

บทที่ 2

การสำรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สมบัติของแคดเมียมและสังกะสี

2.1.1 แคดเมียม (Cadmium; Cd)

แคดเมียมเป็นโลหะอ่อนสีเงินขาว เป็นธาตุลำดับที่ 48 ในตารางธาตุ มีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 112.4 ความหนาแน่นเท่ากับ 8.64 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (gcm^{-3}) จุดหลอมเหลวเท่ากับ 321 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) และจุดเดือดเท่ากับ 767 องศาเซลเซียส (Cotton และคณะ, 1999) แคดเมียมสามารถพบได้ในธรรมชาติทั้งในดิน น้ำ พืช และสิ่งแวดล้อมทั่วไป โดยมีปริมาณที่แตกต่างกัน เช่น ในหินอัคนี (igneous rock) พบแคดเมียมอยู่ในช่วง 0.001-0.60 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (mgkg^{-1}) หินแปร (metamorphic rock) 0.005-0.87 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หินตะกอน (sedimentary rock) 0.05-500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หินฟอสเฟต (phosphate rock) 0.20-340 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และในดิน 0.01-2.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Bowen, 1979) โดยแคดเมียมจะอยู่ร่วมกับแร่สังกะสี ซิงค์ซัลไฟด์ (sphalerite; ZnS) ในรูปของแร่แคดเมียมซัลไฟด์ (greenokite; CdS) ร้อยละ 0.01-0.5 โดยประมาณหรือมากกว่า โดยมีอัตราส่วนของแคดเมียมและสังกะสีเท่ากับ 1:100 ถึง 1:1,000 นอกจากนี้ยังอยู่ร่วมกับแร่ซิงค์ซิลิเกต (wursite; Zn_2SiO_4) และซิงค์คาร์บอเนต (smithsonite; ZnCO_3) นอกจากนี้ยังพบแคดเมียมในรูปของแร่อื่นๆ อีกด้วย เช่น แร่แคดเมียมออกไซด์ (CdO) และแคดเมียมคาร์บอเนต (octavite; CdCO_3) (Adriano, 2001) ซึ่งในธรรมชาติจะพบแคดเมียมอยู่ในรูปของไอออนอิสระ หรือแคดเมียมสองบวก (Cd^{2+}) เป็นส่วนใหญ่ หรืออาจจะพบอยู่ในรูปของไอออนเชิงซ้อนจับอยู่กับสารประกอบจำพวกแคดเมียมคลอไรด์ แคดเมียมไฮดรอกไซด์ แคดเมียมแอมโมเนีย และแคดเมียมไซยาไนด์ เช่น CdCl^+ , CdOH^+ , CdHCO_3^+ , CdCl_4^{2-} , $\text{Cd}(\text{OH})_3^-$, $\text{Cd}(\text{OH})_4^{2-}$, $\text{Cd}(\text{NH}_3)_6^{4+}$ และ $\text{Cd}(\text{CN})_4^{2-}$ นอกจากนี้ยังพบจับอยู่กับสารประกอบอินทรีย์ และคีเลต (chelates) เป็นต้น (Kabata-Pendias และ Pendias, 1992)

2.1.2 สังกะสี (Zinc; Zn)

สังกะสีเป็นโลหะอ่อนสีน้ำเงินขาว เป็นธาตุลำดับที่ 30 ในตารางธาตุ มีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 65.38 ความหนาแน่นเท่ากับ 7.13 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลวเท่ากับ 420 องศาเซลเซียส และจุดเดือดเท่ากับ 907 องศาเซลเซียส (Cotton และคณะ, 1999) ในธรรมชาติจะพบสังกะสีในหินอัคนีอยู่ในช่วง 5-1,070 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หินปูน (lime stone) น้อยกว่า 1-180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หินทราย (sand stone) 5-170 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และดิน 1-900

มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Bowen, 1979) โดยทั่วไปแล้วจะพบสังกะสีในรูป ZnS , Zn_2SiO_4 , $ZnCO_3$ และแร่เฮมิโมรฟิไตต์ (hemimorphite; $Zn_4Si_2O_7(OH)_2 \cdot H_2O$) เมื่อนำแร่เหล่านี้ไปถลุงจะได้แร่อื่นที่ปนอยู่ ออกมาด้วย เช่น แร่เหล็ก (iron; Fe) แคดเมียม และตะกั่ว (lead; Pb) โดยเฉพาะแคดเมียม ในการถลุงแร่สังกะสี 1 ตัน (tonne) จะได้แคดเมียมประมาณ 3 กิโลกรัม (Adriano, 2001) ในประเทศไทยจะพบสังกะสีในรูป $Zn_4Si_2O_7(OH)_2 \cdot H_2O$ และ $ZnCO_3$ ซึ่งมีแคดเมียมอยู่ประมาณร้อยละ 0.38 (ศักดิ์สิรินทร์, 2538)

2.2 การใช้ประโยชน์

แคดเมียมจะนำมาใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ เช่น ประมาณร้อยละ 50 ใช้ในการเคลือบเงาด้วยไฟฟ้า ผิวดโลหะที่เคลือบด้วยแคดเมียมจะเป็นเงางาม และทนต่อการกัดกร่อนไม่เป็นสนิม ซึ่งโลหะที่เคลือบด้วยแคดเมียมจะใช้ในอุปกรณ์รถยนต์ต่างๆ ทั้งส่วนของเครื่องยนต์และส่วนประกอบอื่นๆ รวมทั้งสกรู นอกจากนี้ยังผสมกับโลหะอื่นเป็นโลหะอัลลอยด์ เช่น ผสมกับโลหะทองแดงจะช่วยเพิ่มความเหนียวและความทนทานต่อการสึกกร่อนให้กับทองแดงด้วย นำไปใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมสี ใช้ทำแบตเตอรี่ (แคดเมียมนิเกิลแบตเตอรี่) ใช้เป็นส่วนผสมในสารฆ่าเชื้อรา และสารเคมีเกษตร

สังกะสีนำไปใช้ประโยชน์ที่หลากหลายมากกว่าแคดเมียม ทั้งในด้านอุตสาหกรรม เช่น สารเคลือบผิวกันสนิม น้ำยารักษาคุณภาพไม้ ผลิตภัณฑ์สำอาง โลชันบำรุงผิว แชมพูสระผมกันรังแค ยารักษาโรคผิวหนัง ยาฆ่าเชื้อโรค ใช้ในทางการเกษตร เป็นสารคลุกเมล็ดกันเชื้อรา และยังเป็นธาตุอาหารสำหรับคนและพืชด้วย

2.3 ความเป็นพิษของแคดเมียมและสังกะสี

2.3.1 แคดเมียม

การได้รับแคดเมียมของมนุษย์เกิดได้ทั้งจากการรับประทานอาหารที่มีแคดเมียมปนเปื้อน และการหายใจเอาควันบุหรี่และไอเสียรถยนต์เข้าไป แต่โดยส่วนใหญ่แล้วการรับประทานอาหารที่ปนเปื้อนแคดเมียมจัดเป็นปัจจัยหลักในการรับพิษ ซึ่งการได้รับแคดเมียมและสะสมในร่างกายจะมีผลต่อร่างกายตั้งแต่อาการปวดเมื่อยตามร่างกาย การทำงานที่ผิดปกติของอวัยวะภายใน เช่น ตับและไต การเจริญเติบโตที่ผิดปกติของกระดูก ภาวะกระดูกพรุน และถึงขั้นร้ายแรงที่ป่วยด้วยโรค “อิต-อิต” โดยสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา กำหนดปริมาณการได้รับแคดเมียมจากอาหารของร่างกายมนุษย์ไว้ที่ 7 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม (μgkg^{-1}) ต่อน้ำหนักตัวต่อสัปดาห์ (Ragan และ Mast, 1990)

การรับแคดเมียมจากการหายใจจะเกิดอาการเป็นพิษเฉียบพลัน เมื่อร่างกายได้รับแคดเมียมประมาณ 2-4 ชั่วโมง โดยมีอาการเจ็บคอ เจ็บหน้าอก คลื่นไส้ และเวียนศีรษะ ในกรณีที่ได้รับแคดเมียมในปริมาณที่มาก ผู้ป่วยอาจตายด้วยอาการปอดบวม (pulmonary edema) ปริมาณต่ำสุดที่ทำให้เกิดพิษเมื่อหายใจอากาศที่มีแคดเมียมเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง อยู่ระหว่าง 1-3 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2.3.2 สังกะสี

สังกะสีในรูปแร่ธาตุไม่ปรากฏความเป็นพิษ ตามปกติแล้วสังกะสีเป็นแร่ธาตุที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของคน สัตว์และพืช เนื่องจากสังกะสีเป็นส่วนประกอบของเอนไซม์บางชนิด แต่สารประกอบของสังกะสีบางชนิดอาจแสดงความเป็นพิษแต่ไม่รุนแรงเหมือนแคดเมียม เพราะร่างกายสามารถขับสังกะสีที่เกินออกมาได้อย่างรวดเร็ว

การได้รับสังกะสีจนกระทั่งเป็นพิษต่อร่างกายนั้นเกิดขึ้นได้ยาก โดยส่วนใหญ่แล้วจะเกิดขึ้นเนื่องจากความรู้เท่าไม่ถึงการณ์หรือการใช้เพื่อรักษาโรคในปริมาณที่มาก ปริมาณต่ำสุดของสังกะสีที่กำหนดให้มนุษย์ได้รับโดยการกินอยู่ที่ประมาณ 50 มิลลิกรัมของ $ZnCl_2$ หรือ 106 มิลลิกรัมของ $ZnSO_4$ ต่อน้ำหนักตัว โดย WHO (1984) กำหนดให้มนุษย์ได้รับสังกะสีไม่เกิน 0.30-1.0 มิลลิกรัมสังกะสีต่อน้ำหนักตัวต่อวัน

การที่ร่างกายได้รับสังกะสีในปริมาณที่มากจะทำให้มีอาการเหนื่อย อ่อนเพลีย กระหายน้ำ มีนงง คอแห้ง และปวดขา ในกรณีที่ได้รับมากๆ จะหนาวสั่น ปวดแขนขา ปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน มีอาการชัก ไม่เรื้อรังแต่เป็นอาการเฉียบพลัน

2.4 แคดเมียมและสังกะสีในดิน

2.4.1 ปริมาณแคดเมียมและสังกะสีในดิน

ปริมาณแคดเมียมในดินขึ้นอยู่กับชนิดของหินพื้น เช่น ถ้าหินพื้นเป็นหินอัคนีจะพบแคดเมียมในปริมาณที่ต่ำ (น้อยกว่า 0.10-1.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) เนื่องจากการประทุ หรือระเบิดของภูเขาไฟ ลาวาที่มีอุณหภูมิที่สูงมากจึงเป็นผลทำให้ปริมาณแคดเมียมในหินอัคนีมีปริมาณที่ต่ำ ส่วนดินที่มีหินพื้นเป็นหินตะกอนจะมีปริมาณแคดเมียมในดินสูง (0.30-11 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ในขณะที่สังกะสีในดินนอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดของหินพื้นแล้วยังมีปัจจัยอย่างอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เช่น ดินที่มีหินพื้นเป็นหินอัคนีที่เป็นด่าง (basic rocks) จะมีปริมาณสังกะสีมากกว่า ดินที่มีหินพื้นเป็นหินอัคนีสีจางหรือมีคุณสมบัติเป็นกรด เช่น หินแกรนิต (granites) และหินไนส์ (gneisses) (McGeary, Plummer และ Carlson, 2001)

ในสภาพธรรมชาติแคดเมียมจะเคลื่อนที่ได้้น้อยมาก และแคดเมียมที่พบสะสมที่ผิวหน้าดินก็เกิดจากการที่รากพืชพืชดูดดึงแคดเมียมจากชั้นดินล่างขึ้นมาและสะสมอยู่ในต้นพืช เมื่อพืชตายและย่อยสลายแคดเมียมก็จะสะสมที่ผิวหน้าดิน นอกจากนี้ปริมาณแคดเมียมในดินก็จะมีปริมาณลดลงตามความลึก ลดลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งมีปริมาณเท่ากับที่พบในวัตถุต้นกำเนิด ซึ่งมีความแตกต่างกันตามชนิดของหินในบริเวณนั้น (Page และ Bingham, 1973) ปริมาณของแคดเมียมในดินที่มีวัตถุต้นกำเนิดดินที่ต่างกันแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณแคดเมียมที่พบในหินพื้นที่ต่างกัน

ชนิดหินพื้น	ปริมาณแคดเมียม (mgkg ⁻¹)	
	แสดงค่าเป็นช่วง	แสดงค่าเฉลี่ย
หินอัคนี (Igneous)		
หินแกรนิต (Granite)	0.001-0.60	0.12
หินแกร โน ไดออไรต์ (Granodiorite)	0.016-0.10	0.07
หินไบโอติก-แกรนิต (Biotite-Granite)	<0.05-0.50	-
หินควอตซ์มอนโซไนต์ (Quartz Monzonite)	1.4-1.8	-
หินพิทสโตน (Pitchstone)	0.05-0.34	0.17
หินไรโอไลต์ (Rhyolite)	0.05-0.48	-
หินออบซีเดียน (Obsidian)	0.22-0.29	0.25
หินแอนดีไซต์ (Andesite)	-	0.017
หินไซอีไนต์ (Syenite)	0.04-0.32	0.16
หินบะซอลต์ (Basalt)	0.006-0.60	0.22
หินแกบโบร (Gabbro)	0.08-0.20	0.11
หินตะกอน (Sedimentary)		
หินบิทูมินัส (Bituminous)	<0.30-11	0.80
หินเบนโทไนต์ (Bentonite)	<0.30-11	1.4
หินมาร์ล (Marlstone)	0.40-10	2.6
หินดินดานและหินเคลย์ (Shale and Claystone)	<0.30-8.4	1.0
หินปูน (Limestone)	-	0.035
หินแปร (Metamorphic)		
หินเอคโลไจต์ (Eclogite)	0.04-0.26	0.11
หินการ์เมต ชีสต์ (Garnet Schist)	-	1.0
หินแกรย์ไนต์ (Grey Gneiss)	0.12-0.16	0.14

ที่มา: ดัดแปลงจาก Page และ Bingham (1973)

Onyatta และ Huang (1999) ศึกษาดินจากพื้นที่การเกษตรของประเทศเคนยา โดยเก็บดินที่ระดับความลึก 0-40, 40-70 และ 70-100 เซนติเมตร เท่ากันทุกจุด จากดินที่มีวัตถุต้นกำเนิดดินและลักษณะทางภูมิศาสตร์ที่แตกต่างกัน ดินมีสมบัติทางกายภาพและเคมีต่างกัน จากการศึกษาพบว่าแม้จะมีคุณสมบัติต่างกันแต่การกระจายตัวของแคดเมียมทั้งปริมาณแคดเมียมทั้งหมดและแคดเมียมที่สิ่งมีชีวิตนำไปใช้ได้มีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือมีการกระจายตัวที่ลดลงตามความลึก เช่น ดินที่มีวัตถุต้นกำเนิดเป็นถ่านหิน (0.157, 0.089 และ 0.076 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระดับความลึก 0-40, 40-70 และ 70-100 เซนติเมตร เรียงตามลำดับ) ดินที่เก็บมาจากพื้นที่ลุ่มที่มีวัตถุต้นกำเนิดเป็นถ่านหิน (0.119, 0.187 และ 0.132 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ดินที่มีวัตถุต้นกำเนิดเป็นถ่านหิน โดยมีส่วนที่เป็นหินอักษิ (0.047, 0.041 และ 0.02 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ดินที่มีวัตถุต้นกำเนิดเป็นหินอักษิ (0.019, 0.006 และ 0.008 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และดินที่มีหินแปรเป็นวัตถุต้นกำเนิดดิน (0.017, 0.007 และ 0.002 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) จะเห็นว่าดินจากพื้นที่ลุ่มมีปริมาณแคดเมียมในดินใกล้เคียงกันตลอดหน้าตัดดิน และดินที่มีวัตถุต้นกำเนิดมาจากถ่านหินมีปริมาณแคดเมียมในดินมากกว่าดินที่มีวัตถุต้นกำเนิดมาจากหินอักษิ และหินแปร แสดงให้เห็นว่า วัตถุต้นกำเนิดดินมีผลต่อปริมาณแคดเมียมในดิน

Pichel, Kuroiwa และ Sawyerr (2000) ศึกษาดินบริเวณที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก และมีความจำเป็นที่ต้องจัดการอย่างเร่งด่วน (ซูเปอร์ฟันด์; superfund) และบริเวณสำหรับทิ้งแบตเตอรี่เก่า (battery dump) พบว่าบริเวณซูเปอร์ฟันด์มีปริมาณแคดเมียมทั้งหมดเฉลี่ยอยู่ที่ 8.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 3.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในบริเวณทิ้งแบตเตอรี่ มีการกระจายตัวอยู่ที่ชั้นดินบน และลดลงตามความลึก Römken และ Salomons (1998) ศึกษาปริมาณแคดเมียม ทองแดง และสังกะสีในดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการเกษตรและดินในพื้นที่ป่า พบว่าทั้งสองบริเวณมีปริมาณแคดเมียม ทองแดง และสังกะสีสะสมในดินบนและมีค่าลดลงตามความลึก

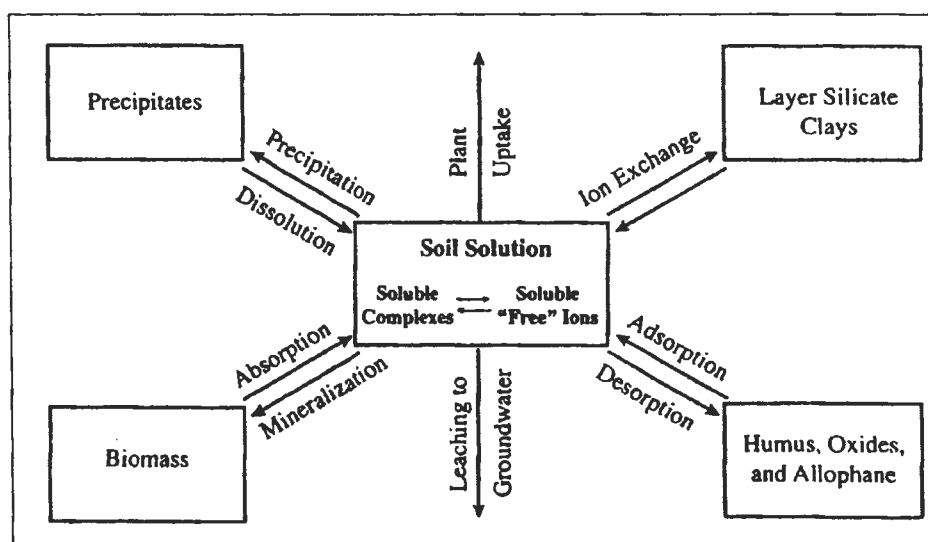
Sterckman และคณะ (2000) ศึกษาการกระจายตัวของแคดเมียม ตะกั่ว และสังกะสีในดินที่เกิดจากการฝังของหินพื้น และดินที่เกิดจากการทับถมของตะกอนแม่น้ำ ในบริเวณที่อยู่ใกล้บริเวณโรงถลุงแร่ในฝรั่งเศส พบว่าโลหะทั้งสามมีการกระจายตัวอยู่ที่ชั้นดินบน (0-20 เซนติเมตร) และมีค่าลดลงตามความลึกในดินจากทั้งสองบริเวณ และพบว่าที่ระดับความลึกตั้งแต่ 40 เซนติเมตรลงไป ทั้งสองบริเวณมีปริมาณของโลหะทั้งสามลดลง และมีปริมาณไม่แตกต่างกัน ในขณะที่ชั้นดินบนของดินตะกอนจะมีปริมาณของโลหะทั้งสามตัวมากกว่า

จากการศึกษาของ Kashem และ Singh (2002) ในการนำอากาศตะกอนจากโรงฟอกหนัง กากตะกอนชุมชน กากตะกอนโรงงานผลิตยา และกากตะกอนโรงงานกระดาษมาใช้ประโยชน์ในพื้นที่เพาะปลูก พบว่าดินมีการปนเปื้อนและสะสมของแคดเมียม ตะกั่ว และสังกะสี พบมากที่ระดับความลึก 0-5 เซนติเมตร (แคดเมียม 0.10-0.62 ตะกั่ว 31-54 และ สังกะสี 85-838

มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และมีค่าลดลงตามความลึก และการกระจายตัวของส่วนที่พืชนำไปใช้ได้ก็มีลักษณะการกระจายตัวลดลงตามความลึกเช่นกัน

2.4.2 ส่วนประกอบทางเคมี (chemical fractionations)

โลหะหนัก หรือแร่ธาตุที่อยู่ในดิน ไม่ได้อยู่เฉพาะใน โครงสร้างผลึกดินเท่านั้น แต่อยู่ในหลายส่วนของดิน โดยอาจจะอยู่ในสารละลายดิน สารเคลือบเม็ดดิน จับอยู่กับประจุลบของดิน อินทรีย์วัตถุในดินหรือสิ่งมีชีวิตในดิน เป็นต้น ดังภาพที่ 2.1 แสดงกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในดินที่มีผลต่อปฏิสัมพันธ์ของแร่ธาตุในวัฏจักรของแข็งและของเหลว ดังนั้นส่วนประกอบทางเคมีของดินจึงเป็นตัวบ่งชี้ให้ทราบว่าแร่ธาตุที่พบในดินนั้นอยู่ในส่วนใดบ้างและมีปริมาณเท่าใด นอกจากนี้ยังเป็นดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน และความสามารถนำไปใช้ได้ของสิ่งมีชีวิตของธาตุนั้นได้ด้วย ส่วนประกอบทางเคมีของโลหะหนักในดินประกอบด้วย 6 ส่วนประกอบหลักดังนี้



ภาพที่ 2.1 กระบวนการที่เกิดขึ้นภายในดินที่มีผลต่อปฏิสัมพันธ์ของโลหะหนักในวัฏจักรของแข็งและของเหลว
ที่มา: Adriano (2001)

2.4.2.1 ส่วนที่ละลายน้ำได้ (water soluble fractions) เป็นส่วนที่อยู่ในสารละลายดิน โดยจะพบแคดเมียมในส่วนนี้ได้เมื่อปริมาณแคดเมียมในดินมีสูงมากจนประจุลบของดินและอินทรีย์วัตถุไม่สามารถจะคูยึดไว้ได้ ปริมาณแคดเมียมส่วนเกินนี้จะอยู่ในสารละลายดิน ระหว่างช่องว่างในดิน ในรูปของไอออนอิสระ ซึ่งพืชหรือสิ่งมีชีวิตในดินสามารถดูดดึงไปใช้ได้ทันที หรือสามารถกระจายตัวไปในสิ่งแวดล้อมได้ในสภาวะธรรมชาติ

2.4.2.2 ส่วนที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable fractions) เป็นส่วนที่จับอยู่กับประจุลบของอนุภาคดินเหนียว และอินทรีย์วัตถุ ด้วยพันธะไอออนิก (ionic bound) ดินจะปลดปล่อยออกมาในสภาวะที่เป็นบัฟเฟอร์ (buffer) หรือเป็นกลาง โดยการแลกเปลี่ยนกับไอออนอิสระ หรือการแทนที่จากแร่ธาตุตัวอื่นในสารละลายดินที่มีแรงดึงดูดกับประจุลบของอนุภาคดินเหนียวหรืออินทรีย์วัตถุที่มากกว่า เช่น แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) โพแทสเซียมไอออน (K^+) เป็นต้น

2.4.2.3 ส่วนที่ถูกดูดซับด้วยคาร์บอเนต (carbonate fractions) ในกรณีที่ดินมีพีเอชเป็นด่าง หรือดินบริเวณนั้นมีหินพื้นเป็นหินปูน ไอออนอิสระของแร่ธาตุจะถูกดูดซับไว้ด้วยคาร์บอเนตไอออน อยู่ในรูปของสารประกอบคาร์บอเนต ดังนั้นในสภาวะธรรมชาติทั่วไปแร่ธาตุกลุ่มนี้ก็จะไม่ถูกปลดปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อม แต่เมื่อสภาพพีเอชของดินหรือน้ำเปลี่ยน คือดินหรือน้ำมีสภาวะที่เป็นกรดเพิ่มมากขึ้นแร่ธาตุกลุ่มนี้ก็จะถูกปลดปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อม

2.4.2.4 ส่วนที่ถูกดูดซับด้วยออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (iron and manganese oxides fractions) เป็นส่วนที่อยู่ในรูปของสารก้อนกลม (nodule) สารมวลพอก (concretion) หรือสารเชื่อมเม็ดดิน (cementing agent) โดยดินที่อยู่ในสภาพน้ำขังติดต่อกันเป็นเวลานานจะพบว่าแร่ธาตุในดินอยู่ในส่วนนี้มาก ยากต่อการดูดซับของพืชและสิ่งมีชีวิต โลหะที่อยู่ในกลุ่มนี้จะถูกปลดปล่อยออกมาเมื่อสภาพรีดักชัน-ออกซิเดชันของดินในขณะนั้นเปลี่ยนไป

2.4.2.5 ส่วนที่ถูกดูดซับด้วยอินทรีย์สาร (organic fractions) เป็นส่วนที่จับอยู่กับอินทรีย์วัตถุ และอยู่ในโครงสร้างของซากอินทรีย์ สัตว์ในดิน เช่น อยู่ในโครงสร้างของโปรตีน ลิกนิน โลหะกลุ่มนี้จะถูกปลดปล่อยเมื่อดินอยู่ในสภาพรีดิวซ์

2.4.2.6 ส่วนที่คงเหลือในดิน (residual fractions) เมื่อส่วนต่างๆ ที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นถูกแยกออกไปหมดแล้ว โลหะที่เหลืออยู่จะเป็นส่วนที่เป็นองค์ประกอบของแร่ปฐมภูมิ (primary mineral) และแร่ทุติยภูมิ (secondary mineral) ซึ่งเป็นวัตถุต้นกำเนิดของดินนั้นๆ โดยโลหะจะอยู่ในโครงร่างผลึก (lattice) ของแร่เหล่านั้นๆ ซึ่งโลหะจะไม่ถูกปลดปล่อยออกมาภายใต้สภาพที่เป็นธรรมชาติ

การแยกส่วนประกอบทางเคมีทำได้โดยใช้สารสกัดที่มีคุณสมบัติต่างกันในการสกัดเป็นลำดับขั้น ตั้งแต่ส่วนที่หนึ่งจนกระทั่งถึงส่วนที่หกตามลำดับ ซึ่ง Ma และ Rao (1997) ได้ศึกษาและสรุปไว้ว่า เมื่อดินมีปริมาณแคดเมียมทั้งหมดมากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะพบเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้ ส่วนที่คงเหลือในดิน ส่วนที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ ส่วนที่ถูกดูดซับด้วยคาร์บอเนต ส่วนที่ถูกดูดซับด้วยออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส ส่วนที่ถูกดูดซับด้วยอินทรีย์สาร และส่วนที่ละลายน้ำได้ โดยความสามารถในการถูกดูดซับไว้ในส่วนต่างๆ นี้ขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินเป็นหลัก

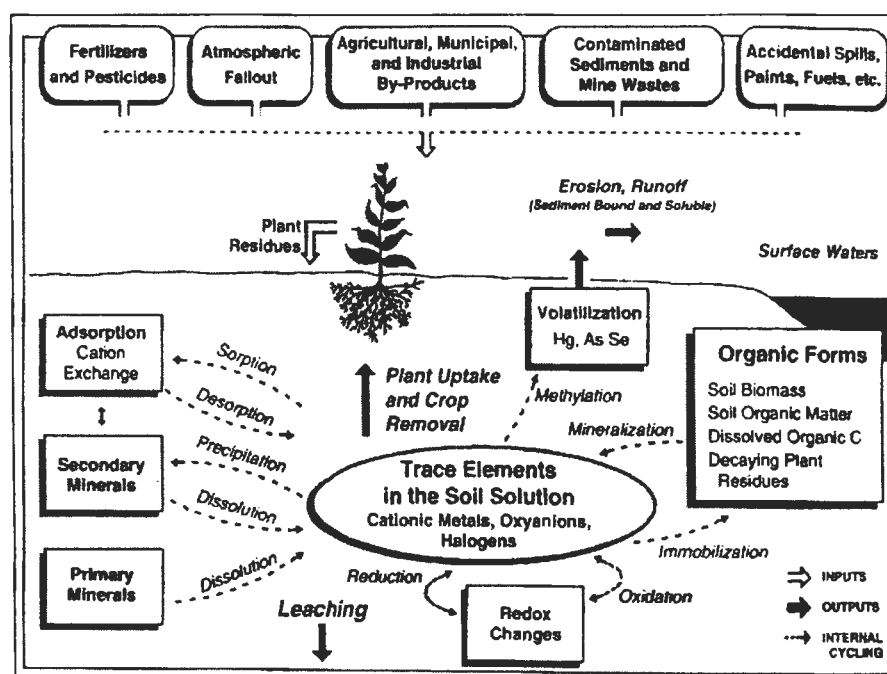
จากการศึกษาของ Pichel, Kuroiwa และ Sawyerr (2000) บริเวณซุเปอร์ฟินด์ และบริเวณสำหรับทิ้งแบตเตอรี่พบว่าบริเวณซุเปอร์ฟินด์แคดเมียมจะอยู่ในส่วนที่ถูกดูดซับอินทรีย์สารร้อยละ 33.4 ส่วนที่ถูกดูดซับด้วยคาร์บอนร้อยละ 32 ส่วนที่คงเหลือในดินร้อยละ 16 และส่วนที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ร้อยละ 15 ในขณะที่บริเวณสำหรับทิ้งแบตเตอรี่พบแคดเมียมในส่วนที่ถูกดูดซับด้วยคาร์บอนร้อยละ 44 ส่วนที่คงเหลือในดินร้อยละ 22 และส่วนที่ถูกดูดซับด้วยอินทรีย์สารร้อยละ 19 ในขณะที่ส่วนที่สามารถแลกเปลี่ยนได้และส่วนที่ละลายน้ำได้มีปริมาณน้อยมากจากการศึกษาครั้งนี้ทำให้พบว่า ร้อยละ 83 ของแคดเมียมในบริเวณซุเปอร์ฟินด์ และร้อยละ 77 ในบริเวณสำหรับทิ้งแบตเตอรี่ไม่ได้อยู่ในส่วนที่คงเหลือในดิน แสดงให้เห็นว่า แคดเมียมในดินส่วนใหญ่ไม่ได้มาจากวัตถุดิบกำเนิดดินในบริเวณนั้น แต่มาจากสภาพแวดล้อมและการใช้ประโยชน์ที่ดิน ข้อควรระวังคือ แคดเมียมในบริเวณดังกล่าวง่ายต่อการดูดซับของพืชในบริเวณนั้นและบริเวณใกล้เคียง

Kashem และ Singh (2002) ศึกษาแยกส่วนประกอบทางเคมีของแคดเมียม ตะกั่ว และสังกะสีในดินที่นำเอาจากตะกอนมาใช้ พบว่าแคดเมียมจะอยู่ในรูปของส่วนที่ถูกดูดซับด้วยออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสมากที่สุด ยกเว้นในดินที่ใช้กากตะกอนจากโรงงานกระดาษจะพบแคดเมียมในส่วนที่ถูกดูดซับด้วยคาร์บอนมากที่สุด โดยพบมากที่สุดที่ชั้นผิวดิน เนื่องจากชั้นดินดังกล่าวมีค่าพีเอชที่สูง (pH 7.5-7.8) และเมื่อหาดัชนีบ่งชี้การเคลื่อนที่ (mobility index) โดยหาสัดส่วนระหว่างผลรวมของส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในดิน (ส่วนที่ละลายน้ำได้ ส่วนที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ และส่วนที่ถูกดูดซับด้วยคาร์บอน) กับผลรวมของส่วนที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในดิน (ส่วนที่ถูกดูดซับด้วยออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส ส่วนที่ถูกดูดซับด้วยอินทรีย์สาร และส่วนที่คงเหลือในดิน) พบว่าการที่ส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในดินพบที่ชั้นดินบนมากกว่าชั้นอื่นๆ ชี้ให้เห็นว่ากิจกรรมของมนุษย์มีผลต่อการปลดปล่อยโลหะหนักของดิน และโลหะหนักในดินที่อยู่ในรูปที่สามารถเคลื่อนที่ได้และสิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้มาจากปุ๋ย หรือสิ่งที่มนุษย์เพิ่มลงไป ในดินมากกว่ามาจากวัตถุดิบกำเนิดดิน

Onyatta และ Huang (1999) ได้แยกส่วนประกอบทางเคมีของดินจากพื้นที่ทำการเกษตรของประเทศเคนย่า พบว่าดินที่ศึกษาไม่มีแคดเมียมอยู่ในส่วนที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ และส่วนที่ถูกดูดซับด้วยคาร์บอน และที่ผิวดินส่วนใหญ่พบแคดเมียมอยู่ในส่วนที่ถูกดูดซับอินทรีย์สาร คิดเป็นร้อยละ 37 ของปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน และในชั้นดินล่างพบแคดเมียมอยู่ในส่วนที่คงเหลือในดินคิดเป็นร้อยละ 43 ของปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน ที่ระดับความลึก 40-70 เซนติเมตร และร้อยละ 37 ที่ระดับความลึก 70-100 เซนติเมตร และการกระจายตัวของส่วนประกอบทางเคมีของแคดเมียมในดินก็ผันแปรไปตามชนิดของดิน

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวของแคดเมียมและสังกะสีในดิน

เนื่องจากแร่ธาตุในดินไม่ได้อยู่ในส่วนใดส่วนหนึ่งของดิน โดยเฉพาะดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น หากแต่อยู่ในทุกๆ ส่วนของดิน ดังนั้นการกระจายตัวของแร่ธาตุหรือสารประกอบต่างๆ ในดินจึงมีกระบวนการหรือปัจจัยต่างๆ เข้ามาเกี่ยวข้องมากมาย ภาพที่ 2.2 แสดงวัฏจักรของแร่ธาตุในดิน ซึ่งรวมไปถึงธาตุที่เป็นธาตุอาหารสำหรับสิ่งมีชีวิต และธาตุที่เป็นโลหะหนักอันตราย เช่น แคดเมียม ตะกั่ว พรอทเป็นต้น เพื่อแสดงให้เห็นถึงกระบวนการและการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ของแร่ธาตุเสริมและโลหะหนักในดิน ทั้งแหล่งของแร่ธาตุ กระบวนการหรือปฏิกิริยาต่างๆ ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการหรือปฏิกิริยานั้นๆ และอิทธิพลของกระบวนการหรือปฏิกิริยานั้นต่อการดูดซับธาตุเสริมของสิ่งมีชีวิต ซึ่งกระบวนการหรือปฏิกิริยาเหล่านั้นจะเป็นประโยชน์ในการศึกษาการกระจายตัวของโลหะหนัก ความเสี่ยงต่อการเกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมจากโลหะหนัก และช่วยในการจัดการกับปัญหาที่เกิดขึ้นกับพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวของโลหะหนักในดินสามารถสรุปได้ดังนี้



ภาพที่ 2.2 แหล่งของแร่ธาตุเสริมและโลหะหนัก กระบวนการ และปฏิกิริยาระหว่างแร่ธาตุเสริม โลหะหนัก กระบวนและสิ่งมีชีวิตในดิน

ที่มา: Pierzynski, Sims และ Vance (2005)

2.5.1 ปฏิกริยาดินหรือพีเอช (pH)

โดยทั่วไปแล้วโลหะหนักจะกระจายตัวได้มากในดินที่มีคุณสมบัติเป็นกรด เนื่องจากง่ายต่อการละลายหรือแลกเปลี่ยนกับไอออนอิสระที่อยู่ในสารละลายดิน ทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นในสารละลายดิน ง่ายต่อการดูดซับของพืชและการนำไปใช้ของสิ่งมีชีวิตอื่นๆ และยังถูกไหลบ่าลงสู่แหล่งน้ำได้มากขึ้น (Dudka และ Adriano, 1997) พีเอชดินจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการประเมินความสามารถในการเคลื่อนที่และการดูดซับแคดเมียมและสังกะสีของพืช โดยทั่วไปแล้วพืชจะดูดซับแคดเมียมได้เพิ่มขึ้นเมื่อดินมีพีเอชลดลง การทดลองของ Römken และ Salomons (1998) พบว่าที่พีเอชน้อยกว่า 5.5 แคดเมียมและสังกะสีจะถูกปลดปล่อยออกจากดินได้มากขึ้น และเมื่อพีเอชเพิ่มมากขึ้นแคดเมียมและสังกะสีจะถูกปลดปล่อยออกมาลดลง เช่นเดียวกับการทดลองของ Naidu และคณะ (1997) พบว่าในช่วงพีเอชของดินเท่ากับ 2.0-3.0 ดินจะมีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมต่ำ และความสามารถในการดูดซับของดินจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อพีเอชของดินมีค่าเพิ่มมากขึ้น

พีเอชดินที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณแคดเมียมในสารละลายดิน และปริมาณแคดเมียมที่ถูกดูดซับด้วยพืชลดลง ดังเช่นการศึกษาดินที่ปลูกผักในประเทศออสเตรเลียของ Jinadasa และคณะ (1997) พบว่าพื้นที่ที่ดินมีพีเอชและปริมาณแคดเมียมในดินสูง (pH 6.8, Cd 6.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) จะมีปริมาณแคดเมียมสะสมในผักที่ปลูกในพื้นที่นั้นเพียงเล็กน้อย เช่น แรดิช (radish) มีแคดเมียมเพียง 0.001 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในขณะที่อีกพื้นที่หนึ่งดินมีปริมาณแคดเมียมทั้งหมด 1.12 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีพีเอชเท่ากับ 4.4 พบว่ากะหล่ำที่ปลูกในดินบริเวณนั้นมีปริมาณแคดเมียมสะสมถึง 0.56 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

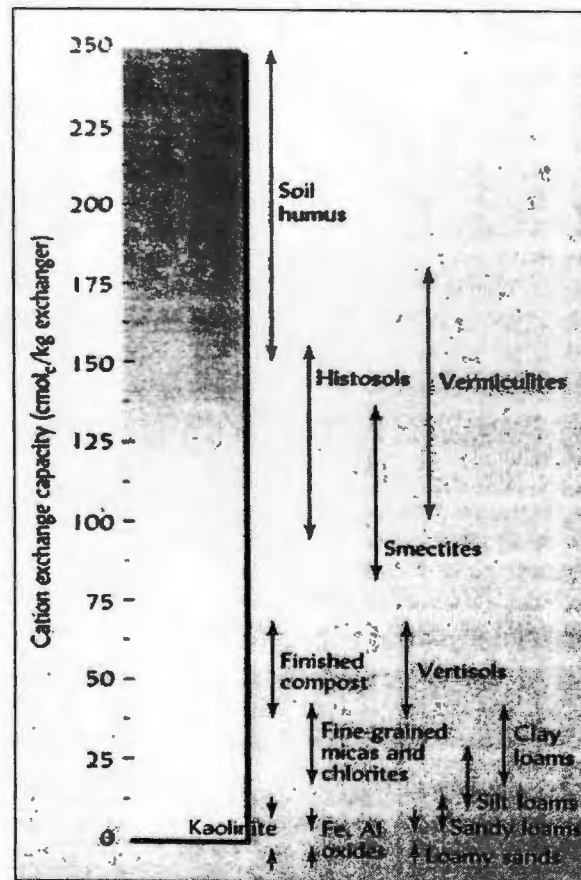
Singh และ Myhr (1998) ศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับแคดเมียมของข้าวบาร์เลย์เป็นเวลาติดต่อกันสี่ปี (ค.ศ. 1991-1994) พบว่าทุกอัตราการเพิ่มแคดเมียมลงไปดินในปี ค.ศ. 1991 ซึ่งเป็นปีแรกของการทดลอง ปริมาณแคดเมียมในข้าวบาร์เลย์ที่ปลูกในดินที่มีพีเอช 6.5 สูงกว่าข้าวบาร์เลย์ที่ปลูกในดินที่มีพีเอช 5.5 (13 และ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ) แต่ในปีที่สี่ของการทดลองพบว่าปริมาณแคดเมียมในข้าวบาร์เลย์ที่ปลูกในดินที่มีพีเอชเท่ากับ 5.5 มีปริมาณที่สูงกว่าที่ปลูกในดินที่มีพีเอชเท่ากับ 6.5 (82 และ 69 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ) แสดงให้เห็นว่าการดูดซับแคดเมียมของพืชจะลดลงเมื่อพีเอชดินมีค่าสูง เนื่องจากแคดเมียมไอออนจะถูกดูดซับไว้ด้วยอนุภาคดินทำให้ปริมาณแคดเมียมที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ลดลง แต่อย่างไรก็ตามผลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับแคดเมียมของอนุภาคดินยังขึ้นอยู่กับปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินด้วย

2.5.2 ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก (cation exchangeable capacity; CEC)

ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก หรือ ซีอีซี เป็นผลรวมของประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ ซึ่งดินหรือแร่ดินเหนียวหรือวัสดุอื่นๆ ดูดซับไว้ได้ ปริมาณอินทรีย์วัตถุและอนุภาคดินเหนียวที่สูงทำให้ดินมีค่าซีอีซีสูงตามไปด้วย ดังนั้นค่าซีอีซีจึงเป็นสมบัติทางเคมีที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของดิน ซึ่งนอกจากจะใช้ในการจำแนกชุดดินแล้ว ยังใช้ประเมินความอุดมสมบูรณ์ของดิน และประเมินศักยภาพทางสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย (Brady และ Weil, 2002) ภาพที่ 2.3 แสดงชนิดของแร่ดินเหนียว อินทรีย์วัตถุ และวัสดุดิน (soil materials) กับความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกของแร่ดินเหนียว ชนิด อินทรีย์วัตถุ และวัสดุดิน จากภาพจะเห็นว่าอินทรีย์วัตถุมีค่าซีอีซีสูงที่สุด แสดงว่ามีความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกสูง หรืออาจจะกล่าวได้ว่าอินทรีย์วัตถุสามารถดูดซับประจุบวกไว้ได้มากนั่นเอง ดังนั้นในกรณีที่ดินหรืออินทรีย์วัตถุดูดซับเอาโลหะหนักเอาไว้ได้มากก็จะช่วยให้การกระจายตัวของโลหะหนักลดลง ไม่ส่งผลกระทบต่อการจัดการ

จากการศึกษาดินที่เกิดจากอิทธิพลของตะกอนน้ำพัดพาของ Sterckeman และคณะ (2000) พบว่าปริมาณสังกะสีในดินจะผันแปรตามค่าซีอีซีของดิน ดังจะเห็นได้จากชั้นดินบนที่มีค่าซีอีซีสูง (อยู่ระหว่าง 8.4-45.6 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ($\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$) ปริมาณสังกะสีที่สะสมในชั้นดินบนก็มีค่าสูงด้วยเช่นกัน (82-19,690.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

Li และคณะ (2006) ได้ศึกษาปริมาณของแคดเมียมในมะเฟืองที่ปลูกในดินที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียมในมณฑลฉางโจว ประเทศจีน จากการศึกษาพบว่าปริมาณแคดเมียมในมะเฟืองเรียงลำดับจากมากไปน้อย ดังนี้ ยอดอ่อน ใบ ราก และผล โดยร้อยละ 74 ของปริมาณแคดเมียมในมะเฟืองจะพบในส่วนของยอดอ่อนและใบ และพบน้อยที่สุดในส่วนของผล จากการศึกษาเขาพบว่า พีเอชมีผลต่อการดูดซับแคดเมียมของมะเฟืองมากที่สุด ($r = 0.84$) ในขณะที่อินทรีย์วัตถุและซีอีซีไม่มีผลต่อการดูดซับแคดเมียมของมะเฟือง ($r = -0.78$ ในอินทรีย์วัตถุ และ $r = -0.47$ ในซีอีซี) เนื่องจากคุณสมบัติที่เป็นกีดกันของอินทรีย์วัตถุและซีอีซี จึงส่งผลให้เกิดการสะสมตัวของแคดเมียมในดิน ทำให้พืชดูดซับแคดเมียมไปได้น้อย และการกระจายตัวของแคดเมียมในดินที่มีอินทรีย์วัตถุและซีอีซีสูงก็เกิดขึ้นได้น้อยเช่นกัน



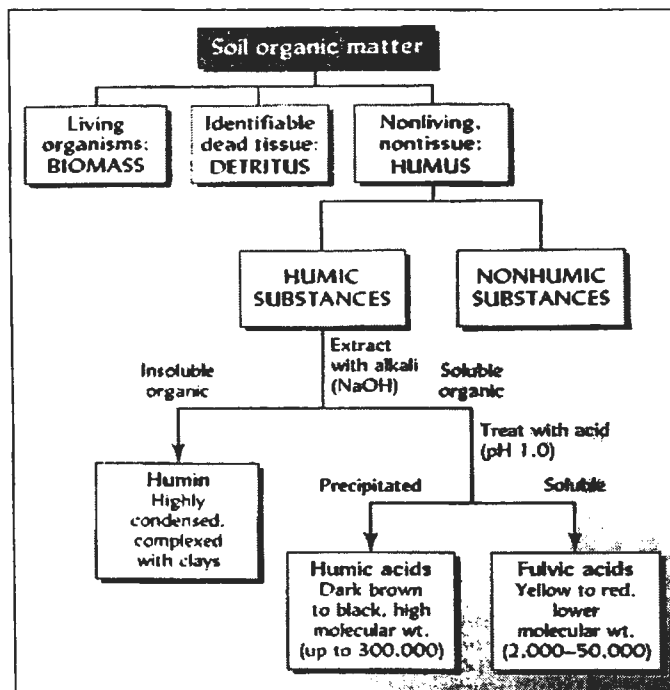
ภาพที่ 2.3 ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกของแร่ดินเหนียว ดินที่มีเนื้อดินที่ต่างกัน และอินทรีย์วัตถุ

ที่มา: Brady และ Weil (2002)

2.5.3 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (organic matter; OM)

อินทรีย์วัตถุในดิน (soil organic matter) มีความหมายครอบคลุมตั้งแต่ส่วนของซากพืชหรือสัตว์ที่กำลังสลายตัว เซลล์จุลินทรีย์ที่ยังมีชีวิตอยู่และส่วนที่ตายแล้ว ตลอดจนสารอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลาย หรือส่วนที่สังเคราะห์ขึ้นมาใหม่ แต่ไม่รวมถึงรากพืชหรือเศษซากพืชหรือสัตว์ที่ยังไม่ย่อยสลาย ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าอินทรีย์วัตถุในดินประกอบไปด้วยสารอินทรีย์แทบทุกชนิดที่สามารถเกิดขึ้นได้ตามธรรมชาติ

อินทรีย์วัตถุในดินอาจแบ่งได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนที่เป็นสารฮิวมิก (humic substances) และส่วนที่ไม่ใช่สารฮิวมิก (nonhumic substances) ภาพที่ 2.4 แผนภูมิแสดงการแบ่งส่วนของอินทรีย์วัตถุ (Brady และ Weil, 2002)

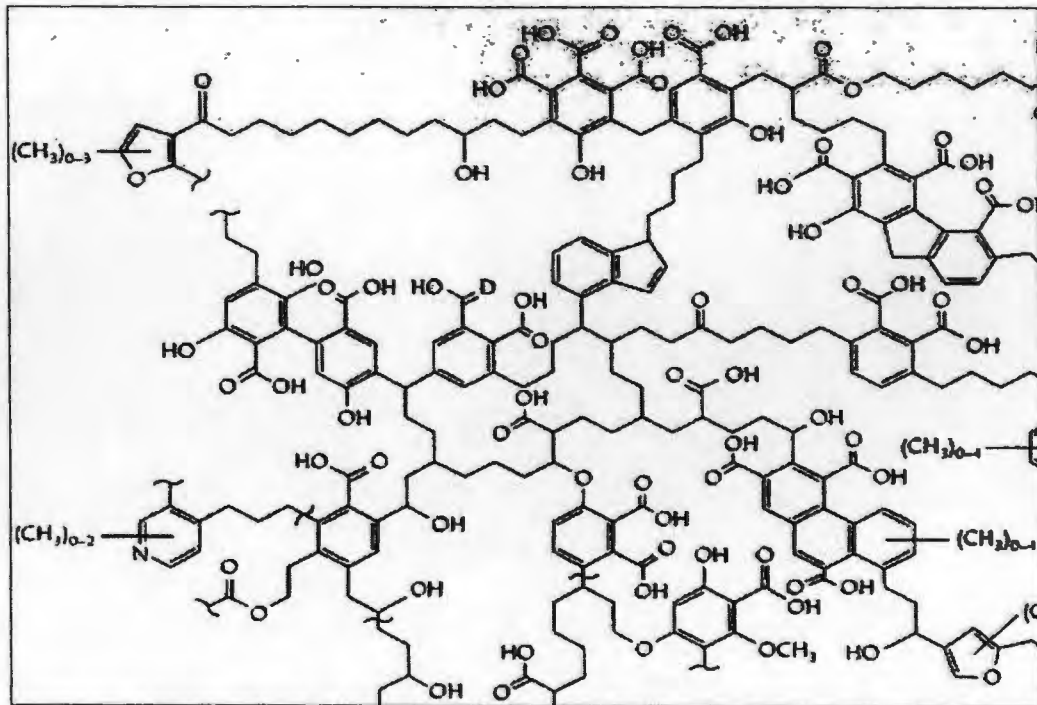


ภาพที่ 2.4 การจำแนกส่วนประกอบของอินทรีย์วัตถุ ประกอบด้วยส่วนที่เป็นสารฮิวมิก (humic substance) และส่วนที่ไม่ใช่สารฮิวมิก (nonhumic substance)

ที่มา: Brady และ Weil (2002)

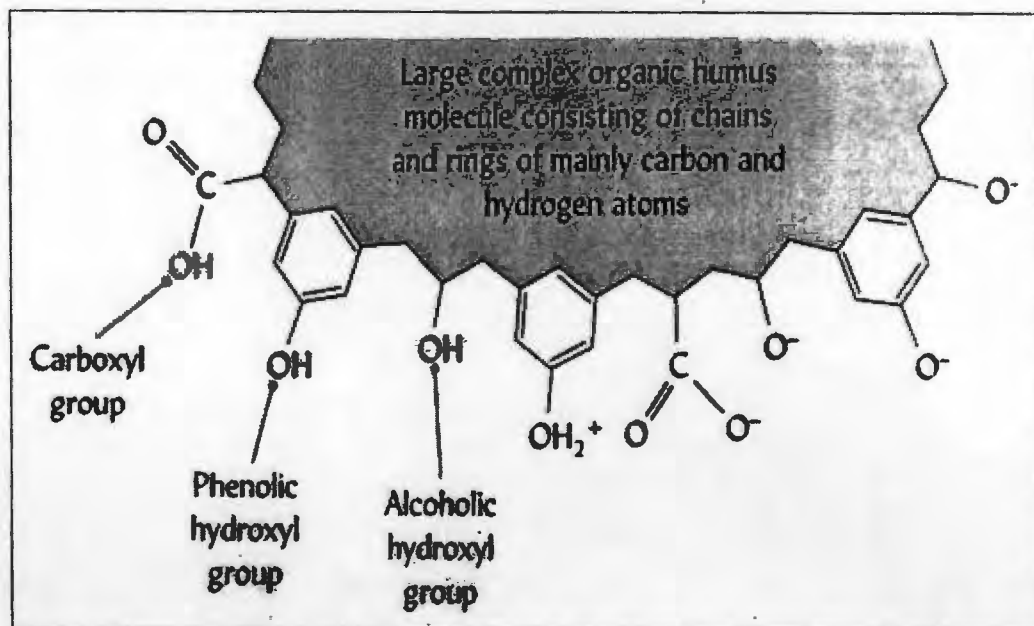
สารฮิวมิก เป็นส่วนที่มีโครงสร้างซับซ้อน ย่อยสลายได้ยาก โครงสร้างหลักประกอบด้วยสารประกอบที่มีโครงสร้างเป็นวง (aromatic compound) เป็นแกนทำให้ย่อยสลายได้ยาก ดังภาพที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของสารฮิวมิก และภาพที่ 2.6 แสดงหมู่ฟังก์ชัน (function group) ของอินทรีย์วัตถุที่จับกับประจุบวกของแร่ธาตุเอาไว้ ทั้งแร่ธาตุที่เป็นธาตุอาหารสำหรับพืช และแร่ธาตุที่เป็นโลหะหนักอันตรายในดินด้วย

ส่วนที่ไม่ใช่สารฮิวมิก ได้แก่สารประกอบที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ย่อยสลายได้ง่าย เช่น กรดอะมิโน (amino acid) คาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) กรดไขมัน (fatty acid) และโปรตีน (protein) เป็นต้น สารประกอบเหล่านี้ ปกติจะถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายได้ง่าย แต่ก็ยังพบในปริมาณค่อนข้างมากในดิน เนื่องจากส่วนใหญ่จะเข้าไปจับกับอนุภาคดินเหนียว หรือทำปฏิกิริยากับประจุบวกของโลหะบางชนิด เช่น เหล็ก อะลูมิเนียม หรือทองแดง หรือแม้แต่เข้าไปทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมเม็ดดินทำให้ย่อยสลายได้ยากขึ้น



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของสารฮิวมิก ที่ประกอบด้วยโครงสร้างหลักที่เป็นวงจิ่งทำให้ย่อยสลายได้ยาก

ที่มา: ดัดแปลงจาก Brady และ Weil (2002)



ภาพที่ 2.6 หมู่ฟังก์ชันของสารฮิวมิก ประกอบด้วยกลุ่มคาร์บอกซิล (carboxyl group) กลุ่มฟีนอลิก (phenolic hydroxyl group) และกลุ่มไฮดรอกซิล (alcoholic hydroxyl group) ทำหน้าที่จับกับประจุบวกของแร่ธาตุในดิน

ที่มา: Brady และ Weil (2002)

Udom และคณะ (2004) เพื่อศึกษาการกระจายตัวของสังกะสี ทองแดง แคดเมียม และตะกั่วในดินที่มีการใช้กากตะกอนชุมชนในการปรับปรุงคุณภาพดิน เป็นเวลา 40 ปีติดต่อกันในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ในจ.ร้อยเอ็ด จากการศึกษพบว่า ปริมาณอินทรีย์วัตถุมีความสัมพันธ์ในทางบวกกับสังกะสี ($r = 0.818$) และแคดเมียม ($r = 0.864$) ซึ่งให้เห็นว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุมีผลต่อการสะสมของแคดเมียมและสังกะสีในดิน แต่ปริมาณอินทรีย์วัตถุที่สูงมีผลทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่และการดูดซับโลหะหนักของพืชลดลง

2.5.4 รีดอกซ์โพเทนเชียล (redox potential; Eh)

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation-reduction (redox) reaction) เป็นตัวควบคุมกระบวนการเคมีหลายกระบวนการในดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ และดินตะกอน ปฏิกิริยารีดอกซ์เป็นการส่งผ่านหรือแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน ผลของการแลกเปลี่ยนนี้ทำให้ตัวให้อิเล็กตรอน (electron donor) มีวาเลนซ์ (valence) เพิ่มขึ้น ในขณะที่ตัวรับอิเล็กตรอน (electron acceptor) มีวาเลนซ์ลดลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของเลขวาเลนซ์นี้มีผลทำให้ธาตุนั้นเปลี่ยนสถานะไป เช่น เปลี่ยนจากแร่หรือของแข็งไปอยู่ในรูปของสารละลาย หรือเปลี่ยนจากสารละลายไปอยู่ในรูปแก๊ส การสูญเสียอิเล็กตรอนไปจากอะตอม (atom) เรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในขณะที่การรับอิเล็กตรอนเรียกว่าปฏิกิริยารีดักชัน ดังนั้นปฏิกิริยารีดอกซ์ที่สมบูรณ์จะต้องมีทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน และปฏิกิริยารีดักชัน โดยปฏิกิริยาทั้งสองจะมีผลต่อดินในทางที่ตรงกันข้าม

ปฏิกิริยาออกซิเดชันในดิน จะมีสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในดิน (micro organism) เป็นตัวกระตุ้น เมื่อสิ่งมีชีวิตหายใจจะทำให้อิเล็กตรอน โดยเฉพาะไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้น โดยสิ่งมีชีวิตกลุ่มนี้จะใช้คาร์บอนที่ได้มาจากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุเป็นแหล่งพลังงาน ดังนั้นสิ่งสำคัญของปฏิกิริยานี้คือ สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในดิน โดยเฉพาะแบคทีเรีย และอินทรีย์วัตถุในดิน ซึ่งถ้าขาดแหล่งพลังงานหรือผู้ย่อยสลายปฏิกิริยารีดอกซ์ก็จะไม่เกิด (Richardson และ Vepreakas, 2001)

ค่ารีดอกซ์มีผลต่อการกระจายตัวของสังกะสี กล่าวคือเมื่อดินอยู่ในสภาพน้ำขังดินจะมีค่ารีดอกซ์ต่ำมีผลให้สังกะสีกระจายตัวได้น้อยกว่าเมื่ออยู่ในสภาพกึ่งน้ำขัง และทำให้สังกะสีในดินเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่เป็นประ โยชนต์ต่อข้าวลดน้อยลง นอกจากนี้ยังทำให้แคดเมียมอยู่ในรูป CdS ทำให้ข้าวดูดซับแคดเมียมไปสะสมในข้าวได้น้อย แต่เมื่อระบายน้ำออกเพื่อเก็บเกี่ยวแคดเมียมจะเปลี่ยนอยู่ในรูปแคดเมียมไอออนทำให้รากข้าวสามารถดูดซับแคดเมียมได้และนำไปสะสมยังเมล็ดเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเพื่อเป็นการลดปริมาณแคดเมียมสะสมในเมล็ดข้าวจึงไม่ควรที่จะระบายน้ำออกจากที่นา ก่อนที่จะเก็บเกี่ยวข้าว แต่ควรที่จะเก็บเกี่ยวข้าวที่อยู่ในสภาพน้ำขัง

2.6 แหล่งของแคดเมียมและสังกะสี

ดินทั่วไปมีปริมาณแคดเมียมในดินน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ศุภมาศ, 2539) รวมถึงดินที่ใช้ในการเกษตร ซึ่งก็เป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่าปริมาณแคดเมียมที่พบในดินที่มีอยู่สูงนั้น มาจากกิจกรรมการทำเหมืองแร่สังกะสี หรืออยู่ใกล้กับบริเวณที่ทิ้งกากแคดเมียมจากอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถจะถูกระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย

คว้นจากท่อไอเสียจากรถยนต์ คว้นจากปล่องคว้นอุตสาหกรรม และการใช้ปุ๋ยฟอสเฟต ก็เป็นอีกปัจจัยที่ทำให้ดินมีปริมาณแคดเมียมในดินเพิ่มมากขึ้น การเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วของภาคอุตสาหกรรมในช่วงยี่สิบปีที่ผ่านมา สามารถประเมินได้ว่าปริมาณแคดเมียมที่เกิดจากคว้นอุตสาหกรรมจะเพิ่มสูงขึ้น

สังกะสีนอกจากจะมาจากกระบวนการหุ้ทางธรณีแล้ว ยังมาจากแหล่งอื่นด้วย เช่น จากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเพิ่มแร่ธาตุสังกะสีลงไปในดินเพื่อการเกษตร ซึ่งนอกจากจะเพิ่มสังกะสีให้กับดินและพืชแล้ว ยังเป็นการเพิ่มแคดเมียมและตะกั่วลงไปดินอีกทางเช่นกัน เนื่องจากทั้งแคดเมียมและตะกั่วเป็นธาตุที่อยู่ร่วมกับสังกะสีนั่นเอง

2.6.1 ปุ๋ยฟอสเฟตและปุ๋ยสังกะสี

ชนิดของปุ๋ยฟอสเฟตที่มีแคดเมียมที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในดินประปนอยู่มีทั้งที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้และไม่ละลายน้ำ โดยรูปที่ละลายน้ำได้ก็ประกอบไปด้วยปุ๋ยครบสูตร คือมีทั้งไนโตรเจน (nitrogen; N) ฟอสฟอรัส (phosphorus; P) และโพแทสเซียม (potassium; K) รวมกันอยู่ และปุ๋ยเดี่ยวคือ ซิงเกิล ซูเปอร์ฟอสเฟต (single superphosphate) และ ทริปเปิล ซูเปอร์ฟอสเฟต (triple superphosphate) ส่วนที่อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำคืออยู่ในหินฟอสเฟต (rock phosphate) สาเหตุที่บอกว่าอยู่ในรูปที่ละลายน้ำ และไม่ละลายน้ำก็เนื่องจากเมื่อมีความชื้นเพิ่มมากขึ้นแร่ธาตุต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบอยู่นั้นจะถูกปลดปล่อยออกมาจากปุ๋ยและอยู่ในรูปที่พืชดูดคั่งได้เลย ส่วนที่ไม่ละลายน้ำก็คือจะต้องใช้เวลานานมากกว่าแร่ธาตุเหล่านั้นจะถูกปลดปล่อยออกมา ซึ่งอาจจะใช้เวลานานกว่าสิบปี และปฏิกิริยาอื่น ในดินเข้ามาเกี่ยวข้อง นอกจากนี้ที่กล่าวมาข้างต้นแล้วยังมีสารประกอบฟอสเฟตอีกมากที่มีแคดเมียมประปนอยู่ แต่อยู่ในรูปที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในดิน เนื่องจากจะทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตและตกตะกอนสะสมอยู่ในดิน แต่สารประกอบเหล่านี้ก็สามารถละลายน้ำได้เช่นกัน เพียงแต่ว่าแคดเมียมไม่ได้อยู่ในรูปไอออนที่พืชดูดคั่งได้ แต่เมื่อสภาวะแวดล้อมเหมาะสม เช่น ความเป็นกรดของดินเพิ่มมากขึ้น อาจเนื่องมาจากกิจกรรมของสิ่งมีชีวิตในดินหรือปัจจัยเร่งจากภายนอก แคดเมียมที่มีอยู่แล้วก็อาจจะถูกปลดปล่อยออกมาให้อยู่ในรูปไอออนที่พืชดูดคั่งได้ สารประกอบดังกล่าวก็เช่น โมโนแคลเซียมไดฟอสเฟต ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) ไดโพแทสเซียมฟอสเฟต (K_2HPO_4) ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$) และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต(KH_2PO_4) เป็นต้น

หินฟอสเฟต เป็นหินซึ่งมีแร่อะพาไทต์ (apatite) เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ยังประกอบด้วยแคลเซียมฟลูออโรฟอสเฟต ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$) และ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ซึ่งความบริสุทธิ์ของแร่ต้องสูงพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ อาจใช้ได้โดยตรงหรือนำเข้าสู่กระบวนการเพื่อผลิตปุ๋ยฟอสเฟตที่มีความเข้มข้นและสามารถละลายน้ำได้สูงขึ้น

ซิงเกิล ซุปเปอร์ฟอสเฟต (0-20-0) เป็นปุ๋ยที่ผลิตจากปฏิกิริยาระหว่างหินฟอสเฟตกับกรดซัลฟูริก องค์ประกอบหลักคือ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ กับยิปซัม ($\text{CaO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) อย่างละประมาณครึ่งต่อครึ่ง

ทริปเปิล ซุปเปอร์ฟอสเฟต (0-46-0) ผลิตเช่นเดียวกับ ซิงเกิล ซุปเปอร์ฟอสเฟต มี $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ เป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้แหล่งของหินฟอสเฟตที่นำมาผลิตปุ๋ยฟอสเฟตก็ยังให้ปริมาณแคลเซียมที่แตกต่างกันด้วย ดังตารางที่ 2.2

แต่ในอัตราการใส่ปุ๋ยโดยทั่วไปคือ 40 กิโลกรัมฟอสฟอรัสต่อเฮกตาร์ ในดินปลูกหญ้าพบว่าอัตราการเพิ่มของแคลเซียมในดินจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ต่ำมาก และจะต้องใช้เวลานานกว่าที่ปริมาณแคลเซียมในดินที่ได้รับจากปุ๋ยจะเกินปริมาณทั่วไปของแคลเซียมที่ยอมรับให้มีในดิน (3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับแหล่งของหินฟอสเฟตที่นำมาใช้ในการผลิตปุ๋ยด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2.3

สารประกอบฟอสเฟตนอกจากจะเป็นแหล่งหรือตัวให้ (source) แคลเซียมแล้ว ยังทำหน้าที่เป็นตัวรับ (sink) แคลเซียมและโลหะหนักตัวอื่นในดินด้วย การทำหน้าที่เป็นตัวให้คือ การเพิ่มแคลเซียมและโลหะหนักในรูปที่สามารถเคลื่อนที่ได้ ในขณะที่การเป็นตัวรับคือ ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของแคลเซียมและโลหะหนักลดลงเมื่อดินมีพีเอชมากกว่า 7.0 ดังนั้นสารประกอบฟอสเฟตจึงมีผลต่อการเคลื่อนที่ และไม่เคลื่อนที่ของแคลเซียมและโลหะหนักในระบบดิน-พืชในหลายกระบวนการ ดังแสดงในภาพที่ 2.7

ตารางที่ 2.2 ปริมาณ โลหะหนักในหินฟอสเฟตจากแหล่งที่ต่างกัน ที่นำมาผลิตปุ๋ยฟอสเฟต

Phosphate rocks	Concentration (mgkg ⁻¹)								
	As	Cd	Co	Cu	Zn	Mn	Ni	Pb	Hg
Gafsa phosphate rock	4	38	3	15	393	7	-	-	-
North Florida phosphate rock	7	3	5	4	57	212	-	-	-
Jordan Phosphate rock	12	4	<1	8	235	5	-	-	-
North Carolina phosphate rock	13	48	2	9	400	7	9-51	<1-51	0.4-2.1
Sechura phosphate rock	5	11	3	6	178	91	-	-	-
Mexican phosphate rock	3	8	6	4	90	151	-	-	-
Nauru Island phosphate rock	3	100	6	8	1010	122	-	-	-
Arad phosphate rock	7	12	4	12	560	2	-	-	-
Makatea Island phosphate rock	2	10	<1	6	220	2	-	-	-
Chatham Rise phosphate rock	-	2	4	5	95	100	-	-	-
Indian phosphate rock	-	-	109	32	187	975	-	962	-
Single superphosphate ¹	-	32	77	15	165	890	-	488	-
Triple superphosphate ¹	-	70	47	49	418	75	-	238	-
Diammonium phosphate ¹	-	10	16	7.2	112	307	-	195	-

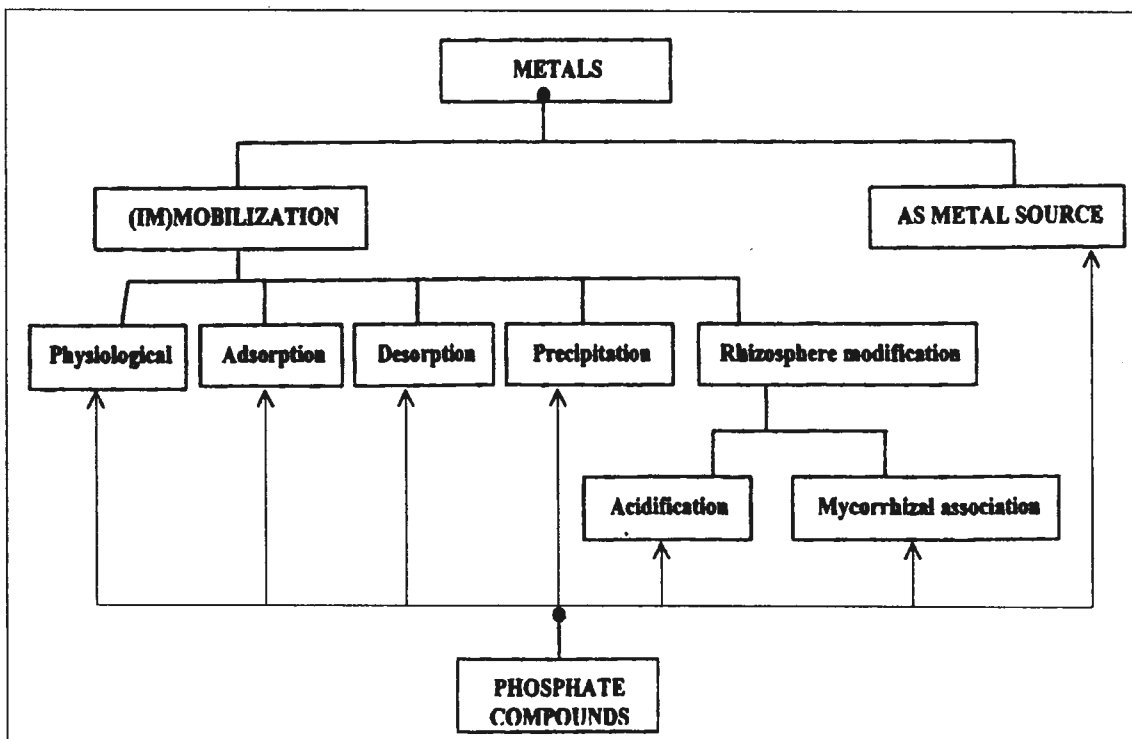
¹ขึ้นอยู่กับหินฟอสเฟตที่ใช้ผลิต

ที่มา: Bolam, Adriano และ Naidu (2003)

ตารางที่ 2.3 แสดงปริมาณฟอสฟอรัสและแคดเมียมในปุ๋ยฟอสเฟตแต่ละชนิด และระยะเวลาที่จะทำให้ปริมาณแคดเมียมในดินเกินมาตรฐานที่ยอมให้มีได้ (3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) จากการใช้ปุ๋ยในอัตรา 40 กิโลกรัมฟอสฟอรัสต่อเฮกตาร์

Phosphate fertilizer	Concentration		Years required to exceed the threshold limit (year)
	P (g kg ⁻¹)	Cd (mg kg ⁻¹)	
Single superphosphate	98	32	166
Triple superphosphate	190	70	152
Diammonium phosphate	200	10	1125
North Carolina phosphate rock	132	54	135
Sechura phosphate rock	131	12	614
Egyptian phosphate rock	130	10	732
Gafsa phosphate rock	134	70	107

ที่มา: Bolam, Adriano และ Naidu (2003)



ภาพที่ 2.7 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบฟอสเฟตกับโลหะหนักในดิน โดยสารประกอบฟอสเฟตจะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวให้และตัวรับโลหะหนักในดิน

ที่มา: Bolam, Adriano และ Naidu (2003)

ในทางการเกษตรปุ๋ยที่มีสังกะสีเป็นส่วนประกอบจะมาจากสี่แหล่งใหญ่คือ ปุ๋ยอินทรีย์ หรือปุ๋ยเคมี สารคีเลตสังเคราะห์ สารประกอบอินทรีย์ และสารประกอบอนินทรีย์ (ตารางที่ 2.4) แหล่งปุ๋ยอินทรีย์ปฐมภูมิได้แก่ $ZnSO_4$ โดยทั่วไปแล้วปุ๋ยสังกะสีที่นิยมใช้ทั่วไปเช่น ZnO , $ZnCO_3$, ซิงค์ไนเตรท ($Zn(NO_3)_2$) ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) และซิงค์แอมโมเนียมคอมเพล็กซ์ ($Zn-NH_3$) ส่วนปุ๋ยอินทรีย์ปฐมภูมิได้แก่ ซิงค์อีดีทีเอ ($ZnEDTA$) ซิงค์ลิกโนซัลโฟเนต (zinc lignosulfonates) และซิงค์โพลีฟลาโวนอยด์ (zinc polyflavonoids) โดยสองตัวหลังเป็นผลพลอยได้จากโรงงานผลิตกระดาษ การใช้ปุ๋ยสังกะสีจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในดินนานถึง 2 ปีหรือมากกว่านั้น

ตารางที่ 2.4 แหล่งและชนิดของปุ๋ยสังกะสี

Source	Formula	Zn ($g\ kg^{-1}$)
ปุ๋ยอินทรีย์		
Zinc ammonium complex	$Zn-NH_3$	100
Zinc carbonate	$ZnCO_3$	520-560
Zinc chloride	$ZnCl_2$	480-500
Zinc frits	Fritted glass	100-300
Zinc nitrate	$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	220
Zinc oxide	ZnO	500-800
Zinc oxysulfate	$ZnO + ZnSO_4$	400-550
Zinc sulfate monohydrate	$ZnSO_4 \cdot H_2O$	360
Zinc sulfate heptahydrate	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	230
Basic zinc sulfate	$ZnSO_4 \cdot 4Zn(OH)_2$	550
ปุ๋ยอินทรีย์		
Zinc chelate	$Na_2ZnEDTA$	140
Zinc chelate	$Na_2ZnHEDTA$	90
Zinc chelate	Na_2ZnNTA	90
Zinc lignosulfonate	-	50-80
Zinc polyflavonoid	-	50-100

ที่มา: Adriano (2001)

2.6.2 กากตะกอนชุมชน และอุตสาหกรรม

การนำเอากากตะกอนมาใช้ในการเกษตรเริ่มเป็นที่นิยมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการกำจัดขยะ นอกเหนือจากการเผาและการนำไปถมทะเล เนื่องจากทั้งสองวิธีอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ นอกจากกากตะกอนเป็นแหล่งของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสแล้วยังช่วยปรับปรุงโครงสร้างดินได้ด้วย ดังนั้นการนำกากตะกอนไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง แต่เมื่อปริมาณการนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรเพิ่มมากขึ้นก็ส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมในดินที่ถูกลบปล่อยออกมาจากกากตะกอนเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ยังไปสะสมในผลผลิตทางการเกษตรด้วย ดังนั้นเมื่อต้องนำเอากากตะกอนมาใช้เป็นแหล่งของธาตุอาหารในทางการเกษตรในแต่ละปีจึงจำเป็นต้องคำนึงถึง ปริมาณของแคดเมียมในกากตะกอน และปริมาณของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยกำหนดให้มีปริมาณแคดเมียมตกค้างในดินหลังจากใช้กากตะกอนไม่เกิน 1.9 กิโลกรัมแคดเมียมต่อเฮกตาร์ต่อปี ($\text{kg Cd ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$) (Havlin และคณะ, 1999)

2.6.3 เหมืองแร่และการถลุงแร่

การทำเหมืองแร่และการถลุงแร่เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้สังกะสีและแคดเมียมเข้าสู่สิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการทำเหมืองเปิด แคดเมียมจะมาจากหลายส่วนด้วยกัน ทั้งจากน้ำที่ใช้ในกระบวนการลอยแร่ กระบวนการถลุงแร่ เมื่อเกิดการไหลบ่าของน้ำฝนหรือน้ำป่าที่ชะเอาตะกอนจากบ่อทิ้งตะกอนกากแร่ลงสู่แหล่งน้ำ และการตกกลับของฝุ่นที่เกิดจากกระบวนการถลุงแร่ โดยเฉพาะการไหลบ่าของน้ำที่ชะเอากากแร่ หรือจากบ่อน้ำทิ้งของเหมือง ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นวงกว้างและอาจจะตกค้างอยู่ในดินเป็นระยะเวลาอันยาวนาน ดังเช่นกรณีของที่ลุ่มแม่น้ำจินทซี ของประเทศญี่ปุ่น ที่ประสบปัญหาการปนเปื้อนของแคดเมียมในน้ำดื่มและข้าวมาเป็นเวลานานกว่า 30 ปี ทำให้ประชาชนที่อาศัยอยู่ในบริเวณดังกล่าวป่วยด้วยโรค “อิไต-อิไต”

Jung และ Thornton (1996) ศึกษาปริมาณแคดเมียมและสังกะสีในดินในบริเวณรอบๆ เหมืองแร่ตะกั่ว และสังกะสีในเมืองซัมโบ ประเทศเกาหลี จากการศึกษาพบว่าดินในพื้นที่เหมืองที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตรมีปริมาณสังกะสีอยู่ระหว่าง 329-25,800 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนพื้นที่ที่ไม่ทำการเกษตร พื้นที่อยู่อาศัยมีปริมาณสังกะสีน้อยกว่า 230 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณแคดเมียมในพื้นที่เหมืองอยู่ระหว่าง 0.9-38 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ในขณะที่ในพื้นที่ที่ไม่ทำการเกษตรและพื้นที่อยู่อาศัยมีปริมาณแคดเมียมน้อยกว่า 3.3 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งทั้งสังกะสีและแคดเมียมในพื้นที่รอบๆเหมืองมีปริมาณต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่ยอมรับให้มีธาตุนั้นได้ในดิน

จากการรวบรวมข้อมูลของ Dudka และ Adriano (1997) ถึงปริมาณการปนเปื้อนของแคดเมียมและสังกะสีในดินบริเวณรอบเหมืองและโรงถลุงแร่ พบว่าปริมาณการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินมีตั้งแต่ น้อยกว่า 1 ถึงมากกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 2.5) ในขณะที่สังกะสีมีตั้งแต่ น้อยกว่า 10 ถึง มากกว่า 100,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 2.6)

ตารางที่ 2.5 การปนเปื้อนของแคดเมียมในชั้นดินบนบริเวณรอบเหมืองแร่ และ โรงงานถลุงแร่

Source of contamination	Range	Mean
	mgkg ⁻¹ dry weight ¹	
Zn-Pb mining	24 - 440	159
Zn-Pb old mine	1.0 - 3.9	1.8
Zn-Pb old mine	0.4 - 540	6.1
Zn-Pb old mine	1.2 - 94	18
Zn-Pb smelting	0.3 - 102	2.5
Cu-Ni mining and smelting	0.1 - 10	4.7
Mining/smelting	0.4 - 132	3.2
Zn-Pb mining and smelting	1.8 - 9.2	3.9
Zn smelting	11 - 1,781	-
Zn smelting	3 - 750	-
Cu smelting	5 - 14	-
Cu smelting	0.02 - 10.9	1.1
Zn-Pb smelting	-	12
Normal Cd in soil 0.1-1 mgkg ⁻¹ dry weight		

¹มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง

ที่มา: ดัดแปลงจาก Dudka และ Adriano (1997)

ตารางที่ 2.6 การปนเปื้อนของสังกะสีในดินบริเวณรอบเหมืองแร่ และ โรงงานถลุงแร่

Source of contamination	Range	Mean
	mgkg ⁻¹ dry weight ¹	
Zn-Pb smelting	11 - 10,500	205
Cu smelting	49 - 554	-
Zn-Pb mining and smelting	238 - 472	349
Cu smelting	7 - 910	-
Zn-Pb mining	2,040 - 50,000	14,9770
Zn-Pb mining	10 - 49,390	728
Pb mining	11 - 641	96
Zn-Pb mining	400 - 4,245	-
Zn smelting	1,340 - 180,000	-
Zn-Pb smelting	180 - 3,500	1,050
Cu smelting	430 - 1,370	-
Zn smelting	110 - 60,700	-
Ag-Cu-Pb-An mining and smelting	-	554
Normal Zn soil levels: 15-100 mgkg ⁻¹ dry weight ¹		

¹ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง

ที่มา: ดัดแปลงจาก Dudka และ Adriano (1997)