บทที่ 4
ผลการศึกษาและวิจารณ์

4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน

4.1.1 เนื้อดิน (soil texture)

เนื้อดินมีความแตกต่างกันตามพื้นที่ศึกษา (ตารางที่ 4.1) พื้นที่ลุ่มเป็นดินร่วนเหนียว (clay loam) พื้นที่ดอนน้ำขัง พื้นที่ดอน และพื้นที่ป่า เป็นดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) เหมือนกันทั้งสามพื้นที่ ส่วนดินพื้นที่ควบคุมมีเนื้อดินเป็นดินร่วน (loam)

เนื้อดินตามความลึก (ภาพที่ 4.1 และ ตารางภาคผนวกที่ ก-2) ดินตะกอนลำห้วยเป็นดินร่วนปนทราย (sandy loam) ที่ความลึก 0-10 และ 10-20 เซนติเมตร เป็นดินทรายปนดินร่วน (loamy sand) ที่ความลึก 20-40 เซนติเมตร และเป็นดินร่วนปนดินทรายที่ความลึก 40-60 เซนติเมตร ซึ่งได้รับอิทธิพลมาจากการทับถมของดินตะกอน และกระแสน้ำที่พัดพามาในแต่ละช่วงเวลา ที่มีความแรงและเร็วของกระแสน้ำต่างกัน และปริมาณตะกอนที่พัดพามาในแต่ละช่วงเวลามีความแตกต่างกัน การทับถมของดินตะกอนจึงต่างกัน ทำให้เนื้อดินต่างกัน (Brady และ Weil, 2002) ดินที่ลุ่มที่ระดับความลึก 0-10 และ 10-20 เซนติเมตร เป็นดินเหนียว แต่ที่ระดับความลึก 20-40 เซนติเมตร เป็นดินร่วนเหนียวปนทราย เหมือนกับดินที่ดอนทั้งสองฝั่งของลำห้วย แสดงว่าดินที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร ในพื้นที่ลุ่มเกิดจากการทับถมของตะกอนน้ำพา ดังนั้นเนื้อดินที่ความลึก 0-20 เซนติเมตร จึงแตกต่างจากเนื้อดินที่ความลึก 20-40 เซนติเมตร เพราะดินในที่ลุ่มมีเวลาในการเกิดดินไม่นาน (เวลา เป็นอีกปัจจัยสำคัญในการเกิดดิน นอกเหนือจาก ภูมิอากาศ พืชพรรณและสิ่งมีชีวิตในดิน วัตถุต้นกำเนิดดิน และสภาพภูมิประเทศ) เมื่อเทียบกับดินในที่สูงที่อยู่บริเวณรอบๆ ทำให้ดินในบริเวณนี้ได้รับอิทธิพลจากการผุพังอยู่กับที่ของวัตถุต้นกำเนิดน้อยมาก (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2539) ดินควบคุมเนื้อดินเป็นดินร่วนที่ระดับความลึก 0-10 และ 10-20 เซนติเมตร และเป็นดินร่วนเหนียวที่ระดับความลึก 20-40 เซนติเมตร ซึ่งมีผลมาจากการทำการเกษตร ที่ช่วยให้ดินได้ผสมคลุกเคล้ากับอินทรียวัตถุตลอดเวลา เนื้อดินที่ระดับ 0-20 เซนติเมตร ซึ่งเป็นระดับรากพืชจึงมีความแตกต่างจากดินล่าง (Brady และ Weil, 2002)

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน ที่ระดับผิวดิน (0-20 เซนติเมตร)

พื้นที่	Sand	Silt	Clay	Texture (USDA)[1]	pH_w (1:5)	OM (%)	CEC ($cmol^+kg^{-1}$)	N[2]
	---------- % ----------							
ควบคุม	27.51 - 29.60 (28.87±1.18)[3]	45.96 - 47.09 (46.51±0.56)	23.91 - 25.40 (24.61±074)	L[4]	5.35 - 5.47 5.39 กรดปานกลาง[7]	3.07 - 3.11 (3.09±0.02) ปานกลาง[7]	17.22 - 19.11 (18.13±0.85) ค่อนข้างสูง[7]	3
ที่ลุ่ม	21.76 - 40.37 (33.59±7.04)	27.78 - 45.38 (35.91±5.59)	27.02 - 32.86 (30.32±2.50)	CL[5]	6.18 - 8.11 7.00 กลาง	2.12 - 4.94 (3.44±0.99) ปานกลาง	11.28 - 20.53 (15.53±3.05) ค่อนข้างสูง	12
ที่ดอนน้ำขัง	49.19 - 55.60 (53.01±2.71)	18.96 - 22.28 (20.95±1.43)	23.44 - 31.85 (26.03±3.92)	SCL[6]	7.02 - 8.00 7.50 ด่างเล็กน้อย	2.90 - 4.49 (3.59±0.78) ปานกลาง	12.29 - 19.45 (15.33±3.32) ค่อนข้างสูง	4
ที่ดอน	50.11 - 69.54 (56.70±7.48)	10.05 - 21.19 (17.95±4.04)	20.41 - 30.66 (25.54±4.38)	SCL	6.38 - 6.81 6.58 กลาง	2.72 - 4.05 (3.40±0.50) ปานกลาง	9.45 - 18.17 (12.99±3.23) ปานกลาง	6
ป่า	66.81 - 70.34 (68.68±1.77)	8.79 - 9.55 (9.22±0.39)	20.11 - 23.85 (22.09±1.88)	SCL	5.08 - 5.56 5.39 กรดปานกลาง	1.01 - 1.96 (1.52±0.48) ต่ำ	9.16 -1 0.08 (9.73±0.50) ค่อนข้างต่ำ	3

[1]United States Department of Agriculture

[2]จำนวนตัวอย่างที่ศึกษา

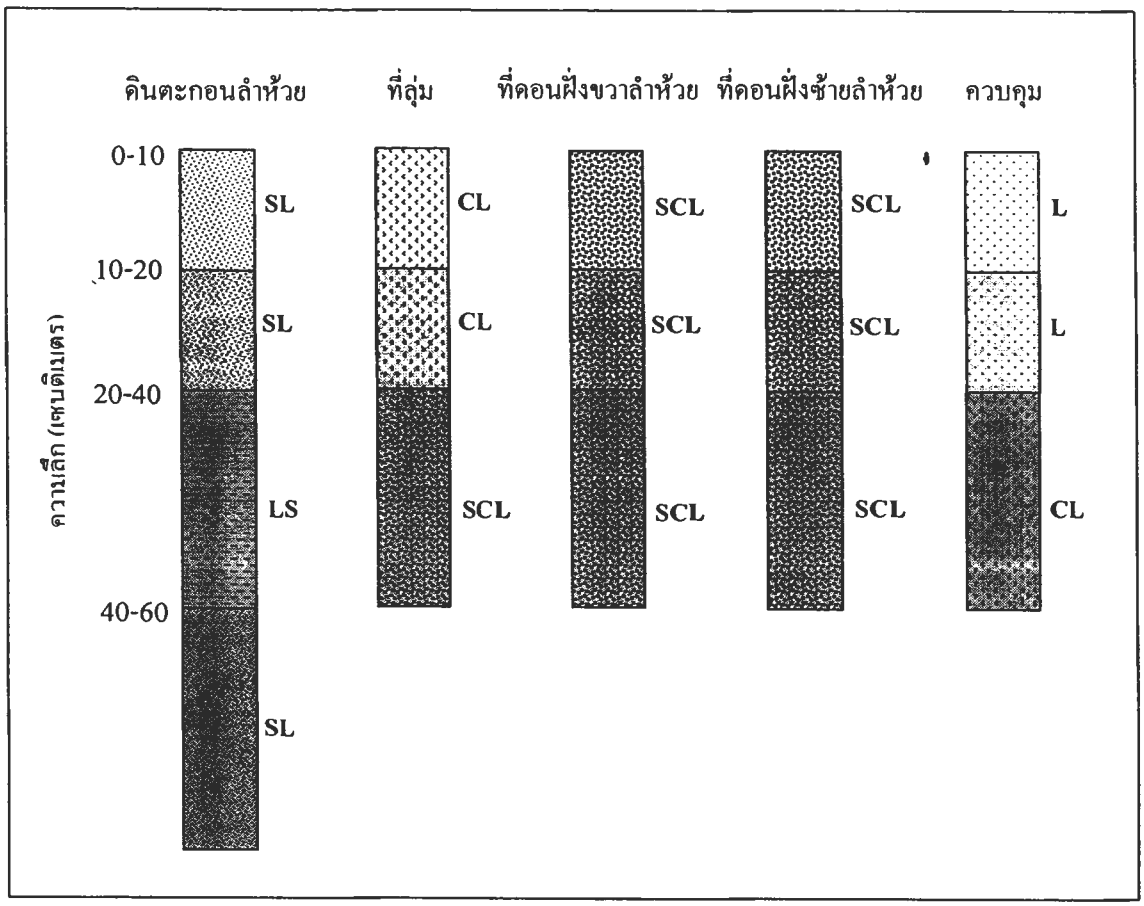
[3]Mean±SD ของจำนวนตัวอย่างที่ศึกษา

[4]loam (ดินร่วน)

[5]clay loam (ดินร่วนเหนียว)

[6]sandy clay loam (ดินร่วนเหนียวปนทราย)

[7]คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา (2539)



ภาพที่ 4.1 ลักษณะเนื้อดินตามความลึก ดินร่วน (loam; L), ดินร่วนเหนียว (clay loam; CL), ดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam; SCL), ดินร่วนปนทราย (sandy loam; SL) และ ดินทรายปนดินร่วน (loamy sand; LS)

4.1.2 ความเป็นกรดด่างของดิน หรือพีเอช (pH)

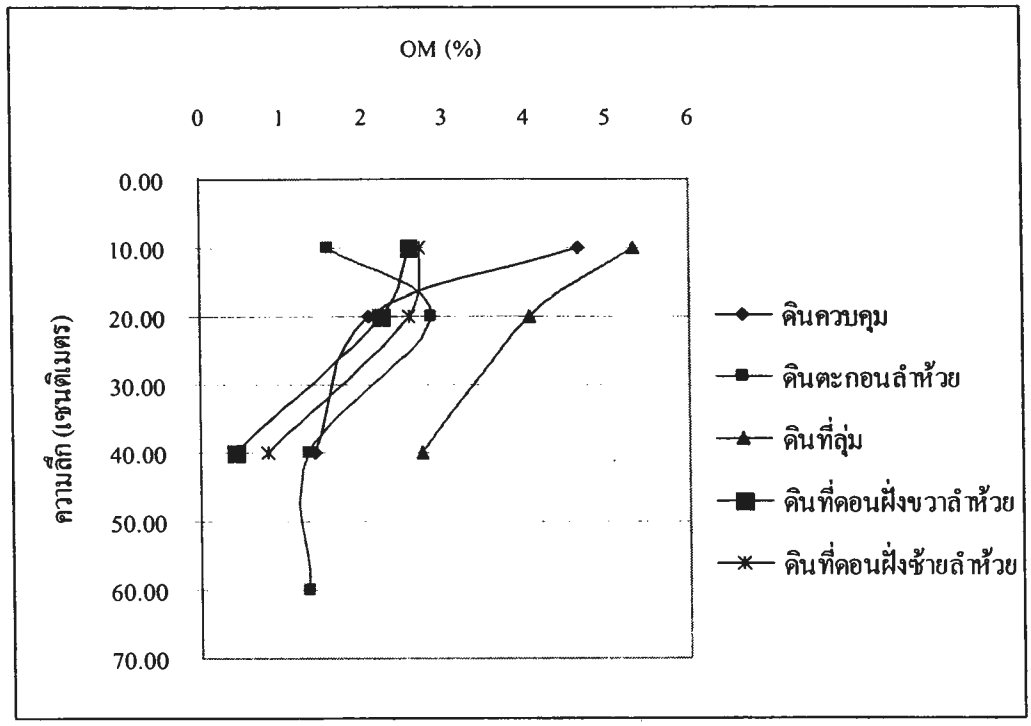
ดินในพื้นที่ลุ่ม พื้นที่ดอนน้ำขัง และพื้นที่ดอนมีพีเอชเฉลี่ยเป็นกลางถึงด่างเล็กน้อย ซึ่งได้รับอิทธิพลจากดินตะกอนที่ทับถม และการผุพังสลายตัวของหินเนื้อหยาบ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา , 2539) พื้นที่ป่า และพื้นที่ควบคุมมีพีเอชเฉลี่ยเป็นกรดปานกลาง (ตารางที่ 4.1)

พีเอชตามความลึกมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดความลึกในทุกจุด (ตารางภาคผนวกที่ ก-2) ในดินตะกอนลำห้วย และดินที่ลุ่ม มีพีเอชเป็นด่างปานกลาง ในขณะที่ดินที่ดอนฝั่งขวาและซ้ายของลำห้วยมีพีเอชเป็นกลาง และดินควบคุมมีพีเอชเป็นกรดปานกลาง

4.1.3 อินทรียวัตถุ (organic matter)

ดินมีอินทรียวัตถุอยู่ในระดับปานกลางทั้งพื้นที่ลุ่ม พื้นที่ดอนน้ำขัง พื้นที่ดอน และพื้นที่ควบคุม ส่วนดินจากพื้นที่ป่าดินมีอินทรียวัตถุต่ำ (ตารางที่ 4.1) เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเขตร้อน จุลินทรีย์ดินที่มีอยู่ในธรรมชาติทำหน้าที่ย่อยสลายเศษซากพืชอย่างรวดเร็ว ทำให้ปริมาณอินทรียวัตถุในพื้นที่ป่าซึ่งเป็นที่สูงมีน้อยกว่าพื้นที่ลุ่ม นอกจากนี้เนื้อดินที่เป็นดินเหนียวยังมีผลต่อปริมาณอินทรียวัตถุในดินด้วย ซึ่ง Bohn, MaNeal และ Connor, 2001 ได้กล่าวไว้ว่า ในลักษณะภูมิประเทศที่เหมือนกัน ดินที่มีอนุภาคดินเหนียวสูงจะมีอินทรียวัตถุสูงกว่าดินที่มีอนุภาคดินเหนียวต่ำ

อินทรียวัตถุลดลงตามความลึกในทุกจุด (ภาพที่ 4.2 และ ตารางภาคผนวกที่ ก-2) มีเพียงดินตะกอนลำห้วยเท่านั้นที่มีอินทรียวัตถุเพิ่มขึ้นที่ระดับความลึก 10-20 เซนติเมตร และจากนั้นก็ลดลงตามความลึก เนื่องจาก เนื่องจากอิทธิพลจากกระแสน้ำในลำห้วยที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา จึงทำให้อินทรียวัตถุที่ระดับความลึก 0-10 เซนติเมตร มีน้อยกว่าดินที่ระดับความลึก 10-20 เซนติเมตร ซึ่งรับอิทธิพลจากกระแสน้ำน้อยกว่า ดังนั้นดินที่ความลึก 10-20 เซนติเมตรจึงมีอินทรียวัตถุสูงกว่าดินบน (Brady และ Weil, 2002) และที่น่าสังเกตคือ อินทรียวัตถุในดินที่ลุ่ม ที่มีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็ว ที่ระดับความลึก 20-40 เซนติเมตร สอดคล้องกับลักษณะเนื้อดินที่เป็นดินร่วนเหนียวปนทราย ดินมีการระบายน้ำดี ทำให้ปริมาณอินทรียวัตถุในดินต่ำ



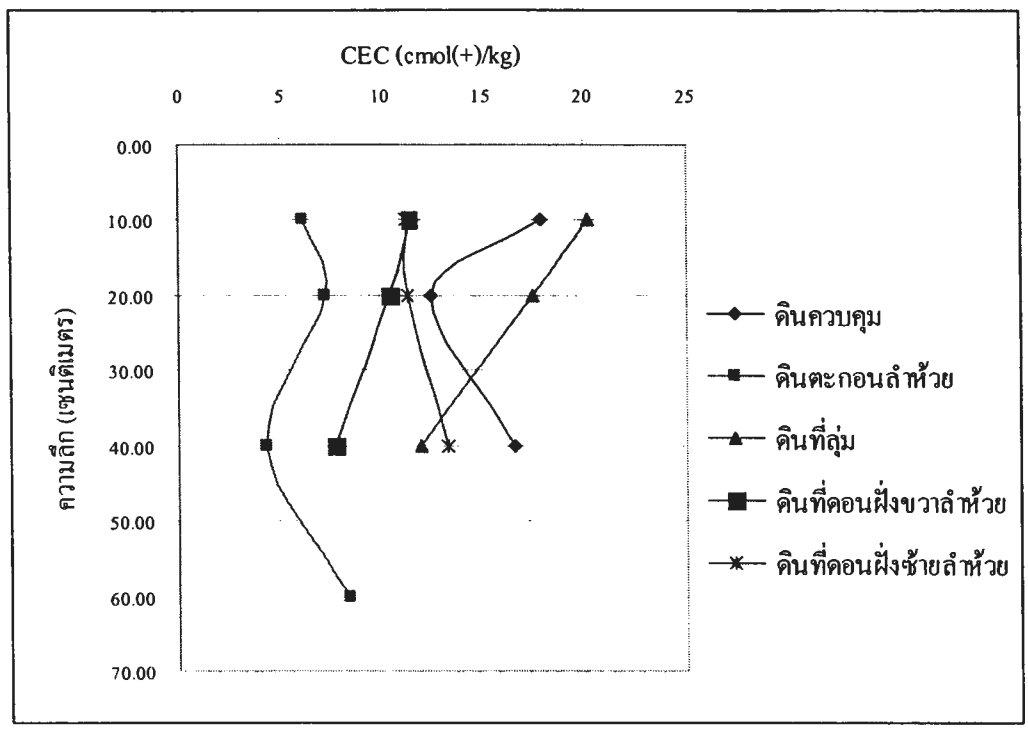
ภาพที่ 4.2 การกระจายตัวของอินทรียวัตถุในดินตามความลึก

4.1.4 ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก (cation exchange capacity)

พื้นที่ลุ่ม พื้นที่คอนน้ำขัง พื้นที่คอน และพื้นควบคุมมีความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกปานกลางถึงค่อนข้างสูง และค่อนข้างต่ำในพื้นที่ป่า (ตารางที่ 4.1) สอดคล้องกับปริมาณอนุภาคดินเหนียวและอินทรียวัตถุในดิน เนื่องจากความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก มีผลมาจากอินทรียวัตถุ อนุภาคดิน และคอลลอยด์ดิน (soil colloid) ดังนั้นถ้าดินมีปริมาณอนุภาคดินเหนียว อินทรียวัตถุสูง และคอลลอยด์ดินสูง ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกก็สูงเช่นกัน ซึ่งจะทำให้เราทราบถึงความสามารถในการดูดยึดธาตุอาหารพืช หรือโลหะหนักของดิน (Brady และ Weil, 2002)

ที่ลุ่มและที่คอนฝั่งขวาลำห้วย ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกมีค่าลดลงตามความลึก (ภาพที่ 4.3 และตารางภาคผนวกที่ ก-2) ที่คอนฝั่งซ้ายลำห้วย มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามความลึกสอดคล้องกับปริมาณอนุภาคดินเหนียว เช่นเดียวกับดินควบคุมที่มีความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกผันแปรไปตามอนุภาคดินเหนียว ในขณะที่ดินตะกอนลำห้วยความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกผันแปรไปตามปริมาณอนุภาคดินเหนียว และอินทรียวัตถุในดิน และจะสังเกตเห็น ดินที่ลุ่ม ที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร ดินมีความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกสูง ในขณะที่ ที่ระดับความลึก 20-40 เซนติเมตร ดินมีความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกอยู่ในระดับเดียวกันกับดินที่คอนฝั่งซ้ายของลำห้วย ซึ่งสอดคล้องกับเนื้อดินที่เป็น

ดินร่วนเหนียวปนทรายเหมือนกัน แสดงว่าในธรรมชาติ ดินในพื้นที่ศึกษามีความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกอยู่ในระดับปานกลาง แต่ดินที่ลุ่ม ที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร ได้รับอิทธิพลจากปัจจัยอย่างอื่น เช่น ตะกอนทับถม การใช้ประโยชน์ที่ดิน และสภาพภูมิประเทศ จึงทำให้มีความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกสูงกว่าพื้นที่อื่นที่อยู่ใกล้เคียง



ภาพที่ 4.3 การกระจายตัวของความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกในดินตามความลึก

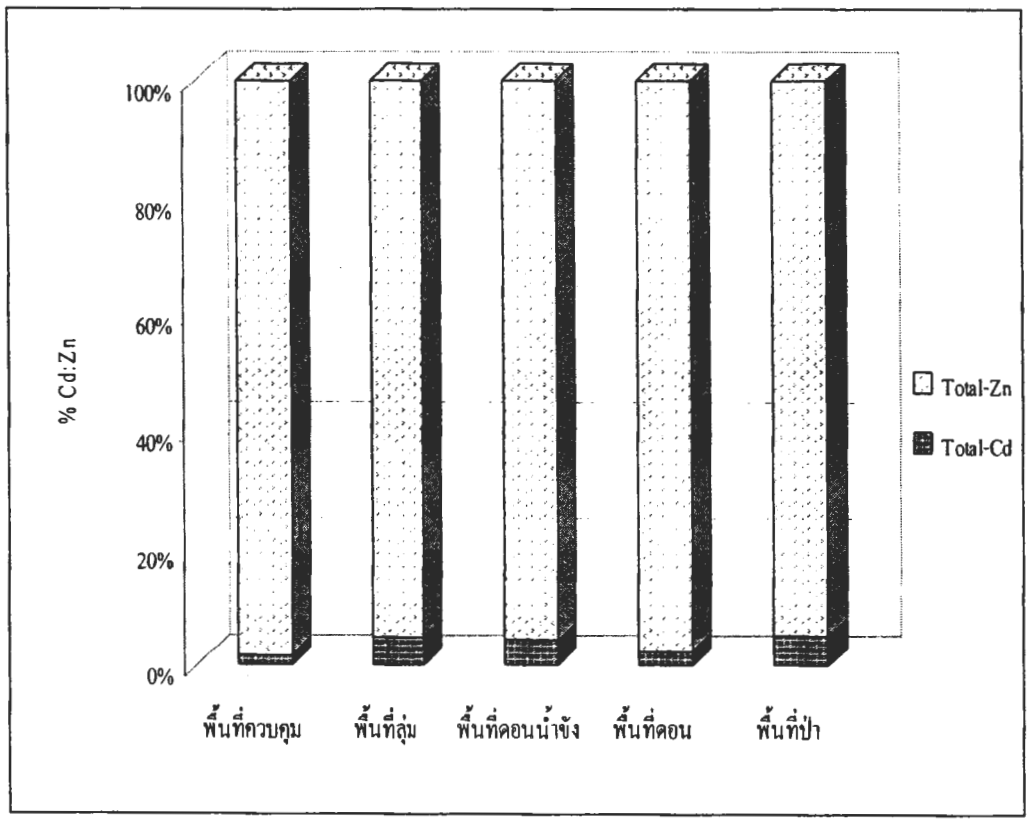
4.2 ปริมาณแคดเมียมและสังกะสีในดิน

4.2.1 ปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมด (total cadmium and zinc)

1) ปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมด ที่ระดับผิวดิน

พื้นที่ลุ่มและพื้นที่ดอนน้ำขังมีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดสูงกว่าพื้นที่อื่น (ตารางที่ 4.2) และมากกว่าค่ามาตรฐานของสหภาพยุโรปที่ยอมให้มีได้ในดินเพาะปลูก (แคดเมียมไม่เกิน 3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และสังกะสีไม่เกิน 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) พื้นที่ดอน พื้นที่ป่า และพื้นที่ควบคุม มีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีน้อยกว่ามาตรฐานของสหภาพยุโรป แต่ปริมาณแคดเมียมในพื้นที่ที่ดอน และพื้นที่ป่ามีปริมาณแคดเมียมสูงกว่า 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งเป็นปริมาณแคดเมียมที่พบในดินทั่วไป ซึ่งสอดคล้องกับคำกล่าวของ ศุภมาศ (2539) และสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Song และคณะ (1999) ที่พบว่าดินในพื้นที่ป่าที่อยู่รอบบ่อดักตะกอนจากการถลุงแร่สังกะสี ในเหมืองกูบอง (Gubong mine) ประเทศเวียดนาม มีปริมาณแคดเมียมน้อยกว่า 0.002 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และปริมาณสังกะสีมีค่าอยู่ระหว่าง 75-80 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

จากตารางที่ 4.2 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดเมื่อคิดเป็นร้อยละของปริมาณสังกะสีทั้งหมดในแต่ละพื้นที่แล้ว พบว่าปริมาณแคดเมียมในทุกพื้นที่มีปริมาณน้อยมาก (น้อยกว่าร้อยละ 10) (ภาพที่ 4.4) โดยพื้นที่ลุ่ม พื้นที่ดอน และพื้นที่ป่ามีปริมาณแคดเมียมสูงกว่าพื้นที่ดอนและพื้นที่ควบคุม (ร้อยละ 4.29, 4.90, 5.34, 2.33 และ 1.84 ในพื้นที่ลุ่ม พื้นที่ดอนน้ำขัง พื้นที่ป่า พื้นที่ดอน และพื้นที่ควบคุม เรียงตามลำดับ) และจะสังเกตเห็นว่า ดินในพื้นที่ป่า มีปริมาณแคดเมียมทั้งหมด ร้อยละ 5.34 ของปริมาณสังกะสีทั้งหมด เนื่องจากดินในพื้นที่ป่าไม่ถูกรบกวนจากกิจกรรมของมนุษย์ และหน้าดินมีเศษพืชปกคลุม ทำให้การชะล้างหน้าดินโดยน้ำเกิดขึ้นได้น้อยกว่าดินในพื้นที่ดอนที่เป็นพื้นที่ทำการเกษตร และหน้าดินเปิดโล่ง



ภาพที่ 4.4 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดที่คิดเป็นร้อยละของปริมาณสังกะสีทั้งหมดในแต่ละพื้นที่

คำนวณจาก $\frac{\text{ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด X 100}}{\text{ปริมาณสังกะสีทั้งหมด}}$

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยปริมาณแคดเมียมและสังกะสีในดิน ที่ระดับผิวดิน (0-20 เซนติเมตร)

พื้นที่	Total		DTPA		ความสามารถในการสกัดได้[1]		N[2]
	Cd	Zn	Cd	Zn	Cd	Zn	
	---------- mgkg^{-1} ----------				---------- % ----------		
ควบคุม	0.34 - 0.79	25.88 - 40.25	nd[4]	1.46 - 2.93	0	6.70	3
	(0.63±0.25)[3]	(34.21±7.45)	-	(2.30±0.76)			
ที่ลุ่ม	2.28 - 78.85	105.23 - 1480.22	0.61 - 32.53	11.98 - 346.64	42.46	18.33	12
	(27.04±31.03)	(550.80±498.35)	(11.48±12.30)	(100.94±97.14)			
ที่ดอนน้ำขัง	3.49 - 70.98	169.66 - 1268.95	2.02 - 23.69	24.88 - 253.56	39.44	26.21	4
	(23.02±32.15)	(536.15±312.89)	(9.08±9.93)	(93.35±107.89)			
ที่ดอน	0.50 - 2.59	8.99 - 272.29	0.12 - 0.98	2.66 - 55.17	27.22	18.32	6
	(1.58±0.78)	(67.67±101.23)	(0.43±0.31)	(12.40±20.24)			
ป่า	0.58 - 1.06	6.57 - 28.32	0.07 - 0.62	0.38 - 4.93	33.77	14.43	3
	(0.77±0.25)	(14.41±12.07)	(0.26±0.31)	(2.08±2.48)			

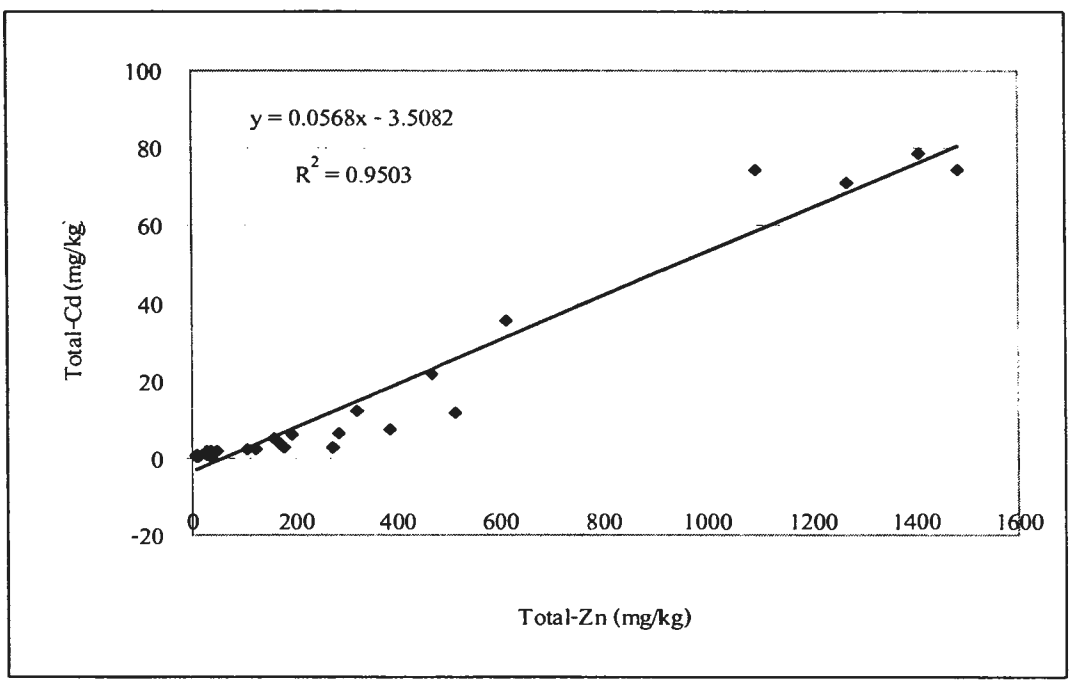
[1]ความสามารถในการสกัดได้ คิดจาก $\frac{\text{ปริมาณที่พืชนำไปใช้ได้} \times 100}{\text{ปริมาณทั้งหมด}}$ ของธาตุนั้น

[2]จำนวนตัวอย่างที่ศึกษา

[3]Mean±SD ของจำนวนตัวอย่างที่ศึกษา

[4]non detectable at 0.05 mgkg^{-1}

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดกับปริมาณสังกะสีทั้งหมด พบว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ R^2=0.950 (ภาพที่ 4.5) กล่าวคือ เมื่อปริมาณสังกะสีในดินมากขึ้น ปริมาณการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินก็จะมากขึ้นเช่นกัน สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Navas และ Machin (2002) ที่ศึกษาปริมาณแคดเมียมและสังกะสีในดิน บริเวณแอ่งอีโบร (Ebro basin) ของประเทศสเปน ผลการศึกษาของ Bloemen, Markert และ Lieth (1995) และผลการศึกษาของ ปิ่นเพชร และละไม (2548) ที่ศึกษาปริมาณแคดเมียมและสังกะสีในดินปลูกข้าวที่ได้รับน้ำเสียจากโรงถลุงแร่สังกะสี พบว่าปริมาณแคดเมียมมีความสัมพันธ์กับปริมาณสังกะสีในดิน



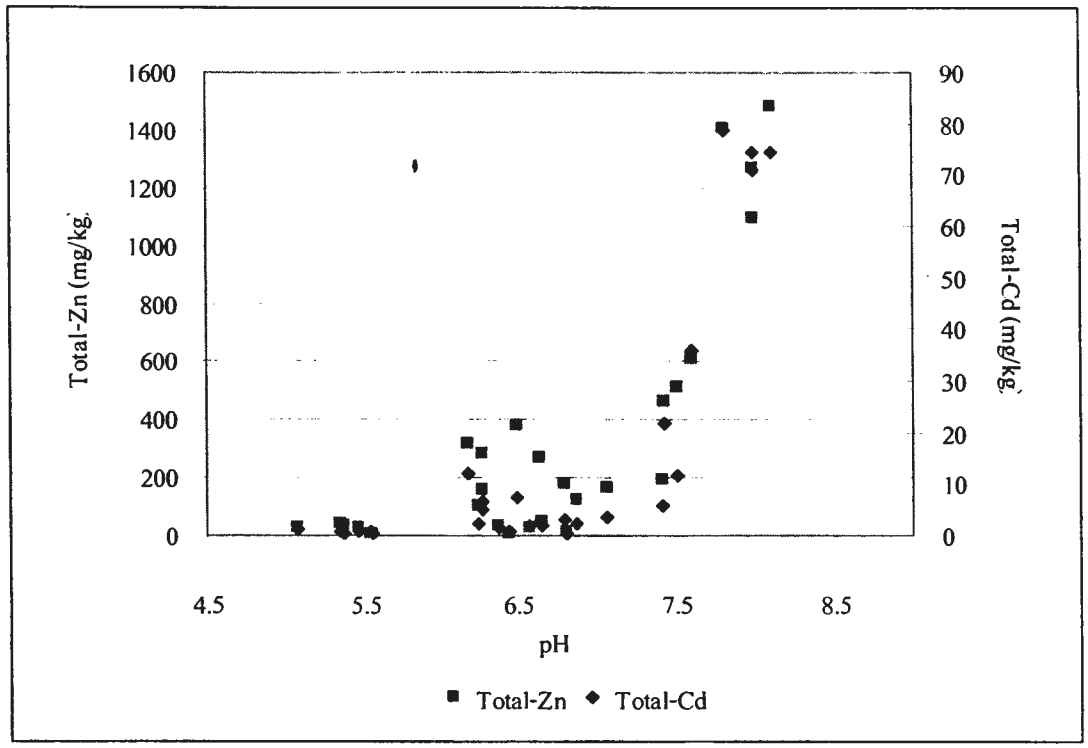
ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคดเมียมทั้งหมด กับปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดิน

จากตารางภาคผนวกที่ ก-1 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมด เฉพาะที่ที่ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดไม่เกิน 40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และปริมาณสังกะสีทั้งหมดไม่เกิน 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยตัดจุดเก็บตัวอย่างที่ 4, 9, 11 และ 14 ซึ่งมีปริมาณแคดเมียมทั้งหมดมากกว่า 60 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และปริมาณสังกะสีทั้งหมดมากกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมออก พบว่า แคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดมีความสัมพันธ์กันที่ R^2=0.8213 ชี้ให้เห็นว่า ปริมาณแคดเมียมที่ปนเปื้อนในพื้นที่บ้านพะเด๊ะส่วนใหญ่มีอิทธิพลมาจากปริมาณสังกะสีที่เพิ่มมากขึ้น แต่มีบางส่วนที่มีอิทธิพลมาจากส่วนอื่น เช่น จากเคมีเกษตร ปุ๋ย และจากธรรมชาติ เป็นต้น

และสาเหตุที่ทำให้จุดเก็บตัวอย่างที่ 4, 9, 11 และ 14 มีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดในดินสูงกว่าจุดเก็บตัวอย่างอื่นในพื้นที่เดียวกัน คาดว่าน่าจะมาจากการที่ทั้ง 4 จุดเก็บตัวอย่างได้รับน้ำจากลำห้วยแม่ตาวอยู่ตลอดเวลา จึงเป็นไปได้ว่าดินตะกอนน้ำพัดพา จะมาทับถมอยู่ในบริเวณนี้มากกว่าพื้นที่อื่น และนอกจากนี้ การที่ดินทั้ง 4 จุดเก็บตัวอย่างมีค่าพีเอชสูง (พีเอชเท่ากับ 8.00, 8.11, 7.99 และ 7.81 ของจุดเก็บตัวอย่างที่ 4, 9, 11 และ 14 ตามลำดับ) คาดว่าเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดสูง เนื่องจากการดูดยึดและตกตะกอนระหว่างไอออนบวกของแคดเมียมและสังกะสี กับประจุลบของอนุภาคดินเหนียว อินทรียวัตถุ สารประกอบคาร์บอเนต และไฮดรอกไซด์ไอออน เป็นต้น

นอกจากปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่มีผลต่อปริมาณการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินแล้ว ยังพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการปนเปื้อน (สะสม) ของแคดเมียมและสังกะสีในดินมากที่สุดคือ พีเอช ในขณะที่ อินทรียวัตถุ อนุภาคดินเหนียวและความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกมีผลต่อการปนเปื้อนแคดเมียมในดินบ้านพะเด๊ะ น้อยมาก (ตารางภาคผนวกที่ ข-1) เนื่องจากดินในพื้นที่บ้านพะเด๊ะส่วนใหญ่เป็นดินร่วนเหนียวปนทราย มีอนุภาคดินเหนียวอยู่น้อย และความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกที่มีปริมาณผันแปรไปตามอนุภาคดินเหนียว ดังนั้นทั้งอนุภาคดินเหนียว และความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกจึงมีผลต่อปริมาณการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินในพื้นที่บ้านพะเด๊ะ น้อยกว่าพีเอช

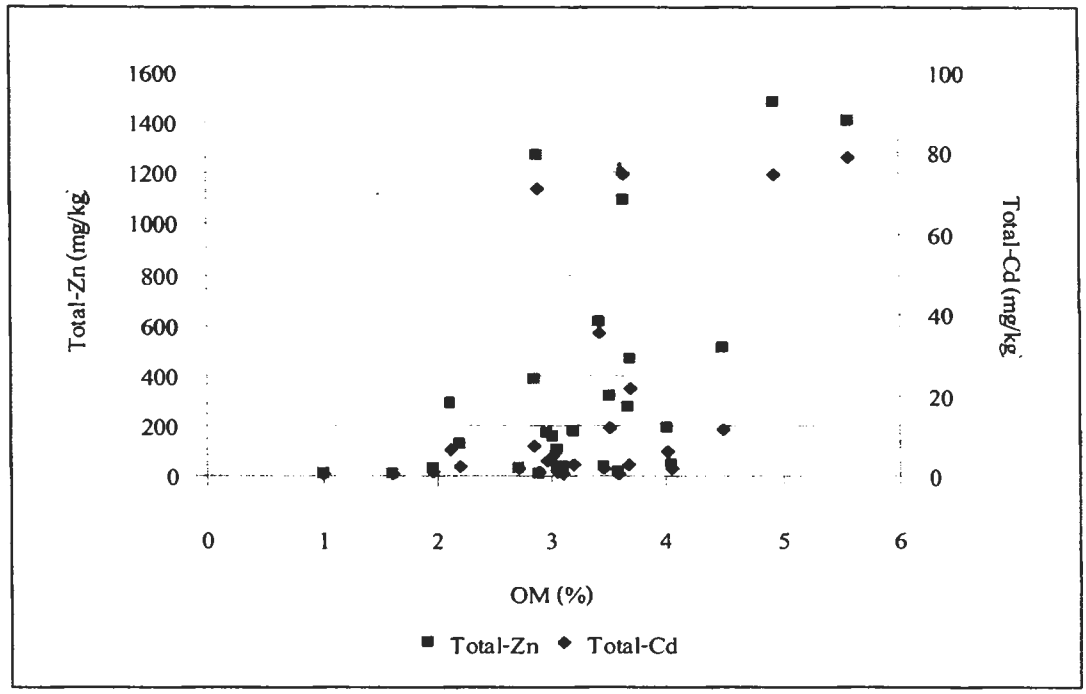
จากภาพที่ 4.6 พบว่าตั้งแต่พีเอช 4.5-7.0 ไม่มีผลต่อปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมด แต่ที่พีเอชดินมากกว่า 7.0 พบว่า ปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชดินเพิ่มขึ้น (ที่พีเอชดินมากกว่า 7.5 ดินมีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมด มากกว่า 20 และ 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ) และเมื่อนำตัวอย่างที่มีพีเอชมากกว่า 7.0 มาหาความสัมพันธ์กับปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมด พบว่ามีค่าความสัมพันธ์ที่ R^2=0.8244 และ R^2=0.8314 ตามลำดับ ชี้ให้เห็นว่าดินที่มี การปนเปื้อนแคดเมียมและสังกะสี จะต้องเป็นดินที่มีพีเอชสูง (เป็นกลางถึงเป็นด่าง) เนื่องจากดินที่มีพีเอชสูง จะมีประจุลบพวกคาร์บอเนต และไฮดรอกไซด์อยู่สูง นอกจากนี้ยังรวมไปถึงประจุลบของอินทรียวัตถุ และอนุภาคดินเหนียว ซึ่งประจุลบเหล่านี้จะดูดยึดเอาแคดเมียมและสังกะสี ซึ่งเป็นประจุบวกตกตะกอนสะสมในพื้นที่นั้น (Essington,2003) สอดคล้องกับข้อสรุปของ Chlopecka และคณะ (1996) ที่ว่า ดินที่พบว่ามีการปนเปื้อนแคดเมียมส่วนใหญ่จะเป็นดินที่มีพีเอชสูง และแคดเมียมจะอยู่ในรูปสารประกอบคาร์บอเนต และผลการทดลองของ Gavi, Basta และ Roun (1997) ที่พบว่าดินที่มีพีเอชสูง มีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีสะสมในดินสูง



ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับแคดเมียมทั้งหมด และสังกะสีทั้งหมดในดิน

และนอกจากพีเอชแล้ว อินทรียวัตถุก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการสะสมของแคดเมียมและสังกะสีในดิน แต่มีความสัมพันธ์น้อยกว่าพีเอช (ภาพที่ 4.7) จากประจุลบที่มีอยู่เป็นจำนวนมากของอินทรียวัตถุ ซึ่งทำหน้าที่ดูดจับประจุบวกของแคดเมียมและสังกะสีเอาไว้ ป้องกันการกระจายตัวเป็นพื้นที่กว้าง (Brady และ Weil, 2002) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Udom และคณะ (2004) ที่พบว่าปริมาณแคดเมียมและสังกะสีในดิน มีความสัมพันธ์กับอินทรียวัตถุ

แต่สมบัติการดูดจับของอินทรียวัตถุจะมีมากเฉพาะในดินที่มีพีเอชสูงเท่านั้น ดังเช่นจุดเก็บตัวอย่างที่ 4, 9, 11 และ 14 ดินมีพีเอชมากกว่า 7.5 ปริมาณอินทรียวัตถุเท่ากับร้อยละ 2.90, 4.94, 3.65 และ 5.58 เรียงตามลำดับ พบว่าปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดในดินทั้ง 4 จุด มีมากกว่า 60 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อดินมีพีเอชลดลง อินทรียวัตถุจะปลดปล่อยประจุบวกที่ดูดจับเอาไว้ออกมา สอดคล้องกับคำกล่าวของ Brady และ Weil (2002) และผลการทดลองของ Ram และ Verloo (1985) ที่ศึกษาผลของปุ๋ยคอกและพีท (peat) ต่อปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดินที่มีพีเอชต่างกัน พบว่าดินที่มีพีเอชต่ำ เมื่อใส่ปุ๋ยคอกและพีท ลงไปปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้เพิ่มขึ้น และมีปริมาณลดลงเมื่อพีเอชดินเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับผลการทดลองของ Mandal และ Hazra (1997) พบว่าการเพิ่มอินทรียวัตถุให้กับดิน ทำให้ดินมีพีเอช ลดลง ช่วยเพิ่มปริมาณสังกะสีที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ในดิน ทำให้พืชดูดดึงสังกะสีได้มากขึ้น

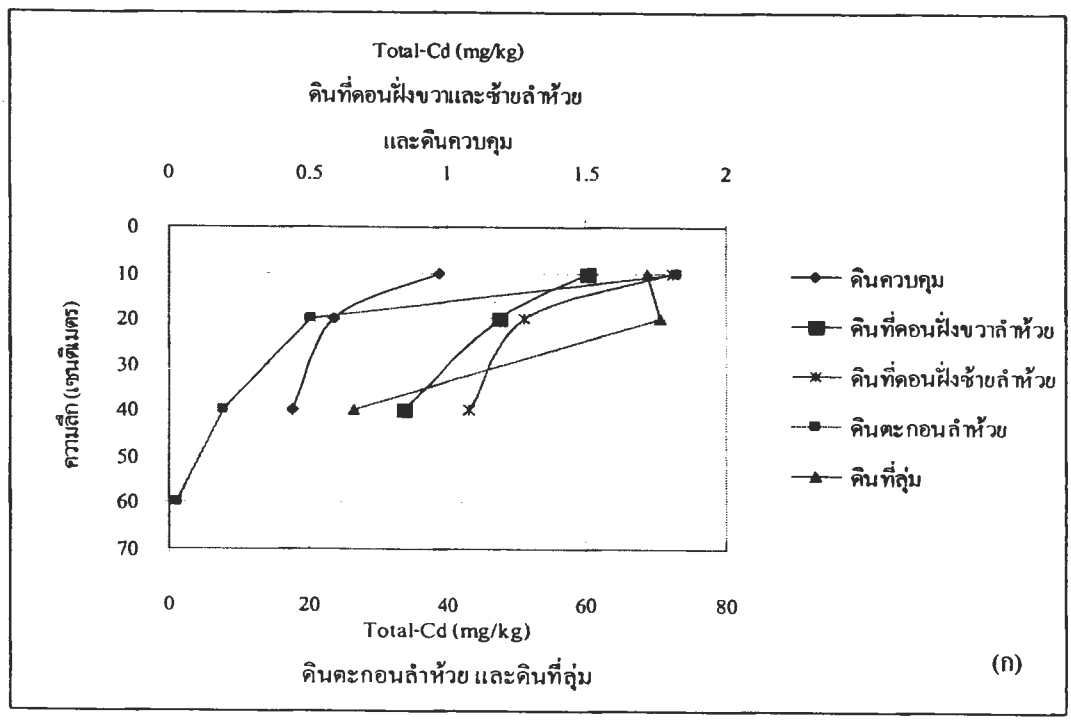


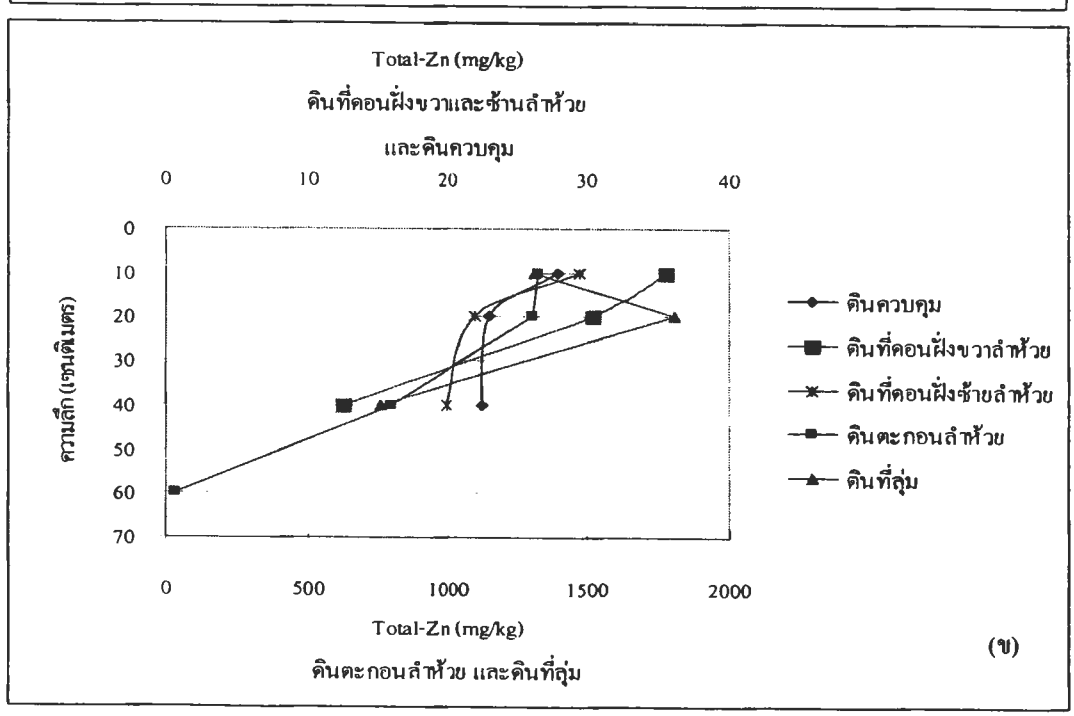
ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอินทรียวัตถุกับแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดในดิน

ดังนั้นในการกำจัด หรือลดปริมาณการปนเปื้อนแคดเมียมในดิน โดยใช้อินทรียวัตถุจึงควรพิจารณาด้วยว่า อินทรียวัตถุนั้นมีฤทธิ์ทำให้ดินเป็นกรด หรือด่าง ถ้าอินทรียวัตถุมีฤทธิ์ทำให้ดินเป็นกรด อินทรียวัตถุนั้นก็ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ประโยชน์ในการดูดจับโลหะหนักในดิน เพราะจะทำให้ดินปลดปล่อยโลหะหนักออกมามาก และในขณะเดียวกันก็ไม่ควรที่จะปล่อยให้อินทรียวัตถุที่ดูดจับโลหะหนักไว้ย่อยสลายในพื้นที่ เพราะถ้าอินทรียวัตถุย่อยสลาย โลหะหนักที่ถูกดูดจับไว้โดยอินทรียวัตถุก็จะถูกปลดปล่อยกลับสู่ดินอีกครั้ง ดังเช่นผลการทดลองของ Van Erp และ Van Lune (1991) ที่พบว่า อินทรียวัตถุจะดูดจับแคดเมียมและสังกะสีเอาไว้ จะปลดปล่อยแคดเมียมและสังกะสีออกมาอย่างช้าๆ เมื่ออินทรียวัตถุย่อยสลาย สอดคล้องกับผลของ Karaca (2004) ที่พบว่า ดินที่ใส่กากอุ่นและก้อนเชื้อเห็ดลงไป มีปริมาณอินทรียวัตถุเพิ่มขึ้นหลังจากบ่มไว้ 1 วัน ปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่สกัดได้มีปริมาณต่ำ เนื่องจากถูกดูดซับไว้ด้วยอินทรียวัตถุที่ใส่ลงไป และเมื่อเวลาบ่มผ่านไป 6 เดือน พบว่าอินทรียวัตถุลดลง ปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่สกัดได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากแคดเมียมและสังกะสีที่ถูกดูดซับไว้ด้วยอินทรียวัตถุถูกปลดปล่อยออกมาเนื่องจากการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ของอินทรียวัตถุ และการทดลองของ Bergkvist และคณะ (2003) พบว่าดินที่ใช้กากตะกอนเป็นเวลานานติดต่อกัน (ค.ศ. 1956-1997) มีผลทำให้อินทรียวัตถุในดินเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันปริมาณแคดเมียมก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้นจึงควรวางแผนและกำหนดเวลาที่เหมาะสมในการปล่อยให้อินทรียวัตถุดูดจับแคดเมียม และนำอินทรียวัตถุนั้นไปกำจัดเป็นลำดับต่อไป

2) ปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมด ตามระดับความลึก

แคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดมีปริมาณลดลงตามความลึกในทุกจุดเก็บตัวอย่าง (ภาพที่ 4.8 ก และ ข และตารางภาคผนวกที่ ก-2) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Sterckeman และคณะ (2000) ที่ศึกษาปริมาณแคดเมียมและสังกะสีในดินที่เกิดจากอิทธิพลของดินตะกอนน้ำพัดพา พบว่าปริมาณแคดเมียมและสังกะสีมีปริมาณลดลงตามความลึก

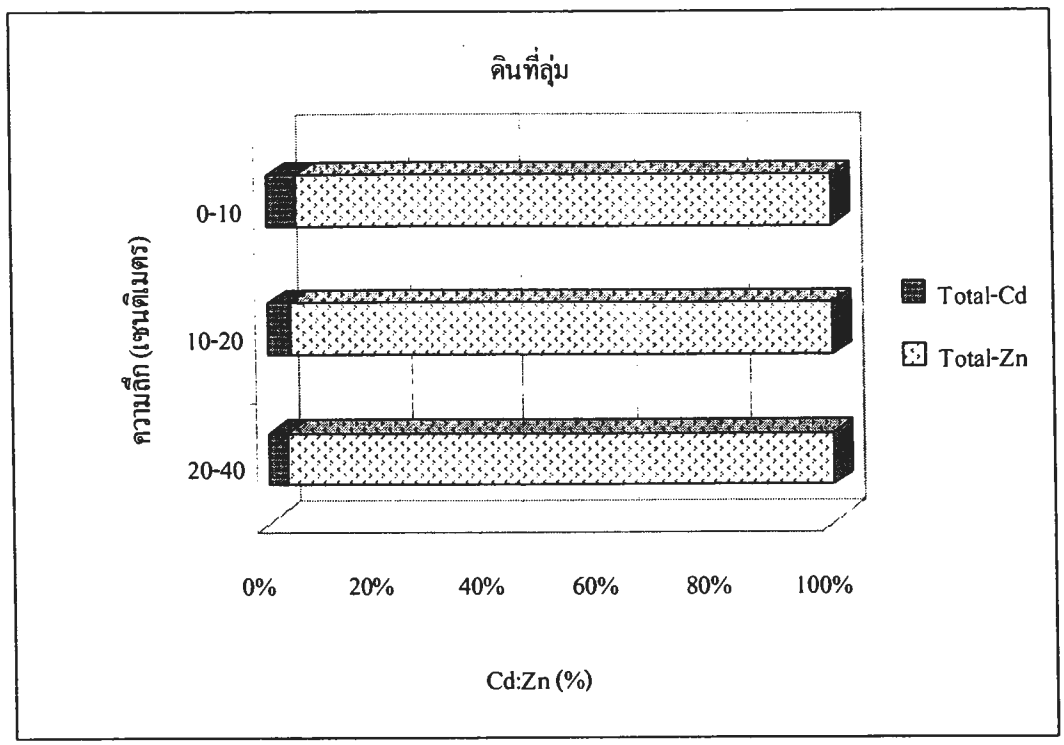




ภาพที่ 4.8 การกระจายตัวของแคดเมียม (ก) และสังกะสีทั้งหมด (ข) ตามความลึก

จากตารางภาคผนวกที่ ก-2 จะสังเกตเห็นว่าแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดมีปริมาณที่สูงที่สุดอยู่ที่ระดับผิวดิน (0-20 เซนติเมตร) เท่านั้น และมีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็วที่ระดับความลึก 20-40 เซนติเมตร โดยเฉพาะดินที่ลุ่ม และดินตะกอนลำห้วยปริมาณแคดเมียม อยู่ในช่วง 68-73 และ 20-70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และปริมาณสังกะสี อยู่ในช่วง 1,315-1,326 และ 1304-1,804 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระดับความลึก 0-10 และ 10-20 เซนติเมตร ตามลำดับ และมีปริมาณสูงกว่าดินที่ดอนฝั่งขวาและซ้ายลำห้วย และดินควบคุม ที่มีปริมาณแคดเมียมอยู่ในช่วง 0.97-1.81 และ 0.59-1.21 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และปริมาณสังกะสีอยู่ในช่วง 27-35 และ 21-30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระดับความลึก 0-10 และ 10-20 เซนติเมตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่พบมีความเกี่ยวข้องกับน้ำ และดินตะกอนน้ำพัดพา นอกจากนี้ลักษณะภูมิประเทศและการเกษตรก็มีผลต่อการปนเปื้อนแคดเมียมในดินเช่นกัน เนื่องจากการไถพรวนพลิกหน้าดินอยู่ตลอดเวลา ทำให้การซึมซาบของน้ำดีขึ้น ดังนั้นแคดเมียมก็มีโอกาสเคลื่อนที่ลงไปตามความลึกได้เช่นกัน ดังจะเห็นได้จากที่ระดับความลึก 20-40 เซนติเมตร ของดินที่ลุ่ม ที่มีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีสูงถึง 26 และ 756 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

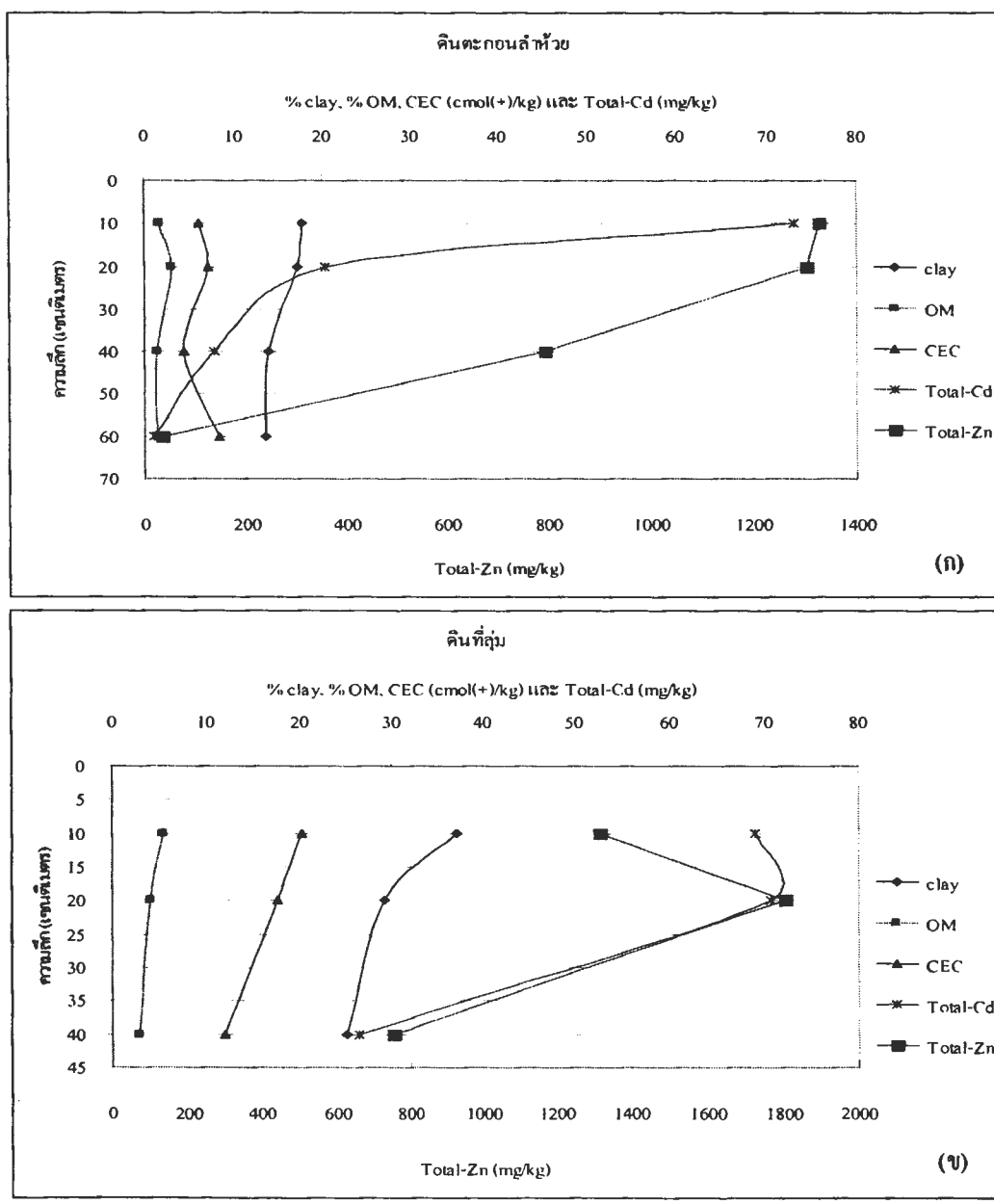
จากตารางภาคผนวกที่ ก-2 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดมีไม่ถึงร้อยละ 10 ของปริมาณสังกะสีทั้งหมด และมีค่าลดลงตามความลึก ดังเช่น ดินที่ลุ่ม (ภาพที่ 4.9) ที่พบว่าที่ระดับความลึก 0-10, 10-20 และ 20-40 เซนติเมตร มีปริมาณแคดเมียมทั้งหมดคิดเป็นร้อยละ 5.24, 3.92 และ 3.49 ของปริมาณสังกะสีทั้งหมด เรียงตามลำดับ



ภาพที่ 4.9 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดที่คิดเป็นร้อยละของปริมาณสังกะสีทั้งหมด ตามความลึกในดินที่ลุ่ม

คำนวณจาก $\frac{\text{ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด X 100}}{\text{ปริมาณสังกะสีทั้งหมด}}$

และเมื่อพิจารณาสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินกับปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดในดินแล้ว พบว่าสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินมีผลต่อการลดลงของแคดเมียมและสังกะสีตามความลึกน้อยมาก ในขณะที่ปริมาณสังกะสีที่ลดลงตามความลึก ส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมลดลงตามความลึกด้วย โดยเฉพาะดินตะกอนลำห้วย และดินในที่ลุ่ม ดังภาพที่ 4.10 ก และ ข สอดคล้องกับ Adriano (2001) ที่กล่าวว่า ในธรรมชาติแคดเมียมในดินที่พบจะอยู่ร่วมกับแร่สังกะสี โดยมีอัตราส่วนของแคดเมียมและสังกะสีเท่ากับ 1:100 ถึง 1:1,000 ดังนั้นเมื่อปริมาณสังกะสีในดินลดลง ปริมาณแคดเมียมก็ลดลงเช่นเดียวกัน

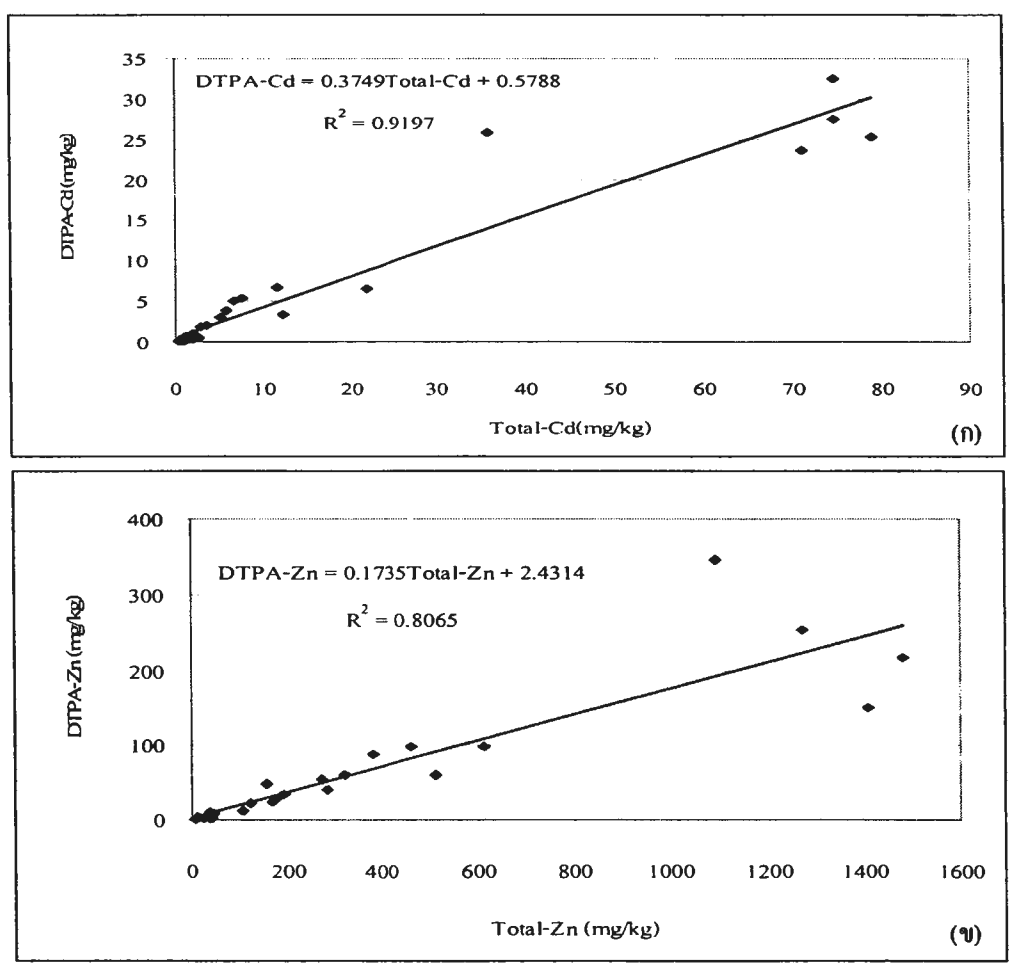


ภาพที่ 4.10 ปริมาณแคดเมียมที่ลดลงตามความลึกสัมพันธ์กับปริมาณสังกะสีที่ลดลงตามความลึก ในดินตะกอนลำห้วย (ก) และดินที่ลุ่ม (ข)

4.2.2 ปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่พืชดูดดึงได้ (available cadmium and zinc)

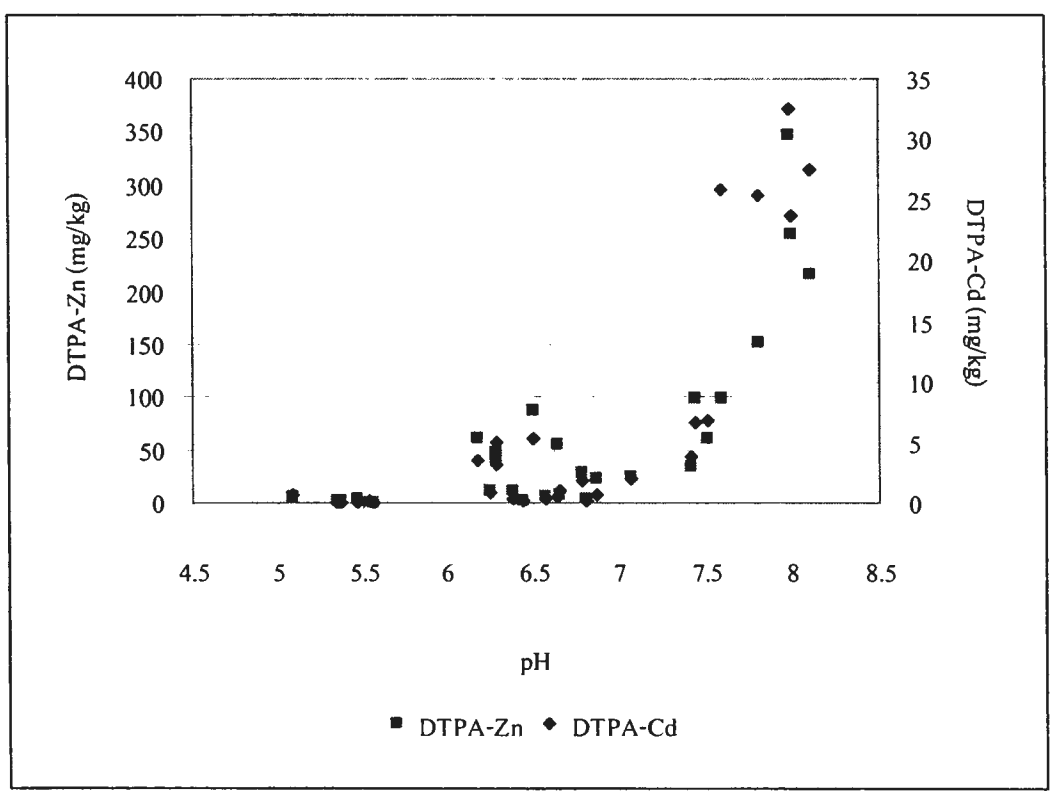
1) ปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่พืชดูดดึงได้ ที่ระดับผิวดิน

จากตารางที่ 4.2 พบว่าปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่พืชดูดดึงได้มีการกระจายตัวเช่นเดียวกับปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมด ดังภาพที่ 4.11 ก และ ข คือ มีปริมาณสูงที่สุดในพื้นที่ลุ่มและพื้นที่ดอนน้ำขัง มีเพียงปริมาณสังกะสีที่พืชดูดดึงได้ในพื้นที่ป่าเท่านั้นที่มีปริมาณใกล้เคียงกับพื้นที่ควบคุม เนื่องจากพื้นที่ควบคุมเป็นพื้นที่ทำการเกษตร ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่พบในดิน อาจเป็นผลมาจากการใช้ปุ๋ยของเกษตรกรที่ยังคงตกค้างอยู่ในพื้นที่ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ ปิ่นเพชร และละไม (2548) ที่พบว่าปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่พืชดูดดึงได้มีความสัมพันธ์กับปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดในดินที่มีการปนเปื้อนจากน้ำเสียโรงงานถลุงแร่สังกะสี



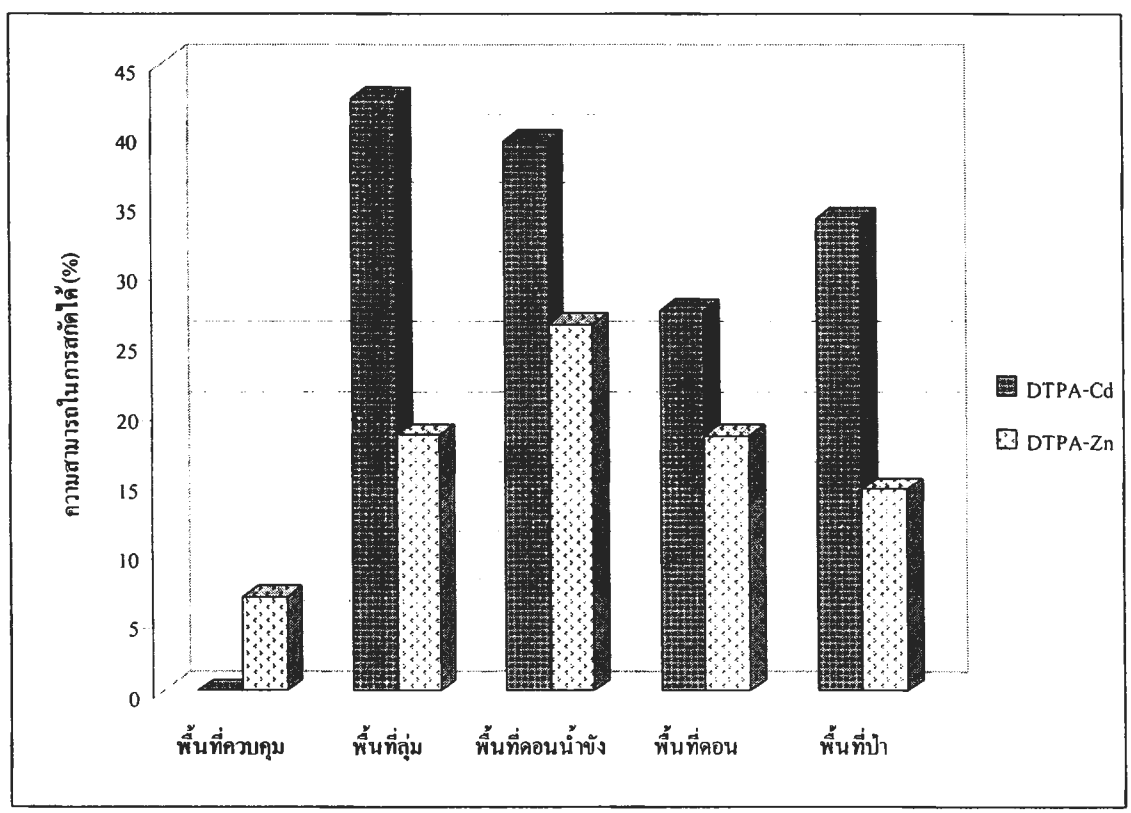
ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคดเมียมที่พืชดูดดึงได้กับแคดเมียมทั้งหมด (ก) และปริมาณสังกะสีที่ดูดดึงได้กับสังกะสีทั้งหมด (ข)

จากผลการศึกษาพบว่า สมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน มีผลต่อปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่พืชดูดดึงได้น้อยมาก (ตารางภาคผนวกที่ ข-1) โดยพีเอชมีผลต่อการดูดดึงแคดเมียมและสังกะสีของพืชมากกว่าปัจจัยอื่น ในขณะที่อินทรียวัตถุ อนุภาคดินเหนียว ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก มีผลต่อการดูดดึงแคดเมียมและสังกะสีของพืชน้อยมาก แต่เนื่องจากดินบางพื้นที่มีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดสูง โดยเฉพาะดินพื้นที่ลุ่มและดินพื้นที่ดอนน้ำขัง ถึงแม้ว่าดินจะมีพีเอชมากกว่า 7.0 แต่ปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่พืชดูดดึงได้ยังคงมีปริมาณที่สูง (ปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่พืชดูดดึงได้ ประมาณ 10 และ 97 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ) เนื่องจากปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดในดินมีปริมาณสูงนั่นเอง และนอกจากนี้ ทั้งสองพื้นที่ยังเป็นพื้นที่ทำการเกษตร ดังนั้นปัจจัยภายนอก เช่น การเกษตร สารเคมี ปุ๋ย เป็นต้น มีส่วนในการกระตุ้นให้ปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่พืชดูดดึงได้ในทั้งสองพื้นที่มีปริมาณที่สูง ถึงแม้ว่าดินจะมีพีเอชเป็นกลางถึงด่างอ่อน จากภาพที่ 4.12 จะพบว่า ปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่พืชดูดดึงได้ มีความสัมพันธ์กับพีเอชในลักษณะเดียวกับ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดกับพีเอช (ตารางภาคผนวกที่ ข-1) แต่ในธรรมชาติการปลดปล่อยแคดเมียมและสังกะสีของดิน จะต้องอาศัยปัจจัยหลายด้านเข้ามาเกี่ยวข้องดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่พืชดูดดึงได้

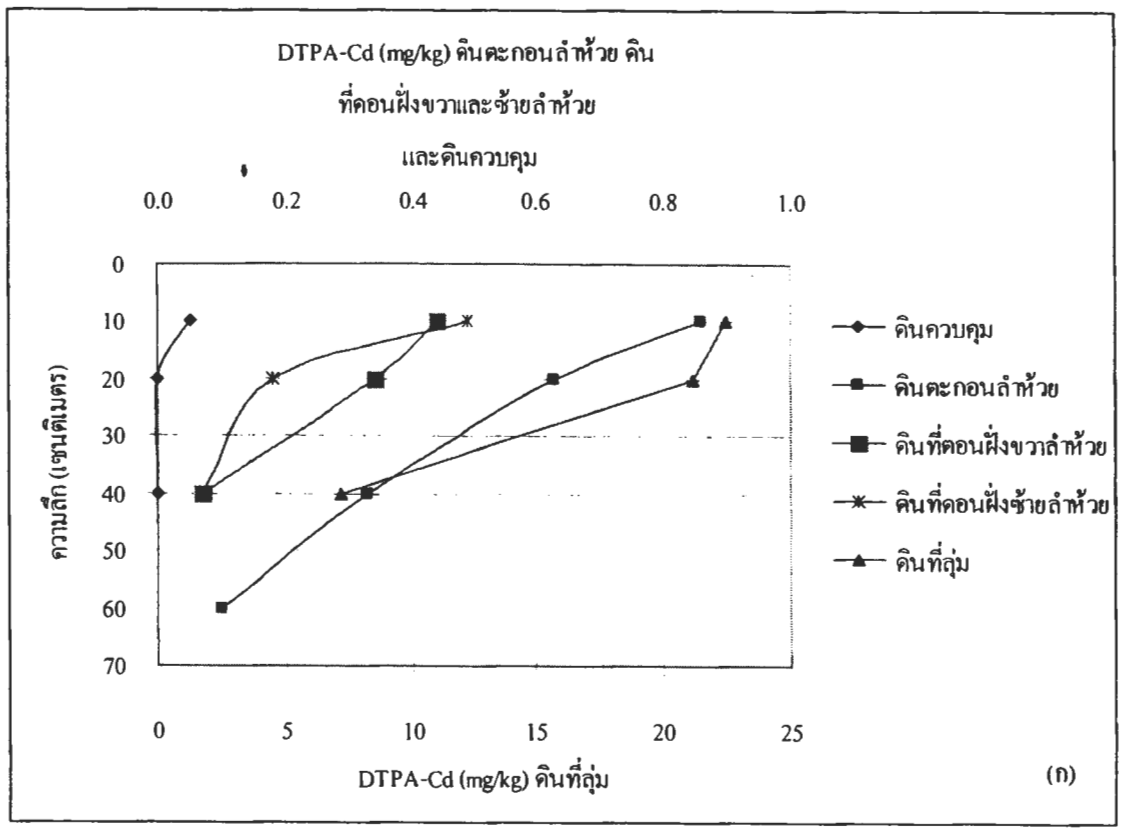
ถึงแม้ว่าแคดเมียมทั้งหมดในดินจะมีปริมาณที่น้อยมาก (ไม่ถึงร้อยละ 10 ของปริมาณสังกะสีทั้งหมดในพื้นที่เดียวกัน) เมื่อเทียบกับปริมาณสังกะสีทั้งหมด แต่เมื่อนำมาคิดความสามารถในการสกัดได้ของปริมาณแคดเมียมที่พืชดูดดึงได้ เทียบกับปริมาณแคดเมียมทั้งหมดแล้ว พบว่า ดินจะปลดปล่อยแคดเมียมออกมาได้ง่ายกว่าสังกะสี (ตารางที่ 4.2) ทั้งในพื้นที่ลุ่ม พื้นที่ดอนน้ำขัง พื้นที่ดอน และพื้นที่ป่า (ภาพที่ 4.13) แสดงว่าโอกาสที่พืชจะดูดดึงแคดเมียมจากดินมีมากกว่าสังกะสี และพืชทุกชนิดในพื้นที่บ้านพะเด๊ะ มีโอกาสที่จะปนเปื้อนแคดเมียมมากกว่าพืชที่พบในพื้นที่ควบคุม โดยเฉพาะพืชที่ปลูกในพื้นที่ลุ่ม และพื้นที่ดอนน้ำขัง เนื่องจากปริมาณแคดเมียมที่พืชดูดดึงได้ มีประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในขณะที่ พื้นที่ดอนและพื้นที่ป่า ที่ถึงแม้ว่าดินจะปลดปล่อยแคดเมียมออกมาได้ง่าย แต่ปริมาณที่ปลดปล่อยออกมามีอยู่น้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนพื้นที่ควบคุมปริมาณแคดเมียมที่พืชดูดดึงได้ ไม่สามารถตรวจวัด

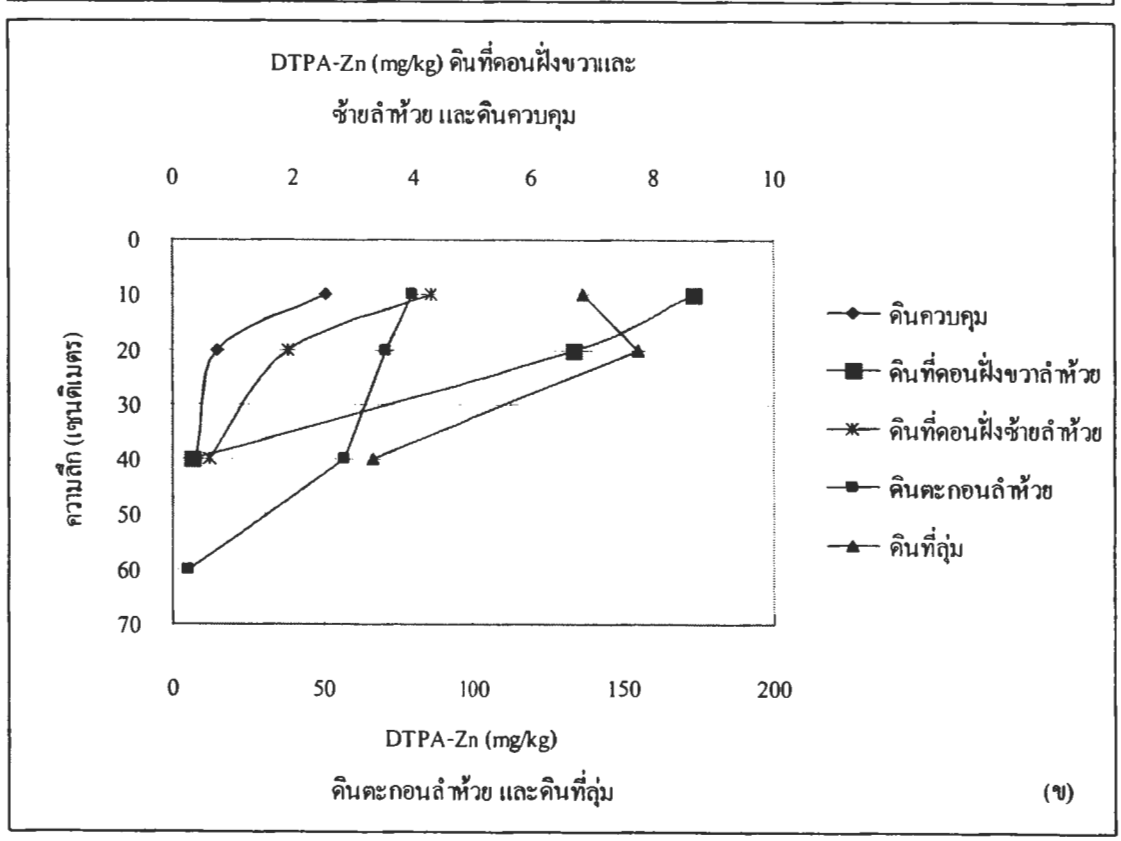


ภาพที่ 4.13 ความสามารถในการสกัดได้ด้วยสารสกัด DTPA ของแคดเมียมและสังกะสีที่พืชนำไปใช้ได้ เมื่อเทียบกับปริมาณทั้งหมดของแคดเมียม และสังกะสีในแต่ละพื้นที่ คำนวณจาก $\frac{\text{ปริมาณที่พืชนำไปใช้ได้} \times 100}{\text{ปริมาณทั้งหมด}}$ ของธาตุนั้น

2) ปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่พืชดูดดึงได้ ตามความลึก

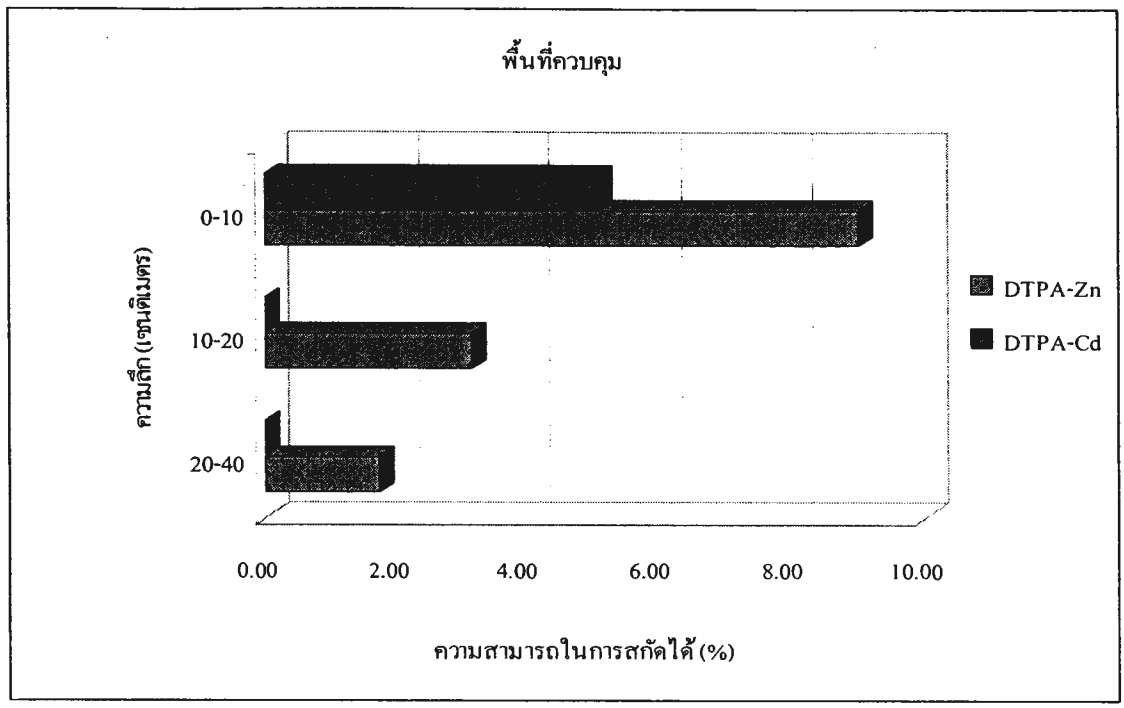
แคดเมียมและสังกะสีที่พืชดูดดึงได้มีปริมาณลดลงตามระดับความลึก สอดคล้องกับปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมด (ภาพที่ 4.14 ก และ ข และตารางภาคผนวกที่ ก-2) โดยมีปริมาณที่สูงที่สุดอยู่ที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร เพียงเท่านั้น และมีอัตราการลดลงอย่างรวดเร็วที่ระดับความลึก 20-40 เซนติเมตร โดยที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร ดินที่ลุ่มมีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่พืชดูดดึงได้สูงที่สุด (ปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่พืชดูดดึงได้มากกว่า 20 และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ) ในขณะดินตะกอนลำห้วย ดินที่ดอนฝั่งขวาและฝั่งซ้ายลำห้วย ดินมีปริมาณแคดเมียมที่พืชดูดดึงได้ใกล้เคียงกัน คือ น้อยกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และดินควบคุมไม่สามารถตรวจวัดปริมาณแคดเมียมได้ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Römkens และ Salomons (1998) ที่พบว่าปริมาณแคดเมียม สังกะสี และทองแดงที่สกัดได้ในดินทำการเกษตรและดินป่า มีปริมาณลดลงตามความลึก สอดคล้องกับปริมาณแคดเมียม สังกะสี และทองแดงทั้งหมด ซึ่งการที่ดินมีปริมาณสังกะสีที่พืชนำไปใช้ได้ลดลงตามความลึกเช่นนี้ อาจส่งผลให้พืชดูดดึงแคดเมียมในดินเพิ่มมากขึ้น เพราะแคดเมียมไอออนมีจำนวนประจุเท่ากันกับสังกะสีไอออน (Zn^{2+}) ซึ่งเป็นรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช โดยพืชบางชนิดจะไม่แสดงอาการขาดสังกะสีให้เห็น แต่มีผลทำให้ผลผลิตลดลง และด้อยคุณภาพ แต่สิ่งที่สำคัญหากพืชนั้นเป็นพืชที่นำมาเป็นอาหารก็จะส่งผลต่อผู้บริโภค (Adriano, 2001) ดังนั้นหากตรวจพบว่าดินมีการปนเปื้อนแคดเมียม ควรที่จะรักษาระดับของสังกะสีที่พืชนำไปใช้ได้ในดินให้อยู่ในระดับที่สูง เพื่อลดการดูดดึงแคดเมียมของพืชลง และควรควบคุมไม่ให้ดินปลดปล่อยแคดเมียมออกมา





ภาพที่ 4.14 การกระจายตัวของแคดเมียม (ก) และสังกะสีที่พืชดูดดึงได้ (ข) ตามความลึก

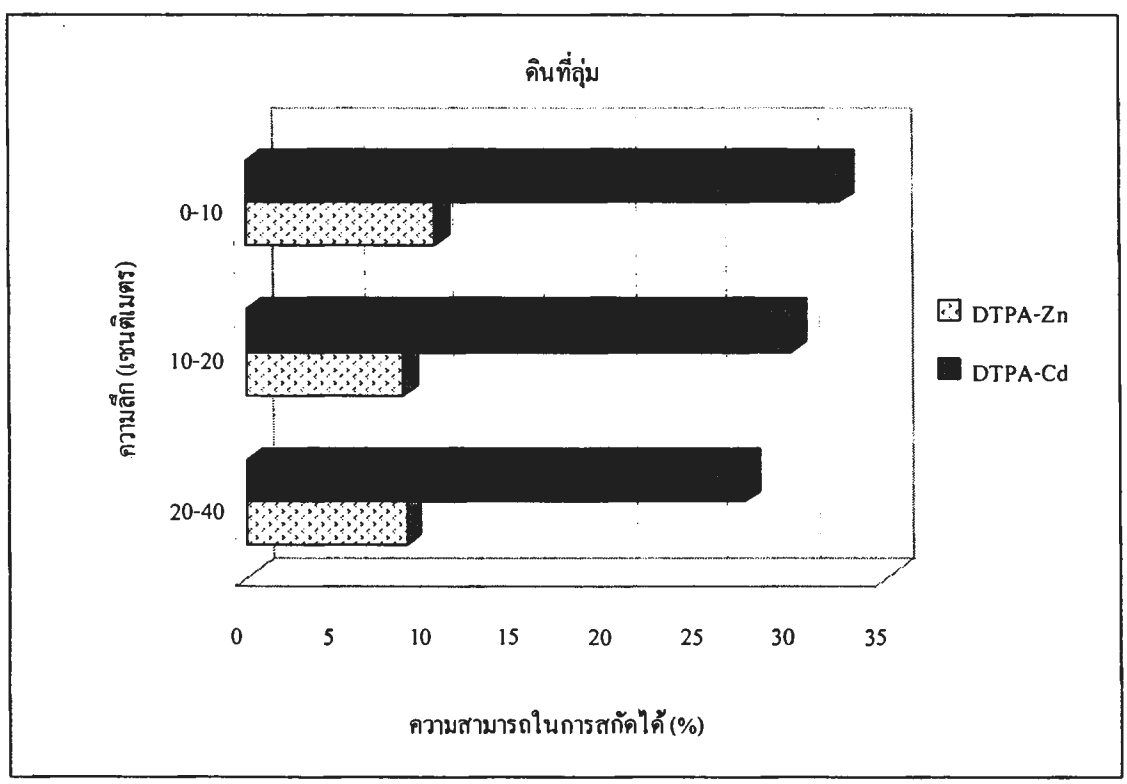
จากตารางภาคผนวกที่ ก-2 พบว่าความสามารถในการสกัดได้ของสังกะสีที่พืชดูดดึงได้ ในดินควบคุม และดินตะกอนลำห้วยมีมากกว่าแคดเมียม และมีค่าลดลงตามความลึกทั้งแคดเมียมและสังกะสี (ภาพที่ 4.15)



ภาพที่ 4.15 ความสามารถในการสกัดได้ด้วยสารสกัด DTPA ของแคดเมียมและสังกะสีที่พืชดูดดึงได้เมื่อเทียบกับปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดในดิน ตามระดับความลึก ในดินที่ควบคุม

ในขณะที่ความสามารถในการสกัดได้ของแคดเมียมที่พืชดูดดึงได้ในดินที่ลุ่ม และดินที่ดอนฝั่งขวาและฝั่งซ้ายลำห้วยมีมากกว่าสังกะสีที่พืชดูดดึงได้ตลอดความลึก 40 เซนติเมตร (ตารางภาคผนวกที่ ก-2) ซึ่งการที่แคดเมียมถูกปลดปล่อยออกมาให้อยู่ในรูปที่พืชดูดดึงได้ ได้ง่ายกว่าสังกะสีนั้นไม่เป็นผลดีต่อเกษตรกรที่ใช้ประโยชน์จากทั้งสามพื้นที่ และไม่ว่าจะปลูกพืชที่มีระบบรากยาว (มากกว่า 20 เซนติเมตร) หรือระบบรากสั้น (ไม่เกิน 20 เซนติเมตร) ก็ตาม จะพบว่าพืชเหล่านั้นมีโอกาสปนเปื้อนแคดเมียมได้เหมือนกันหมด ซึ่งปริมาณการปนเปื้อนก็ขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่ปลูก ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด และปริมาณแคดเมียมที่พืชดูดดึงได้ ว่ามีปริมาณสูง หรือต่ำ เพราะถ้าในดินมีปริมาณแคดเมียมสูงพืชก็จะดูดดึงได้สูง แต่ถ้าดินมีปริมาณแคดเมียมต่ำ ปริมาณที่พืชจะดูดดึงได้ก็ต่ำ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับอายุของพืชด้วย เช่น ถ้าเป็นพืชที่มีอายุมาก หรือ พืชสวน พืชยืนต้น เช่น มะม่วง มะขาม ลำไย เป็นต้น ถึงแม้ว่าดินจะมีปริมาณแคดเมียมที่พืชดูดดึงได้อยู่ในปริมาณที่น้อยมาก (น้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) แต่พืชดูดดึงแคดเมียมอยู่ตลอดเวลา ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในพืชก็มีมากขึ้นตามอายุของพืชเช่นกัน

และจากการที่พบว่า ดินที่ลุ่มของบ้านพะเด๊ะปลดปล่อยแคดเมียมออกมาได้ง่ายกว่าสังกะสี (ภาพที่ 4.16) จึงทำให้ดินที่ลุ่มอยู่ในสภาวะที่วิกฤตกว่าพื้นที่อื่น เพราะพืชที่ปลูกในพื้นที่ลุ่ม มีโอกาสปนเปื้อนแคดเมียมในปริมาณที่สูงมากกว่าพืชที่ปลูกในพื้นที่ดอนฝั่งขวาและฝั่งซ้ายลำห้วย โดยเฉพาะพืชที่มีระบบรากที่สั้น (ความยาวรากประมาณ 20 เซนติเมตร) เช่น ข้าว ข้าวโพด ถั่วเหลือง และพืชผัก เป็นต้น เนื่องจาก ตลอดความลึก 40 เซนติเมตร พบว่าดินมีปริมาณแคดเมียมทั้งหมด เฉลี่ยเท่ากับ 55 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีปริมาณแคดเมียมที่พืชดูดดึงได้ เฉลี่ยเท่ากับ 16 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยเฉพาะที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร ที่ดินมีปริมาณแคดเมียมทั้งหมด และแคดเมียมที่พืชดูดดึงได้ เฉลี่ยแล้วสูงถึง 69 และ 21 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ



ภาพที่ 4.16 ความสามารถในการสกัดได้ด้วยสารสกัด DTPA ของแคดเมียมและสังกะสีที่พืชดูดดึงได้เมื่อเทียบกับปริมาณทั้งหมดของแคดเมียม และสังกะสี ตามระดับความลึก ในดินที่ลุ่ม

จากผลการศึกษาพบว่า ดินในพื้นที่ลุ่ม และพื้นที่ดอนน้ำขัง มีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมด เฉลี่ยอยู่ในช่วง 23-27 และ 536-550 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งเกินที่มาตรฐานสหภาพยุโรปกำหนดไว้ (ปริมาณแคดเมียมและสังกะสีในดินเพาะปลูกไม่เกิน 3 และ 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ) และจุดที่ 4, 9, 11 และ 14 มีปริมาณแคดเมียมทั้งหมด อยู่ในช่วง 70-78 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีปริมาณสังกะสีทั้งหมด อยู่ในช่วง 1,093-1,480 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งเป็นปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่สูงที่สุด เนื่องจากทั้งสี่จุดอยู่ติดกับลำห้วยแม่ตาว และเปิดรับน้ำจากลำห้วยแม่ตาวตลอดเวลา จึงทำให้ดินมีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีในดินสูงกว่าจุดเก็บตัวอย่างอื่นในพื้นที่เดียวกัน ที่มีปริมาณแคดเมียมทั้งหมดอยู่ในช่วง 2.28-35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และปริมาณสังกะสีทั้งหมดอยู่ในช่วง 105-612 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

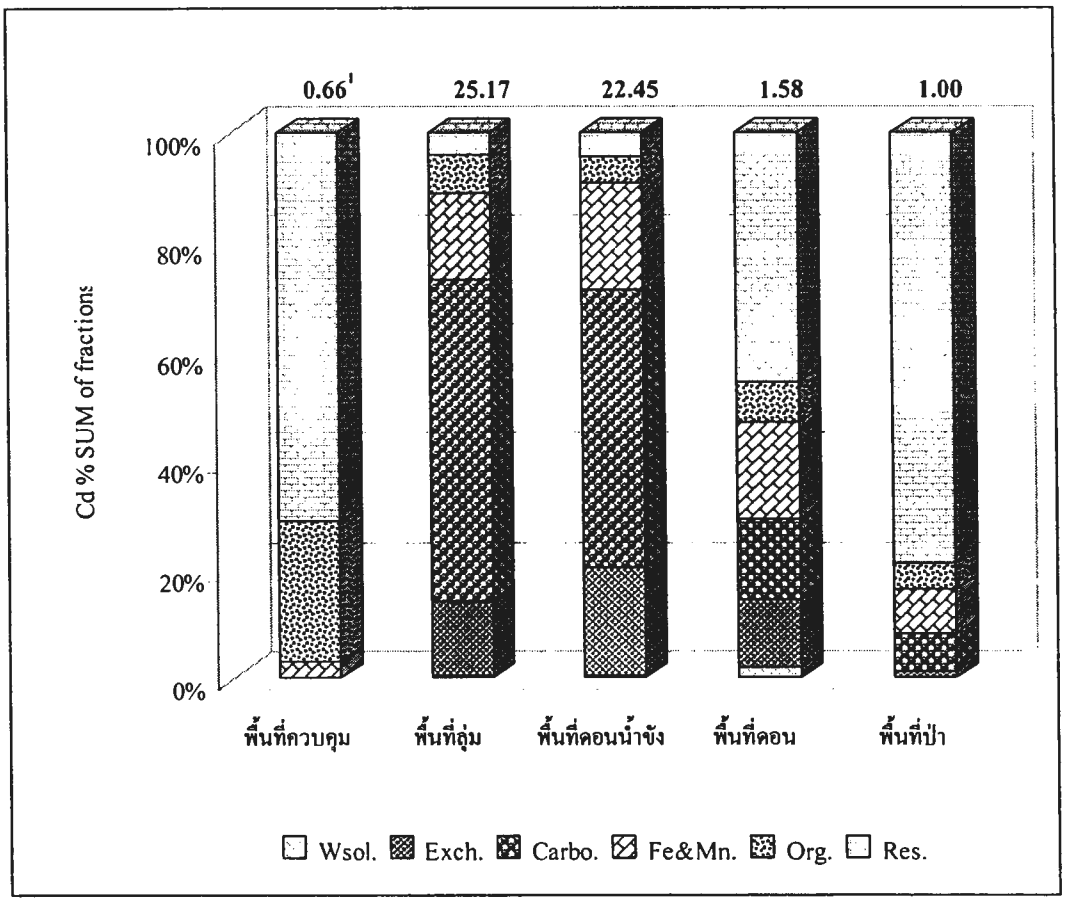
นอกจากนี้ดินตะกอนลำห้วยยังมีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดในดินสูงเช่นเดียวกับดินในที่ลุ่ม โดยมีปริมาณสูงสุดที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร (ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด เฉลี่ยเท่ากับ 46 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และปริมาณสังกะสี เฉลี่ยเท่ากับ 1,315 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และมีปริมาณลดลงตามความลึก เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Song และคณะ (1999) ที่พบว่าดินตะกอนลำห้วยที่ระนะห่าง 4-10 กิโลเมตร จากบ่อตะกอนของเหมืองแร่กูบอง (Gubong Mine) ในประเทศเวียดนาม มีปริมาณแคดเมียม 41 และ 24 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และปริมาณสังกะสี 760 และ 564 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และผลการศึกษาของ Bech และคณะ (1997) ที่พบว่าดินบริเวณรอบเหมืองแร่ทองแดง ในเขตแคนชัว (Canchaque) มลรัฐเพียรา (Piura) ตอนเหนือของประเทศเปรู มีการปนเปื้อนของแคดเมียมและสังกะสีในดิน โดยมีปริมาณการปนเปื้อนของแคดเมียมอยู่ระหว่าง 8.9-499 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และปริมาณสังกะสีอยู่ระหว่าง 56-772 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

การปนเปื้อนแคดเมียมและสังกะสี ในพื้นที่บ้านพะเด๊ะ จะปรากฏอยู่ที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตรเท่านั้น และปริมาณแคดเมียมในพื้นที่ลุ่ม (27 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) มีปริมาณการปนเปื้อนของแคดเมียมสูงกว่าพื้นที่ดอน และพื้นที่ป่า (ปริมาณแคดเมียม ต่ำกว่า 3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) อย่างเห็นได้ชัด และจากลักษณะของเนื้อดินที่เป็นดินร่วนเหนียว ที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร ในพื้นที่ลุ่ม ซึ่งแตกต่างจากดินในพื้นที่ดอน และพื้นที่ป่า ที่เป็นดินร่วนเหนียวปนทราย สามารถกล่าวได้ว่า แคดเมียมและสังกะสีที่ปนเปื้อนในดินบริเวณดังกล่าวไม่ได้เกิดจากการผุพังสลายตัวของหินพื้น แต่เกิดจากตะกอนที่มาทับถมในบริเวณที่ลุ่ม เป็นปัจจัยหลัก ซึ่งตะกอนที่มาทับถมนั้นมีมาจากหลายสาเหตุด้วยกัน ทั้งจากกิจรรมของมนุษย์ เช่น การทำเหมืองแร่ การระเบิดหิน การเปิดหน้าดินให้โล่ง การบุกรุกพื้นที่ป่าทำให้เกิดการพังทลายของหน้าดิน และการผุพังตามธรรมชาติของหินและแร่บางส่วน นอกจากนี้ การทำการเกษตรที่ใช้ปุ๋ยเคมี และสารเคมีเกษตรเป็นปริมาณที่มาก เป็นตัวเร่งให้ดินปลดปล่อยแคดเมียมและสังกะสีออกมาจากดินในปริมาณที่มากและเร็วขึ้น สอดคล้องกับคำกล่าวของ Alam, Snow และ Tanaka (2003) และ Uminska (1993)

4.3 ส่วนประกอบทางเคมีของแคดเมียมและสังกะสี

4.3.1 ส่วนประกอบของแคดเมียมทั้งหมด (fractionation cadmium)

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าเฉลี่ยส่วนประกอบของแคดเมียมทั้งหมดที่ระดับผิวดิน พบว่าแคดเมียมส่วนใหญ่อยู่ในส่วนที่คงเหลือในดิน (residual fractions) มากกว่าร้อยละ 60 ยกเว้นพื้นที่ลุ่มและพื้นที่ดอนน้ำขังที่พบแคดเมียมในส่วนที่ดูดยึดด้วยคาร์บอเนต (carbonate fractions) มากกว่าร้อยละ 50 เป็นส่วนใหญ่ (ภาพที่ 4.17) และพบว่าแคดเมียมอยู่ในส่วนที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ (immobile fractions) มากกว่าร้อยละ 80 ของผลรวมทั้งหมด จากค่าดัชนีการเคลื่อนที่ (mobility index) ของแคดเมียม พบว่าพื้นที่ลุ่มและพื้นที่ดอนน้ำขัง มีดัชนีการเคลื่อนที่ของแคดเมียมสูง ชี้ให้เห็นว่าแคดเมียมในทั้งสองพื้นที่มีโอกาสที่จะเคลื่อนที่ แลกเปลี่ยนได้ หรือถูกปลดปล่อยออกมาอยู่ในรูปของไอออนที่สิ่งมีชีวิตสามารถดูดดึงได้มากกว่าแคดเมียมในพื้นที่ดอน พื้นที่ป่า และพื้นที่ควบคุม



ภาพที่ 4.17 การกระจายตัวของส่วนประกอบของแคดเมียมในดิน ที่ระดับผิวดิน (0-20 เซนติเมตร) โดยใช้ค่าเฉลี่ยของส่วนประกอบของแคดเมียมแต่ละส่วน คิดเป็นร้อยละของส่วนประกอบของแคดเมียมทั้งหมด

[1]SUM of fractions ($mgkg^{-1}$)

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยส่วนประกอบของแคดเมียมทั้งหมดในดิน ที่ระดับผิวดิน (0-20 เซนติเมตร)

พื้นที่	Wsol.[1]	Exch.[2]	Carbo.[3]	Fe&Mn[4]	Org.[5]	Res.[6]	SUM[7]	Total	MI[8]	N[9]
	mgkg^{-1}									
ควบคุม	nd[10]	nd	nd	nd-0.03	0.14 - 0.18	0.37 - 0.56	0.51 - 0.77	0.34 - 0.79	-	3
	-	-	-	(0.02±0017)[11]	(0.16±0.023)	(0.47±0.096)	(0.66±0.13)	(0.63±0.25)	(0.10±0.069)	
ที่ลุ่ม	0.05 - 0.12	0.27 - 13.00	0.22 - 50.93	0.21 - 15.29	0.20 - 9.08	0.70 - 3.28	2.18 - 78.84	2.28 - 78.85	0.35 - 6.13	12
	(0.085±0.017)	(3.49±3.96)	(14.84±17.59)	(4.02±5.02)	(1.72±2.50)	(0.99±0.73)	(25.17±28.04)	(27.04±31.03)	(0.35±0.13)	
ที่ดอนน้ำขัง	0.05 - 0.14	0.32 - 14.93	0.93 - 39.06	1.64 - 10.34	0.45 - 1.68	0.61 - 1.64	4.28 - 67.70	3.49 - 70.98	0.84 - 3.96	4
	(0.11±0.042)	(4.46±6.9)	(11.40±18.47)	(4.40±4.07)	(1.08±0.59)	(0.97±0.45)	(22.44±30.32)	(23.02±32.15)	(0.32±0.23)	
ที่ดอน	nd - 0.07	0.10 - 0.44	0.03 - 0.58	0.10 - 0.63	0.05 - 0.20	0.41 - 0.93	0.99 - 2.34	0.50 - 2.59	0.14 - 0.96	6
	(0.03±0.033)	(0.19±0.12)	(0.23±0.2)	(0.27±0.22)	(0.12±0.053)	(0.72±0.17)	(1.57±0.57)	(1.58±0.7)	(0.27±0.15)	
ป่า	nd	nd - 0.04	0.05 - 0.09	0.07 - 0.10	0.03 - 0.09	0.67 - 0.98	0.84 - 1.23	0.58 - 1.06	0.08 - 0.11	3
	-	(0.013±0023)	(0.07±0.02)	(0.08±0.017)	(0.05±0.034)	(0.78±0.16)	(1.00±0.20)	(0.77±0.25)	(0.09±0.0155)	

[1] water soluble fractions (ส่วนที่ละลายน้ำได้)

[2] exchangeable fractions (ส่วนที่แลกเปลี่ยนได้)

[3] carbonate fractions (ส่วนที่ดูดยึดด้วยคาร์บอเนต)

[4] iron and manganese oxides fractions (ส่วนที่ดูดยึดด้วยออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส)

[5] organic fractions (ส่วนที่ดูดซับด้วยอินทรียสาร)

[6] residual fractions (ส่วนที่คงเหลือในดิน)

[7] sum of fractions (ผลรวมทั้งหมดของส่วนประกอบทางเคมี)

[8] mobility index (ดัชนีการเคลื่อนที่) = $\frac{(\text{Wsol.} + \text{Exch.} + \text{Carbo.})}{(\text{Fe \& Mn} + \text{Org.} + \text{Res})}$

[9] จำนวนตัวอย่างที่ศึกษา

[10] non detected

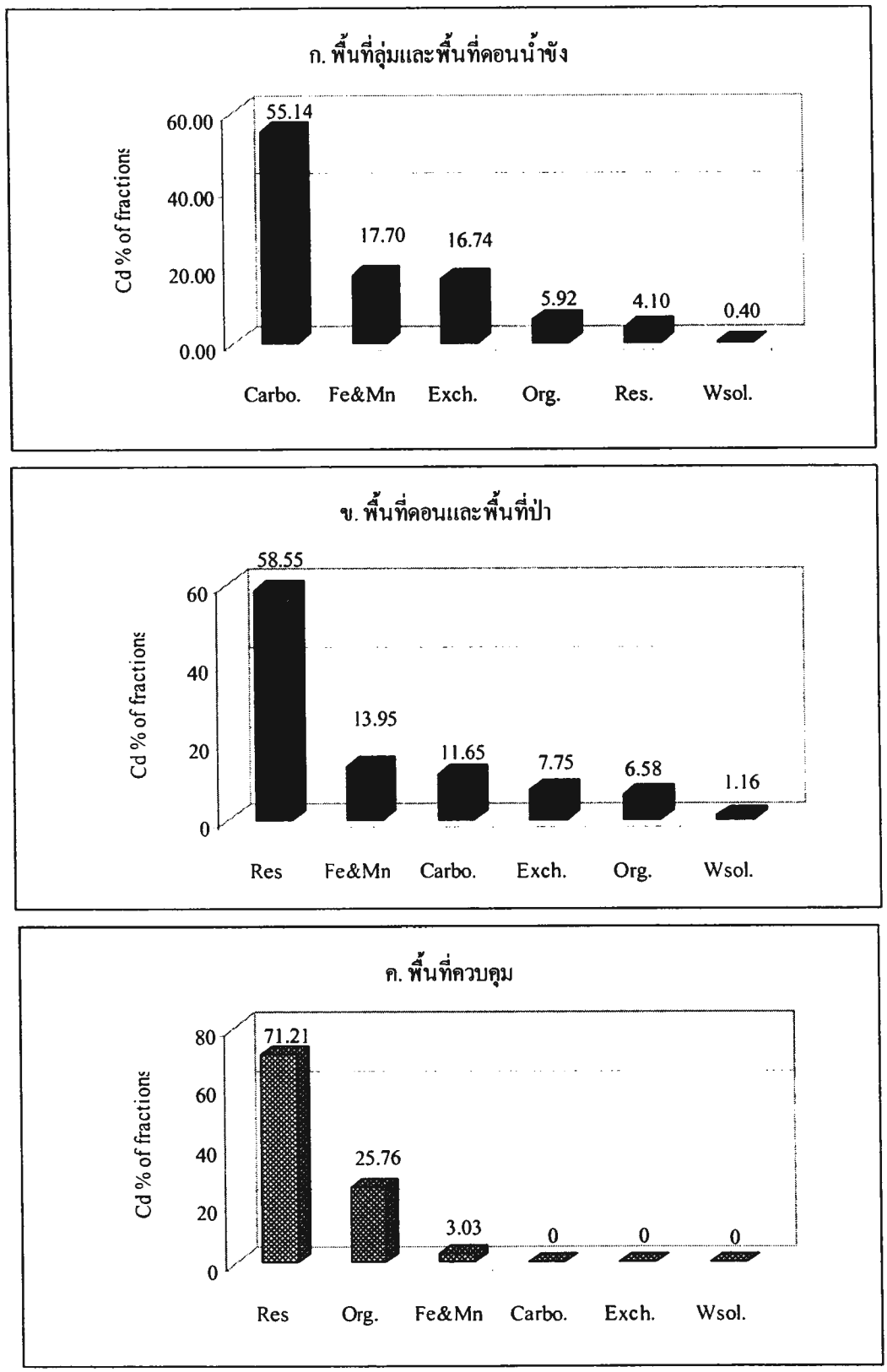
[11] Mean±SD ของตัวอย่างที่ศึกษา

เมื่อเรียงลำดับส่วนประกอบของแคดเมียมจากมากไปหาน้อย สามารถจัดกลุ่มตัวอย่างได้สามกลุ่ม คือ

กลุ่มที่หนึ่งประกอบด้วย พื้นที่ลุ่มและพื้นที่ดอนน้ำขัง เรียงลำดับส่วนประกอบของแคดเมียมจากมากไปหาน้อย ได้ดังนี้ ส่วนที่ดูดยึดด้วยคาร์บอเนต (ร้อยละ 55.14) ส่วนที่ดูดยึดด้วยออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (ร้อยละ 17.70) ส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ (ร้อยละ 16.74) ส่วนที่ดูดซับด้วยอินทรียสาร (ร้อยละ 5.92) ส่วนที่คงเหลือในดิน (ร้อยละ 4.10) และส่วนที่ละลายน้ำได้ (ร้อยละ 0.40) (ภาพที่ 4.18 ก) ซึ่งส่วนประกอบทางเคมีของแคดเมียม สอดคล้องกับพีเอชของดินที่เป็นกลางถึงด่างอ่อน สอดคล้องกับ Adriano (2001) ที่กล่าวว่า ส่วนประกอบของแคดเมียม หรือโลหะหนัก ขึ้นอยู่กับสมบัติของดินนั้น เช่น ดินที่มีสมบัติเป็นด่างจะพบแคดเมียมในส่วนที่ดูดยึดด้วยคาร์บอเนต ในขณะที่ดินที่มีอินทรียวัตถุสูงจะพบแคดเมียมในส่วนที่ดูดซับด้วยอินทรียสารเป็นส่วนใหญ่ และผลการทดลองของ Kashem และ Singh (2002) และผลการศึกษาของ Chlopecka และคณะ (1996) ที่พบว่า ดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมจะเป็นดินที่มีพีเอชสูง และแคดเมียมจะอยู่ในรูปของสารประกอบคาร์บอเนต

กลุ่มที่สองประกอบด้วยพื้นที่ดอน และพื้นที่ป่า เรียงลำดับส่วนประกอบของแคดเมียมจากมากไปหาน้อย ได้ดังนี้ ส่วนที่คงเหลือในดิน (ร้อยละ 58.55) ส่วนที่ดูดยึดด้วยออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (ร้อยละ 13.95) ส่วนที่ดูดยึดด้วยคาร์บอเนต (ร้อยละ 11.68) ส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ (ร้อยละ 7.75) ส่วนที่ดูดซับด้วยอินทรียสาร (ร้อยละ 6.58) และส่วนที่ละลายน้ำได้ (ร้อยละ 1.16) (ภาพที่ 4.18 ข)

และกลุ่มที่สาม คือพื้นที่ควบคุม เรียงลำดับส่วนประกอบของแคดเมียมจากมากไปหาน้อย ได้ดังนี้ ส่วนที่คงเหลือในดิน (ร้อยละ 71.21) ส่วนที่ดูดซับด้วยอินทรียสาร (ร้อยละ 25.76) ส่วนที่ดูดยึดด้วยออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (ร้อยละ 3.03) ส่วนที่ดูดยึดด้วยคาร์บอเนต ส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ และส่วนที่ละลายน้ำได้ (ร้อยละ 0) (ภาพที่ 4.18 ค) สอดคล้องกับข้อสรุปของ Ma และ Rao (1997) ที่ว่า ถ้าปริมาณแคดเมียมในดินมีน้อยกว่า 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะพบแคดเมียมส่วนที่ถูกดูดยึดด้วยคาร์บอเนต ส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ และส่วนที่ละลายน้ำได้มีปริมาณน้อยมาก หรืออาจจะไม่พบทั้งสามส่วน หรือไม่พบส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ และส่วนที่ละลายน้ำได้ในดิน เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Onyatta และ Huang (1999) ในขณะที่ดินที่มีระดับแคดเมียมอยู่ในระดับปกติทั่วไปของดิน แคดเมียมส่วนใหญ่จะอยู่ในส่วนที่คงเหลือในดินที่เป็นส่วนประกอบของแร่ปฐมภูมิ (Chlopecka และคณะ, 1996)



ภาพที่ 4.18 การจัดกลุ่มส่วนประกอบทางเคมีของแคดเมียมเรียงจากมากไปหาน้อย กลุ่มที่หนึ่งพื้นที่ลุ่มและพื้นที่ดอนน้ำขัง (ก), กลุ่มที่สองพื้นที่ดอนและพื้นที่ป่า (ข) และกลุ่มที่สามพื้นที่ควบคุม (ค)

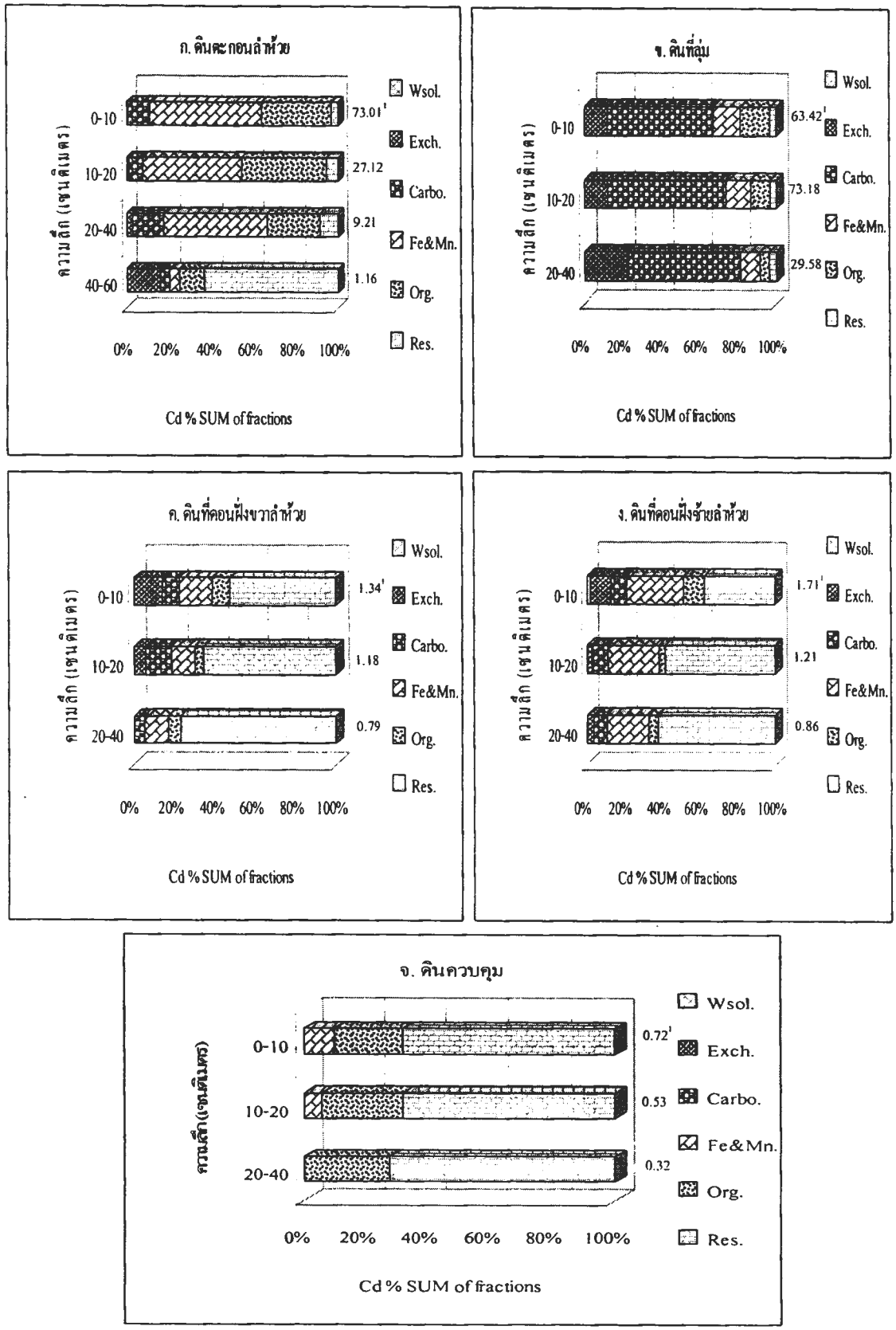
การกระจายตัวของส่วนประกอบของแคดเมียมตามความลึกมีปริมาณของส่วนประกอบแต่ละส่วนแตกต่างกัน ดังนี้ (ตารางภาคผนวกที่ ก-4)

ดินตะกอนลำห้วย ที่ระดับความลึก 0-40 เซนติเมตร พบแคดเมียมในส่วนที่ดูดยึดด้วยออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (มากกว่าร้อยละ 45) เป็นส่วนใหญ่ แต่ที่ระดับความลึก 40-60 เซนติเมตร พบแคดเมียมส่วนที่คงเหลือในดิน (มากกว่าร้อยละ 60) โดยทั้งสองส่วนนี้เป็นส่วนที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในสภาวะแวดล้อมปกติของดิน (ภาพที่ 4.19 ก)

ดินที่ลุ่ม แคดเมียมอยู่ในส่วนที่ดูดยึดด้วยคาร์บอเนต (มากกว่าร้อยละ 50) ทั้งสามระดับความลึก และนอกจากนี้ยังพบแคดเมียมส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ในดินพื้นที่ลุ่มด้วย โดยมีมากกว่าร้อยละ 10 ที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร และมากกว่าร้อยละ 20 ที่ระดับความลึก 20-40 เซนติเมตร (ภาพที่ 4.19 ข) ซึ่งแคดเมียมทั้งสองส่วนเป็นส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในดิน และง่ายที่จะถูกปลดปล่อยออกมาจากดิน และพบว่าดัชนีการเคลื่อนที่ของแคดเมียมมีค่าสูงกว่าพื้นที่อื่น ชี้ให้เห็นว่า แคดเมียมในพื้นที่ลุ่มมีโอกาสที่พืชจะดูดดึงไปใช้ได้มากกว่าพื้นที่ดอน และพื้นที่ควบคุม และเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่ใช้ประโยชน์จากพื้นที่นี้

ดินที่ดอนฝั่งขวาและซ้ายลำห้วย มีแคดเมียมอยู่ในส่วนที่คงเหลือในดิน มากกว่าร้อยละ 40 ที่ระดับความลึก 0-10 เซนติเมตร และมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามความลึก (ภาพที่ 4.19 ค และ ง)

ดินควบคุม มากกว่าร้อยละ 70 ของแคดเมียมทั้งหมดอยู่ในส่วนที่คงเหลือในดินทั้งสามระดับความลึก และไม่พบแคดเมียมส่วนที่เคลื่อนที่ได้ (ภาพที่ 4.19 จ) ดังนั้นอาจจะกล่าวได้ว่าระดับแคดเมียมปกติในดินของอำเภอแม่สอด อยู่ในระดับที่ไม่เกินมาตรฐานสหภาพยุโรป และอยู่ในส่วนที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ หรือถูกปลดปล่อยออกมาจากดินได้ยาก และพืชดูดดึงได้น้อย



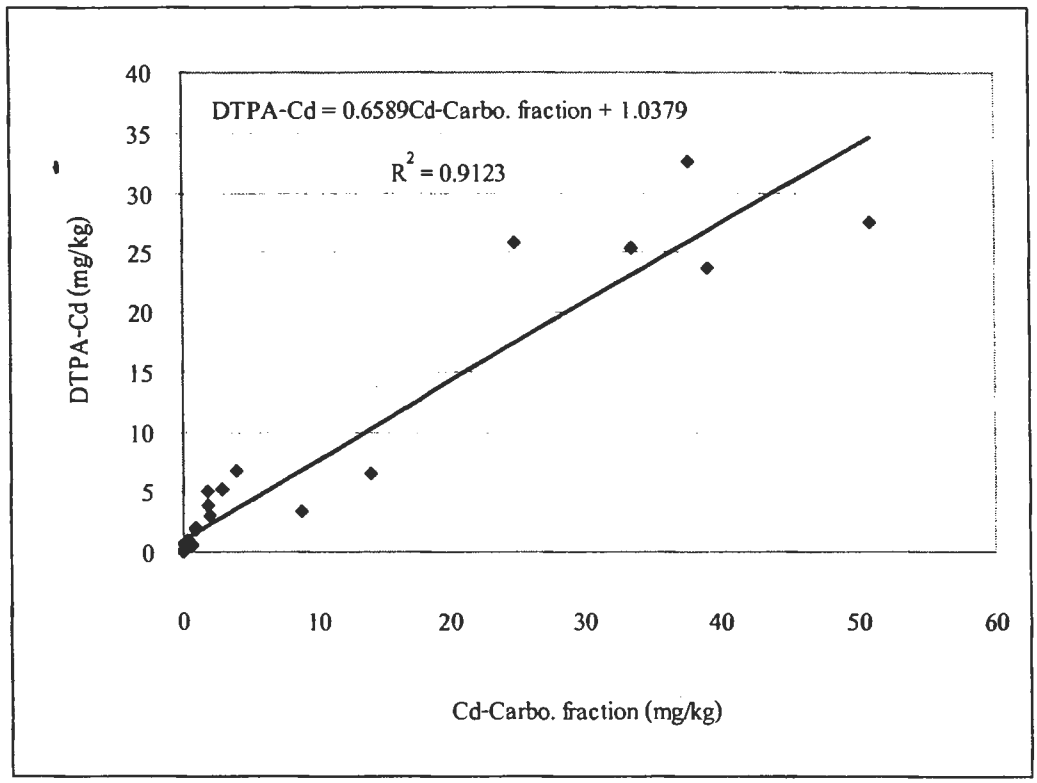
ภาพที่ 4.19 แสดงการกระจายตัวตามความลึกของส่วนประกอบของแคดเมียมในดิน ในดินตะกอนลำห้วย (ก), ดินที่ลุ่ม (ข), ดินที่คอนฝั่งขวาลำห้วย (ค), ดินที่คอนฝั่งซ้ายลำห้วย (ง) และดินควบคุม (จ)

[1]SUM of fractions ($mgkg^{-1}$)

ทั้งห้าจุดเก็บตัวอย่างตามความลึก (ดินตะกอนลำห้วย ดินที่ลุ่ม ดินที่ดอนฝั่งขวาและฝั่งซ้ายลำห้วย และดินควบคุม) จากภาพที่ 4.19 จะสังเกตเห็นว่า ทุกจุดมีแคดเมียมส่วนที่คงเหลือในดินเพิ่มขึ้นตามความลึก โดยเฉพาะดินที่ดอนฝั่งขวาและฝั่งซ้ายลำห้วย(ภาพที่ 4.19 ค และ ง) และดินควบคุม (ภาพที่ 4.19 จ) ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แสดงว่าในธรรมชาติแคดเมียมส่วนที่จะถูกปลดปล่อยออกมาจากดินให้อยู่ในรูปไอออนได้ง่าย และพืชดูดดึงไปใช้ได้ จะพบมากที่ระดับความลึกไม่เกิน 20 เซนติเมตรเท่านั้น เช่น ในดินที่ลุ่ม (ภาพที่ 4.19 ข) ที่พบว่าที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร แคดเมียมอยู่ในส่วนที่เคลื่อนที่ได้ มากกว่าร้อยละ 60 ของส่วนประกอบแคดเมียมทั้งหมด (ประมาณ 68 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) แต่ที่ระดับความลึกที่มากกว่า 20 เซนติเมตร ดินจะต้องใช้เวลานานและมีปัจจัยภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เนื่องจากแคดเมียมจะอยู่ในโครงร่างผลึกของแร่ปฐมภูมิ หรืออยู่ในโครงสร้างของอินทรียสาร โดยเฉพาะการผุพังสลายตัวตามธรรมชาติของแร่ อาจต้องใช้เวลามากกว่า 10 ถึง 100 ปี แต่หากมีปัจจัยภายนอกอื่น เช่น การระเบิดหิน การเกษตร หรือแม้กระทั่งการเร่งปฏิกิริยาหรือกิจกรรมของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในดินเข้ามาเป็นตัวเร่ง หรือทำให้ระยะเวลาในการสลายตัวผุพังตามธรรมชาติลดลง แคดเมียมจะถูกปลดปล่อยออกจากโครงร่างผลึกของแร่เร็วขึ้น

จากตารางภาคผนวกที่ ข-2 พบว่าปริมาณแคดเมียมที่พืชดูดดึงได้ มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ กับแคดเมียมส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ (R^2=0.803) ส่วนที่ดูดยึดด้วยคาร์บอเนต (R^2=0.912) ส่วนที่ดูดยึดด้วยออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (R^2=0.874) และส่วนที่ดูดซับด้วยอินทรียสาร (R^2=0.518) โดยเฉพาะส่วนที่ดูดยึดด้วยคาร์บอเนต (ภาพที่ 4.20) ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างแคดเมียมที่พืชดูดดึงได้ กับส่วนที่คงเหลือในดิน มีระดับความสัมพันธ์อยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ (R^2= 0.179)แสดงให้เห็นว่าแคดเมียมที่พืชดูดดึงได้ในพื้นที่บ้านพะเด๊ะ ส่วนใหญ่มาจากปุ๋ย สารเคมีเกษตร ดินตะกอนน้ำพัดพา มากกว่ามาจากการผุพังตามธรรมชาติของหิน และแร่ในพื้นที่บ้านพะเด๊ะ และบริเวณใกล้เคียง

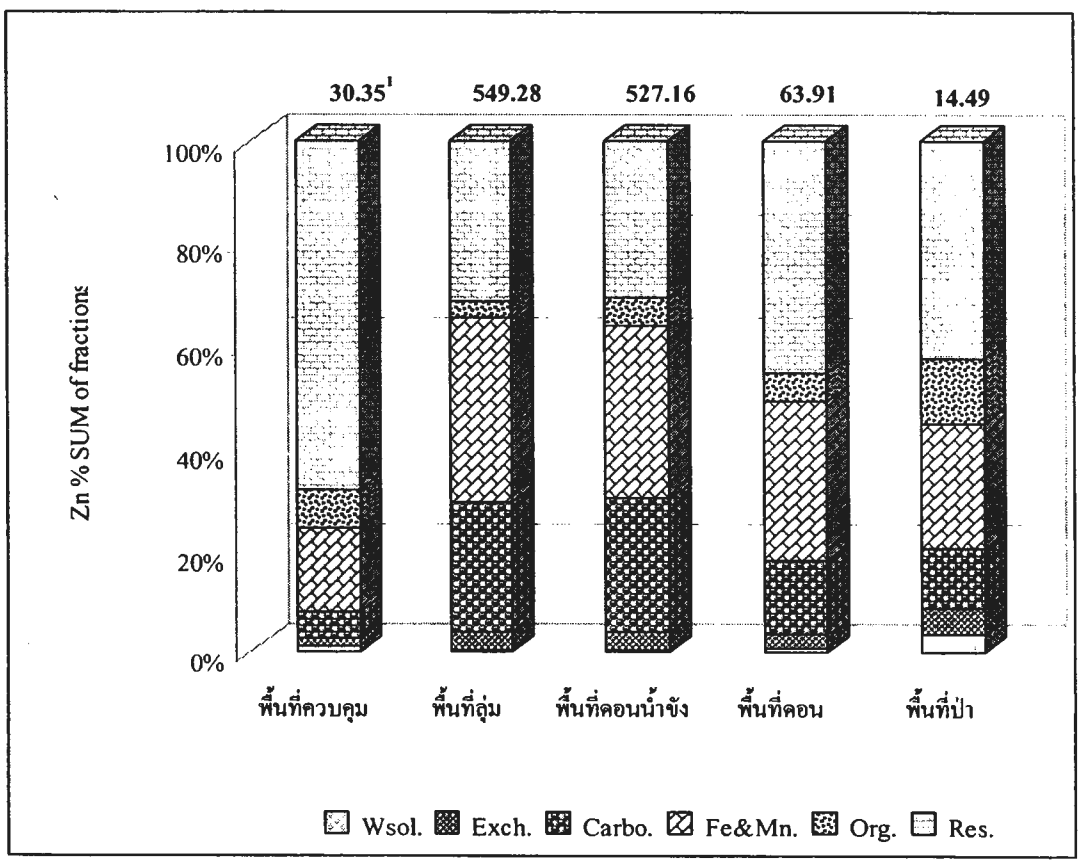
และจากค่าความสัมพันธ์ของแคดเมียมที่พืชดูดดึงได้ กับแคดเมียมส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ ส่วนที่ดูดยึดด้วยคาร์บอเนต และส่วนที่ดูดยึดด้วยออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส บอกให้ทราบว่า เมื่อดินมีสภาพพีเอชที่เปลี่ยนไปเป็นกรดเล็กน้อย ถึงปานกลาง แคดเมียมก็จะถูกปลดปล่อยออกมาอยู่ในรูปของแคดเมียมไอออนที่พืชสามารถดูดดึงได้ ตัวอย่างเช่น บริเวณโซนรากพืชดินจะพีเอชต่ำเนื่องจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน และสิ่งมีชีวิตในดิน ทำให้แคดเมียมถูกปลดปล่อยออกมา และพืชก็ดูดดึงไปใช้ได้ หรือแม้กระทั่งการทำการเกษตรก็มีผลต่อการปลดปล่อยแคดเมียมของดินเช่นกัน



ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแคดเมียมส่วนที่ดูดยึดด้วยคาร์บอเนต กับแคดเมียมส่วนที่พืชดูดดึงได้

4.3.2 ส่วนประกอบของสังกะสีทั้งหมด (fractionation zinc)

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเฉลี่ยส่วนประกอบของสังกะสีที่ระดับผิวดิน พบว่าพื้นที่ลุ่มและพื้นที่ดอนน้ำขัง สังกะสีส่วนใหญ่อยู่ในส่วนที่ดูดยึดด้วยออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส และส่วนที่คงเหลือในดิน โดยมีมากกว่าร้อยละ 30 แต่ไม่เกินร้อยละ 35 และรองลงมาคือส่วนที่ดูดยึดด้วยคาร์บอเนต มากกว่าร้อยละ 25 ในขณะที่พื้นที่ดอน พื้นที่ป่า และพื้นที่ควบคุม มีสังกะสีส่วนที่คงเหลือในดินมากกว่าร้อยละ 45 (ภาพที่ 4.21) แต่โดยรวมแล้ว มากกว่าร้อยละ 70 ของทั้งห้าพื้นที่สังกะสีอยู่ในส่วนที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในดิน แสดงว่าสังกะสีที่พบในพื้นที่บ้านพะเด๊ะ ไม่ได้มาจากการปนเปื้อนของตะกอนน้ำพัดพาเพียงอย่างเดียว แต่มีบางส่วนที่มาจากการผุพังสลายตัวของวัตถุต้นกำเนิดดินด้วย และทุกพื้นที่มีดัชนีการเคลื่อนที่ของสังกะสีอยู่ในระดับที่ต่ำมาก แสดงว่าโอกาสที่สังกะสีจะเคลื่อนที่ในดิน หรือถูกปลดปล่อยออกมาในรูปไอออนที่พืชนำไปใช้ได้มีน้อยกว่าแคดเมียม



ภาพที่ 4.21 การกระจายตัวของส่วนประกอบของสังกะสีในดิน ที่ระดับผิวดิน (0-20 เซนติเมตร) โดยใช้ค่าเฉลี่ยของแต่ละส่วนประกอบของแคดเมียม คิดเป็นร้อยละของส่วนประกอบของแคดเมียมทั้งหมด

[1]SUM of fractions ($mgkg^{-1}$)

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเฉลี่ยส่วนประกอบของสังกะสีในดินที่ระดับผิวดิน (0-20 เซนติเมตร)

พื้นที่	Wsol.[1]	Exch.[2]	Carbo.[3]	Fe&Mn[4]	Org.[5]	Res.[6]	SUM[7]	Total	MI[8]	N[9]
	---------- mgkg^{-1} ----------									
ควบคุม	0.10 - 0.49	0.36 - 0.76	0.99 - 2.25	3.69 - 6.72	1.21 - 3.50	10.20 - 29.90	20.59 - 41.06	25.88 - 40.25	0.06 - 0.18	3
	(0.32±0.19)[10]	(0.52±0.20)	(1.55±0.64)	(4.97±1.56)	(2.29±1.14)	(20.69±9.91)	(30.35±10.26)	(34.21±7.45)	(0.10±0.069)	
ที่ลุ่ม	0.54 - 2.73	2.16 - 39.11	6.28 - 433.66	35.02 - 602.94	4.07 - 86.81	39.90 - 445.54	105.23 - 1469.72	105.23 - 1480.22	0.09 - 0.51	12
	(1.33±0.61)	(20.33±13.73)	(140.21±152.87)	(196.81±192.36)	(17.01±22.99)	(173.56±128.85)	(549.27±495.72)	550.80±498.35	(0.35±0.13)	
ที่ดอนน้ำขัง	0.64 - 2.47	1.90 - 69.76	33.03 - 420.24	52.12 - 455.61	21.89 - 47.49	62.07 - 253.49	171.65 - 1225.96	169.66 - 1268.55	0.16 - 0.67	4
	(1.30±8.11)	(19.53±33.49)	(137.60±189.16)	(177.17±190.02)	(29.43±12.96)	(162.11±102.77)	(527.15±491.50)	(536.15±312.89)	(0.32±0.23)	
ที่ดอน	0.09 - 1.20	0.55 - 5.93	0.66 - 43.27	2.26 - 83.65	0.16 - 16.18	2.02 - 125.00	7.62 - 275.28	8.99 - 272.29	0.12 - 0.56	6
	(0.44±0.38)	(1.72±2.11)	(9.47±16.63)	(19.71±31.82)	(3.52±6.25)	(29.03±47.56)	(63.91±104.44)	(67.67±101.23)	(0.27±0.15)	
ป่า	0.41 - 0.57	0.68 - 0.84	1.04 - 2.88	1.46 - 7.46	0.40 - 3.25	1.50 - 14.72	5.63 - 28.27	6.57 - 28.32	0.18 - 0.68	3
	(0.46±0.089)	(0.77±0.085)	(1.71±1.01)	(3.53±3.40)	(1.81±1.42)	(6.16±7.42)	(14.47±12.10)	(14.41±12.07)	(0.39±0.25)	

[1] water soluble fractions (ส่วนที่ละลายน้ำได้)

[2] exchangeable fractions (ส่วนที่แลกเปลี่ยนได้)

[3] carbonate fractions (ส่วนที่ถูกดูดยึดด้วยคาร์บอเนต)

[4] iron and manganese oxides fractions (ส่วนที่ถูกดูดยึดด้วยออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส)

[5] organic fractions (ส่วนที่ถูกดูดซับด้วยอินทรียสาร)

[6] residual fractions (ส่วนที่คงเหลือในดิน)

[7] sum of fractions (ผลรวมทั้งหมดของส่วนประกอบทางเคมี)

[8] mobility index (ดัชนีการเคลื่อนที่) = $\frac{(\text{Wsol.} + \text{Exch.} + \text{Carbo.})}{(\text{Fe \& Mn} + \text{Org.} + \text{Res})}$

[9] จำนวนตัวอย่างที่ศึกษา

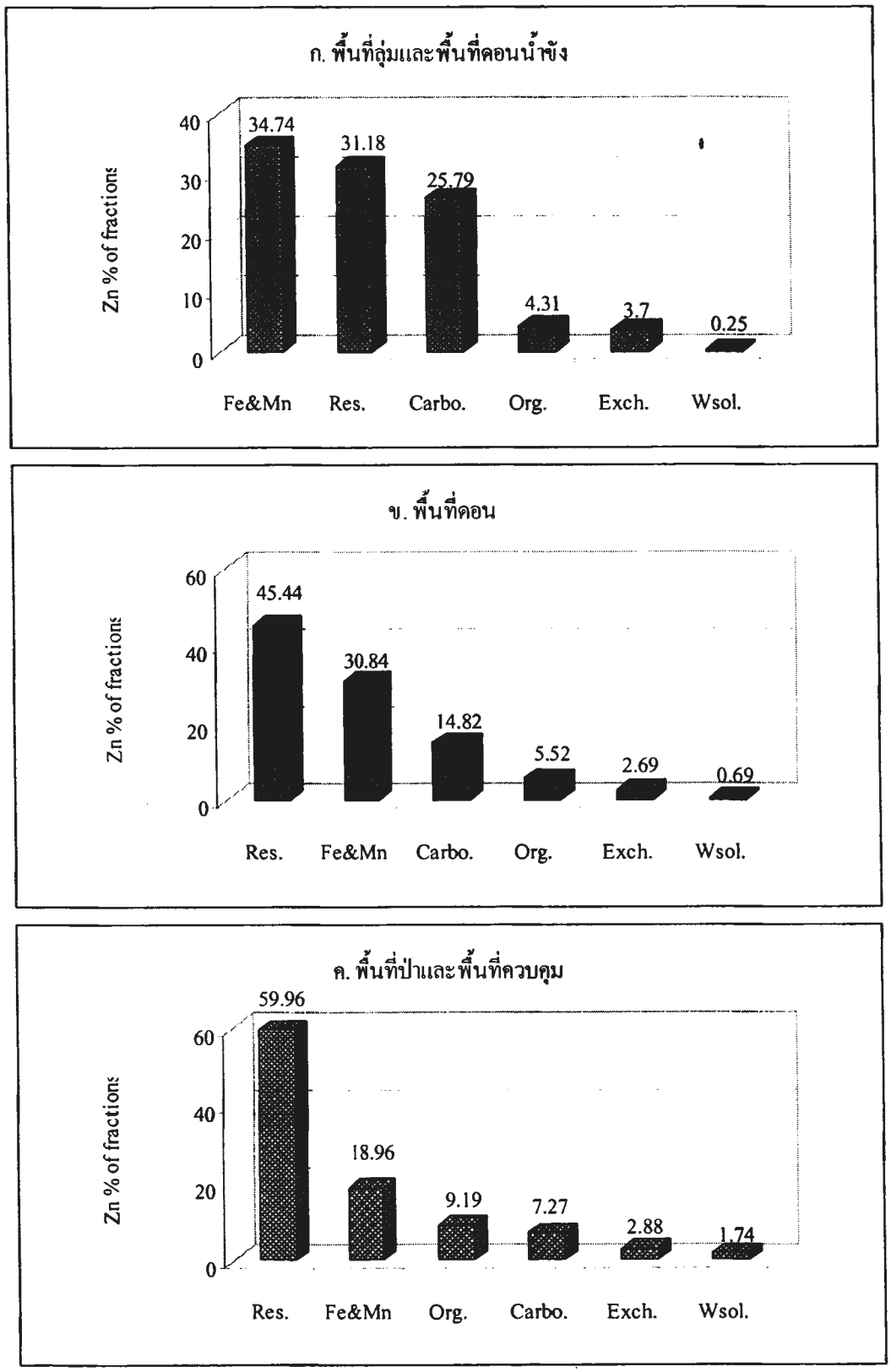
[10] Mean±SD ของจำนวนตัวอย่างที่ศึกษา

จากตารางที่ 4.4 สามารถจัดกลุ่มตัวอย่างได้สามกลุ่มเช่นเดียวกันกับแคดเมียม ประกอบด้วย

กลุ่มที่หนึ่ง ประกอบด้วยพื้นที่ลุ่มและพื้นที่ดอนน้ำขัง เรียงลำดับส่วนประกอบของสังกะสีจากมากไปหาน้อย ได้ดังนี้ ส่วนที่ดูดยึดด้วยออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (ร้อยละ 34.74) ส่วนที่คงเหลือในดิน (ร้อยละ 31.18) ส่วนที่ดูดยึดด้วยคาร์บอเนต (ร้อยละ 25.79) ส่วนที่ดูดซับด้วยอินทรียสาร (ร้อยละ 4.31) ส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ (ร้อยละ 3.70) และส่วนที่ละลายน้ำได้ (ร้อยละ 0.25) (ภาพที่ 4.22 ก) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Ma และ Rao (1997) ที่พบว่าการกระจายตัวของสังกะสีบริเวณโรงถลุงแร่ มีปริมาณสังกะสีในส่วนที่คงเหลือในดินมากกว่าส่วนอื่น และส่วนที่ถูกดูดยึดด้วยออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเป็นดันดับรองลงมา ซึ่งเป็นลักษณะโดยทั่วไปของดินเขตร้อน ที่มีปริมาณของ เหล็ก อะลูมินัม และแมงกานีส เป็นองค์ประกอบในปริมาณมาก ซึ่งธาตุเหล่านี้จะพบมากในธรรมชาติเนื่องจากกระบวนการผุพังของดินตามธรรมชาติ (Pierzynski และคณะ, 2005)

กลุ่มที่สองได้แก่พื้นที่ดอน พบสังกะสีเรียงจากส่วนที่มีมากไปน้อย ได้ดังนี้ ส่วนที่คงเหลือในดิน (ร้อยละ 45.44) ส่วนที่ดูดยึดด้วยออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (ร้อยละ 30.84) ส่วนที่ดูดยึดด้วยคาร์บอเนต (ร้อยละ 14.82) ส่วนที่ดูดซับด้วยอินทรียสาร (ร้อยละ 5.52) ส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ (ร้อยละ 2.69) และส่วนที่ละลายน้ำได้ (ร้อยละ 0.69) (ภาพที่ 4.22 ข)

และกลุ่มที่สามประกอบด้วยพื้นที่เปรียบเทียบและพื้นที่ป่า เรียงลำดับส่วนประกอบทางเคมี จากมากไปหาน้อย ได้ดังนี้ ส่วนที่คงเหลือในดิน (ร้อยละ 50.96) ส่วนที่ดูดยึดด้วยออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (ร้อยละ 18.96) ส่วนที่ดูดซับด้วยอินทรียสาร (ร้อยละ 9.19) ส่วนที่ดูดยึดด้วยคาร์บอเนต (ร้อยละ 7.27) ส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ (ร้อยละ 2.88) และส่วนที่ละลายน้ำได้ (ร้อยละ 1.74) (ภาพที่ 4.22 ค)



ภาพที่ 4.22 การจัดกลุ่มส่วนประกอบของสังกะสีเรียงจากมากไปหาน้อย กลุ่มที่หนึ่งพื้นที่ลุ่มและพื้นที่ดอนน้ำขัง (ก), กลุ่มที่สองพื้นที่ดอน (ข) และกลุ่มที่สามพื้นที่ควบคุมและพื้นที่ป่า (ค)

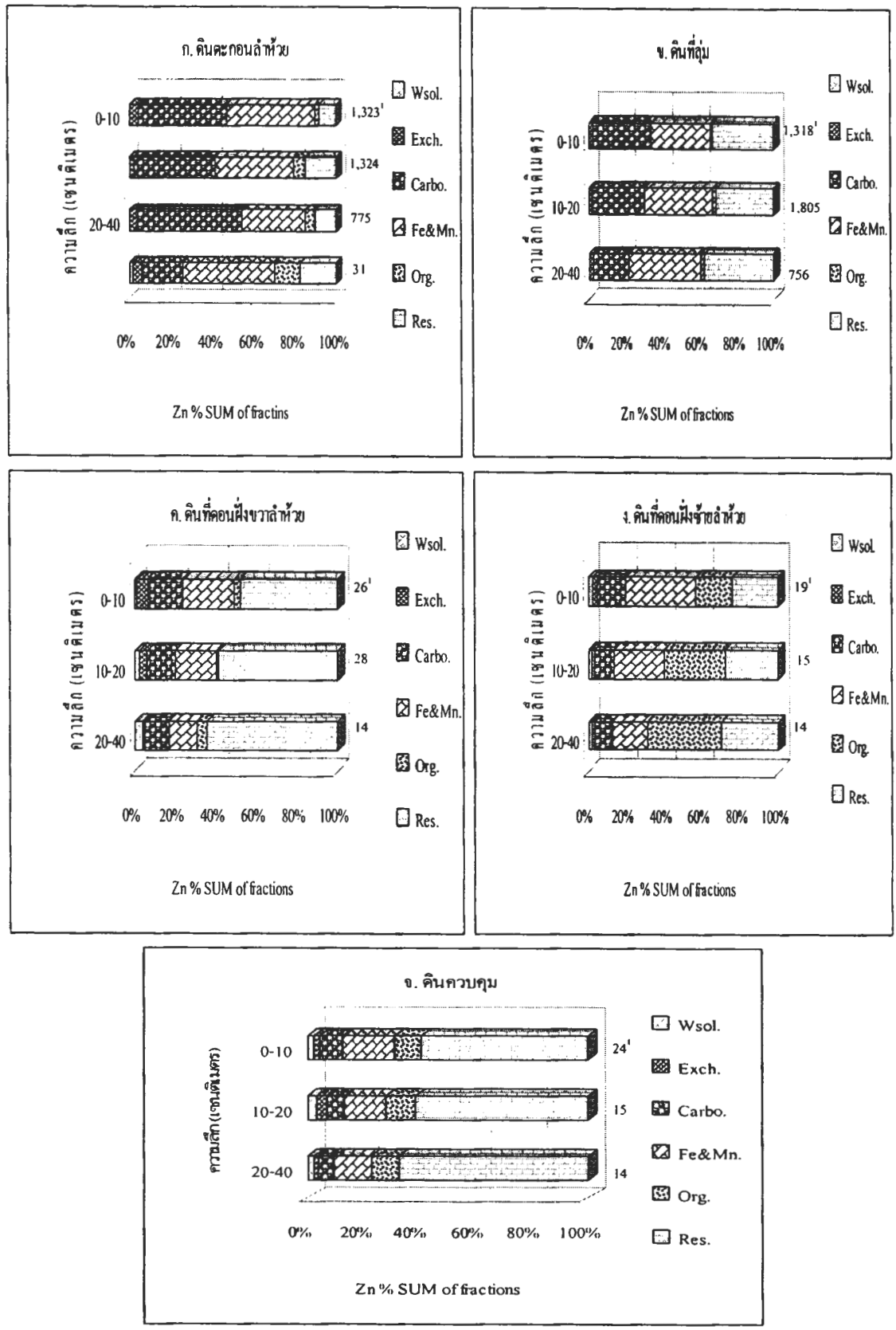
การกระจายตัวของส่วนประกอบของสังกะสีตามความลึก มีปริมาณของส่วนประกอบแต่ละส่วนแตกต่างกัน (ตารางภาคผนวกที่ ก-6)

ดินตะกอนลำห้วย พบสังกะสีส่วนใหญ่อยู่ในส่วนที่ดูดยึดด้วยออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส และส่วนที่ดูดยึดด้วยคาร์บอเนต ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน (มากกว่าร้อยละ 35) และโดยรวมแล้ว สังกะสีจะอยู่ในส่วนที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ตลอดความลึก 60 เซนติเมตร (มากกว่าร้อยละ 50) และพบว่าที่ระดับความลึก 20-40 เซนติเมตร พบสังกะสีส่วนที่ดูดยึดด้วยคาร์บอเนตมากกว่าร้อยละ 45 ซึ่งสอดคล้องกับพีเอชของดินที่ระดับความลึกดังกล่าว (พีเอช 8.22) (ภาพที่ 4.23 ก)

ดินที่ลุ่ม พบสังกะสีในส่วนที่คงเหลือในดิน ส่วนที่ดูดยึดด้วยออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส และส่วนที่ดูดยึดด้วยคาร์บอเนต มีปริมาณใกล้เคียงกัน คือ มากกว่าร้อยละ 30 ที่ระดับความลึก 0-10 เซนติเมตร และมีส่วนที่คงเหลือในดินและส่วนที่ดูดยึดด้วยออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส มากกว่าร้อยละ 30 ตลอดความลึก ในขณะที่ส่วนที่ดูดยึดด้วยคาร์บอเนตมีปริมาณลดลงตามความลึก (ภาพที่ 4.23 ข)

ดินที่ดอนฝั่งขวาลำห้วย สังกะสีอยู่ในส่วนที่คงเหลือในดินเป็นส่วนใหญ่ (มากกว่าร้อยละ 50 ทุกระดับความลึก) (ภาพที่ 4.23 ค) เช่นเดียวกับดินดินควบคุม ที่พบสังกะสีในส่วนที่คงเหลือในดิน มากกว่าร้อยละ 55 (ภาพที่ 4.23 ง)

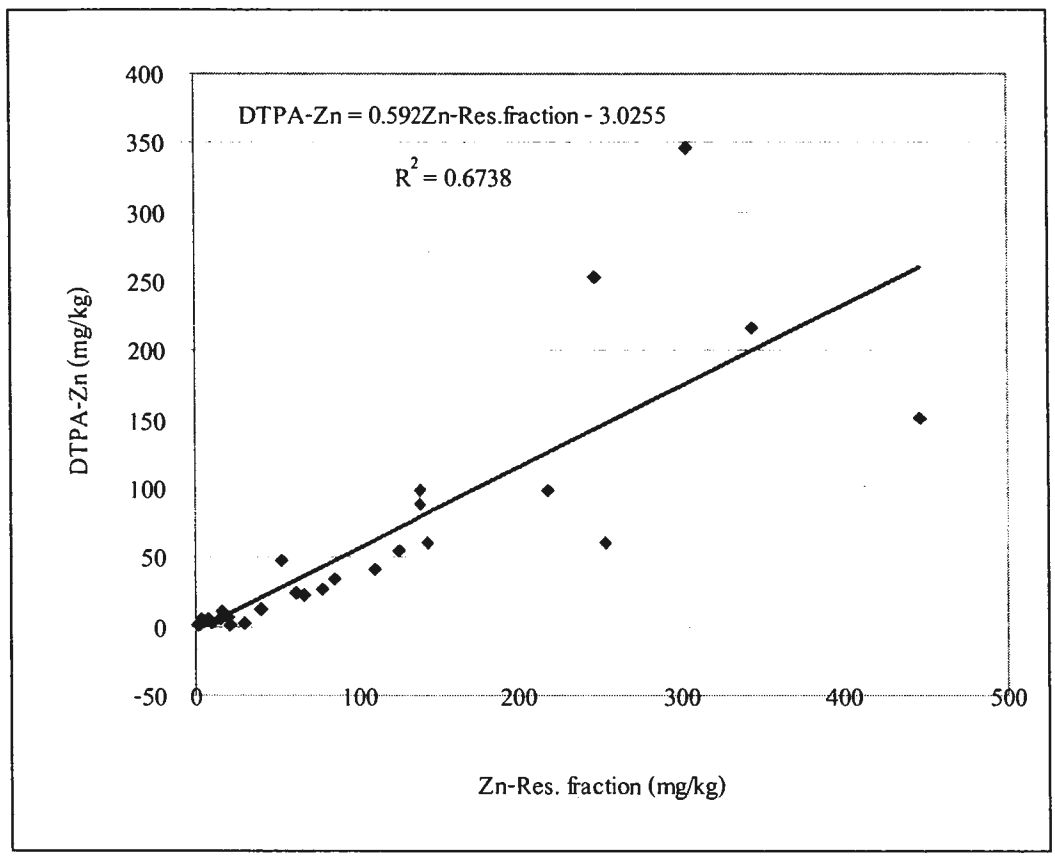
ดินที่ดอนฝั่งซ้ายลำห้วย พบสังกะสีส่วนที่ดูดยึดด้วยออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสมีปริมาณลดลงตามความลึก ในขณะที่ส่วนที่คงเหลือในดิน และส่วนที่ดูดซับด้วยอินทรียสารมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามความลึก (ภาพที่ 4.23 จ)



ภาพที่ 4.23 การกระจายตัวตามความลึกของส่วนประกอบของสังกะสีในดิน ในดินตะกอนลำห้วย (ก) ดินที่ลุ่ม (ข), ดินที่ดอนฝั่งขวาลำห้วย (ค), ดินที่ดอนฝั่งซ้ายลำห้วย (ง) และดินควบคุม (จ)

[1]SUM of Fractions ($mgkg^{-1}$)

จากตารางภาคผนวกที่ ข-3 ปริมาณสังกะสีที่พืชดูดดึงได้ มีความสัมพันธ์ที่อย่างมีนัยสำคัญกับส่วนประกอบของสังกะสีทุกส่วน โดยเฉพาะส่วนที่ดูดยึดด้วยคาร์บอเนต (R^2=0.822) และที่สำคัญคือ การที่สังกะสีในดินสัมพันธ์กับสังกะสีส่วนที่คงเหลือในดิน (R^2=0.674) (ภาพที่ 4.24) บอกให้ทราบว่า ปริมาณสังกะสีที่พืชนำไปใช้ได้นั้น นอกจากจะมาจากแหล่งอื่น เช่น ดิน ตะกอนน้ำพัดพา และปุ๋ยเคมีที่เกษตรกรใช้แล้ว บางส่วนยังมาจากการผุพังสลายตัวของหินพื้นในบริเวณนั้นด้วย



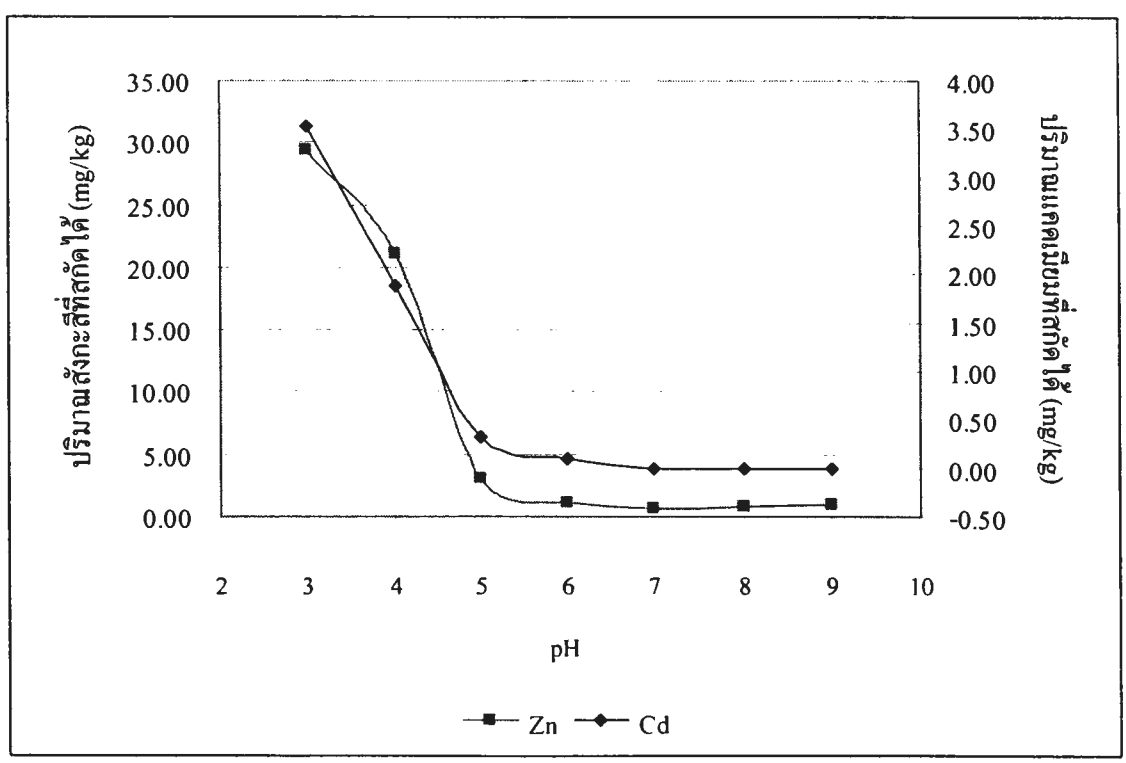
ภาพที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างสังกะสีส่วนที่คงเหลือในดิน กับสังกะสีส่วนที่พืชดูดดึงได้

4.4 ผลของพีเอชต่อการละลายของแคดเมียมและสังกะสี

ตารางภาคผนวกที่ ก-7 แสดงผลการทดลองหาช่วงของค่าพีเอชที่มีผลต่อการละลายของแคดเมียมและสังกะสีในดิน โดยเลือกใช้ตัวอย่างในจุดเก็บตัวอย่างที่ 4, 9, 11 และ 14 ซึ่งมีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดในดินสูงที่สุด (ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน เท่ากับ 70, 74, 74 และ 78 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดิน เท่ากับ 1268, 1480, 1093 และ 1407 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ)

จากผลการทดลองพบว่า ที่พีเอชเท่ากับ 3.0 แคดเมียมจะถูกสกัดออกมาจากดินได้มากที่สุด (เฉลี่ยเท่ากับ 3.53 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้จะลดลง (ปริมาณแคดเมียมเท่ากับ 1.88, 0.33 และ 0.105 ที่ พีเอชเท่ากับ 4.0, 5.0 และ 6.0) จนกระทั่งไม่สามารถตรวจวัดได้ที่พีเอชเท่ากับ 7.0-9.0 (ภาพที่ 4.25 และตารางภาคผนวกที่ ก-7)

สังกะสี ถูกสกัดออมาจากดินได้มากที่สุดที่พีเอชเท่ากับ 3.0 และ 4.0 สังกะสีถูก (เฉลี่ยเท่ากับ 29 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่พีเอช 3.0 และ 21 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่พีเอช 4.0) และมีปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ลดลงอย่างรวดเร็วที่พีเอชเท่ากับ 4.0-5.0 (ปริมาณสังกะสี จาก 21.07 ที่พีเอช 4.0 เป็น 3.04 ที่พีเอช 5.0) และที่พีเอช 6.0-9.0 ปริมาณสังกะสีที่สกัดมีปริมาณค่อนข้างคงที่ (อยู่ในช่วง 0.43-0.96 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) (ภาพที่ 4.27 และ ตารางภาคผนวกที่ ก-7)



ภาพที่ 4.25 ผลของพีเอชต่อปริมาณการสกัดได้ของแคดเมียมและสังกะสี

จากภาพที่ 4.27 เมื่อพิจารณาเฉพาะที่พีเอช 3.0-5.0 พบว่า ปริมาณที่สกัดได้ของแคดเมียมและสังกะสี มีปริมาณลดลงสัมพันธ์กับพีเอชที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าความสัมพันธ์ที่ R^2=0.999 ในแคดเมียม และ ที่ R^2=0.956 เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น ปริมาณของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในสารละลายดินจะลดลง และปริมาณของไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เพิ่มขึ้น และเข้าจับกับแคดเมียมไอออน และสังกะสีไอออน เป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ สอดคล้องกับ Reed และ Martens (1996) ที่สรุปว่าปริมาณของทองแดงและสังกะสีที่เป็นประโยชน์ต่อพืชมีปริมาณลดลงเมื่อพีเอชดินเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคดินเหนียว อินทรียวัตถุ สารประกอบออกไซด์ และไฮดรอกไซด์จะดูดยึดทองแดงและสังกะสีเพิ่มขึ้น และผลการทดลองของ Impellitteri และคณะ (2002) ที่พบว่าเมื่อพีเอชดินลดลงปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่สกัดได้สูงถึงร้อยละ 80 และ 87 ตามลำดับ เช่นเดียวกับการทดลองของ Pehlivan และคณะ (1995) ที่ศึกษาอิทธิพลของพีเอช และอุณหภูมิ ต่อการดูดซับแคดเมียมไอออน สังกะสีไอออน และอะลูมินัมไอออน ด้วยสารดูดซับ bDAEG-sporopollenin (bis-diaminoethyl-glyoximated sporollenin) และ DAEG-sporopollenin (carboxylated diaminosporopollenin) พบว่าตัวดูดซับทั้งสองสามารถดูดซับ แคดเมียมไอออน สังกะสีไอออน และอะลูมินัมไอออนได้เพิ่มมากขึ้น เมื่อพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น (พีเอช 6-10) และผลการทดลองของ Gavi และคณะ (1997) ที่ศึกษาผลของการใช้ปุ๋ย และความเป็นกรดของดินต่อเมล็ดข้าวฟ่าง จากการทดลองพบว่า ที่พีเอชน้อยกว่า 5.0 ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวฟ่างอยู่ที่ 45 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และมีปริมาณลดลงอย่างเห็นได้ชัดที่พีเอชดินอยู่ในช่วง 5.0-6.2 และมีค่าค่อนข้างคงที่ที่พีเอชมากกว่า 6.2 (9.9 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม) (มาตรฐานแคดเมียมในเมล็ดข้าวฟ่าง 100 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม)