิบัติบัณฑิตทางการขาดสังกะสีสามารถแก้ได้โดยใส่สังกะสีในรูปปุ๋ยลงในอัตราที่เหมาะสม คือ ประมาณ 4 กิโลกรัม/เฮกตาร์ ซึ่งสามารถให้ผลได้ราว 3 - 8 ปี สังกะสีในรูปของเกลือซัลเฟต ($ZnSO_4$) นับว่านิยมใช้กันมากเนื่องจากสามารถละลายได้ดี ส่วนสังกะสีในรูปสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนนิยมใช้ในดินทรายที่มีความเป็นกรดสูง เพราะการปลดปล่อยสังกะสีออกจากสารประกอบเชิงซ้อน ช้ากว่าในกรณีของเกลือซัลเฟต (Mengel และ Kirkby, 1982)

โดยทั่วไปพืชที่ขาดสังกะสีจะมีอาการขาดคลอโรฟิล (Chlorosis) ในบริเวณระหว่างเส้นใบ โดยจะมีสีจางลงกลายเป็นสีเหลืองหรือบางที่เป็นสีขาว สำหรับผักหลายชนิดอาการขาดสังกะสีจะปรากฏลักษณะบริเวณระหว่างข้อ (ปล้อง) จะสั้น และเกิดบริเวณที่ขาดคลอโรฟิล (Chlorotic Area) ในใบแก่ บางครั้งอาการขาดคลอโรฟิลยังเกิดในใบอ่อนด้วย (Maynard, 1979) การขาดสังกะสีจะหยุดยั้งการสร้างเม็ดคลอโรพลาสต์และทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในเซลล์ (Jyung et al., 1975) ช่วงความเข้มข้นซึ่งจัดว่าพืชขาดสังกะสีค่อนข้างต่ำคือ อยู่ในช่วง 0-15 ppm. ของน้ำหนักแห้งพืช (Mengel และ Kirkby, 1982)

2.1.1.4 ทองแดง (Copper)

การดูดตั้งและการเคลื่อนที่ในพืช

พืชดูดตั้งทองแดงได้ในปริมาณที่น้อยมาก ปริมาณทองแดงในพืชส่วนมากจะอยู่ในช่วง 2-20 ppm. ของน้ำหนักพืช การดูดตั้งทองแดงของพืชได้รับอิทธิพลจากการแข่งขันของอิออนบวก และมีความสัมพันธ์กับระดับทองแดงในดินที่อยู่ในรูปที่พืชนำไปใช้ได้ (Mengel และ Kirkby, 1982) ทองแดงสามารถแทนที่อิออนอื่น ๆ ออกจากตำแหน่งที่แลกเปลี่ยนอิออนของราก และสามารถจับกับรากได้แน่นมาก ซึ่งนับว่าเป็นเหตุผลที่ทำให้พบปริมาณทองแดงในรากสูงกว่าในส่วนอื่น ๆ ของพืช (Hill, 1973) การเคลื่อนที่ของทองแดงขึ้นกับปริมาณทองแดงในพืชอย่างมากในพืชบางชนิดเช่น ข้าวสาลี ซึ่งได้รับทองแดงอย่างเพียงพอจะพบว่ามีการเคลื่อนที่ของทองแดงจากใบไปยังเมล็ด แต่ในพืชที่ขาดทองแดงจะพบว่าเกือบไม่มีการเคลื่อนที่ของทองแดงเลย (Loneragan, 1975) และในพืชหลายชนิดจะพบทองแดงในท่อลำเลียงน้ำ (Xylem) ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนของทองแดงที่เป็นประจุลบ (Anionic Cu Complex Form) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ทำหน้าที่เป็นตัวพาทองแดงเคลื่อนที่ไปได้ในส่วนที่เป็นของเหลวของพืช (Tiffin, 1972)

การเป็นธาตุอาหารเพื่อการเพาะปลูก

ในดินส่วนมากจะมีทองแดงที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเพียงพอ สำหรับดินที่พบว่ามีการขาดทองแดงก็อาจเป็นเพราะธรรมชาติของดินนั้นมีทองแดงอยู่น้อยเอง หรือไม่มีปริมาณทองแดงในรูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อย พืชแต่ละชนิดมีความไวต่อการขาดทองแดงต่างกัน พืชที่มีการตอบสนองต่อทองแดงได้ดีมาก ได้แก่ ข้าวไรต ผักขม ข้าวสาลีและพืชผักที่เป็นอาหารสัตว์ พืชที่ตอบสนองได้ในระดับปานกลาง ได้แก่ กะหล่ำปลี ดอกกระหล่ำ หัวผักกาด และข้าวโพด ส่วนพืชประเภทถั่ว กาแฟ มันฝรั่ง และถั่วเหลือง ตอบสนองต่อทองแดงได้น้อย การใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอาจเป็นสาเหตุการขาดทองแดงในดินซึ่งมีไนโตรเจนสูง การใส่ปุ๋ยฟอสเฟตติดต่อกันเป็นระยะเวลาอันยาวนาน อาจทำให้เกิดการขาดทองแดงในดิน และการเติมปุ๋ยที่มีสังกะสีอยู่มากก็มีผลทำให้เกิดการขาดทองแดงมากขึ้นด้วย (Mengel และ Kirkby, 1982)

สำหรับธาตุพืชโดยทั่วไปจะดูดตั้งทองแดงไปใช้โดยเฉลี่ยเพียง 20-30 กรัมของทองแดง/เฮกตาร์ ซึ่งนับว่าเป็นอัตราที่ค่อนข้างต่ำ แต่อย่างไรก็ตาม ทองแดงสามารถยึดเกาะกับดินได้ดี ด้วยเหตุนี้เองจึงต้องเติมทองแดงลงในดินให้มากพอกับความต้องการของพืช (Mengel และ Kirkby, 1982) รูปของทองแดงที่ใช้เป็นปุ๋ยนั้นใช้ทั้งรูปสารประกอบอินทรีย์ (CuSO_4 , CuO เป็นต้น) และสารประกอบอินทรีย์ (Murphy และ Walsh, 1972; Caldwell, 1971) และที่ใช้กันมากคือทองแดงในรูปเกลือซัลเฟต (CuSO_4) อัตราเติมโดยทั่วไปประมาณ 1-10 กิโลกรัมทองแดง/เฮกตาร์ นับว่าเพียงพอสำหรับดินที่มีแร่ธาตุดู้อยู่บ้างแล้ว (Minertal Soil) แต่ถ้าเป็นดินอินทรีย์อาจจำเป็นต้องเติมในระดับที่สูงกว่า (Mengel และ Kirkby, 1982)

การขาดทองแดงเป็นที่ทราบกันดีในพืชหลายชนิด ในธาตุพืชลักษณะการขาดทองแดงจะปรากฏขึ้นที่ปลายใบเป็นอันดับแรก โดยปลายใบจะเป็นสีขาว ใบจะแคบและบิดเป็นเกลียว การเจริญของบริเวณระหว่างข้อลดลง (Mengel และ Kirkby, 1982)

2.1.2 โลหะหนักที่เป็นพิษโดยตรง

ในที่นี้หมายถึง นิกเกิล ตะกั่ว และแคดเมียม ซึ่งเป็นโลหะหนักที่จัดว่ามีความเป็นพิษร้ายแรงกว่า เหล็ก แมงกานีส สังกะสีและทองแดง เนื่องจากก่อให้เกิดความเป็นพิษขึ้นได้

แม้จะมีปริมาณน้อยกว่าโลหะหนักที่เป็นจุลธาตุอาหารโดยตรง แต่อย่างไรก็ตาม จากผลการศึกษาวิจัยในระยะหลัง ๆ มีรายงานว่าโลหะหนักเหล่านี้บางชนิดก็สามารถถูกพืชใช้เป็นจุลธาตุอาหารได้ ถ้ามีปริมาณในดินไม่สูงจนถึงระดับที่เป็นพิษต่อพืช

2.1.2.1 นิกเกิล (Nickel)

นิกเกิลเป็นธาตุที่มีประจุบวกสอง (Ni^{2+}) อยู่ในรูปสารประกอบทั้งที่ไม่ละลายน้ำ ได้แก่ นิกเกิลคาร์บอเนต ($NiCO_3$) นิกเกิลซัลไฟด์ (NiS) และนิกเกิลออกไซด์ (NiO) และสารประกอบที่ละลายน้ำ ได้แก่ นิกเกิลคลอไรด์ ($NiCl_2$) นิกเกิลซัลเฟต ($NiSO_4$) และนิกเกิลไนเตรต ($NiNO_3$) ส่วนนิกเกิลคาร์บอเนต ($NiCO_3$) อยู่ในรูปไอระเหย (WHO, 1991) สามารถพบนิกเกิลได้ทั้งใน ดิน น้ำ และอากาศ

ในดินเกษตรกรรมทั่วโลกจะมีนิกเกิลเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่วง 3-1,000 ppm. (NAS, 1975) พืชดูดซับนิกเกิลจากดินผ่านระบบราก ตามปกติปริมาณนิกเกิลในพืชจะอยู่ในช่วง 0.1-5 ppm. ของน้ำหนักแห้งพืช แต่พืชบางชนิดอาจพบนิกเกิลในปริมาณสูง เช่นข้าวไรตซึ่งไวต่อนิกเกิล นิกเกิลสามารถเคลื่อนไปได้ในท่อลำเลียงอาหาร (phloem) หลังจากนิกเกิลถูกดูดซับเข้าไปแล้ว จะถูกเคลื่อนย้ายไปยังผลและเมล็ด (Catalodo et al., 1970; Mitchell et al., 1978) มีรายงานว่านิกเกิลสามารถถูกใช้เป็นจุลธาตุอาหารของพืชหลายชนิด (Welch, 1981) แม้ว่านิกเกิลในระดับที่เกิน 50 ppm. ที่สะสมในพืชโดยทั่วไปจะทำให้เกิดความเป็นพิษแก่พืชได้ แต่ก็มีพืชหลายชนิดที่มีความทนทานต่อนิกเกิลในระดับสูง ๆ ได้ แหล่งสำคัญของนิกเกิลที่ทำให้เกิดการสะสมในพืชบกคือนิกเกิลในดิน ซึ่งมาจากแหล่งอุตสาหกรรม และจากภาคตะกอนน้ำเสีย (Berrow และ Burrige, 1981; Chang et al, 1984) Grossmann (1988) อ้างถึงใน WHO (1991) พบว่าพืชผักสามารถเจริญเติบโตได้บนดินที่มีการปนเปื้อนของนิกเกิลโดยเฉลี่ย 558 ppm. และตรวจพบนิกเกิลในพืชผักสีเขียว เช่น ผักกระหล่ำชนิดต่าง ๆ และหัวหอม มีปริมาณอยู่ในช่วง 10.8-65 ppm. ต่อน้ำหนักแห้งพืชในถั่วลิสงพบนิกเกิลในช่วง 42-65.1 ppm. (ในเมล็ด) และ 16.5-23.4 ppm. (ในต้นถั่วลิสง) ในรากผักต่าง ๆ พบนิกเกิลสะสมในช่วง 7.95-26.9 ppm. ของน้ำหนักแห้ง และยังมีรายงานว่าโดยทั่วไปการสะสมนิกเกิลในพืชจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของความเข้มข้นนิกเกิลในดิน แต่อย่างไรก็ตามในข้าวโพดพบปริมาณนิกเกิลค่อนข้างต่ำคือ ในเมล็ดพบ 2.32-4.28 ppm. ใน

ใบพบ 6.69-10.7 ppm. และลำต้นพบ 4.33-5.53 ppm. โดยปลูกบนดินที่มีนิกเกิล 745 ppm. สำหรับต้นยาสูบก็มีแนวโน้มในการดูดตังนิกเกิลอย่างเด่นชัด โดยจะดูดตังนิกเกิลจากดินไปสะสม โดยเฉพาะในใบยาสูบ ความเข้มข้นโดยเฉลี่ยของนิกเกิลในยาสูบที่ปลูกบนดินและปลูกบนกากตะกอน เท่ากับ 0.64 ppm. และ 1.15 ppm. ตามลำดับ (Bache et al., 1985)

2.1.2.2 ตะกั่ว (Lead)

ตะกั่ว นับว่าเป็นหนึ่งในมลสารที่มีบทบาทในสภาวะแวดล้อม และความเป็นพิษต่อมนุษย์สูง แต่การสะสมตะกั่วในพืชจนถึงระดับที่เป็นพิษต่อพืช หรือผู้บริโภคพืชในสภาวะการเจริญทางด้านเกษตรกรรมยังไม่ปรากฏให้เห็นเด่นชัดนัก ส่วนใหญ่ความเป็นพิษของตะกั่ว โดยผ่านทางโซอาหารคือจากพืชสืบทอดมาถึงมนุษย์ จะพบได้บ้างก็ในกรณีที่มีการปนเปื้อนของตะกั่วลงสู่ดินอย่างรุนแรง เช่น กรณีตะกั่วในกากแบตเตอรี่ที่มีผู้นำไปถมถนนที่หมู่บ้านอำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ แล้วละลายลงสู่ดิน และเข้าไปปนพิษจนเป็นอันตรายถึงมุษย์ขั้นที่สุด

โดยทั่วไปปริมาณทั้งหมดที่พบในดินเกษตรกรรมจะมีค่าอยู่ในช่วง 2-200 ppm. และโดยปกติพืชจะดูดตังตะกั่วไปใช้ได้น้อยมากด้วย Chumbley และ Unwin (1982) ได้ศึกษาและติดตามการดูดตังตะกั่วของพืชพบว่า ปริมาณตะกั่วที่มีอยู่ในใบพืชนั้นไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณที่มีอยู่ในดิน อันเนื่องมาจากกากตะกอนน้ำเสียที่เติมลงสู่ดินที่ใช้เพาะปลูกพืช

นอกจากนี้การดูดตังตะกั่วของพืชจะยิ่งลดลงอีกถ้าเติมปูนลงในดิน เพราะ ณ ระดับความเป็นกรดเป็นด่างสูง ๆ จะทำให้ตะกั่วตกตะกอนในรูปตะกั่วไฮดรอกไซด์ ตะกั่วฟอสเฟต หรือตะกั่วคาร์บอเนต และยังสามารถเกิดการรวมตัวกับอินทรีย์ เป็นสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนได้อีกด้วย การเพิ่มระดับแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ก็จะช่วยเพิ่มการแข่งขันกับตะกั่วไอออน (Pb^{2+}) ในการแลกเปลี่ยนประจุที่ราก

ตะกั่วซึ่งพืชอาจดูดตังเข้าไปได้แม้จะไม่ดีนักก็ตามจะสะสมที่ผนังเซลล์ของพืช ซึ่งเท่ากับเป็นการช่วยป้องกันหรือลดความเป็นพิษของตะกั่ว (Mengel และ Kirkby, 1982) จึงอาจเป็นเหตุผลหนึ่งที่สามารถอธิบายได้ว่า ทำไมพืชบางชนิดมีความทนทานต่อตะกั่วได้ดี เช่น พบว่าหญ้าน (Brachiria Mutica) สามารถทนความเป็นพิษของตะกั่วและแคดเมียมโดยไม่กระทบกระเทือนต่อการเจริญเติบโตได้ถึง 100 ppm. (อรรณพ ศิริรัตน์พิริยะ, 2522) ผักคะน้าเองก็สามารถทนความเป็นพิษของตะกั่วได้ถึง 150 ppm. เช่นกัน (อรรณพ ศิริรัตน์พิริยะ, 2525)

2.1.2.3 แคดเมียม (Cadmium)

แคดเมียมและสังกะสี มีลักษณะสมบัติทางเคมีคล้ายคลึงกันมากจึงนับว่าแคดเมียมมีพฤติกรรมคล้ายกับธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืช ทั้งการดูดดึงและปฏิกิริยาต่าง ๆ ในพืช (Mengel และ Kirkby, 1982) แคดเมียมต่างจากตะกั่วคือ แคดเมียมสามารถเคลื่อนที่จากดินผ่านรากไปยังส่วนบนของพืชได้ การดูดดึงไปใช้ประโยชน์นั้นขึ้นกับระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดินอย่างมาก และยังขึ้นกับประจุบวกอื่น ๆ ที่สามารถแข่งขันกันจับกับตำแหน่งแลกเปลี่ยนประจุของราก แคดเมียมและสังกะสีช่วยลดการดูดดึงของแคดเมียมได้ในพืชส่วนมากการละลายของแคดเมียมเข้าไปในลำต้น จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นภายนอก (Jones et al., 1975; Petterson, 1976) อย่างไรก็ตาม การเคลื่อนย้ายของแคดเมียมจากใบไปยังเมล็ดเป็นไปได้น้อยและปริมาณแคดเมียมในปริมาณสูง ๆ ก็มีค่าไม่เกิน 1 ppm. (Sommer, 1977)

พืชแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดดึง และสะสมแคดเมียมได้แตกต่างกัน เช่น ต้นยาสูบมีความสามารถพิเศษที่จะดูดดึงแคดเมียมจากดินไปสะสมในส่วนใบได้ในปริมาณสูงกว่าปกติคือ อยู่ในช่วง 0.77-7.02 ppm. (โดยปกติในพืชที่ใช้เป็นอาหารโดยทั่วไปจะมีแคดเมียมต่ำกว่า 0.05 ppm. (Chiba และ Masironi, 1992)

แหล่งที่อาจทำให้เกิดการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินที่ซ้ำ

เพาะปลูกได้แก่ ดินจากแหล่งแร่สังกะสี และจากกากตะกอนน้ำเสีย ในสภาพการณ์จริงยังไม่พบรายงานเกี่ยวกับความเป็นพิษของแคดเมียมจากแหล่งเพาะปลูกดังกล่าว แต่การใช้กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย ควรต้องมีการติดตามอย่างรอบคอบ (Mengel และ Kirkby, 1982) แม้ว่าจากรายงานของ Dijkshoorn และ Lampe (1975) จะสรุปไว้ว่า การดูดดึงแคดเมียมของพืชจากกากตะกอนจะน้อยกว่าการดูดดึงแคดเมียมจากเกลือแคดเมียมที่เติมลงไปดิน และการดูดดึงแคดเมียมจากเกลือแคดเมียมที่เติมลงในดิน จะน้อยกว่าการดูดดึงแคดเมียมจากการทดลองปลูกพืชในสารละลายก็ตาม อรรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ (2529) ได้ยืนยันผลการศึกษาวิจัยทั้งภาคสนามและเรือนเพาะชำว่า พืชผักจะดูดดึงแคดเมียมจากกากตะกอนได้น้อยกว่าการดูดดึงจากเกลือแคดเมียมคลอไรด์ที่เติมลงในดิน

2.2 ความเป็นพิษของโลหะหนัก

โลหะหนักเป็นสารพิษกลุ่มใหญ่ที่สุด และมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตมากที่สุด เพราะโลหะหนักต่าง ๆ ถูกนำพาเข้าในชีวิตรประจำวันในรูปแบบต่าง ๆ นั้นเอง โลหะหนักทำให้เกิดมลภาวะทั้งในอดีตและปัจจุบัน โดยขบวนการที่ความเข้มข้นในสิ่งมีชีวิต (Bio Concentration) โดยผ่านทางห่วงโซ่อาหาร (Food Chain) รวมทั้งการกระทบสัมผัสกับโลหะหนักโดยตรงจากการประกอบกิจกรรมบางอย่างหรืออาคารดำรงชีวิตรประจำวัน (ไมตรี สุทธิจิตต์, 2531) จึงปรากฏความเป็นพิษของโลหะหนักทั้งในคนและสัตว์อยู่เสมอ

ความเป็นพิษของโลหะหนักต่อพืชนั้น ส่วนใหญ่มักจะพบอาการคลอโรซิส (Chlorosis) ปรากฏขึ้นที่ใบ การเจริญเติบโตถูกยับยั้ง เช่น รากและใบไม่ขยายตัว หรือเกิดลักษณะผิดปกติตามส่วนต่าง ๆ โดยเฉพาะที่ใบอาจเกิดจุด แดง หรือเน่าเกิดขึ้น ลำต้น ช้อ และปล้องผิดปกติ

สำหรับความเป็นพิษต่อสัตว์และมนุษย์นั้น เกิดขึ้นทั้งในลักษณะพิษเฉียบพลัน (Acute poisoning) จากการได้รับโลหะหนักโดยตรงในปริมาณสูง และพิษเรื้อรัง (Chronic poisoning) เนื่องจากการได้รับโลหะหนักในปริมาณต่ำ ๆ แต่ได้รับเป็นระยะเวลาอันติดต่อกันตลอดจนการได้รับโลหะหนักผ่านทางโซ่อาหาร

โลหะหนักที่เป็นพิษแบ่งเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ตามความเป็นพิษต่อร่างกาย ได้ดังนี้

1. โลหะหนักที่ทําให้เกิดโรคเกี่ยวกับระบบหายใจ ส่วนใหญ่เป็นอนุภาคของโลหะหนักที่แขวนลอยในอากาศ ได้แก่ เหล็ก หังสเตน และไนโอเบียม
2. โลหะที่ทําให้เกิดโรคเกี่ยวกับอวัยวะภายใน เช่น ตับ ไตและหัวใจ โลหะที่เป็นพิษเหล่านี้ได้แก่ โครเมียม โมลิบดีนัม วานาเดียม นิกเกิล โคบอลต์ ทองแดง เงิน และแคดเมียม
3. โลหะที่เป็นพิษร้ายแรง จนเกินความสามารถที่รักษาให้หายได้โดยง่าย ได้แก่ พรอท ตะกั่ว แมงกานีส สารหนู และพลวง สารพิษกลุ่มนี้อาจเป็นพิษต่อระบบหายใจและระบบประสาทส่วนกลางด้วย การสะสมของสารพิษเหล่านี้มักเกิดจากการจับกับหมู่ซัลไฮดริล (-SH) ของโปรตีนภายในเซลล์อย่างแน่นหนายากที่จะขจัดหรือทำลายให้หมดไปในเวลาอันสั้น (ไมตรี สุทธิจิตต์, 2531)

ความเป็นพิษของโลหะหนักส่วนมากเกิดจากการรบกวนเมตาบอลิซึมของเซลล์ โดยรบกวนการทำงานของเอนไซม์ เช่น ซัลไฮดริลเอนไซม์ยึดจับกับกรดอะมิโนเข้ารวมกับเยื่อหุ้มเซลล์

ทําให้คุณสมบัติในการควบคุมการนำส่งสารชีวเคมีต่าง ๆ ของเซลล์เปลี่ยนแปลงไป และรบกวนการทํางานของเซลล์คือ ทําให้โครงสร้างหรือประจุไฟฟ้าของเซลล์ผิดปกติ

ดังนั้นอาจสรุปความเป็นพิษโดยทั่วไปของโลหะหนักต่อสัตว์และมนุษย์ได้ ดังนี้

1. ทําให้เซลล์ตาย เนื่องจากโลหะหนักมีผลรบกวนขบวนการเมตาบอลิซึมในเซลล์ ทําให้เกิดการเสื่อมสภาพ เซลล์บางพองเกิดช่องว่างภายใน ร่างกายจะเร่งสร้างเซลล์ใหม่ทดแทน ดังนั้นโลหะหนักหลายชนิดจึงสามารถกระตุ้นให้เกิดการสร้างเซลล์มากเกินไป ทําให้เกิดการเจริญของเนื้อเยื่อผิดปกติ

2. เปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการทํางานของเซลล์ ถ้าร่างกายได้รับโลหะหนักเป็นประจําแม้ในปริมาณที่ไม่ถึงขีดอันตรายก็ตาม ก็อาจมีผลทําให้โครงสร้างและการทํางานของเซลล์ผิดปกติและเสื่อมสภาพได้ ทําให้เกิดการสะสมของไขมันที่ตับ ไต เกิดความผิดปกติ จึงเกิดการบวมขึ้นเนื่องจากเกิดภาวะเสียสมดุลของสารอิเล็กโทรไลต์ในร่างกาย

3. ทําให้เกิดมะเร็ง มีรายงานว่าโลหะหนักบางชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogen) เช่น ตะกั่ว และนิกเกิล เป็นต้น

4. ทําให้เกิดความผิดปกติแก่ตัวอ่อนในครรภ์ โลหะหนักหลายชนิดมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของตัวอ่อน เช่น ทารกที่คลอดจากครรภ์มารดาที่ได้รับปรอทในปริมาณสูง จะมีลักษณะปัญญาอ่อน

5. ทําให้โครโมโซมผิดปกติ เช่น ตะกั่ว และปรอท ทําให้ออโตโซมหักขาดได้ โลหะหนักบางชนิดจึงอาจจัดว่าเป็นสารก่อกลายพันธุ์ (Mutagen) (WHO, 1982; ไมตรี สุทธิจิตต์, 2531: พิมพ์พรณ เกิดอุดม, 2532)

เหล็ก ทองแดง สังกะสี และแมงกานีส นอกจากจะจัดเป็นจุลธาตุอาหารของพืชแล้ว ยังจัดเป็นธาตุที่มีความจำเป็นแก่ร่างกายมนุษย์และสัตว์ ถ้ามีปริมาณในร่างกายอยู่ในระดับที่เหมาะสม สำหรับ เหล็ก ทองแดง และสังกะสี นั้น เป็นธาตุที่ร่างกายต้องการในปริมาณน้อย ส่วนแมงกานีสนั้นร่างกายมีความต้องการในปริมาณที่น้อยมาก

สำหรับ นิกเกิล ตะกั่ว และแคดเมียม นั้น จัดเป็นโลหะที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษโดยตรงของร่างกาย

ต่อไปจะได้อธิบายถึงความพิษของโลหะหนักทั้ง 7 ธาตุ ที่มีต่อ พืช สัตว์ และมนุษย์ ดังนี้

2.2.1 ความเป็นพิษของโลหะที่มีความจำเป็นต่อพืชสัตว์และมนุษย์

2.2.1.1 เหล็ก (Iron)

ความเป็นพิษต่อพืช

ความเป็นพิษของเหล็กต่อพืชนับว่าเป็นปัญหามาก โดยเฉพาะในดินนาข้าวที่มีน้ำขังราว 2-3 สัปดาห์ อาจทำให้ความเข้มข้นของเหล็กเพิ่มขึ้นจาก 0.1 ppm. ถึง 50-100 ppm. ได้ สำหรับความเป็นพิษต่อต้นข้าวพบว่าพบว่ามีลักษณะผิดปกติ เกิดจุดสีน้ำตาลเล็ก ๆ ซึ่งจะขยายตัวกลายเป็นสีน้ำตาลเหมือนกันทั้งใบ (Mengel และ Kirkby, 1982) ความเป็นพิษของเหล็กต่อข้าวยังมีผลทำให้เกิดการขาดโบตัสเซียม และเมื่อปริมาณโบตัสเซียมอออน (K^+) ไม่เพียงพอ รากข้าวก็จะยิ่งสูญเสียความสามารถในการออกไซด์ Fe^{2+} เป็น Fe^{3+} อีกด้วย (Tralldenier, 1973) จึงทำให้ความเป็นพิษของเหล็กยิ่งทวีสูงขึ้น

ความเป็นพิษต่อสัตว์และมนุษย์

แม้ว่าเหล็กจะเป็นธาตุที่จำเป็นต่อร่างกายก็ตามแต่ถ้าได้รับเหล็กมากเกินไปความต้องการก็จะทำให้เกิดความเป็นพิษได้ มนุษย์และสัตว์ทุกชนิดไม่มีการขับถ่ายธาตุเหล็กออกจากร่างกาย ดังนั้นความเป็นพิษของเหล็กจึงขึ้นกับปริมาณเหล็กที่มีอยู่เดิมในร่างกายด้วย โดยทั่วไป ความเป็นพิษของเหล็กเกิดจากการได้รับยาที่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบ หรือจากเหล็กที่สะสมอยู่ในอาหาร 5-10% ของเหล็กที่ร่างกายได้รับเข้าไป จะดูดซึมที่ลำไส้เล็ก ซึ่งเหล็กจะถูกดูดซึมได้ทั้งในรูป เฟอร์ริกอออน (Fe^{3+}) และเฟอร์รัสอออน (Fe^{2+}) (มาลินี ลัมภคา, 2523)

เหล็กเป็นสารพิษที่มีฤทธิ์กัดกร่อนเนื้อเยื่อ โดยจะกัดผนังลำไส้ ระบบย่อยอาหารส่วนบนจะมีเลือดออกมากและเสียน้ำ ความดันโลหิตต่ำ หลอดเลือดขยายตัว เนื่องจากการเกิดเฟอร์ริติน (Ferritin) เพิ่มขึ้นในกระแสโลหิต ระบบประสาทส่วนกลาง ถูกกดถ้าได้รับปริมาณสูงมาก เหล็กจะไปเกาะตามเนื้อเยื่อ โดยเฉพาะตับ ทำให้เกิดตับแข็งได้ (Dreisbrch, 1986)

อาการเรื้อรังของผู้ที่ได้รับเหล็กเป็นระยะเวลาต่อเนื่องกันนาน ๆ จะปรากฏอาการผิดปกติของเลือด ทำให้เซลล์เยื่อเหนียวเป็นพังพืดและตาย มีรายงานว่า การได้รับเหล็กในปริมาณสูงของชนบางเผ่าในอาฟริกาใต้ที่รู้จักกันว่า "Bantu Siderosis" ซึ่งพบมากในเพศชาย สาเหตุเนื่องจากการใช้ภาชนะที่เป็นเหล็กในการประกอบอาหาร ทำให้เหล็กไปจับอยู่ที่เซลล์ของตับ (Kupffer Cell) และตับอ่อน (Reticulo Endothelial Cells) รวมทั้งเซลล์ของไขกระดูก ในเอเชียมีโรค "Aschin-Bock" ที่เกิดจากการได้รับเหล็กเข้าร่างกายมาก เพราะการดื่มน้ำที่มีเหล็กสูง ทำให้เกิดอาการเกี่ยวกับข้ออักเสบ การหายใจเอาฝุ่นละอองของเหล็ก (Iron Oxide) เข้าไป จะทำให้เกิดอาการคล้ายกับบอดบวม และผู้ที่ทำงานสัมผัสกับฝุ่นเหล่านี้มีอัตราการตายด้วยมะเร็งในบอดสูง (พิมพ์รณ เกิดอุดม, 2532)

2.2.1.2 ทองแดง (Copper)

ความเป็นพิษต่อพืช

ในพืชหลายชนิดที่มีทองแดงในปริมาณสูง จะปรากฏความเป็นพิษต่อการเจริญเติบโต ซึ่งขึ้นกับความสามารถของทองแดงในการไล่ที่อิออนของโลหะอื่น ๆ และโดยเฉพาะเหล็กออกจากบริเวณที่แลกเปลี่ยนที่ของอิออนที่ราก ทำให้อาจเกิดการขาดธาตุเหล็กขึ้น อาการเป็นพิษจากทองแดงที่พบคือคลอโรซิส ซึ่งเป็นลักษณะของการขาดเหล็กนั่นเอง (Daniels et al., 1972) แต่แคลเซียมในปริมาณสูงก็สามารถช่วยลดความเป็นพิษของทองแดงได้ การยับยั้งการเจริญเติบโตของรากก็เป็นอีกอาการหนึ่ง จากความเป็นพิษของทองแดงที่เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว (Mengel และ Kirkby, 1982) ในพืชบางชนิดมีความสามารถในการสะสมทองแดงในระดับสูง ๆ ได้ เช่น 1,000 ppm. ของน้ำหนักแห้งพืช และพบว่าทองแดงสามารถรวมตัวกับกลุ่มอะมิโน (-NH₂) ของ Amino Acid และ Protein ได้ (Relly, 1969) ซึ่งเป็นเหตุผลที่อธิบายได้ว่าทำไมพืชบางชนิดจึงมีความทนทานต่อทองแดงได้

ผลตกค้างของการเติมทองแดงในดินจะน้อยลง ถ้าใช้ปุ๋ยในรูปสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน เนื่องจากการปลดปล่อยทองแดงค่อนข้างช้า ในสภาพการณ์จริงความเป็นพิษของทองแดงไม่ค่อยปรากฏมากนัก เนื่องจากทองแดงสามารถยึดเกาะกับอนุภาคดินได้ดีมาก ดังกล่าวแล้ว ความเป็นพิษจากทองแดงอาจพบได้ในดิน ซึ่งได้รับแร่ทองแดงจากแหล่งแร่หรือจาก

การใส่เกลือของทองแดงลงดินติดต่อกันเป็นระยะเวลาานาน ๆ (Mengel และ Kirkby, 1982) ในดินกรดจะพบความเป็นพิษจากทองแดงรุนแรง เนื่องจากทองแดงไม่สามารถยึดเกาะกับอนุภาคดินได้ และถูกพืชดูดดึงไปใช้ได้มาก ปัญหาความเป็นพิษของทองแดงจะปรากฏอย่างเฉียบพลันในดินซึ่งนาของเสียซึ่งมีทองแดงเป็นองค์ประกอบบาส่งดินอย่างต่อเนื่อง ความรุนแรงของพิษทองแดงที่เกิดขึ้นอย่างเฉียบพลันนั้น เนื่องจากอัตราการซึมลงไปในดินชั้นล่างของทองแดง เป็นไปได้ช้า (Dam Kofoed, 1980) ภาคตะกอนโดยเฉพาะอย่างยิ่งภาคตะกอนจากอุตสาหกรรมจะมีทองแดงสูงมาก ถ้านำมาใส่ลงดินอย่างต่อเนื่องอาจทำให้ปริมาณทองแดงในดินสูงขึ้น ถึงระดับที่เป็นพิษได้ พืชแต่ละชนิดได้รับอิทธิพลจากความเป็นพิษของทองแดงแตกต่างกันไป เช่น ถั่วฝักยาวเป็นพืชที่ไวต่อความเป็นพิษของทองแดงมาก นอกจากนี้ปริมาณทองแดงในพืชที่สูงพอสามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อสัตว์เคี้ยวเอื้องได้ (Mengel และ Kirkby, 1982)

ความเป็นพิษต่อสัตว์และมนุษย์

ทองแดงเป็นโลหะที่มีความจำเป็นต่อร่างกายคือ เป็นตัวร่วมในการสร้างฮีโมโกลบิน (Hemoglobin) และการทำงานของเอนไซม์ (Enzyme) บางชนิด คือ Peroxidase และ Cytochrome Oxidase นอกจากทองแดงจะใช้มากในอุตสาหกรรมทำเครื่องไฟฟ้าแล้ว ยังเป็นส่วนประกอบของยาหลายชนิด เช่น ยาที่ทำให้อาเจียน ยารักษาแผลจากไฟฟ้าไหม้ ยาถ่ายพยาธิ ยาฆ่าเชื้อรา หรือใช้เติมลงในอาหาร เช่น ถั่วกระป๋อง ผลไม้แช่อิ่ม บางอย่างเช่น มะดัน ในอาหารทะเลจากพวกหอยก็พบว่ามีทองแดงในปริมาณสูง การได้รับทองแดงในรูปคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) หรือคอปเปอร์ซีโตอาซิเนท ในปริมาณสูงอาจทำให้เสียชีวิตได้ (WHO, 1980; พิมพ์พรณ เกิดอุดม, 2532)

ทองแดงเข้าสู่ร่างกายได้ทั้ง ทางหายใจ ทางปาก และทางผิวหนัง ในสัตว์ที่ได้รับทองแดงอย่างเพียงพอจากทุ่งหญ้า และยังได้รับทองแดงที่ปะปนอยู่ในอาหารด้วย แต่ไม่ได้รับโบลินดินน้อยอย่างเพียงพอ จะทำให้สัตว์เคี้ยวเอื้อง โดยเฉพาะแกะ เกิดการสะสมทองแดงในตับจะพบอาการฮีโมลิติกไครซิส (Haemolytic Crisis) กล่าวคือทองแดงที่สะสมอยู่ในตับด้วยปริมาณสูงนั้น จะถูกขับออกมาจากตับมาอยู่ในกระแสโลหิต และทำให้เม็ดเลือดแตกตัวพบอาการดีซ่านและโลหิตจาง เนื้อไตและตับตาย จะพบอาการดังกล่าวได้ในแกะที่ได้รับทองแดงขนาดสูง 8-10 ppm. และได้รับโบลินดินน้อยกว่า 0.5 ppm. อาการขาดทองแดงจะมีลักษณะเหมือน

อาการพิษของโมลิบดีนัมและอาการขาดโมลิบดีนัมก็จะเหมือนอาการเป็นพิษของทองแดง ในอาหารที่มีทองแดง 25-30 ppm. แต่มีโมลิบดีนัมต่ำคือ ประมาณ 1-2 ppm. จะทำให้เกิดอาการพิษเนื่องจากทองแดงในสัตว์โดยเฉพาะแกะ ดังนั้น สัดส่วนของทองแดงต่อโมลิบดีนัมจึงมีความสำคัญมาก (มาลีณี ลัมภกา, 2523)

สำหรับคนถ้าได้รับทางการหายใจ จะทำให้เกิดจุก เป็นแผลที่เพดานปาก ถ้าได้รับโดยการกินปริมาณสูง จะคลื่นไส้อาเจียน ปวดท้อง เลือดออกในกระเพาะอาหาร ระบายน้ำ อาเจียนมีสีเขียว ปัสสาวะเป็นสีขาวมีสีเข้ม (อาจเสียชีวิตใน 4 ชั่วโมง) มีอาการทางประสาท ชัก เพื่อ เป็นอัมพาต ทรงตัวไม่ได้ มีอาการดีซ่าน ถ้าได้รับโดยดูดซึมผ่านทางผิวหนังจะทำให้เกิดอาการคัน ผื่นเป็นตุ่ม ถ้าเข้าตาจะทำให้เยื่อตาอักเสบ หนังตาบวม เป็นแผลที่ตาดำ บางรายมีการระคายเคืองเยื่อตาที่มีสีเขียวที่โคนผมและที่เหงือก สำหรับพิษเรื้อรังไม่ค่อยปรากฏให้เห็น (Thienes และ Haley, 1980; พิมพ์รวม เกิดอุดม, 2532)

2.2.1.3 สังกะสี (Zinc)

ความเป็นพิษต่อพืช

ความเป็นพิษต่อพืชของสังกะสี พบในพืชที่ปลูกบนดินที่มีแร่สังกะสีอยู่มาก แต่อย่างไรก็ตามพืชบางชนิดมีความทนทานและสามารถเจริญเติบโตได้ บางครั้งพบปริมาณสังกะสีตั้งแต่ 600-7,800 ppm. ของน้ำหนักแห้งพืชที่มีความทนทานสูง ความสามารถทนทานต่อความเป็นพิษของสังกะสีเกิดได้เนื่องจากพืชสามารถนำสังกะสีไปรวมอยู่ในผนังเซลล์ ใดก็ตาม พืชที่ได้รับพิษจากสังกะสีจะสูญเสียคลอโรฟิลล์ถึง 50% แม้ว่าจะไม่ปรากฏอาการเป็นพิษ (Mengel และ Kirkby, 1982) สังกะสีในปริมาณสูงจะลดการดูดตั้งของฟอสฟอรัส และเหล็ก (Adriano et al., 1971) ความเป็นพิษของสังกะสีมีผลลดการเจริญของราก และการขยายตัวของใบ ตามด้วยอาการคลอโรซิส (Mengel และ Kirkby, 1982)

ความเป็นพิษต่อสัตว์และมนุษย์

สังกะสีดูดซึมได้ดีในลำไส้เล็ก ถ้าได้รับสังกะสีในปริมาณสูง

ร่างกายจะกระตุ้นเยื่อเมือก (Mucosal Epithelium) ให้สังเคราะห์สารเมทาโลไธโอนิน (Metallothionein) ซึ่งเป็นโปรตีนที่มีส่วนประกอบของซิสเตอีน (Cysteine) อยู่มากเข้าจับกับสังกะสี และเกาะติดอยู่ตามผนังเซลล์ของลำไส้ และหลอดอาหาร แต่ถ้าได้รับสังกะสีในปริมาณสูงมาก ๆ ก็จะทำให้เกิดความเป็นพิษขึ้น ในสัตว์ทดลองที่ให้อาหารที่มีปริมาณสังกะสีสูงพบว่ามีความผิดปกติเกิดในระบบโลหิต และโลหิตจาง สำหรับในมนุษย์อวัยวะที่มีสังกะสีอยู่มากได้แก่ ตับ ไต ตับอ่อน กล้ามเนื้อ และระบบสืบพันธุ์เพศชาย ในเลือดพบในเซลล์เม็ดเลือดแดง การได้รับเกลือสังกะสีที่ละลายน้ำได้ดี โดยการกินเป็นปริมาณมากจะทำให้มีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ร่างกายขาดน้ำ ปวดท้องรุนแรง ท้องเดิน ถ้าได้รับเกิน 45 กรัม จะยิ่งเกิดพิษรุนแรง ทำให้ไม่รู้สึกรู้สึกร่างกายเป็นเลือด บัสสาวะน้อย น้ำตาลในเลือดต่ำ และเสียชีวิต การได้รับโดยการสูดดมในรูปไอสังกะสีหรือผงสังกะสี (Zinc Oxide) จะเกิดอาการปวดบวม มีไข้หนาวสั่น หายใจขัด ปวดเมื่อยกล้ามเนื้อ (Thienes และ Haley, 1980; พิมพ์รวม เกิดอุดม, 2532)

2.2.1.4 แมงกานีส (Manganese)

ความเป็นพิษต่อพืช

แมงกานีสในระดับความเข้มข้นสูง ๆ สามารถทำให้เกิดความเป็นพิษต่อพืชได้ อาการเป็นพิษของแมงกานีสนั้นจะปรากฏจุดสีน้ำตาลขึ้นโดยเฉพาะที่ใบแก่และคลอโรฟิลล์กระจายไปสม่ำเสมอ จุดสีน้ำตาลที่ปรากฏนั้นก็คือแมงกานีสออกไซด์ที่เกิดขึ้น นอกจากนี้แมงกานีสในระดับที่เป็นพิษยังลดการทำงานของเอนไซม์ Auxin ทั้งยังทำให้เกิดการขาดเหล็กในพืชอีกด้วย (Mengel และ Kirkby, 1982)

ในดินกรดที่มีปริมาณแมงกานีสในรูปที่สามารถนำเอาไปใช้ประโยชน์ได้สูง เป็นไปได้ที่พืชจะสามารถดูดดึงแมงกานีสได้ถึง 1,000 ppm. ของแมงกานีสในรูปนี้เท่านั้นแก่พืช สำหรับดินที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อผลผลิตเช่นนี้พบได้บ่อย แต่พืชโดยเฉพาะในเขตร้อนมีความทนทานต่อความเป็นพิษของแมงกานีสได้ Foy (1976) กล่าวว่าดินจะมีแมงกานีสทั้งหมดสูงเมื่อ pH อยู่ในช่วง 5.0-5.5 ซึ่งแมงกานีสจะสามารถละลายออกสู่สารละลายดินจนถึงระดับความเข้มข้นที่เป็นพิษได้ แต่พืชบางชนิดสามารถทนได้ก็เพราะมีอัตราการดูดดึงแมงกานีสช้า (Brown et al., 1972)

ความเป็นพิษต่อสัตว์และมนุษย์

แมงกานีสเป็นธาตุที่มีความจำเป็นต่อร่างกายเช่นเดียวกับ เหล็ก ทองแดง และสังกะสี แต่ร่างกายต้องการแมงกานีสในปริมาณที่น้อยมาก แมงกานีสเป็นตัวร่วมใน ขบวนการที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของ เอนไซม์ที่สำคัญหลายชนิด และช่วยในการสังเคราะห์กรดไขมัน (Fatty Acid) แมงกานีสมีมากในผัก เมล็ดที่กำลังงอก ในทางอุตสาหกรรมมาใช้เป็นส่วนประกอบ ของถ่ายไฟฉาย (MnO_2) ผลิตสี พอกหนัง ทาปุ๋ย และผสมอยู่ในอาหารสัตว์ ในทางการแพทย์ ใช้เป็นส่วนผสมของยาฆ่าเชื้อโรค เช่น ค่างทับทิม แมงกานีสเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งปะปนมาทาง อาหาร และน้ำ ตลอดจนการสูดดมไอและฝุ่นของแมงกานีสไดออกไซด์ (WHO, 1980; พิมพ์พรณ เกิดอุดม, 2532)

ความเป็นพิษของแมงกานีสส่วนใหญ่มักจะ เกิดในลักษณะที่เป็นพิษสะสม เรื้อรัง ทำให้ร่างกายและจิตพิการแต่ไม่ถึงตาย ส่วนมากจะใช้เวลาสะสมนานอย่างน้อยสามเดือน เข้าใจว่าแมงกานีส (Mn^{2+}) ที่เข้าไปในร่างกายจะถูกพาไปสะสมอยู่กับหมู่ $-SH$ ของโปรตีนใน เซลของระบบประสาทและสมอง เพราะแมงกานีสทำให้เกิดการฝ่อของสมอง (Brain Atrophy) มีอาการปวดหัว ง่วงนอน ซึมเศร้า มีตะคริวที่ขา มีการโต้ตอบทางประสาท (Tendon Reflex) เพิ่มขึ้น มีอารมณ์แปรปรวน และมีใบหน้าตึงเครียด ขาดการยืดหยุ่นแฉ่งแฉ่วส แมงกานีสยังจัดเป็นทั้ง สารก่อมะเร็ง (Carcinogen) และสารก่อกลายพันธุ์ (Mutagen) อีกด้วย (ไมตรี สุทธิจิตต์, 2531)

2.2.2 ความเป็นพิษของโลหะหนักที่เป็นพิษโดยตรงต่อพืช สัตว์ และมนุษย์

2.2.2.1 นิกเกิล (Nickel)

ความเป็นพิษต่อพืช

โดยทั่วไปผลระยะยาวของนิกเกิลในระดับความเข้มข้นต่ำ ๆ ต่อ พืชมักไม่ปรากฏความผิดปกติให้เห็นเด่นชัด ความเป็นพิษของนิกเกิลต่อพืชในกรณีที่ได้รับใน ปริมาณสูงคือ จะมีอาการคลอโรซิส และใบ มีลักษณะผิดปกติ รากไม่เจริญเติบโตและเกิดการ

เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของส่วนต่าง ๆ ของพืช จนเซลล์ตายและเหี่ยวแห้งไปมากที่สุด (Prokipcak และ Ormzod, 1986) นอกจากนี้ยังพบผลจากการเสริมฤทธิ์ของนิกเกิลกับโลหะอื่น ๆ เช่น ทองแดงที่มีต่อการเจริญเติบโตของต้นถั่ว สำหรับข้าวบาเลย์พบการเสริมฤทธิ์กันของนิกเกิลกับ ธาตุโลหะอื่น ๆ เช่น ลิเทียม สังกะสี ทองแดง และแคดเมียม โดย Wallace et al., (1980a) ได้ทดลองปลูกข้าวบาเลย์ในดินที่เติมโลหะ 5 ธาตุ คือ ลิเทียม (13 ppm. ของ น้ำหนักดินแห้ง) สังกะสี (200 ppm.) ทองแดง (200 ppm.) นิกเกิล (100 ppm.) และแคดเมียม (100 ppm.) โดยเติมธาตุเหล่านี้แยกกัน พบว่าไม่มีการลดลงของผลผลิตเลย สำหรับแต่ละหน่วยทดลองที่เติมธาตุแต่ละชนิด แต่ถ้าผสมธาตุทั้ง 5 ชนิด ด้วยความเข้มข้นเดิมลง ในดินพร้อมกัน ปรากฏว่าผลผลิตของข้าวบาเลย์ลดลงถึง 40% ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากธาตุเหล่านี้ ทำให้การนำฟอสฟอรัสมาใช้ได้น้อยลง ในทางตรงกันข้ามพบว่าแคลเซียมสามารถลดความเป็นพิษ ของนิกเกิลได้ ตัวอย่างเช่น ถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายอาหารที่มีนิกเกิล 1.2 มิลลิกรัม/ลิตร ผลผลิตของส่วนใบจะลดลงถึง 74% เมื่อมีแคลเซียมละลายอยู่เพียง 4 มิลลิกรัม/ลิตร แต่พบว่า ผลผลิตจะลดลงเพียง 45% ถ้ามีแคลเซียมอยู่ 400 มิลลิกรัม/ลิตร (Wallace et al., 1980b)

แม้ว่าปริมาณนิกเกิลที่เกิน 50 ppm. ของน้ำหนักแห้งพืช จะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อพืชขึ้นได้ (NAS, 1975) แต่ก็มีพืชบางชนิดมีความทนทานต่อพิษของนิกเกิล คือ สามารถขึ้นได้บนดินที่มีนิกเกิลสูง และสะสมนิกเกิลในปริมาณมากได้

ความเป็นพิษต่อสัตว์และมนุษย์

แม้จะพบว่านิกเกิลเป็นธาตุอาหารพืช ที่จำเป็นในการเร่งให้เกิด การทำงานของ เอนไซม์ในพืชและแบคทีเรียบางชนิดก็ตาม แต่สำหรับสัตว์และมนุษย์ นิกเกิลจัดเป็น โลหะที่ทำให้เกิดความเป็นพิษได้ถ้าได้รับในปริมาณที่ก่อให้เกิดอันตราย

จากการประเมินของ Schmidt และ Andren (1980) ชี้ให้เห็นถึงแหล่งสำคัญของขนาดของการแพร่กระจายของนิกเกิลว่า ได้แก่การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เหมือนแร่ โรงกลั่นน้ำมัน โรงงานถลุงแร่ และจากการเผาภาคตะกอนน้ำเสีย ซึ่งจากการ ประเมินผลการเผาภาคตะกอนพบว่า 1% ของนิกเกิล ซึ่งเป็นองค์ประกอบในภาคตะกอนที่ถูกนำไป เผาจะแพร่กระจายออกมากับควัน (Gerstke และ Albrinck, 1982) ในเขตเมืองและชนบท

ทั่วไปจะมีนิกเกิลในอากาศอยู่ในช่วง 5-35 ng/m³ (Bennett, 1984) ในน้ำดื่มพบจากแหล่งผลิตน้ำดื่ม 969 แห่ง ในสหรัฐอเมริการะหว่างปี 1965-1970 มีนิกเกิลปะปนอยู่ 4.8 ไมโครกรัม/ลิตร (NAS, 1975) สำหรับในอาหาร Ellen et al., (1978) ได้ตรวจปริมาณนิกเกิลในอาหารของประเทศเนเธอร์แลนด์พบว่า ในผลิตภัณฑ์ส่วนมากมีนิกเกิลปะปนอยู่ด้วยกว่า 0.5 ppm. ของน้ำหนักสด ยกเว้นผลิตภัณฑ์ประเภทโกโก้ และพืชที่มีเปลือกเมล็ดแข็งบางชนิด มีนิกเกิลปะปนอยู่ได้ถึง 9.8 ppm. และ 5.1 ppm. ตามลำดับ Smart และ Sherlock (1987) รายงานว่าใน เนื้อสัตว์ ผลไม้ และผัก ในประเทศอังกฤษ อาจมีนิกเกิลได้มากกว่าหรือเท่ากับ 0.2 ppm. ของน้ำหนักสด นอกจากนี้ในสัตว์น้ำพวกหอยและปลาอาจมีการสะสมนิกเกิลในปริมาณสูงได้ถ้าความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำมีค่าสูง

เนื่องจากพบนิกเกิลในพืชหลายชนิด ดังนั้นสัตว์กินพืชจึงอาจได้รับนิกเกิลโดยผ่านทางโซอาหาร ระดับนิกเกิลที่เพิ่มขึ้นในพืชผักสามารถทำให้ระดับนิกเกิลในสัตว์กินหญ้า (Grazing Animals) และสัตว์ที่เป็นผู้ล่า สูงขึ้นได้ ตัวอย่างเช่น พบว่าระดับนิกเกิลในสัตว์เคี้ยวเอื้องจะสูงกว่าในสัตว์อื่น ๆ เช่น สุนัข เนื่องจากนิกเกิลที่สะสมในหญ้าและพฤติกรรมการกินอาหารของสัตว์ที่แตกต่างกันและพบการสะสมของนิกเกิลในอวัยวะต่าง ๆ ของสัตว์ที่กินหญ้าที่อาศัยอยู่ใกล้แหล่งอุตสาหกรรมที่แพร่กระจายนิกเกิลพบการสะสมในกระดูกซี่โครงและไต ในช่วง 1.13-1.50 ppm และ 0.47-0.86 ppm. ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (Groppe et al., 1980)

นิกเกิลและสารประกอบของนิกเกิลสามารถถูกดูดซึมผ่านระบบหายใจ ระบบทางเดินอาหาร และทางผิวหนัง นิกเกิลเข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจโดยเฉลี่ยวันละ 0.1-0.7 ไมโครกรัม ปริมาณในอาหารและน้ำดื่มไม่ควรมีนิกเกิลเกิน 0.5 ppm. (ของน้ำหนักสด) และ 10 ไมโครกรัม/ลิตร ตามลำดับ การได้รับนิกเกิลจากอาหารเป็นประจำจะทำให้มีโอกาที่จะเกิดการสะสมนิกเกิลขึ้น โดยเฉพาะที่เฉลี่ยของหลาย ๆ ประเทศ ผู้บริโภคจะได้รับนิกเกิลจากอาหารวันละ 100-300 ไมโครกรัม (WHO, 1991)

การรับนิกเกิลเข้าสู่ร่างกายโดยผ่านระบบหายใจ และระบบทางเดินอาหาร นับว่าเป็นทางสำคัญในการได้รับพิษของนิกเกิล หากเปรียบเทียบการดูดซึมของนิกเกิลเข้าสู่ร่างกายแล้วพบว่านิกเกิลคาร์บอนิลจะถูกดูดซึมได้ดีที่สุด รองลงมาได้แก่ สารประกอบของนิกเกิลที่ละลายน้ำ (Soluble Nickel Compounds) และสารประกอบนิกเกิลที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble Nickel Compounds) นิกเกิลจะถูกดูดซึมเข้ากระแสโลหิตโดยจับกับอัลบูมิน (Albumin) โกลบูลิน (Globulin) และกรดอะมิโน (Amino Acid) และสะสมมากที่สุดที่ไต

ปอด ตับ และสำหรับสมองจะพบนิกเกิลในรูปนิกเกิลคาร์บอนิลในปริมาณสูง และยังพบนิกเกิลในสิ่ง
ที่ร่างกายขับถ่ายหรือหลั่งออกมา (WHO, 1991)

อาการเริ่มแรกที่เกิดจากพิษของนิกเกิล คือ ปวดศีรษะส่วนหน้า
ง่วงนอน บางทีมีอาการ คลื่นไส้ อาเจียน มีอาการปวดหลัง ตัวเขียว ปวดที่หน้าอก ไอ หายใจ
ไม่สะดวก อ่อนเพลีย ปวดท้อง และท้องร่วง (ไมตรี สุทธิจิตต์, 2531) สัตว์ที่ได้รับนิกเกิลมาก
เกินไปจะแสดงอาการนี้หนักลด โลหิตจาง และมีโอกาสแท้งลูกได้สูง พิษเฉียบพลันของนิกเกิลมัก
เกิดจากนิกเกิลคาร์บอนิลซึ่งเป็นไอระเหย จะมีผลต่อปอดคือ ทำให้เกิดอาการปอดบวม (Pulmo-
nary Edema) ภายใน 4 ชั่วโมงหลังจากได้รับนิกเกิล ส่วนพิษเฉียบพลันของนิกเกิลในรูปสาร
ประกอบอื่นนั้นพบมีน้อย นอกจากนี้ยังพบว่านิกเกิลยับยั้งการสร้าง DNA ในสิ่งมีชีวิตส่วนมาก
(WHO, 1991)

2.2.2.2 ตะกั่ว (Lead)

ความเป็นพิษของพิษ

เนื่องจากพิษดูดซับตะกั่วได้น้อยเมื่อเทียบกับโลหะหนักอื่น ๆ เช่น
แคดเมียม หรือนิกเกิล ดังนั้นจึงไม่ค่อยปรากฏความเป็นพิษของตะกั่วจากดินสู่พืช นอกจากพบว่า
มีพืชบางชนิดสามารถสะสมตะกั่วในปริมาณสูงได้ แต่อย่างไรก็ตาม ความเป็นพิษของตะกั่วต่อพืช
ก็คือ ตะกั่วสามารถลดอัตราการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งยังไม่พบในสภาพการเพาะปลูกจริง
โดยมากพบความเป็นพิษดังกล่าว ในการทดลองปลูกพืชในสารละลายตะกั่วซึ่งย่อมน่าจะมีอัตราการ
ดูดซับตะกั่วจากสารละลายได้ดีกว่าการที่พืชจะดูดซับตะกั่วจากดิน

ความเป็นพิษต่อสัตว์และมนุษย์

พบตะกั่วได้ทั้งใน อากาศ น้ำ ดิน พืช และ เครื่องอุปโภคบริโภค
ในครัวเรือน ทำให้มีโอกาสที่ได้รับสารตะกั่วได้มาก เช่น ในแบตเตอรี่รถยนต์ น้ำมันบางชนิด
ท่อต่าง ๆ สีทาสีบ้านมีตะกั่วถึง 50% น้ำมันที่ใส่กับรถยนต์จะถูกเผาผลาญไปได้ตะกั่วในรูป
เตตราเอทิลถึง 30 % ในหน่วยริมถนนอาจพบตะกั่วในปริมาณสูงและถ่ายทอดไปสู่สัตว์ที่กินหญ้าได้

ตัวอย่าง เช่น จากการสำรวจห้วยาริมถนนพบตะกั่วสะสม 2.55 ppm. ถ้าบริโภค 1 ตัวกินหญ้าประมาณ 22.5 กรัม/กิโลกรัม/วัน หากเป็นหญ้าที่มีตะกั่วค้างสะสมอยู่แล้วโคจะได้รับตะกั่วประมาณ 1-5.7 ppm. ของน้ำหนักสัตว์ นอกจากนี้ตะกั่วในรูปอาร์ซีเนทยัง เป็นส่วนผสมของสารป้องกันและกำจัดศัตรูพืชและสัตว์หลายชนิด (มาลินี ลิ้มภักดา, 2523)

ตะกั่วสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งผ่านระบบทางเดินอาหาร ระบบหายใจ และทางผิวหนัง สำหรับโดยทางการกินไม่ว่าตะกั่วจะอยู่ในรูปใด กรดในกระเพาะอาหารสามารถละลายได้ แล้วถูกดูดซึมได้ดีที่บริเวณดูโอดินัม (Duodenum) คือ ส่วนต้นของลำไส้เล็ก จากนั้นตะกั่วจะถูกพาผ่านทางเส้นเลือดเข้าสู่ตับ บางส่วนจะถูกขับออกทางน้ำดี และอุจจาระ ตับโตเป็นอวัยวะที่เก็บตะกั่วไว้มากที่สุด แต่ต่อมาตะกั่วจะเคลื่อนที่ไปตามกระแสเลือดไปเกาะสะสมที่กระดูกในสภาพเกลือที่ละลายยาก เช่น ตะกั่วฟอสเฟต $[Pb_3(po_4)_2]$ กระดูกก็จะสะสมตะกั่วเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตะกั่วสามารถขับออกจากร่างกายได้ทั้งทางปัสสาวะ (76% ของที่ได้รับ) ทางอุจจาระ (16%) และทางผิวหนัง (8%) หากปริมาณตะกั่วในเลือดสูงถึง 0.8 ppm. จะปรากฏอาการเป็นพิษเริ่มแสดงให้เห็น และถ้ามีมากกว่านี้ สมอและตับจะพิการถึงแก่ชีวิตได้ (WHO, 1977; มาลินี ลิ้มภักดา, 2523, อรุณี อานสกุล, 2528; ไมตรี สุทธิจิตต์, 2531)

ตะกั่วมีผลต่ออวัยวะสำคัญของร่างกายคือ

1. ผลต่อระบบหมุนเวียนโลหิต

ตะกั่วรวมตัวได้ดีกับเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์เปราะบาง เม็ดเลือดแดงถูกทำลายและอายุสั้นลง จึงทำให้เกิดโรคโลหิตจางทั้งในคนและสัตว์เนื่องจากตะกั่วทำให้เม็ดเลือดแดงแตกง่าย และยับยั้ง ATPase ที่อยู่บนเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้เม็ดเลือดแดงขาดพลังงานจึงมีอายุสั้น และตะกั่วยังยับยั้งการสร้างฮีม (Heme) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของฮีโมโกลบิน (Hemoglobin) การขนส่งออกซิเจนโดยเม็ดเลือดจึงลดลง

2. ผลต่อระบบประสาทและสมอง

ตะกั่วทำลายหลอดเลือดฝอยในสมอง ทำให้เลือดไปเลี้ยงสมองไม่พอ ทำให้เกิดการแพชของหลอดเลือดที่ไปเลี้ยงส่วนสมอง อาการทางสมองที่เกิดขึ้นได้แก่ ปวดศีรษะ อ่อนเพลีย ง่วงนอน ซึม กระวนกระวาย ปัญญาอ่อน ความจำเสื่อม นอนไม่หลับ ประสาทหลอน อาจเพ้อคลั่ง วิงเวียน ชัก อัมพาต หมดสติ อาจมีอาการปวดท้องอย่างรุนแรง เนื่องจากความผิดปกติทางระบบประสาท

3. ผลต่อไต

ถ้าระดับตะกั่วในเลือดมากกว่า 100 ไมโครกรัมเปอร์เซ็นต์ จะก่อให้เกิดการทลายเซลล์ของท่อเล็กในไต (Renal Tubule) ทำให้ไตขับกรดอะมิโน น้ำตาล และเกลือฟอสเฟต ออกทางปัสสาวะมากขึ้น แต่จะขับกรดยูริก (Uric Acid) ได้น้อยลง จึงทำให้กรดยูริกสะสมในเลือดและตกผลึกตามโอกาสต่าง ๆ จึงมีอาการปวดตามข้อมือข้อเท้า ผู้ที่ได้รับ ตะกั่วเป็นระยะเวลานาน ๆ มากกว่า 10 ปีขึ้นไป จะมีอาการความดันโลหิตสูง โลหิตเป็นพิษและ เนื้อเยื่อไตแข็งกระด้าง (Nephrosclerosis)

4. ผลต่ออวัยวะอื่น ๆ

ตะกั่วทำให้ตับเกิดการเปลี่ยนแปลงและเกิดเนื้อตาย ผนัง กระเพาะอาหารและลำไส้ก็ได้รับผลเช่นกัน และมีรายงานว่าตะกั่วทำให้สัตว์แท้งและผสมไม่ติด

5. ผลต่อสารพันธุกรรม

ตะกั่วรบกวนการทำงานของ DNA และ RNA โดยจับกับ ไฮดรอกซิล (-OH) ของฟอสเฟตในกรดนิวคลีอิกได้อย่างหนาแน่น จึงถือว่าตะกั่วเป็นสารก่อการ กลายพันธุ์ และสารก่อมะเร็งชนิดหนึ่ง (ไมตรี สุทธิจิตต์, 2531)

2.2.2.3 แคดเมียม (Cadmium)

ความเป็นพิษต่อพืช

แคดเมียมก่อให้เกิดความเป็นพิษทั้งในพืชและสัตว์ ในพืชซึ่งได้รับ แคดเมียมในปริมาณสูงจะมีผลรบกวนกลไกต่าง ๆ ของเซลล์ และเป็นเหตุให้เกิดอาการคลอโรซิส ขึ้น (Mengel และ Kirkby, 1982) ปัญหาการสะสมของแคดเมียมในพืชอาจมีผลต่อมนุษย์ซึ่ง เป็นผู้บริโภคได้ ในภาคตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียอาจพบแคดเมียมในช่วง 10-150 ppm. ของ ภาคตะกอนแห้ง (Berrow และ Webber, 1972) และภาคตะกอนจากบางแหล่ง เช่น ภาคตะกอน จากการบำบัดน้ำเสียชุมชนได้ถูกนำมาใช้กันมากในพื้นที่เกษตรกรรม ปริมาณปกติของแคดเมียมในพืช อยู่ในช่วง 0.1-1.00 ppm. ความเป็นพิษในมนุษย์จะเกิดขึ้นจากการบริโภคพืช ซึ่งมีปริมาณ แคดเมียมสูงเกิน 3 ppm. ติดต่อกันเป็นประจำ (Mengel และ Kirkby, 1982)

ความเป็นพิษต่อสัตว์และมนุษย์

แคดเมียมเป็นโลหะที่ใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น ใช้ในการผลิตพลาสติก ใช้เป็นขั้วแบตเตอรี่ ใช้ฉาบโลหะ เคลือบกระเบื้องบรรจุภัณฑ์หรืออาหาร ซึ่งถ้ามีฤทธิ์เป็นกรดก็สามารถละลายแคดเมียมออกมาได้ ใช้ทำสีทาบ้าน สีผสมแก้ว ทำหลอดไฟ ผลิตยาฆ่าแมลง ทำอาวุธสงครามพวกระเบิดควัน ใช้เป็นตัวดูดซึมนิวตรอนในงานทางนิวเคลียร์ ทางวงการแพทย์ใช้อุดฟัน (Amalgams) ในเครื่องสำอางค์ใช้เป็นตัวยान้ำยาสระผม จึงเห็นได้ว่าแคดเมียมมีโอกาสนับเป็นอันตรายภาวะแวดล้อมได้สูง โดยเฉพาะแหล่งน้ำปลาและหอยบางชนิดเช่น หอยแครง หอยนางรม และหอยแมลงภู่ มีแคดเมียมสูงตั้งแต่ 100-1,000 ไมโครกรัม/กิโลกรัม (ppb.) (WHO, 1980; พิมพ์ธรรม เกิดอุดม, 2532)

ความเป็นพิษของแคดเมียมได้เคยปรากฏขึ้นในญี่ปุ่นซึ่งเป็นที่ทราบกันดีคือ ทำให้เกิดโรคอิไต-อิไต (Itai-Itai Disease) มีอาการกระดูกและไตพิการ ความดันโลหิตสูง และทำให้มีผู้เสียชีวิตถึง 280 คน เนื่องจากการบริโภคข้าวและพืชซึ่งได้รับแคดเมียมจากการปล่อยน้ำเสียของโรงงานถลุงแร่เหล็ก โรงงานผลิตทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี ลงสู่ไร่นาที่ปลูกข้าวและสวนพืชผักต่าง ๆ ซึ่งทำให้เกิดการสะสมแคดเมียมในข้าวและน้ำมันถั่วเหลืองถึง 0.4-3.36 ppm. (ไมตรี สุทธิจิตต์, 2531)

แคดเมียมเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งผ่านระบบหายใจและทางผิวหนัง การได้รับโดยผ่านระบบทางเดินอาหารแคดเมียมจะถูกดูดซึมได้ประมาณ 8% ในรูป Cd^{2+} เมื่อเข้าสู่กระแสโลหิต Cd^{2+} ส่วนมาก (84%) จะถูกนำไปสะสมที่ ไตและตับ และกระดูก ตลอดจนเนื้อเยื่อต่าง ๆ ทำให้มีการบวม (Hypertrophy) ของไตและหัวใจ เข้าใจว่าแคดเมียมคงไปรวมกับหมู่ซัลไฮไดรล (-SH) ในโปรตีนของเซลล์ต่าง ๆ เช่น ในหน่วยกรองและหลอดไต จึงทำให้หน้าที่ของไตเสีย และแคดเมียมทำให้เกิดความดันโลหิตสูงขึ้น ด้วยการได้รับแคดเมียมเพียง 10^{-8} กรัมในเลือด ก็จะทำให้ความดันเลือดสูงขึ้นทันที แต่แคดเมียมไม่เป็นสารก่อการกลายพันธุ์หรือสารก่อมะเร็งแต่อย่างใด (ไมตรี สุทธิจิตต์, 2531)

2.3 วิธีการประเมินความเป็นพิษ

2.3.1 วิธีทดสอบความเป็นพิษ

โดยทั่วไป "ความเป็นพิษของสาร" (Toxicity of Substance) นิยามไว้ว่า คือความสามารถในการที่สารนั้นจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดอันตรายกับสิ่งมีชีวิต (NAS/NRC, 1970; Sanockij, 1970) สารที่มีความเป็นพิษสูงจะสามารถทำลายสิ่งมีชีวิตได้โดยได้รับเข้าไปในร่างกายแม้เพียงปริมาณเล็กน้อย ส่วนสารที่มีความเป็นพิษน้อยจะไม่ทำให้เกิดอันตรายนอกจากจะได้รับเข้าไปในปริมาณสูง ดังนั้นการจะกล่าวถึงความเป็นพิษจึงต้องเปรียบเทียบกับปริมาณสารที่ได้รับหรือดูดซึมเข้าไป (WHO, 1978)

การทดสอบความเป็นพิษของสารพิษชนิดใดชนิดหนึ่งก่อนนำมาใช้ประโยชน์เป็นสิ่งที่มีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในการทดสอบนั้นควรวางวิธีการหลาย ๆ วิธีเพื่อความแน่นอนและความมั่นใจในผลที่ได้ ค่าที่ประเมินได้ในแต่ละวิธีจะแสดงความเป็นพิษในลักษณะที่แตกต่างกันตามชนิดของสัตว์ทดลอง ตลอดจนทั้งสภาพการทดลองที่แตกต่างกันด้วย (มาลีณี ลัมภคา, 2527) วิธีการทดสอบอาจทำได้ เช่น

1. พิจารณาจากค่า LD_{100} และ LD_{50} ซึ่งเป็นค่าที่บอกปริมาณของวัตถุมีพิษต่อน้ำหนักตัวที่ทำให้สัตว์ทดลองตายทันที 100% และ 50% ตามลำดับ โดยการให้เพียงครั้งเดียว LD_{50} หรือ median lethal dose นั้น เป็นค่าที่นิยมใช้ในการทดสอบความเป็นพิษเพื่อจำแนกความเป็นพิษของสารว่ามีความรุนแรงมากน้อยเพียงใด ทั้งนี้เป็นการวัดปริมาณของวัตถุมีพิษที่ทำให้สัตว์ตาย หรือยังมีชีวิตอยู่เท่านั้น ไม่ได้วัดการตอบโต้ที่จะเกิดโดยปฏิกิริยาทางชีวเคมีในร่างกาย อาจจำแนกสารต่าง ๆ ที่ต้องการทราบความเป็นพิษโดยอาศัยค่า LD_{50} เป็นเกณฑ์ได้ ดังตารางที่ 2.1

นอกจากค่า LD_{50} แล้ว บางครั้งอาจประเมินความเป็นพิษจากค่า TD_{50} (Median Toxic Dose) ซึ่งหมายถึงปริมาณของสารพิษต่อน้ำหนักตัวสัตว์ที่สามารถทำให้สัตว์ทดลองแสดงอาการเจ็บป่วยโดยไม่ถึงตาย 50% ของจำนวนสัตว์ทดลองที่ใช้ทั้งหมด

อย่างไรก็ตาม สารพิษจะออกฤทธิ์ในสัตว์แต่ละชนิดมากน้อยแตกต่างกัน ปริมาณที่ทำให้สัตว์ทดลองชนิดหนึ่งตายอาจไม่ทำให้สัตว์อีกชนิดหนึ่งหรือมนุษย์ตายได้ ค่าโดยประมาณที่พอเชื่อถือได้ในคนคือค่า MLD (Minimum Lethal Dose) ซึ่งเป็นค่าของปริมาณที่น้อยที่สุดที่จะ

ทำให้คนตายได้ทันทีโดยที่คนที่มีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม เป็นเกณฑ์ (มาลินี ลีหมอกดา, 2527) จากค่า MLD ของสารพิษในคนอาจจำแนกสารพิษออกได้ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 การจำแนกสารพิษตามขนาดที่ทาให้สัตว์ทดลองตาย 50% (LD₅₀)
(อรุณี อานสกุล, 2528)

Class of poisons	LD ₅₀ (oral,mg/Kg)	LD ₅₀ (Inhalation 4 hrs,ppm)	LD ₅₀ (Dermal,mg/kg)
Extremely toxic (พิษร้ายแรง)	<5	<10	<5
Highly toxic (พิษมาก)	5-50	10-100	5-50
Moderately toxic (พิษปานกลาง)	50-500	100-1,000	5-350
Slightly toxic (พิษอย่างอ่อน)	500-5,000	1,000-10,000	350-3,000
Practically non-toxic (ไม่ค่อยเป็นพิษ)	5,000-15,000	10,000-100,000	3,000-25,000
Harmless (ไม่เป็นพิษเลย)	>15,000	>100-000	>25,000

ตารางที่ 2.2 การจำแนกสารพิษตามปริมาณที่น้อยที่สุดที่ทำให้คนตายทันที (MLD)
(ไมตรี สุทธิจิตต์, 2522)

ชนิดของสารพิษ	MLD (ต่อน้ำหนักตัว)	ตัวอย่างสารพิษ
พิษร้ายแรง	<1 - มก./กก.	อาฟล่าทอกซิน ไดออกซิน
พิษมาก	1-50 มก./กก.	นิโคติน ดีจิตทอกซิน
พิษปานกลาง	50-500 มก./กก.	ดีดีที ไชยานินด์ พรอท ตะกั่ว สารหนู สตริกนีน พาราไธออน
พิษอย่างอ่อน	0.5-5 กรัม/กก.	ออกซาเลท ซิลเวอร์ไนเตรท
ไม่ค่อยเป็นพิษ	5-15 กรัม/กก.	คอปเปอร์ซัลเฟต โบตัสเซียมไนเตรท
ไม่เป็นพิษเลย	>15 กรัม/กก.	โรตีโนนไพรีทริน ควินิน

2. คุณภาพการเปลี่ยนแปลงของอวัยวะส่วนต่าง ๆ และการเกิดพยาธิสภาพ
ในสัตว์ทดลอง ที่ได้รับวัตถุพิษเข้าไปอาจทดลองให้ขนาดสูง ๆ มีเพียงครั้งเดียว หรือให้ซ้ำ ๆ
หลาย ๆ ครั้งติดต่อกันเป็นเวลานานหลายวันหรือหลายเดือนและอาจนานเป็นปี

3. ทดสอบดูความเป็นพิษโดยเฉพาะในรูปแบบต่าง ๆ กัน เช่น ความเป็น
สารก่อมะเร็ง ความเป็นสารก่อการกลายพันธุ์ และความเป็นสารก่อให้เกิดลูกวิรูป เป็นต้น
(มาลีสมิโกคา, 2527)

2.3.2 การทดสอบความเป็นพิษทางชีวภาพ

การทดสอบความเป็นพิษทางชีวภาพของสารพิษใด ๆ นั้น ทำได้โดยใช้สัตว์
เลี้ยงลูกด้วยนมเป็นสัตว์ทดลองแล้วนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่อาจเกิดขึ้นในคน ใน
การทดสอบความเป็นพิษของสารแต่ละตัว ทำได้โดยใช้ปริมาณของสารที่ต้องการทดสอบด้วยขนาด

ต่าง ๆ กัน ตั้งแต่น้อยไปมาก และเวลาของการที่สัตว์ทดลองได้รับสารแตกต่างกัน แล้วสังเกตความเป็นพิษที่เกิดขึ้น หรือที่เรียกว่าการตอบโต้ที่ได้จากสารพิษในขนาดต่าง ๆ กัน (Response) ซึ่งเกิดขึ้นโดยอาศัยหลักการที่ว่า สารเคมีจะออกฤทธิ์ต่อเซลล์มีชีวิต โดยทำปฏิกิริยากับสารใดสารหนึ่งหรือทำปฏิกิริยากับส่วนใดส่วนหนึ่งของเซลล์ ปฏิกิริยาทางชีวเคมีทั้งหมดที่เกิดขึ้นในร่างกายก็คือ ความเป็นพิษ หรือการตอบโต้ที่ได้จากสารพิษนั่นเอง คืออันที่ลุดจะได้รับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารพิษ (Dose) กับการตอบโต้ที่ได้จากสารพิษ (Response) ซึ่งจะชี้ความเป็นพิษมากหรือน้อยของสารนั้น ๆ แต่เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดจากการวัดการตอบโต้ของสารพิษที่มีต่อเซลล์ เพราะกระทำได้หลายแบบแล้วแต่ว่าจะใช้สิ่งใดเป็นเกณฑ์ที่แสดงการตอบโต้ต่อสารพิษจึงมักประเมินความเป็นพิษของสารพิษจาก "Lethality" ที่เกิดจากสารพิษนั้นคือ พิจารณาจากอัตราการตายของสัตว์ทดลองที่ได้รับสารพิษนั้น ๆ และไม่ว่าจะวัดการตอบโต้ที่เกิดจากสารพิษโดยวิธีใดก็ตาม อันที่ลุดจะ ประเมินความพิษของสารพิษได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ และผลตอบโต้ที่เกิดขึ้น โดยดูจาก Dose-Response Curve ที่มีลักษณะ เฉพาะ ของสารแต่ละชนิด ซึ่งโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นรูปคล้ายตัว S คือ การตอบโต้ที่ได้จากการรับสารพิษจะแปรผันตามปริมาณของสารพิษที่ำให้าน ลักษณะที่อัตราการเพิ่มไม่สม่ำเสมอ (WHO, 1970; มาลินี ลิ้มภักดา, 2527)

2.3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเป็นพิษของสารพิษ

นอกจากที่กล่าวมาแล้วในการประเมินความเป็นพิษของสารพิษจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อความเป็นพิษอีกด้วย ปัจจัยดังกล่าวอาจจำแนกได้ดังนี้

2.3.3.1 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวสาร

(1) โครงสร้างทางเคมี การทราบโครงสร้างทางเคมีของสารนับว่าเป็นสิ่งจำเป็นในการประเมินถึงความเป็นพิษและยังมีประโยชน์ในการเลือกวิธีวิเคราะห์ที่เหมาะสมด้วย

(2) คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี เช่น คุณสมบัติในการละลายตัว การแตกตัว ความคงตัวของสาร การรวมตัวกับสารอื่น ๆ เช่น โบรตีน ทว่าให้เราสามารถที่จะคาดคะเนถึงพฤติกรรมของสารเมื่อเข้าสู่ร่างกายว่าจะมีการดูดซึมมากน้อยเพียงใด มี

การกระจายตัวในร่างกายอย่างไร และจะขับถ่ายออกจากร่างกายได้อย่างไร ตลอดทั้งสามารถที่จะคาดคะเนถึงปฏิกิริยาชีวเคมีที่จะเกิดขึ้นภายในเซลล์ด้วย

(3) สิ่งเจือปนในส่วนประกอบ สิ่งที่มีเจือปนอยู่ในส่วนประกอบของสารพิษ อาจมีผลรบกวนปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นในร่างกายเป็นการเร่งปฏิกิริยาหรือลดค่าให้ช้าลง

(4) ชนิดของส่วนประกอบ เช่น สารที่ใช้เป็นตัวทำละลาย หรือตัวแขวนลอย หรือสารละลายพวกอินทรีย์ ส่วนผสมที่มีอยู่ในสารพิษที่แตกต่างกันมีผลทำให้ปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่มีต่อเซลล์แตกต่างกันไป เป็นการเปลี่ยนแปลงความเป็นพิษของสารพิษ

2.3.3.2 ปัจจัยที่เกี่ยวกับการได้รับสาร

(1) ปริมาณ ขนาด หรือความเข้มข้นที่ได้รับ

(2) วิธีการและทางที่เข้าสู่ร่างกาย

(3) ความถี่ที่ได้รับ ระยะ เวลาในการสัมผัส

(4) ความเร็วในการกำจัดออกจากร่างกาย

ปัจจัยทั้ง 4 ประการนี้ มีผลต่อความรุนแรงของการเป็นพิษถ้าได้รับปริมาณสูง ความเข้มข้นสูง และเข้าสู่ร่างกายอย่างรวดเร็ว ความรุนแรงของอาการพิษก็จะสูงตามไปด้วย แต่ถ้ารับแรงกำจัดสารพิษออกจากร่างกายโดยเร็ว โอกาสที่จะเกิดความเป็นพิษก็จะมีได้น้อยลง

2.3.3.3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับผู้ที่ได้รับสาร (ลักษณะของคนหรือสัตว์)

(1) ลักษณะทางกรรมพันธุ์ เชื้อชาติ

(2) สภาพร่างกาย และพยาธิสภาพโดยทั่วไป ในผู้ที่ร่างกายแข็งแรงย่อมสามารถทนต่อสารพิษหรือสามารถกำจัดสารพิษได้ดีกว่าผู้ที่ร่างกายอ่อนแอ

(3) อายุ เพศ น้ำหนัก เช่น โดยทั่วไปพบว่าเพศหญิงมักเกิดอาการเป็นพิษจากสารพิษได้มากกว่าเพศชาย

2.3.3.4 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับผู้ที่ได้รับสาร (สิ่งแวดล้อม)

ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ความกดดัน แสงเสียง การแผ่รังสี สภาพของบริเวณที่ทดลอง ฤดูกาล ลักษณะภูมิศาสตร์ แม้กระทั่งอาหารเช่น พบว่านมหรือโกโก้สามารถช่วยลดการดูดซึมของสารพิษจากกระเพาะอาหารได้ (Klaassen, 1975; มาลินี ลัมภคดา, 2527; อรุณี อวนสกุล, 2528; สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2528)

2.4 ระดับที่ปลอดภัยและระดับที่เป็นพิษของโลหะหนัก

2.4.1 ระดับโลหะหนักที่ยอมรับว่ามีได้ในดินเพื่อการเกษตร

ปริมาณของโลหะหนักทั้ง 7 ธาตุ คือ โลหะหนักที่เป็นจุลธาตุอาหารโดยตรง (เหล็ก แมงกานีส สังกะสี และทองแดง) และโลหะหนักที่เป็นพิษ (นิกเกิล แคดเมียมและตะกั่ว) ซึ่งสามารถยอมรับว่ามีได้ในดินเพื่อการเกษตรตามเกณฑ์ของประเทศต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.3

2.4.2 ระดับโลหะหนักที่ยอมรับว่ามีได้ในกากตะกอนเพื่อใช้ทางการเกษตร

ปริมาณโลหะหนักทั้ง 7 ธาตุ ที่ยอมรับว่ามีได้ในกากตะกอนที่ใช้ในการเกษตรตามเกณฑ์ของนานาประเทศ และของกลุ่มประชาคมยุโรป (Commission of the European Communities) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

2.4.3 ระดับปกติและระดับที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษของโลหะหนักต่อพืช

ปริมาณโลหะหนักทั้ง 7 ธาตุ ในพืช ณ ระดับปกติ และระดับที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืชได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.3 ปริมาณโลหะหนัก (ppm.) ที่ยอมรับให้มีในดินเพื่อการเกษตร (Webber et al., 1984)

ประเทศที่กำหนด	ปริมาณโลหะหนัก (ppm.)						
	เหล็ก	แมงกานีส	สังกะสี	ทองแดง	นิกเกิล	ตะกั่ว	แคดเมียม
อังกฤษ	-	-	280	140	35	550	3.5
เยอรมัน	-	-	300	100	50	100	3.0
ฝรั่งเศส	-	-	300	100	50	100	2.0
ช่วงของทั้ง 3 ประเทศ	-	-	280-300	100-140	35-50	100-550	2.0-3.5

หมายเหตุ : - หมายถึง ไม่มีการเสนอตัวเลข

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 ปริมาณโลหะหนัก (ppm.) สูงสุดที่ยอมรับให้มีได้ในภาคตะกอนที่จะใช้เพื่อการเกษตร (Webber et al., 1984)

ประเทศ	ปริมาณโลหะหนัก (ppm.)						
	เหล็ก	แมงกานีส	สังกะสี	ทองแดง	นิกเกิล	ตะกั่ว	แคดเมียม
เบลเยียม	-	500	2,000	500	100	300	10
แคนาดา	-	-	1,850	-	180	500	20
เดนมาร์ก	-	-	-	-	30	400	8
ฟิลแลนด์	-	3,000	5,000	3,000	500	1,200	30
ฝรั่งเศส	-	-	3,000	1,000	200	800	20
เยอรมัน	-	-	3,000	1,200	200	1,200	20
เนเธอร์แลนด์	-	-	2,000	600	100	500	10
นอร์เวย์	-	500	3,000	1,500	100	300	10
สวีเดน	-	-	10,000	3,000	500	300	15
สวิสเซอร์แลนด์	-	-	1,000	1,000	200	1,000	30
กลุ่มประชาคมยุโรป (CEC)	-	-	3,000	1,500	400	1,000	40
ช่วงของทุกประเทศ	-	500-3,000	1,000-10,000	500-3,000	30-500	300-1,200	8-40

หมายเหตุ : - หมายถึง ไม่มีการเสนอตัวเลข

ตารางที่ 2.5 ปริมาณโลหะหนัก (ppm.) ในพืช ณ ระดับปกติและระดับที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช (Chaney, 1982)

ชนิดของโลหะหนัก	ปริมาณโลหะหนัก (ppm.)	
	ระดับปกติ	ระดับที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช
เหล็ก	30-300	-
แมงกานีส	15-150	400-2,000
สังกะสี	15-150	500-1,500
ทองแดง	3-20	25-40
นิกเกิล	0.1-5	50-100
ตะกั่ว	2-5	-
แคดเมียม	0.1-1	5-700

หมายเหตุ : - หมายถึง ไม่มีการเสนอตัวเลข

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4.4 ระดับปกติและระดับที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษของโลหะหนักต่อมนุษย์

ระดับปกติและระดับที่เป็นพิษของโลหะหนักในเลือดหรือานซีรัม (serum) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ระดับปกติและระดับที่เป็นพิษของโลหะหนักในเลือด/ซีรัม (Thienes และ Haley, 1980; Liden et al., 1985; อรุณี อานสกุล, 2528; Dreisbrch, 1986; มาตรการ สุทธิจิตต์, 2531)

ชนิดโลหะหนัก	ระดับปกติ	ระดับที่เป็นพิษ
เหล็ก	100 $\mu\text{g} \%$ (b)	> 350 $\mu\text{g} \%$ (b)
แมงกานีส	0.01-0.025 $\mu\text{g}/\text{ml}$ (s)	> 1.0 $\mu\text{g}/\text{ml}$.(s)
สังกะสี	0.8-1.6 $\mu\text{g}/\text{ml}$.(s)	> 2.0 $\mu\text{g}/\text{ml}$.(s)
ทองแดง	0.8-1.5 $\mu\text{g}/\text{ml}$.(s)	>1.7 $\mu\text{g}/\text{ml}$.(s)
นิกเกิล	< 0.05-1.05 $\mu\text{g}/\text{l}$ (b)	-
ตะกั่ว	ผู้ใหญ่ : 20-30 $\mu\text{g} \%$ (b) เด็ก : 15-25 $\mu\text{g} \%$ (b)	> 60 $\mu\text{g} \%$
แคดเมียม	< 1.0 $\mu\text{g} \%$ (b)	-

หมายเหตุ : (b) หมายถึง ระดับในเลือด (Whole blood)
: (s) หมายถึง ระดับในซีรัม (Serum)
: - หมายถึง ไม่มีการเสนอตัวเลข

2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสะสมโลหะหนักในดินและพืชเมื่อเติมโลหะหนักลงสู่ดิน

การนำกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียชุมชนมาใช้ประโยชน์ทางการเกษตร จำเป็นจะต้องมีการจัดการที่เหมาะสม และคำนึงถึงปริมาณโลหะหนักบางชนิดในกากตะกอนน้ำเสีย เช่น แคดเมียม ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี เป็นต้น (Sommers, 1977; Jacops, 1981; Webber et al., 1984) โดยปริมาณโลหะหนักจากกากตะกอนจะสะสมในดินและพืชมากขึ้นเพียงใด ขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ คือ ชนิดของโลหะหนัก สิ่งต่าง ๆ ที่เติมลงสู่ดิน ไม่ว่าจะเป็นกากตะกอน ปูนหรือปุ๋ย ลักษณะสมบัติของดิน ชนิดพืช รูปร่างเคมีของโลหะหนัก และอุณหภูมิ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5.1 ชนิดของโลหะหนัก

โลหะหนักแต่ละชนิดมีลักษณะสมบัติในการถูกปลดปล่อยจากกากตะกอนสู่สารละลายดิน และถูกดูดซับเข้าสู่ส่วนต่าง ๆ ของพืชแตกต่างกัน เช่นพบว่า การใส่กากตะกอนลงดินทำให้มีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของ สังกะสี ทองแดง แคดเมียม และนิกเกิล ในดินตามอัตราการใส่กากตะกอน (Sheaffer et al, 1979) และธาตุทั้ง 4 นี้ สามารถถูกพืชดูดซับไปใช้ได้ดีกว่า ตะกั่ว บรอม และโครเมียม จึงมีโอกาที่จะเกิดอันตรายจากการเติมกากตะกอนซึ่งมีธาตุเหล่านี้ได้มากกว่า และพบว่า แคดเมียมและนิกเกิลมีความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่มีอยู่ในพืชและในดิน (Davis, 1984) สำหรับสังกะสีแม้ว่าความเข้มข้นในดินจะเพิ่มขึ้นตามอัตราเติม แต่ไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นที่พบในพืช (Mortvedt และ Giordano, 1975) ส่วนตะกั่ว นั้นพบว่าปริมาณที่มีอยู่ในใบพืชไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณที่มีอยู่ในดิน อันเนื่องมาจากกากตะกอน (Chumbley และ Unwin, 1982) นอกจากนี้ Cottenie et al. (1984) ยังได้เปรียบเทียบถึงลำดับความสามารถในการดูดซับของนิกเกิล แคดเมียม สังกะสี และทองแดง โดยต้นข้าวสาลีได้ดังนี้ นิกเกิลสามารถดูดซับได้สูงที่สุด รองลงมาคือ แคดเมียมและสังกะสี ซึ่งถูกดูดซับได้ใกล้เคียงกันไม่ว่าจะปลูกข้าวบนดินประเภทใด (ดินทรายหรือดินเหนียว) หรือใช้โลหะหนักในรูปแบบใด (รูปเกลือซัลเฟตหรือกากตะกอน)

2.5.2 สิ่งต่าง ๆ ที่เติมลงสู่ดิน

ไม่ว่าจะเป็นการเติมกากตะกอนด้วยอัตราต่าง ๆ การเติมปุ๋ยเพื่อปรับสภาพความเป็นกรดเป็นด่างของดิน หรือการเติมปุ๋ยเคมีบางชนิด เช่น ปุ๋ยฟอสเฟตลงสู่ดิน ก็ล้วนแล้วแต่มีอิทธิพลต่อปริมาณการสะสมโลหะหนักในดินและพืชทั้งสิ้น

2.5.2.1 อัตราและวิธีการใส่กากตะกอน

อัตราเติมและวิธีการใส่กากตะกอนลงในดิน เป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่จะต้องคำนึงถึงในแง่ความเป็นพิษของโลหะหนักต่อพืช และความเหมาะสมคุ่มค่าทางเศรษฐกิจ พบว่าการสะสมโลหะหนักของพืชที่ปลูกบนดินเติมกากตะกอนมักจะเพิ่มปริมาณมากขึ้น ขึ้นแปรตามการปริมาณกากตะกอนที่เติมลงไป (Dowdy และ Larson, 1975; Kelling et al., 1977) Reddy และ Dunn (1984) ได้ทดลองปลูกข้าวเหลืองบนดินที่เติมกากตะกอนน้ำเสียพบว่า ระดับนิเกิลในเนื้อเยื่อพืชจะเพิ่มขึ้นตามอัตราเติมกากตะกอน ความเข้มข้นในใบจะสูงกว่าในลำต้นคือพบนิเกิลสะสมในใบ 2.1-8.5 ppm. และในลำต้นพบ 1.2-6.2 ppm. ของน้ำหนักแห้งพืช จากการเติมกากตะกอนลงดินด้วยอัตรา 0-8.4 กิโลกรัมของนิเกิลต่อเฮกตาร์ นอกจากนี้ Keefe et al. (1986) รายงานถึงการสะสมนิเกิลทั้งในส่วนที่บริโภคได้ และบริโภคไม่ได้ของผักที่ปลูกบนดินที่เติมกากตะกอนน้ำเสียชนิดต่าง ๆ ซึ่งคิดเป็นปริมาณนิเกิลที่เติมลงดินในช่วงอัตรา 2-2,540 กิโลกรัม/เฮกตาร์ ดังนั้น ในหัวกระหล่ำพบปริมาณนิเกิล 2.04-22.1 ppm. ในรากและยอดผักกาดพบ 1.28-12.3 ppm. และ 3.12-18.3 ppm. ตามลำดับ ส่วนถั่วเขียวพบในใบและผัก 4.68-14.0 ppm. และ 5.0-11.0 ppm. ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

แม้จะมีแนวโน้มการสะสมโลหะหนักในพืชสูงขึ้นตามอัตราเติมกากตะกอนก็ตาม แต่พบว่าผลผลิตที่ได้ไม่จำเป็นต้องเพิ่มขึ้นตามอัตราเติมกากตะกอนลงดิน อรารธรรมศิริรัตน์พิริยะ (2529) รายงานไว้ว่า อัตราเติมกากตะกอนที่เพิ่มขึ้นไม่ก่อให้เกิดการเพิ่มผลผลิตผักคะน้าในระดับที่คุ่มค่าทางเศรษฐกิจ เพราะอัตราเติมที่เพิ่มขึ้นหมายถึงการใช้จ่ายเพื่อการขนย้ายกากตะกอน การทบกากตะกอน รวมทั้งค่าจ้างแรงงาน จะต้องเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ผลผลิตที่ได้กลับไม่เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนตามอัตราเติมตะกอน ส่วนวิธีการใส่กากตะกอนลงสู่ดินก็มีผลต่อผลผลิตผักคะน้าด้วยเช่นกัน และได้เสนอว่า อัตราเติมกากตะกอน 20 เมตริกตัน/เฮกตาร์ (3,200

กิโกรัม/ไร่) เป็นอัตราเติมที่เหมาะสมทั้งการทดลองในภาคสนามและในกระถาง สำหรับการทดลองในกระถางพบว่า วิธีใส่กากตะกอนโดยคลุกเคล้ากับดินจะให้ผลผลิตผักคะน้าสูงกว่าวิธีโรยกากตะกอนบนผิวดิน คือ ๗ อัตราเติม (20 เมตริกตัน/เฮกตาร์) นี้ จะให้ผลผลิตสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 10-10-10 ร่วมกับปุ๋ยยูเรียอัตรา 104 กิโลกรัม/ไร่ สำหรับอัตราเติม 20 เฮกตาร์นี้ นับว่าเป็นอัตราต่ำสุด เมื่อเทียบกับค่าขีดจำกัดของต่างประเทศที่กำหนดค่าอัตราเติมกากตะกอนสูงสุด (Maximum Sludge Solids Loadings) ลงในดิน ซึ่งอยู่ในช่วง 20-200 เมตริกตัน/เฮกตาร์ ในรูปของกากตะกอนแห้ง (Webber et al., 1984)

2.5.2.2 สิ่งอื่น ๆ ที่เติมลงสู่ดิน

การเติมปูนเพื่อปรับระดับความเป็นกรดต่าง (pH) นั้น ถึงแม้จะทราบว่าจะช่วยลดความเป็นพิษของนิกเกิลได้ (Mengel และ Kirkby, 1982) แต่การเติมปูนลงไปในดินมาก ๆ ก็อาจก่อให้เกิดการขาดธาตุเหล็กในดินขึ้นได้ เพราะนอกจากเหล็กจะถูกเปลี่ยนให้เป็นเหล็กไฮดรอกไซด์ซึ่งละลายน้ำได้ยากแล้ว โบคาร์บอเนตไอออน (HCO_3) ที่เกิดจากการแปรสภาพของปูนยังอาจเป็นปฏิปักษ์ต่อเมตาโบลิซึมของเหล็กด้วย (โพบูลย์ ประพฤติธรรม, 2528) การใส่ปุ๋ยฟอสเฟตในปริมาณสูงหรือติดต่อกันเป็นระยะเวลาานาน ๆ มีผลทำให้จุลธาตุบางชนิด เช่น สังกะสีและทองแดง กลายไปอยู่ในรูปที่ยากแก่การที่พืชจะนำพาไปใช้ประโยชน์ได้ (Mengel และ Kirkby, 1982)

ผลของการเติมปูนต่อการดูดตั้ง โลหะหนักได้แสดงไว้อย่างชัดเจน
ในรูปที่ 2.1

2.5.3 ลักษณะสมบัติและองค์ประกอบบางอย่างของดิน

2.5.3.1 ความเป็นกรดเป็นด่างของดิน

นับว่าเป็นลักษณะสมบัติของดิน ประการสำคัญที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อปริมาณโลหะหนักที่ละลายออกมาในสารละลายดิน และปริมาณโลหะหนักที่ถูกพืชดูดตั้ง ซึ่งอาจทำให้เกิดความเป็นพิษหรือการขาดธาตุเหล่านั้นขึ้นก็ได้ การเติมกากตะกอนลงในดินอาจทำให้ดินมี

ความเป็นกรดเพิ่มขึ้นได้บ้าง (Roberson et al., 1982) Gangaiya และ Bache (1988) สรุปว่า การละลายในสารละลายดินของ แคลเซียม ทองแดง และสังกะสี ซึ่งมีอยู่ในภาคตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียจะเพิ่มขึ้น เมื่อระดับความเป็นกรดเป็นด่างลดลง นิกเกิลก็เช่นกัน คุณสมบัติการละลาย และการใช้ประโยชน์ได้ของนิกเกิลก็ขึ้นกับระดับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ถ้า pH ลดลง โดยทั่วไปนิกเกิลจะละลายออกมาได้มาก สารประกอบของนิกเกิลส่วนใหญ่มักจะละลายในช่วง pH ที่ต่ำกว่า 6.5 แต่นิกเกิลจะแสดงสมบัติการไม่ละลายอย่างเด่นชัด โดยจะอยู่ในรูปนิกเกิลไฮดรอกไซด์ $[\text{Ni}(\text{OH})_2]$ ในช่วง pH ที่สูงกว่า 6.7 (WHO, 1991) สำหรับโลหะหนักอื่น ๆ เช่น เหล็กและแมงกานีส ก็สามารถละลายสู่สารละลายดินได้ในช่วง pH ต่ำ และเกิดเป็นไฮดรอกไซด์ที่ละลายน้ำยากในช่วง pH สูงได้เช่นกัน เพียงแต่ pH ที่แน่นอนที่จะทำให้โลหะหนักเหล่านั้นตกตะกอนเป็นโลหะไฮดรอกไซด์นั้นแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของธาตุ อย่างไรก็ตาม พอจะสรุปได้โดยทั่วไปว่า เมื่อดินมี pH ต่ำ จุลธาตุอาหารเหล่านี้จะละลายออกมาได้มากแต่จะละลายได้น้อยลงเมื่อ pH ของดินสูงขึ้น (โพบูลย์ ประพศิตธรรม, 2528) Davis (1984) ได้รายงานไว้ว่า ระดับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) เท่ากับ 6.5 เป็นระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดินที่พืชส่วนมากเจริญเติบโตได้ดี ซึ่งนับว่าเป็นข้อเสนอนี้ที่ได้รับการยอมรับกันแล้วว่าเหมาะสม และจำเป็นสำหรับพื้นที่ที่ต้องการนำภาคตะกอนมาใช้ประโยชน์เพื่อการเกษตร

2.5.3.2 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของดิน

ลักษณะสมบัติทางกายภาพของดิน เช่น ลักษณะเนื้อดิน (Soil Texture) สภาพการระบายน้ำ (Drainage Status) และความสามารถในการดูดซับ (Sorptive Capacity) ของดิน มีบทบาทไม่น้อยต่อปริมาณโลหะหนักในสารละลายดิน และปริมาณโลหะหนักที่ถูกพืชดูดคั่งนำไปใช้ เช่น พบว่าพืชที่ปลูกในดินซึ่งมีลักษณะอัดตัวแน่นหรืออยู่ในที่จำกัดเช่นภาชนะที่ปลูกพืช มักพบว่าพืชจะขาดสังกะสี เนื่องจากการอัดตัวแน่นของดินเป็นปัจจัยต่อการแพร่ของสังกะสีไปยังรากพืช จึงทำให้การนำสังกะสีไปใช้ประโยชน์ต่อพืชลดลง (Lindsay, 1972) หรือชนิดดินที่ต่างกันก็มีผลต่อการเคลื่อนที่และการดูดคั่งโลหะของพืช ดังเช่น ผลการศึกษาของ Cottenie et al. (1984) ได้รายงานไว้ว่า การเคลื่อนที่และการดูดคั่งสังกะสี นิกเกิล และแคลเซียม ของต้นข้าวที่ปลูกบนดินทราย (Sandy Soil) สูงกว่าที่ปลูกบนดินเหนียว (Heavy Clay Soil) ไม่ว่าจะใช้โลหะหนักในรูปแบบเกลือซัลเฟตหรือรูปภาคตะกอนก็ตาม และ Allaway

และ Morgan (1986) ได้ทดลองปลูกพืชในสภาพเรือนทดลองโดยเติมกากตะกอนน้ำเสียลงในดินประเภทต่าง ๆ คือ ดินต่างร่วน (Calcareous Loam) ดินเหนียว (Clay) และดินร่วนปนทราย (Sandy Loam) พบปริมาณนิกเกิลสะสมสูงสุดในผักกระหล่ำที่ปลูกบนดินเหนียว และผักกาดหอมที่ปลูกบนดินร่วนปนทราย ซึ่งแสดงว่าลักษณะสมบัติทางกายภาพของดินที่ต่างกันก็มีอิทธิพลต่อการดูดดึง โลหะหนักของพืชที่ต่างชนิดกันด้วย

นอกจากนี้ยังพบว่า กากตะกอนที่เติมลงสู่ดินสามารถทำให้ลักษณะสมบัติทางกายภาพของดินเปลี่ยนแปลงได้ด้วย คือ ทำให้ความหนาแน่นรวมของดินลดลง (Gupta et al., 1977; Kladivko และ Nelson, 1979; Hall และ Coker, 1983) และ ความพรุนของดินเพิ่มขึ้น (Pagliai et al., 1981)

2.5.3.3 ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน

อินทรีย์วัตถุสามารถจับยึดโลหะหนักไว้ได้ดี จึงทำให้โลหะหนักสะสมอยู่ในอินทรีย์วัตถุ และถูกพืชดูดดึงเข้าไปได้น้อยดังเช่นรายงานของ Hutchinson et al. (1981) ซึ่งสรุปว่า ในดินที่เกิดมลภาวะจากนิกเกิลจะพบนิกเกิลปริมาณสูงในดินอินทรีย์ชั้นบน ซึ่งอาจเนื่องมาจากผิวดินที่มีสารอินทรีย์สูงมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนประจุสูง Gignac และ Beckett (1986) พบว่า มีความสัมพันธ์ทางลบระหว่างปริมาณนิกเกิลในแก้วกับปริมาณสารอินทรีย์ในดิน

2.5.4 ชนิดพืช

การสะสมสารพิษในพืชจากการเติมกากตะกอนลงในดินไม่เพิ่มเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเพิ่มอัตราเติมกากตะกอน แต่พืชต่างชนิดจะมีพฤติกรรมการสะสมที่ต่างกัน (Joseph, 1984) Dowdy และ Lason (1975) รายงานว่า ผักกาดหอม หัวผักกาด หัวแครอท และมันฝรั่ง ที่ปลูกบนดินเติมกากตะกอน จะสะสม สังกะสี ทองแดง แคดเมียม และตะกั่ว ในเนื้อเยื่อลำต้นมากกว่าในรากและหัว และมีปริมาณมากกว่า 2-3 เท่าของปริมาณโลหะหนักในเนื้อเยื่อจากพืชที่ปลูกบนดินที่ไม่มีการเติมกากตะกอน ยกเว้นผักกาดหอม มีการสะสมโลหะหนัก คือ สังกะสี ทองแดง และแคดเมียม เพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน หัวผักกาดโรโดเดนดรอน (Rododendron)

พื้นเมือง และอโซเลียร์ (Azolea) เป็นกลุ่มของพืชที่ต้องการเหล็กสูงมาก จึงขึ้นอยู่บนดินกรดและ
ทนทานต่อพิษของโลหะหนักได้สูงกว่าพืชปกติ นอกจากนี้หญ้าอาหารสัตว์ ก้าวหลายชนิด วัชพืชต่าง ๆ
พืชไร่ และผักต่าง ๆ ชอบดินที่มีฤทธิ์เป็นกรดเล็กน้อย (Brady, 1974)

นอกจากพืชแต่ละชนิดจะแสดงพฤติกรรมการดูดตั้ง และสะสมโลหะหนักได้
แตกต่างกันแล้ว แม้พืชชนิดเดียวกันก็ยังมี การสะสมโลหะหนักในส่วนต่างๆ ของพืชแตกต่างกันด้วย
เช่น ต้นยาสูบจะมีการสะสมโลหะหนักแตกต่างกันไปตามส่วนของลำต้น และในใบแก่จะมีปริมาณ
โลหะหนักสูงกว่าในใบอ่อน (Chiba และ Masironi, 1992)

2.5.5 รูปร่างเคมีของโลหะหนัก

รูปร่างเคมีของโลหะหนักมีผลต่อการดูดตั้งของพืชมากเช่นกัน โดยทั่วไปพบว่า
โลหะหนักที่อยู่ในรูปของ เกลืออนินทรีย์ที่ละลายน้ำ จะถูกพืชดูดตั้งเข้าไปได้มากกว่าโลหะหนักจาก
กากตะกอน Cottenie et al. (1984) พบว่า การเคลื่อนที่ (Mobility) และการดูดตั้ง
(Uptake) ของ สังกะสี นิกเกิล และแคดเมียม ของต้นข้าวที่ปลูกบนดินที่เติมโลหะหนักในรูป
เกลือซัลเฟตสูงกว่าจากดินที่เติมโลหะหนักในรูปกากตะกอน ไม่ว่าจะปลูกบนดินทรายหรือดินเหนียว
ก็ตาม เหตุที่พืชสามารถดูดตั้งโลหะหนักในรูปเกลืออนินทรีย์ได้ดีนั้น อาจเนื่องมาจากเกลืออนินทรีย์
มักละลายน้ำได้ดีพืชจึงมีโอกาสดูดตั้งได้สูง นอกจากนี้เกลืออนินทรีย์อาจทำให้ความเป็นกรดเป็น
ด่างของดินลดลง โดยอิออนบวกของเกลืออนินทรีย์จะแทนที่ไฮโดรเจนที่ผิวอนุภาคดินทำให้โลหะหนัก
หลายชนิดในดินมีโอกาสถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างมากขึ้น ส่วนอิออนลบของเกลืออนินทรีย์มีแนวโน้ม
จะเพิ่มความสามารถในการละลายของโลหะหนัก โดยการเพิ่มความเข้มข้นของประจุลงในสาร
ละลายของดิน (Kuntze et al., 1984)

การที่โลหะหนักบางชนิดในกากตะกอน เช่น แมงกานีส และสังกะสี สามารถ
เกิดการรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับอินทรีย์วัตถุในกากตะกอนได้ มีผลทำให้การดูดตั้งขึ้นไป
สะสมในส่วนลำต้นลดลง (Hodgeson et al., 1965) ซึ่งสอดคล้องกับที่ อรารณ ศิริรัตน์พิริยะ
(2529) รายงานว่าปริมาณการสะสมของแมงกานีสและสังกะสีในผักคะน้า (ส่วนที่บริโภคได้) จาก
ตัวรับทดลองเติมโลหะหนักในรูปโลหะหนักคลอไรด์ มีมากกว่าตัวรับทดลองเติมกากตะกอนอย่างมี
นัยสำคัญ

2.5.6 อุณหภูมิ

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีผลต่อการดูดตั้งโลหะหนักของพืช Orwan Siriratpiriya et al., (1985) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง 9-24 องศาเซลเซียสต่อการดูดตั้งโลหะหนักของผักกาดหอม พบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การดูดตั้ง สังกะสี แมงกานีส และ เหล็ก ของผักกาดหอมเพิ่มขึ้น สำหรับแคดเมียมก็เช่นเดียวกัน แต่ให้ผลไม่สม่ำเสมอในฤดูเก็บเกี่ยวที่สอง ส่วน นิกเกิล ทองแดง และ โมลิบดีนัม ได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างไม่มีนัยสำคัญ สำหรับสังกะสีให้ผลสอดคล้องกับที่ Mengel และ Kirkby (1982) ได้สรุปไว้ว่า ในพื้นที่เพาะปลูกที่มีอากาศเย็นจัด มักพบว่าพืชมีการขาดสังกะสีเนื่องจากอุณหภูมิที่ลดลงอาจมีผลต่อการขยายตัวของราก หรือยับยั้งกิจกรรมของจุลินทรีย์ดินในการปลดปล่อยสังกะสีจากอินทรีย์วัตถุ ในกรณีประเทศไทยน่าจะให้ผลตรงข้ามเนื่องจากอุณหภูมิก่อนข้างสูง ดังนั้นโอกาสที่พืชจะขาดธาตุอาหารดังกล่าวจากผลของอุณหภูมิต่ำก็ไม่น่าจะเกิดขึ้น แต่น่าจะมีแนวโน้มของการใช้ประโยชน์ได้ของธาตุอาหารเหล่านี้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

2.6 ภาวะก่อนจากการบำบัดน้ำเสียชุมชน

ภาวะก่อนจากการบำบัดน้ำเสียอาจจำแนกได้ 2 ประเภทคือ

1. ภาวะก่อนที่เป็นสารอินทรีย์ ได้แก่ ภาวะก่อนที่เกิดจากขบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น โรงงานชุบโลหะ โรงงานผลิตแบตเตอรี่ หรือโรงงานอุตสาหกรรมเคมีอื่น ๆ ที่มีน้ำเสียจากขบวนการผลิต และ/หรือ ในการชะล้างทำความสะอาด เครื่องมือและอุปกรณ์

2. ภาวะก่อนที่เป็นสารอินทรีย์ ได้แก่ ภาวะก่อนที่เกิดจากขบวนการบำบัดน้ำเสียจากแหล่งชุมชน การบดคุสตร์ หรือโรงงานแปรรูปผลิตผลทางการเกษตร ซึ่งส่วนใหญ่มักจะใช้วิธีทางชีวภาพในการบำบัด

สำหรับในที่นี้จะกล่าวถึง เฉพาะภาวะก่อนจากการบำบัดน้ำเสียชุมชนเท่านั้น

2.6.1 แหล่งกำเนิดของกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียชุมชน

ที่มาของกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียชุมชนก็คือ น้ำเสียจากแหล่งชุมชนที่เป็นผลมาจากกิจกรรมต่าง ๆ ของชุมชน แล้วจำเป็นต้องมีการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำต่อไป ซึ่งในขบวนการบำบัดน้ำเสียไม่ว่าจะโดยวิธีการใด ย่อมจะมีกากตะกอน (Sludge) เกิดขึ้นเสมอ จึงกล่าวได้ว่าต้นกำเนิดของกากตะกอนก็คือสิ่งต่าง ๆ เช่น ของแข็ง สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ เกลือแร่ต่าง ๆ ตลอดจนจุลินทรีย์หลายชนิด

โดยทั่วไปปริมาณของแข็งในน้ำเสียอยู่ในช่วง 500-1,000 มิลลิกรัม/ลิตร ประมาณ 25% มีอยู่ในน้ำระพาเต็ม และ 75% เพิ่มมาจากชุมชน ปริมาณของแข็งแขวนลอยจะมีประมาณหนึ่งในสามของของแข็งทั้งหมดและประมาณหนึ่งในสามถึงหนึ่งในสองของของแข็งแขวนลอยนี้ มีขนาดของอนุภาค และความถ่วงจำเพาะ ที่จะทำให้ตัวมันแยกออกจากของเหลวเมื่อตั้งทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง ของแข็งที่ตกตะกอนลงมาเองได้นี้เรียกว่า Settleable Solids และส่วนที่ไม่สามารถตกตะกอนเมื่อตั้งทิ้งไว้เรียกว่า Nonsettleable Solids สำหรับของแข็งในน้ำที่สามารถผ่านกระดาษกรองจะประกอบด้วยของแข็งที่ละลายน้ำได้และคอลลอยด์ (สมาใจ กาญจนวงศ์, 2532)

สารอินทรีย์ในน้ำเสียชุมชนประกอบด้วย สารอินทรีย์ในโตรเจน ได้แก่ โบรตีน ยูเรีย และกรดอะมิโน คาร์โบไฮเดรต ได้แก่ น้ำตาล แป้ง เซลลูโลส กรดไขมันและสารประกอบอื่น ๆ เช่น ฟีนอล ฟังก์พอก ฯลฯ สำหรับสารอนินทรีย์ในน้ำเสียจากชุมชนประกอบด้วย กรวด ทราย กรด ต่าง เกลือ หรือโลหะบางชนิด ซึ่งบางส่วนละลายได้ในน้ำ บางส่วนอยู่ในรูปของคอลลอยด์หรือแขวนลอยในน้ำ ส่วนเกลือแร่ต่าง ๆ เช่น โบคาร์บอเนต คาร์บอเนต ฟอสเฟต แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก แมงกานีส ซิลิกา เป็นต้น (Lamb, 1985) นอกจากนี้ยังมีจุลินทรีย์ต่าง ๆ เช่น แบคทีเรีย โพรโตซัว และนีมาทอด (Green, son 1981)

กากตะกอนได้จากขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียบางขั้นตอน โดยทั่วไปการบำบัดน้ำเสียแบ่งเป็นขั้นตอนดังนี้คือ

1. ขั้นเตรียมการก่อนบำบัด เป็นขั้นตอนที่ต้องการตัดแปลงหรือปรับปรุงสภาพน้ำทิ้งให้เหมาะสมกับการบำบัดในระดับต่อไป อาศัยขบวนการทางกายภาพเป็นส่วนใหญ่คือ แยกสิ่งแขวนลอยขนาดใหญ่โดยอาศัยตะแกรงกักเอาไว้ คูม้อตราการไหลให้มีอัตราค่อนข้างสม่ำเสมอ และแยกน้ำมันหรือไขมันออกจากน้ำ สำหรับขั้นแรกนี้ยังไม่มียากตะกอนเกิดขึ้น จะมีก็เพียงสิ่งแขวนลอยขนาดใหญ่ที่ถูกแยกออกมา

2. การบำบัดขั้นต้น เป็นการหาของแข็งส่วนที่ตกตะกอนได้ (Settleable Solids) ให้แยกตัวออกจากน้ำโดยอาศัยการตกตะกอน (Sedimentation) โดยแรงโน้มถ่วงที่ตกตะกอนจนถึงตกตะกอน และการบำบัดขั้นต้นนี้มุ่งให้สารส่วนที่จุลชีพย่อยสลายได้ (Biodegradable matter) ตกตะกอนจนถึงตกตะกอนขั้นต้น (Primary Clarifier) สำหรับสารส่วนที่จุลชีพย่อยสลายไม่ได้ (Non-biodegradable matter) ได้แก่ วัตถุประเภททราย กรวด หิน เมล็ดผลไม้ เศษกระดูก จะถูกแยกให้ตกตะกอนจนถึงอีกาบหนึ่ง (Grit Chamber)

การบำบัดขั้นต้นนี้อาจอาศัยขบวนการทางเคมีแทน เช่น การทำให้เป็นกลาง (Neutralization) การสังเคราะห์แแกนตะกอนและการรวมตะกอน (Coagulation and flocculation) ซึ่งเป็นขบวนการที่เปลี่ยนสารที่มีขนาดเล็กมากซึ่งละลายอยู่ในน้ำและไม่สามารถตกตะกอนได้ ถูกทำให้เป็นกลางจนเกิดตะกอนเบาเล็ก ๆ ซึ่งสามารถรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนจนสามารถตกตะกอนโดยน้ำหนักของตัวเอง

3. การบำบัดขั้นที่สอง น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นยังมีความสกปรกในสภาพของสารอินทรีย์ (Soluble organics) จึงต้องเปลี่ยนสารละลายอินทรีย์ให้กลายเป็นเซลของจุลชีพ และน้ำเซลเหล่านี้ไปแยกออกจากน้ำโดยการตกตะกอนจนถึงตกตะกอนขั้นที่สอง (Secondary Clarifier) การบำบัดขั้นที่สองจึงอาศัยขบวนการทางชีวภาพเป็นหลักและระบบที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ ระบบเลี้ยงตะกอน (Activated Sludge) ระบบลานกรอง (Trickling filters หรือ Biofilter) ระบบคลองวางเวียน (Oxidation ditch) ระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoons) และระบบบ่อกักตุน (Stabilization ponds)

4. การบำบัดขั้นสุดท้าย โดยทั่วไปถือว่าน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองแล้ว จะมีความสกปรกต่ำ สามารถปล่อยทิ้งลงแหล่งน้ำได้ การบำบัดขั้นต้นส่วนใหญ่มักจะเป็นการกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพไม่ได้ เช่น ฟีนอล ดีเทอร์เจนต์ สารเร่งการเจริญเติบโตของพืชน้ำ เช่น ไนเตรต ฟอสเฟต คลอโรเจนลี กลิ่น โลหะต่าง ๆ ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids) ซึ่งก่อให้เกิดความขุ่น (ศุภกฤษ์ สินสุพรรณ, 2526)

ตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียชุมชนมักเกิดจากขั้นตอนการบำบัดขั้นต้นและการบำบัดขั้นที่สอง สำหรับการบำบัดขั้นสุดท้ายมักใช้บำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพไม่ได้หรือสารอินทรีย์เคมี โดยอาศัยขบวนการทางเคมีในการบำบัดเป็นส่วนใหญ่ ตะกอนน้ำเสียที่ได้นี้จะต้องนำมาบำบัดต่อไป เพราะยังถือว่าเป็นตัวการสำคัญที่ก่อให้เกิด

เกิดมลภาวะ ถ้าไม่ได้ผ่านการบำบัดก่อนนำไปทิ้ง เพราะตะกอนเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นตะกอนอินทรีย์ (Organic Sludge) ที่ได้จากถังตกตะกอนชั้นต้นและชั้นที่สอง ซึ่งยังมีสภาพไม่คงตัว (Unstable)

การบำบัดตะกอนมีขั้นตอนหลักอยู่ 2 ขั้นตอนคือ

1. ลดส่วนที่เป็นน้ำ (Water Content) ที่มีอยู่ในตะกอนเพื่อให้ตะกอนมีความแน่นตัวขึ้น การลดส่วนที่เป็นน้ำกระทำได้ในขั้นก่อนหน้าตะกอนเข้าสู่ขบวนการบำบัด (เรียกว่า Concentration หรือ Thickening) และหลังจากผ่านขบวนการบำบัดแล้ว (เรียกว่า dewatering)

2. เปลี่ยนสภาพสารอินทรีย์ของตะกอนให้อยู่ในสถานะคงตัว คือไม่มีการย่อยสลายอีกต่อไป โดยอาศัยการย่อยสลายซึ่งแบ่งเป็นการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (Anaerobic Digestion) ซึ่งใช้กันเป็นส่วนใหญ่ และการย่อยสลายแบบใช้อากาศ (Aerobic Digestion) (ศุภกฤษ์ สินสุพรรณ, 2526)

านที่สุดของขบวนการบำบัดน้ำเสียและบำบัดตะกอน ก็จะได้กากตะกอนซึ่งมีลักษณะ คงตัวและถูกรีดน้ำออกแล้ว เพื่อจะได้สะดวกต่อการนำไปทิ้งหรือใช้ประโยชน์ต่อไป

2.6.2 องค์ประกอบของกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียชุมชน

องค์ประกอบของกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียชุมชน จริง ๆ แล้วก็คือ องค์ประกอบของน้ำเสียจากชุมชนดังกล่าวแล้วในหัวข้อ 2.6.1 องค์ประกอบของน้ำเสียบางอย่างก็สามารถถูกกำจัดหรือทำให้มีปริมาณน้อยลงไปในระหว่างขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย แต่องค์ประกอบบางอย่างก็ไม้อาจจะถูกกำจัดให้หมดไปได้เลยทีเดียว หรือบางครั้งอาจมีความเข้มข้นในกากตะกอนสูงกว่าในน้ำเสียก็ได้ ดังนั้นจึงควรทราบถึงองค์ประกอบของกากตะกอนก่อนจะตัดสินใจนำกากตะกอนไปกำจัดหรือนำไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่าง ๆ เพราะอาจมีองค์ประกอบที่จัดว่าเป็นมลพิษต่อสิ่งมีชีวิตปะปนอยู่ด้วย เช่นพบว่ากากตะกอนที่เก็บจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนต่าง ๆ ในสหรัฐอเมริกา มีนิเกิลเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่วง 21-1,990 ppm. ของน้ำหนักแห้งกากตะกอน (Sung et., 1986)

สำหรับองค์ประกอบของกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียชุมชนของประเทศไทย นั้น อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ (2529) ได้รายงานถึงองค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนจาก Anaerobic Digester ของโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนห้วยขวาง การเคหะแห่งชาติ มีผลดังตารางที่ 2.7



ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของ Anaerobic Digested Sludge จากโรงบำบัด
น้ำเสียชุมชนห้วยขวาง (อรรณพ ศิริรัตน์พิริยะ, 2529)

องค์ประกอบทางเคมี	ค่าขององค์ประกอบทางเคมี
pH	7.00
Organic carbon (%)	30.40
Organic matter (%)	52.29
Total Nitrogen (%)	2.87
NH ₄ -N (ppm.)	800.00
NO ₃ -N (ppm.)	636.00
Available p (ppm.)	167.75
Exchangable K (ppm.)	690.00
Sodium (ppm.)	300.00
<u>โลหะหนักสกัดด้วย 0.005 M DTPA (ppm.)</u>	
Cadmium	0.24 (4.2)
Copper	55.00 (179.5)
Iron	357.00 (16,176.7)
Manganese	126.00 (523.1)
Nickel	4.40 (43.3)
Lead	3.54 (162.4)
Zinc	500.00 (1,510.7)

ตัวเลขในวงเล็บคือปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในกากตะกอน

จากตารางที่ 2.7 จะเห็นว่า กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียชุมชน ห้วยขวางนั้น มีองค์ประกอบทางเคมีที่มีประโยชน์โดยตรงต่อพืช ได้แก่ อินทรีย์วัตถุ อินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โบตัสเซียม โซเดียม โลหะหนักที่เป็นจุลธาตุอาหารโดยตรง (ทองแดง เหล็ก แมงกานีส และสังกะสี) และองค์ประกอบที่เป็นโลหะหนักที่จัดว่าเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต (แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่ว)

นอกจากองค์ประกอบข้างต้นดังกล่าวแล้ว ยังอาจมีอีกโอกาสขององค์ประกอบอื่น ๆ ที่ควรแก่การพิจารณาในแง่ความปลอดภัยก่อนที่จะนำกากตะกอนมาเติมลงสู่ดิน อันได้แก่ จุลมลสาร ประเภทอินทรีย์ (Organic micropollutants) และองค์ประกอบทางพยาธิวิทยา ซึ่งหากพบ องค์ประกอบเหล่านี้ในกากตะกอนก็ควรจะต้องพิจารณาถึงชนิดและปริมาณขององค์ประกอบดังกล่าว ว่ามีโอกาสจะทำให้เกิดความเป็นพิษหรือการระบาดได้มากน้อยเพียงใด

Lester (1984) ได้ศึกษาถึงโอกาสและการกระจายของจุลมลสารประเภท สารอินทรีย์ (Organic micropollutants) เช่น สารป้องกันและกำจัดแมลง (Insecticide) และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ ในน้ำเสีย และกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย พบว่า ส่วนใหญ่สารเหล่านี้จะรวมตัวอยู่กับส่วนที่เป็นกากตะกอน และมีการละลายตัวอย่างมีขอบเขตจำกัด ในระหว่างขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย จึงทำให้สารเหล่านี้มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นในกากตะกอนที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสีย พฤติกรรมของสารเหล่านี้ในระหว่างการบำบัดน้ำเสียยังมีการศึกษากันอยู่ในวงจำกัด และยังไม่มียุทธศาสตร์ที่แน่ชัด เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการศึกษายังมีน้อย แต่อย่างไรก็ตาม จากผลการศึกษาวิจัย ที่ได้ศึกษาถึงความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ที่เป็นพิษจากกากตะกอน (Sludge-Borne Toxic Organics) โดยพบว่าสาร PCB_s (Polychlorinated Biphenyls) มีปริมาณการสะสมในเนื้อเยื่อพืชในระดับต่ำมาก ส่วน DEP (Dichlorophenoxy ethyl phosphate) มีโอกาสจะเกิดการสะสมได้ แต่จะถูกแปรรูปอย่างรวดเร็ว โดยขบวนการ เมตาบอลิซึมภายในพืชจึงทำให้พบปริมาณเนื้อเยื่อพืชในระดับที่ต่ำมากเช่นกัน และสำหรับ PCP (Pentachloro Phenol) นั้นค่อนข้างจะสลายตัวได้อย่างรวดเร็วในดิน จึงมีโอกาสน้อยที่จะพบ อยู่ในส่วนประกอบของพืชได้น้อยมาก ดังนั้นจึงยังไม่สามารถอ้างอิงองค์ประกอบดังกล่าวนี้เป็นตัวกำหนดขีดจำกัดในการนำกากตะกอนมาเติมลงในดินได้

สำหรับองค์ประกอบทางพยาธิวิทยาของกากตะกอนที่นับว่าสำคัญ คือ เชื้อแบคทีเรีย *Salmonella sp* ไข่ของพยาธิตัวแบน *Taenia saginata* และไข่ของพยาธิตัวกลม *Ascaris sp* ซึ่งสามารถถูกกำจัดได้พร้อม ๆ กับเชื้ออื่น ๆ จุดประสงค์ของการกำจัดเชื้อทาง

พยาธิวิทยาในกากตะกอนก็คือ เพื่อลดโอกาสที่จุลินทรีย์ซึ่งสามารถทำให้เกิดโรคติดต่อได้ มาให้เข้าไปมีบทบาทในการนำกากตะกอนไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตร ซึ่งสามารถทำได้โดยการกำจัดเชื้อเหล่านี้ให้อยู่ในปริมาณที่ต่ำกว่าจะตรวจพบได้ (Havelaar, 1984) องค์ประกอบทางพยาธิวิทยาในกากตะกอน สามารถถูกกำจัดให้ลดลงได้โดยหลายวิธีการ ได้แก่ การพลาสเจอร์ไรซ์ (Pasteurization) การฉายรังสี (Irradiation) การควบคุมอุณหภูมิห้องที่ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน (Aerobic Thermophilic Stabilization) การหมัก (Composting) และการเติมปูน (Liming) สำหรับสองวิธีแรกนับว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง (Havelaar, 1984; Strauch, 1984) ศรีธยา เบียงแดง (2533) ได้ทดลองฉายรังสีกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียชุมชนห้วยขวาง ที่ปริมาณรังสี 2.33 กิโลเกรย์ พบว่า สามารถฆ่าจุลินทรีย์ได้ถึง 99.90% และได้ทดลองนำกากตะกอนทั้งที่ฉายและไม่ฉายรังสี ไปทำปุ๋ยปลูกผักบุงเงินในกระถาง พบว่า ผักบุงที่ปลูกด้วยดินที่ผสมกากตะกอนทั้งที่ฉายและไม่ฉายรังสีให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งแสดงว่ากากตะกอนทั้งที่ฉายและไม่ฉายรังสีให้ผลผลิตแก่พืชได้ดีสูง เหมาะสมที่จะใช้ทำปุ๋ยได้

อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบของกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียชุมชนนั้นย่อมแตกต่างกันไปบ้างตามสภาพกิจกรรม อุณหภูมิ ความเป็นอยู่ และลักษณะการอุปโภคบริโภค ของคนในชุมชน ซึ่งเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา และยังขึ้นกับวิธีการและประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียอีกด้วย ดังนั้นหากจะนำกากตะกอนมาใช้ประโยชน์ก็ควรจะได้มีการวิเคราะห์ถึงองค์ประกอบของกากตะกอนเพื่อความมั่นใจว่าปลอดภัยจากองค์ประกอบที่อาจทำให้เกิดความเป็นพิษ หรืออันตรายนั้นเอง

ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย