บทที่ 5

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

5.1 ขั้นตอนการทำวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ วัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางในระบบคือ ดิน และทราย โดยในถังใบที่หนึ่งบรรจุทรายซึ่งคัดขนาดให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 มิลลิเมตร ส่วนในถังใบที่สองบรรจุทรายและดิน (สำหรับการทดลองนี้จะเรียกว่า ดินปนทราย) อัตราส่วนผสม 1 : 1 และในถังใบที่สามบรรจุดินร่วนซึ่งเป็นดินปลูกต้นไม้ โดยฝังท่อเก็บตัวอย่างและปลูกต้นชูปฤาษี (กกช้าง) โดยมีลักษณะการติดตั้งหน่วยการทดลองจริง ดังรูป 5.1 จากนั้นเริ่มป้อนน้ำเสียซึ่งเป็นน้ำเสียสังเคราะห์โดยมีลักษณะตามหัวข้อ 4.2 ทั้งนี้ขั้นตอนการทำงานตลอดการวิจัยมีดังนี้ คือ

<u>ขั้นตอนการทำงาน</u>

1) การเตรียมระบบ

หลังจากเตรียมทรายขนาดที่ต้องการ ดิน และ ต้นชูปฤาษี รวมทั้งจัดเตรียมระบบตามหัวข้อ 4.5 เติมน้ำประปาเข้าไปในระบบเพื่อให้ตัวกลางอิ่มตัวด้วยน้ำ (Hydric soil) เมื่อต้นชูปฤาษีเริ่มคุ้นเคยกับสภาวะของระบบแล้ว (สังเกตุจากการแตกยอดอ่อนของพืช) เริ่มต้นการทดลองโดยป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ตามที่กำหนดไว้ (KNO_3 = 6 มก/ล N และ K_2HPO_4 = 2 มก./ล. P) แคดเมียมเริ่มต้นในน้ำเสียดิบเข้าเป็นศูนย์ ด้วยอัตราการไหล 4 4.5 และ 5 ลิตรต่อวัน ในถังทราย ดินปนทราย และดิน ตามลำดับ โดยมีเวลากักน้ำ 5 วัน

2) การเดินระบบ (ชุดการทดลองที่ 1-1 ถึง 4-3)

ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีองค์ประกอบ ดังข้อ 1) พร้อมทั้งเติมแคดเมียมลงไป($CdCl_2$ ½ H_2O) โดยมีค่าความเข้มข้นในแต่ละชุดการทดลอง ดังนี้ คือ

ตารางที่ 5.1 ชุดการทดลอง

ชุดทดลอง	$[Cd]_{inf}$ (มก./ล.)	N (มก./ล.)	P (มก./ล.)
1-1 → 1-3	1	6	2
2-1 → 2-3	5	6	2
3-1 → 3-3	10	6	2
4-1 → 4-3	20	6	2

หมายเลขชุดการทดลอง * - *

ตำแหน่งแรก แสดง ชุดการทดลองที่ [Cd] ค่าหนึ่ง

ตำแหน่งหลัง แสดง ชนิดตัวกลาง

1 = ทราย

2 = ดินปนทราย

3 = ดิน

3) การตรวจสอบปริมาณแคดเมียมในระบบ

หลังจากสิ้นสุดการทดลองในชุดการทดลองที่ 4-1 – 4-3 แล้ว วิเคราะห์ปริมาณแคดเมียม ที่สะสมในส่วนต่าง ๆ ของระบบ

4) การทดสอบการดูดซับของตัวกลาง

5) การทดสอบการชะละลายของตัวกลาง

ทดสอบตัวกลางที่ผ่านการทดลองทั้ง 12 ชุดการทดลอง โดยใช้วิธีการสกัดสารตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.1 การติดตั้งชุดการทดลองภายนอกห้องปฏิบัติการปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ก)

รูปที่ 5.1 การติดตั้งชุดการทดลองภายนอกห้องปฏิบัติการปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ต่อ)

(ก) ตัวกลางดิน (ซ้าย) และตัวกลางทราย (ขวา) (ข) ทางน้ำเข้า

5.2 สภาวะในการทดลอง (Experimental condition)

ในระหว่างการวิจัยการใช้ระบบบำบัดบึงประดิษฐ์ในการบำบัดแคดเมียมจากน้ำเสียนั้น พารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาในระหว่างการทดลองคือ อุณหภูมิ และพีเอช ส่วนค่าออกซิเดชั่น-รีดักชั่น โพเทนเชียล (ORP) จะขึ้นอยู่กับสภาวะของระบบ

5.2.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างวัน ฤดูกาล และตำแหน่งของละติจูด เนื่องจากอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อกระบวนการทางชีวะและเคมี จึงมีความสำคัญต่อระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ ในระหว่างการทดลอง ในชุดการทดลองซึ่งมีตัวกลางเป็นทรายทั้ง 4 ชุด อุณหภูมิของระบบโดยเฉลี่ยคือ 28.99 - 29.89 องศาเซลเซียส และ 29.15 - 29.70 องศาเซลเซียส ในน้ำดิบเข้าและน้ำทิ้ง ตามลำดับ ดังตารางที่ 5.2 ส่วนในชุดทดลองซึ่งมีตัวกลางเป็นดินปนทรายทั้ง 4 ชุด อุณหภูมิของระบบโดยเฉลี่ยของน้ำทิ้ง คือ 29.13 - 29.77 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 5.3 และในชุดทดลองซึ่งมีตัวกลางเป็นดินทั้ง 4 ชุดอุณหภูมิของระบบโดยเฉลี่ยของน้ำทิ้ง คือ 29.05 - 29.87 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.2 อุณหภูมิเฉลี่ยในน้ำเข้าและออกจากระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีตัวกลางทราย

ชุดทดลองที่	อุณหภูมิ (c)			
	inf	eff	inf_{mean}	eff_{mean}
1-1	29.00-31.50	28.60-31.20	29.89	29.70
2-1	28.10-30.20	28.10-31.10	28.99	29.28
3-1	28.30-30.10	28.10-30.50	29.01	29.15
4-1	28.70-30.20	28.60-29.80	29.25	29.13

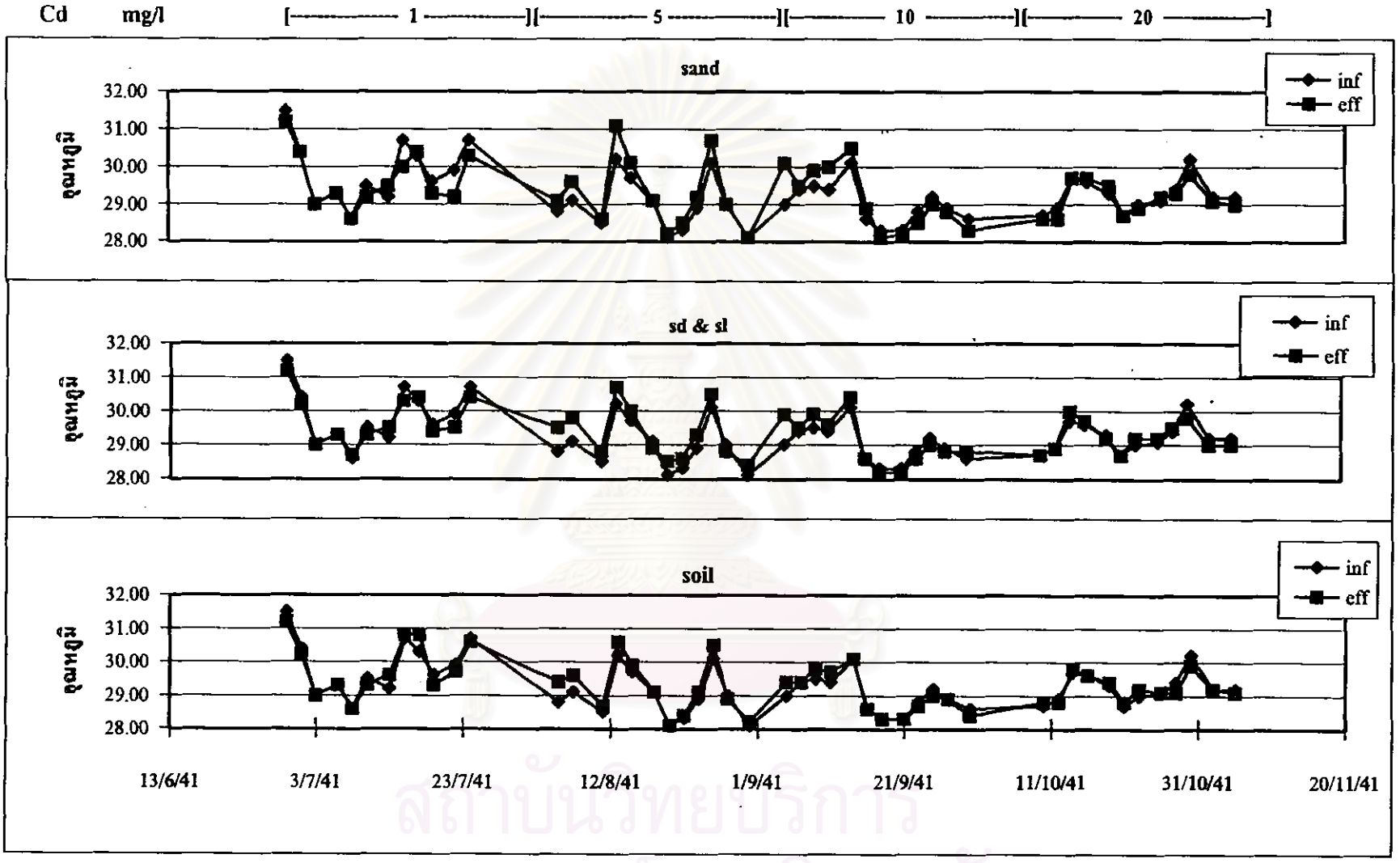
ตารางที่ 5.3 อุณหภูมิเฉลี่ยในน้ำเข้าและออกจากระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีตัวกลางดินปนทราย

ชุดทดลองที่	อุณหภูมิ (c)			
	inf	eff	inf_{mean}	eff_{mean}
1-2	29.00-31.50	28.70-31.20	29.89	29.77
2-2	28.10-30.20	28.40-30.70	28.99	29.32
3-2	28.30-30.10	28.20-30.40	29.01	29.13
4-2	28.70-30.20	28.70-30.00	29.25	29.24

ตารางที่ 5.4 อุณหภูมิเฉลี่ยในน้ำเข้าและออกจากระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีตัวกลางดิน

ชุดทดลองที่	อุณหภูมิ (c)			
	inf	eff	inf_{mean}	eff_{mean}
1-3	29.00-31.50	28.60-31.20	29.89	29.87
2-3	28.10-30.20	28.10-30.60	28.99	29.21
3-3	28.30-30.10	28.30-30.10	29.01	29.05
4-3	28.70-30.20	28.80-29.90	29.25	29.23

จะเห็นได้ว่าตลอดการทดลอง น้ำเสียดิบเข้าและน้ำทิ้งที่ผ่านเข้าระบบบำบัดบึงประดิษฐ์ ทั้งสามนั้น มีอุณหภูมิค่อนข้างคงที่ คือ มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 2 องศาเซลเซียส ดังนั้นอุณหภูมิจึงไม่มีผลต่อการดำเนินการของระบบในแต่ละช่วงการทดลอง ดังจะเห็นจากกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระบบบึงประดิษฐ์ในแต่ละชุดการทดลอง ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงอุณหภูมิของน้ำเข้าและออกจากระบบ ที่มีตัวกลางทราย ดินปนทราย และดิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2.2 พีเอช

ชีววิทยาและเคมีของน้ำในพื้นที่ชุ่มน้ำเป็นผลมาจากพีเอช แบคทีเรียที่ใช้ในการบำบัดหลายชนิดสามารถอยู่ได้ในช่วงพีเอชมากกว่า 4 และน้อยกว่า 9 (Metcalf and Eddy , 1991) ซึ่งพืชในที่นี้คือธูปฤาษี จะสามารถอยู่ได้ในช่วงพีเอช 4 ถึง 10 (ดังตารางที่ 3.3)

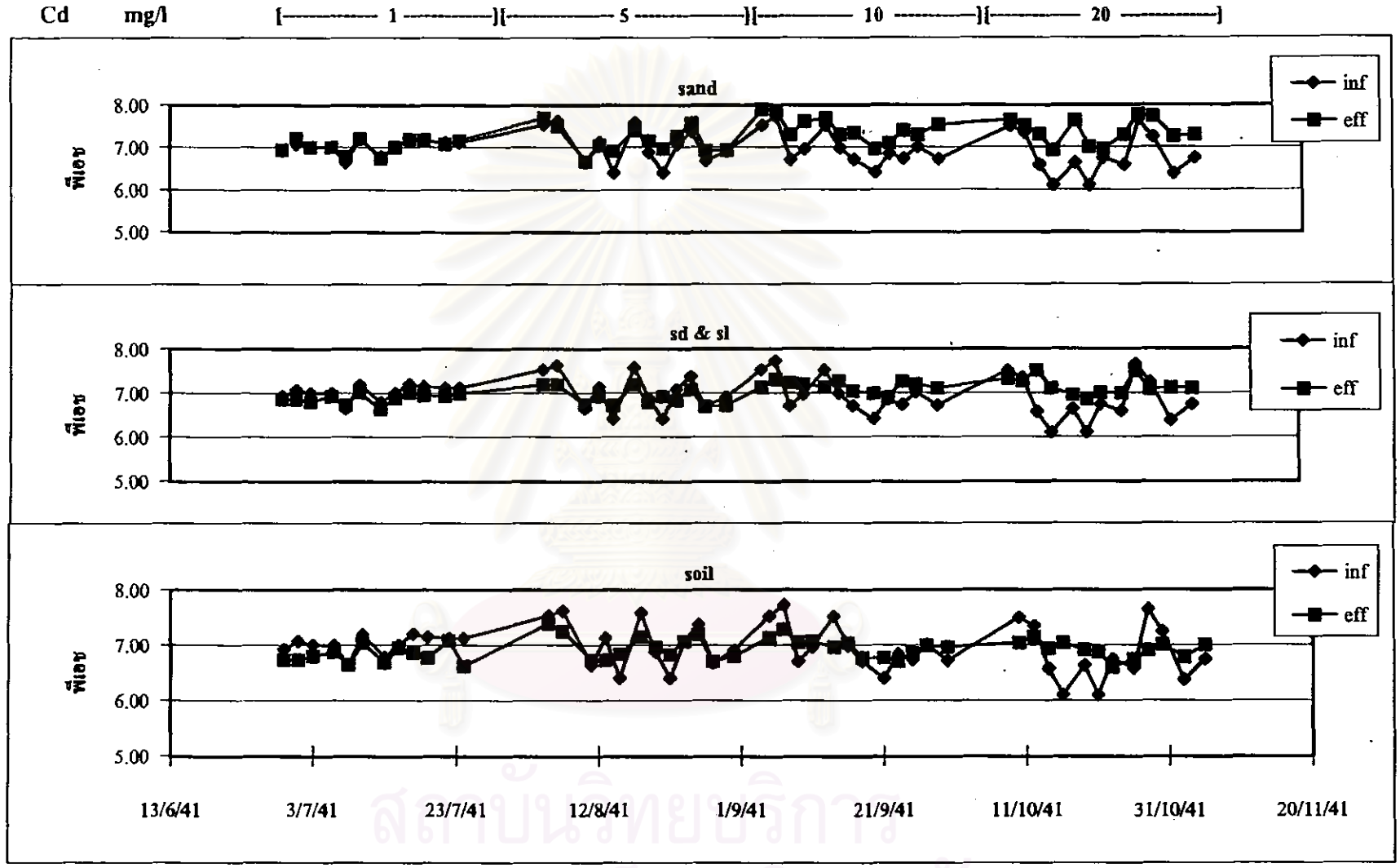
ในขณะที่ทำการวิจัยนั้น พีเอชเฉลี่ยในน้ำเข้าที่มีความเข้มข้นแคดเมียมเป็น 1 5 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรนั้น เท่ากับ 7.02 7.02 6.98 และ 6.80 ตามลำดับ ซึ่งเป็นช่วงที่ทั้งแบคทีเรียและต้นธูปฤาษีสามารถอยู่ได้ในระบบ โดยที่พีเอชของน้ำเข้าและออกจากระบบของตัวกลางแต่ละชนิดตลอดการทดลองแสดงได้ดังรูป 5.3

1) ตัวกลางทราย

ในระหว่างการทดลองจะเห็นได้ว่าพีเอชของน้ำเข้าจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเข้าเพิ่มขึ้น คือมีพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.02 - 6.80 ในชุดการทดลองซึ่งมีตัวกลางทรายที่ 1-1 ถึง 4-1 นอกจากนั้นแล้วเมื่อเปรียบเทียบพีเอชเฉลี่ยของน้ำเข้ากับน้ำออกจากระบบจะเห็นได้ว่า พีเอชของน้ำออกมีค่าสูงกว่าในน้ำเข้า คือมีพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.04 7.17 7.44 และ 7.37 ที่ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเข้าเป็น 1 5 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังตารางที่ 5.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้ามากขึ้นก็ยังมีความแตกต่างของพีเอชในน้ำเข้าและออกมากขึ้นด้วย

ตารางที่ 5.5 พีเอชเฉลี่ยในน้ำเข้าและออกจากระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีตัวกลางทราย

ชุดทดลองที่	พีเอช			
	inf	eff	inf_{mean}	eff_{mean}
1-1	6.64-7.20	6.74-7.22	7.02	7.04
2-1	6.40-7.58	6.66-7.70	7.02	7.17
3-1	6.40-7.72	6.95-7.90	6.98	7.44
4-1	6.10-7.65	6.93-7.79	6.80	7.37



รูปที่ 5.3 พีเอชของน้ำเข้าและออกจากระบบของตัวกลางทราย ดินปนทราย และดิน

2) ตัวกลางดินปนทราย

จากการทดลองในตัวกลางดินปนทราย จะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเป็น 1 5 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ในชุดการทดลองที่ 1 และ 2-2 นั้น พีเอชของน้ำออกจะมีค่าต่ำกว่าน้ำเข้าคือเท่ากับ 6.88 และ 6.91 ตามลำดับ ส่วนที่ความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเป็น 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร (ในชุดการทดลองที่ 3 และ 4-2 นั้น) พีเอชของน้ำออกสูงกว่าน้ำเข้าคือเท่ากับ 7.14 และ 7.15 ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้ามากขึ้นก็จะมีความแตกต่างของพีเอชในน้ำเข้าและออกเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับในตัวกลางทราย แต่มีค่าน้อยกว่า

ตารางที่ 5.6 พีเอชเฉลี่ยในน้ำเข้าและออกจากระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีตัวกลางดินปนทราย

ชุดทดลองที่	พีเอช			
	inf	eff	inf_{mean}	eff_{mean}
1-2	6.64-7.20	6.63-7.01	7.02	6.88
2-2	6.40-7.58	6.71-7.19	7.02	6.91
3-2	6.40-7.72	6.98-7.30	6.98	7.14
4-2	6.10-7.65	6.85-7.50	6.80	7.15

3) ตัวกลางดิน

ในตัวกลางดินพีเอชของน้ำออกจากระบบนั้นค่อนข้างเป็นกลางและมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเป็น 1 5 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 6.82 6.91 6.97 และ 6.91 ตามลำดับ ดังตารางที่ 5.7 จะเห็นได้ว่าแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของน้ำเข้าเมื่อความเข้มข้นแคดเมียมเพิ่มขึ้น แต่พีเอชของน้ำออกจากระบบนั้นยังคงค่อนข้างจะคงตัวและเป็นกลาง

จากการทดลองทั้ง 4 ระยะ คือตั้งแต่ความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเสียดิบเข้าเป็น 1 5 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรนั้น จะเห็นได้ว่าพีเอชเฉลี่ยของน้ำเข้าและออก ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก คือ ในน้ำเข้าอยู่ในช่วง 6.80 - 7.02 ส่วนน้ำทิ้งจากชุดทดลองที่มีตัวกลางทราย

ดินปนทราย และดิน คือ 7.01-7.44 6.85-7.15 และ 6.82-6.97 ตามลำดับ และจะเห็นได้ว่า พีเอชของน้ำออกจากตัวกลางทรายจะมีค่าสูงกว่าดินปนทราย และดิน ตามลำดับ

ตารางที่ 5.7 พีเอชเฉลี่ยในน้ำเข้าและออกจากระบบบึงประดิษฐ์ ที่มีตัวกลางดิน

ชุดทดลองที่	พีเอช			
	inf	eff	inf_{mean}	eff_{mean}
1-3	6.64-7.20	6.65-7.04	7.02	6.82
2-3	6.40-7.58	6.70-7.39	7.02	6.91
3-3	6.40-7.72	6.70-7.29	6.98	6.97
4-3	6.10-7.65	6.60-7.14	6.80	6.91

เมื่อพิจารณาจากค่าพีเอชของทั้งระบบ จะเห็นได้ว่า ช่วงพีเอชที่เกิดขึ้นนั้น อยู่ในช่วงกลไกการดูดซับแคดเมียมในตัวกลางของระบบ (pH = 4.0-7.7) นั่นคือเกิดการดูดซับแคดเมียมโดยตัวกลางทั้งสามชนิด คือ ทราย ดินปนทราย และดิน สำหรับการบำบัดแคดเมียมโดยตัวกลางดินนั้น พีเอชในระบบค่อนข้างจะคงที่มากกว่า ในตัวกลางทราย และดินปนทราย

5.2.3 ความต่างศักย์ออกซิเดชั่น-รีดักชั่น โพเทนเชียล (Oxidation-Reduction Potential ,ORP)

ค่าโออาร์พี หรือค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้จากระบบใด ๆ นั้น ไม่มีความหมายอย่างเจาะจง นั่นคือโออาร์พีไม่ได้บอกว่าจะมีสารตัวนั้นปรากฏอยู่หรือไม่ สิ่งที่โออาร์พีบอกเป็นเพียงอัตราส่วนของความเข้มข้นระหว่างตัวออกซิไดซ์กับตัวรีดิวซ์เท่านั้น

เมื่อโออาร์พีมีค่ามากกว่า 300 มิลลิโวลท์ จะเป็นสภาวะแอโรบิกเนื่องจากยังสามารถวัดออกซิเจนละลายได้ และเมื่อโออาร์พีมีค่าน้อยกว่า - 100 มิลลิโวลท์ จะเป็นสภาวะแอนแอโรบิกเนื่องจากไม่มีออกซิเจนละลายอยู่ ส่วนค่าโออาร์พีที่อยู่ระหว่างค่าข้างต้นนั้นถือเป็นสภาวะแฟคัล-เททีฟ สำหรับดินที่มีออกซิเจนโดยทั่วไปจะมีค่าโออาร์พีอยู่ในช่วง 400 - 700 มิลลิโวลท์ ที่พีเอชเป็น 7 ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำอาจจะมีโออาร์พีตั้งแต่ - 300 มิลลิโวลท์ (หรือต่ำกว่า) ไปจนถึง 700 มิลลิโวลท์

จากการทดลองค่าโอออาร์พีที่เกิดขึ้นในระบบตลอดการทดลองนั้นมีค่าเป็นบวก ทั้งน้ำเข้า และที่ผ่านจุดต่าง ๆ (0 15 30 45 และ 60 เซ็นติเมตร จากทางน้ำเข้า) ในระบบจนถึงน้ำออกในตัวกลางทั้งสามชนิดตลอดการเดินระบบ ทั้งยังค่อนข้างคงที่ในแต่ละชุดทดลอง โดยค่าโอออาร์พีเฉลี่ยดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 โอออาร์พีเฉลี่ย

ชุดการทดลองที่	ORP จุดเก็บตัวอย่าง(มิลลิโวลท์)						
	inf	1	2	3	4	5	eff
1-1	156	147	155	158	153	146	153
1-2		159	151	153	154	154	157
1-3		156	187	178	172	167	167
2-1	153	129	117	118	115	113	120
2-2		144	128	124	131	133	133
2-3		144	145	149	151	154	151
3-1	225	166	163	169	174	175	179
3-2		193	188	187	190	200	202
3-3		201	220	216	214	225	217
4-1	260	243	264	240	227	225	228
4-2		269	239	226	229	241	234
4-3		265	259	244	247	262	245

นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นแคดเมียมของน้ำเข้าเพิ่มขึ้น ค่าโอออาร์พีก็จะสูงขึ้นด้วยคือ โอออาร์พีเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 156 153 225 และ 260 มิลลิโวลท์ ที่ความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเท่ากับ 1 5 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และทำให้ค่าโอออาร์พีที่ออกจากตัวกลางทั้ง 3 ชนิด เพิ่มขึ้นตามไปด้วยเมื่อค่าโอออาร์พีของน้ำเข้าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าโอออาร์พีของน้ำออกจากตัวกลางทั้ง 3 ชนิด จะเห็นได้ว่าค่าโอออาร์พีในน้ำออกจากตัวกลางดินมีค่ามากกว่าจากตัวกลางดินปนทราย และทราย ตามลำดับ นั่นก็แสดงว่าเกิดปฏิกริยาออกซิเดชันในตัวกลางดินมากกว่าในตัวกลางดินปนทราย และทรายตามลำดับ ที่ทุก ๆ ค่าความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเข้า

จะเห็นได้ว่าค่าไอออาร์พีเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในระบบนั้นอยู่ในช่วงแฟคัลเททีฟค่อนไปทางแอโรบิก นั่นคืออยู่ในช่วง 113 - 265 มิลลิโวลท์ อีกนัยหนึ่งนั้นอาจจะกล่าวได้ว่าระบบเกิดออกซิเดชั่นมากกว่ารีดักชั่น โดยที่ความต่างศักย์มาตรฐานที่ 25 องศาเซลเซียส ของแคดเมียม คือ -0.40 มิลลิโวลท์ ดังสมการ 5.1 (สมการรีดักชั่น)

$$Cd^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Cd\,(s) \qquad (5.1)$$

สำหรับในระบบบำบัดโดยใช้พื้นที่ชุ่มน้ำนั้นมีความซับซ้อนมากเนื่องจากมีปฏิกริยารีดอกซ์เกิดขึ้นมากมาย ดังนั้นจึงไม่สามารถสรุปได้ชัดเจนนักสำหรับการระบุปริมาณสารเฉพาะตัวใดตัวหนึ่ง

5.3 การกำจัดแคดเมียม

แคดเมียมโดยธรรมชาติแล้วเป็นโลหะที่ไม่เป็นที่ต้องการในเชิงสารอาหารสำหรับสิ่งมีชีวิต ซ้ำยังมีพิษร้ายแรง โดยที่แคดเมียมสามารถเข้าสู่ร่างกายได้โดยผ่านทางน้ำและอาหารที่มีภาชนะบรรจุเป็นกระป๋องที่มีแคดเมียมเป็นส่วนผสม ดังนั้นในน้ำดื่มจึงกำหนดให้มีแคดเมียมได้ไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร พบแคดเมียมได้ในแหล่งน้ำผิวดินและใต้ดินเนื่องจากการปล่อยน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมประเภททำโลหะผสม ชุบโลหะ เซรามิก อุตสาหกรรมถ่ายรูป และจากท่อชุบโลหะที่เสื่อมสภาพ ดังนั้นน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมจึงกำหนดให้มีปริมาณแคดเมียมไม่มากกว่า 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร

5.3.1 ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดแคดเมียม

จากการทดลองเก็บตัวอย่างน้ำที่ออกจากระบบทั้งในตัวกลางทราย ดินปนทราย และดิน ที่รับน้ำเสียที่มีแคดเมียม 1 5 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีเวลากักน้ำ 5 วัน เป็นเวลา 30 วัน ในแต่ละความเข้มข้นนั้น ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมใกล้เคียงกันในตัวกลางทั้ง 3 ชนิด จะเห็นได้ว่าที่ $[Cd]_{inf}$ เท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตัวกลางทั้ง 3 ชนิดสามารถกำจัดแคดเมียมได้หมด คือน้ำที่ออกจากระบบไม่มีแคดเมียมออกมากับน้ำทิ้งเลย สำหรับที่ $[Cd]_{inf}$ เท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงแรกสามารถกำจัดแคดเมียมได้หมด ส่วนในช่วงหลังการทดลองมีแคดเมียม

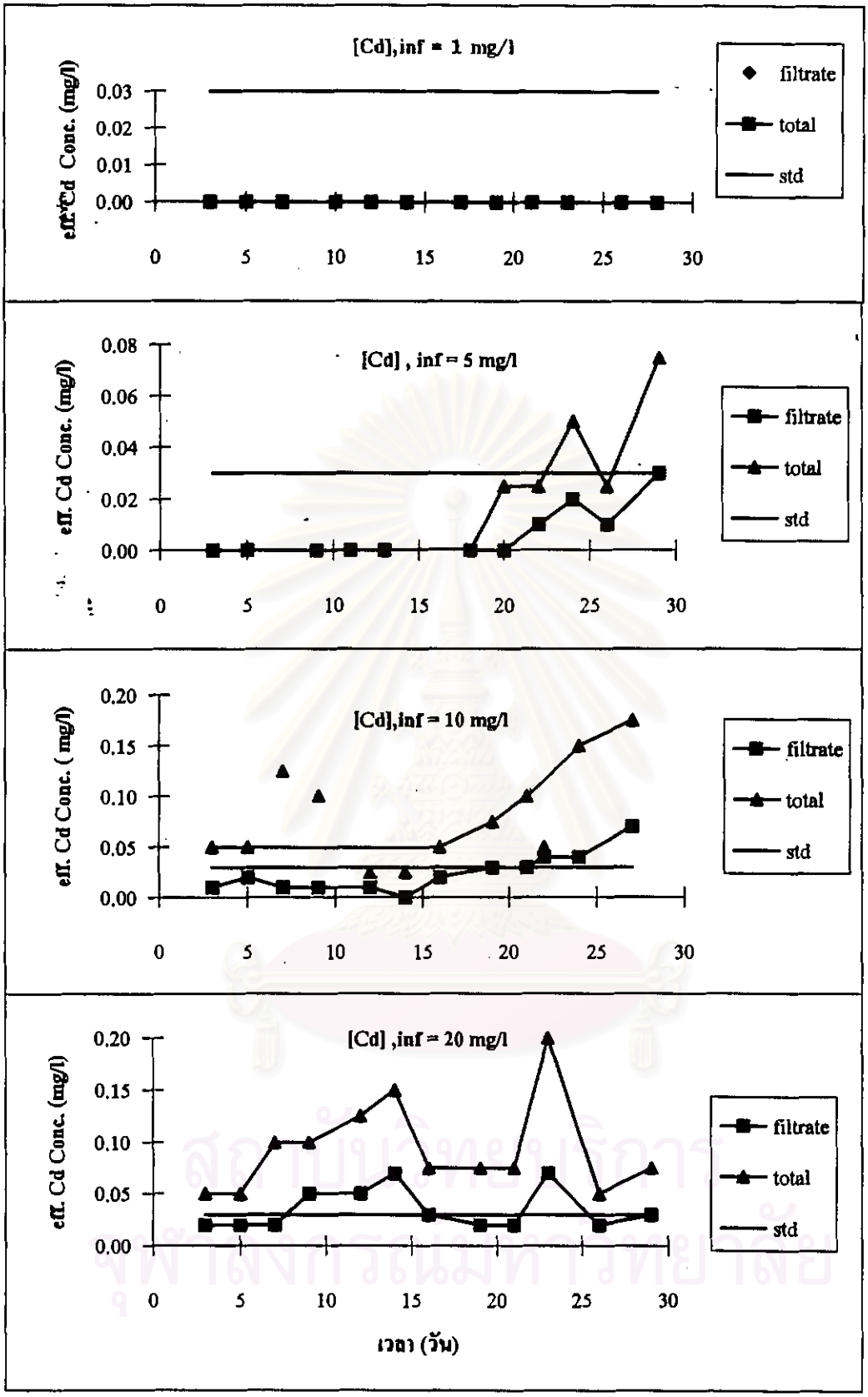
ออกมากับน้ำทิ้งเพียงเล็กน้อย และที่ $[Cd]_{inf}$ เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เริ่มมีแคดเมียมออกมากับน้ำทิ้งตั้งแต่วันแรกที่ทำการทดลอง โดยปริมาณแคดเมียมในน้ำทิ้งนั้นค่อนข้างใกล้เคียงกับที่ $[Cd]_{inf}$ เท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

1) ตัวกลางทราย

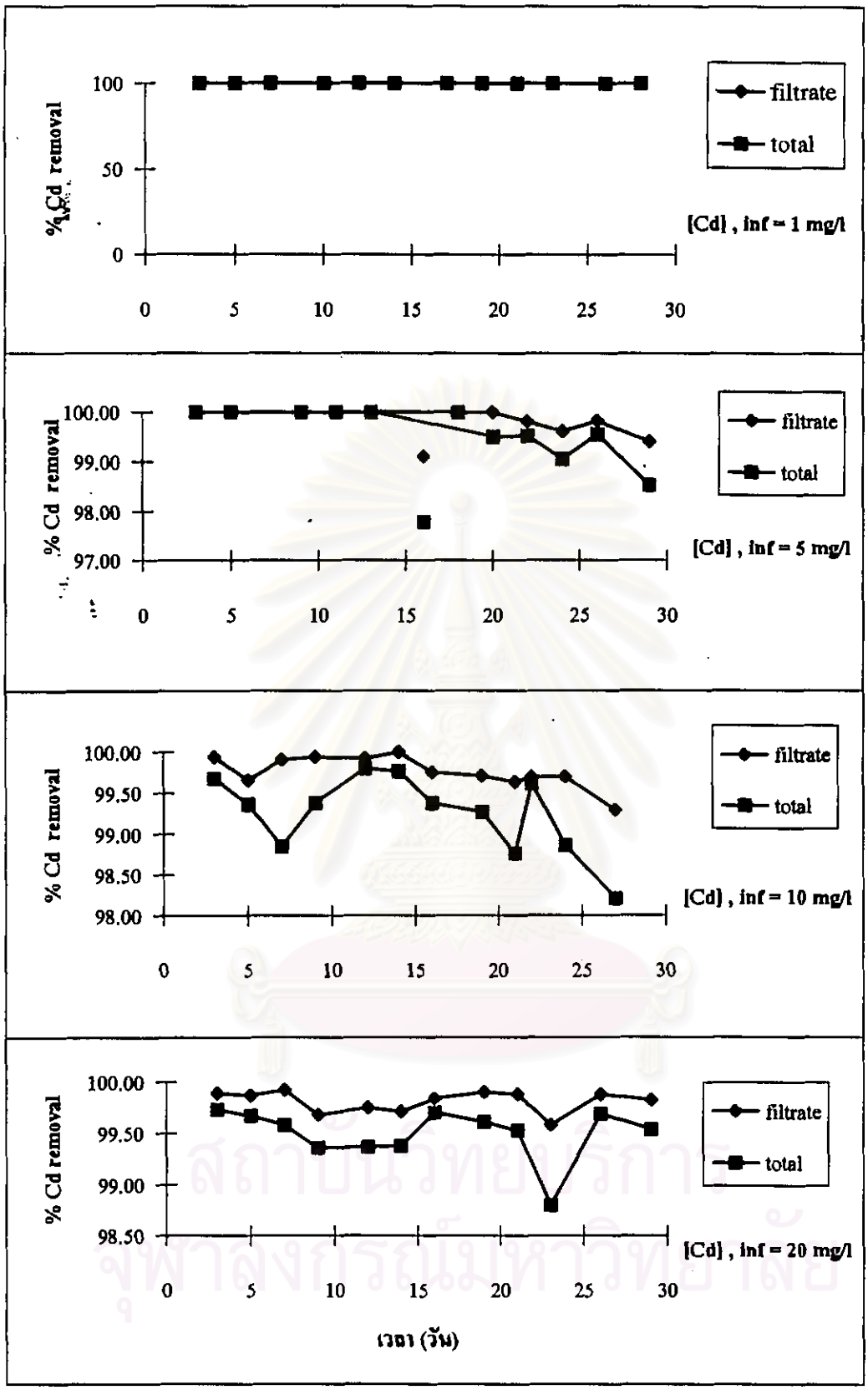
เมื่อเริ่มป้อนน้ำเข้าที่มีแคดเมียมความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เข้าไปในระบบนั้น ตลอดการทดลอง(30วัน) ไม่มีแคดเมียมออกมาในทิ้งเลย และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเป็น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นได้ว่าในช่วง 14 วันแรกที่ทำการทดลอง แคดเมียมในน้ำที่ออกจากระบบยังคงเป็นศูนย์ แต่หลังจากนั้นเริ่มมีแคดเมียมออกมาในน้ำทิ้งและเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดเฉลี่ยเท่ากับ 100 และ 99.81 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับแต่ก็ยังไม่เกินมาตรฐานน้ำทิ้งคิดเป็นปริมาณแคดเมียมที่สะสมในระบบเท่ากับ 92.5 และ 581.0 มิลลิกรัม ที่ $[Cd]_{inf}$ เท่ากับ 1 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

เมื่อความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเป็น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เริ่มมีแคดเมียมในน้ำทิ้งตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ใน 22 วันแรก ซึ่งยังคงเป็นไปตามมาตรฐาน หลังจากนั้นปริมาณแคดเมียมเพิ่มขึ้นและไม่เป็นไปตามมาตรฐาน คือเพิ่มขึ้นจาก 0.04 ถึง 0.07 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่โดยเฉลี่ยแล้วความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำออกจากระบบมีค่าเท่ากับ 0.024 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่านั้น ประสิทธิภาพในการกำจัดเฉลี่ยเท่ากับ 99.76 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นปริมาณแคดเมียมที่สะสมในระบบเท่ากับ 1267.8 มิลลิกรัม

ที่ความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเป็น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เริ่มต้นมีแคดเมียมในน้ำทิ้งเช่นกันคือ 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วง 3 วันแรกที่ทำการทดลองซึ่งยังคงเป็นไปตามมาตรฐาน แต่หลังจากนั้นก็มีแคดเมียมในน้ำทิ้งมากกว่าค่ามาตรฐานไทยมีค่าสูงถึง 0.07 มิลลิลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดเฉลี่ยเท่ากับ 99.81 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉลี่ยแล้วแคดเมียมในน้ำทิ้งเท่ากับ 0.035 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นปริมาณแคดเมียมที่สะสมในระบบเท่ากับ 2051.8 มิลลิกรัม



รูปที่ 5.4 ปริมาณแคดเมียมในน้ำทิ้งจากระบบบึงประดิษฐ์ที่มีตัวกลางทราย



รูปที่ 5.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีตัวกลางทราย

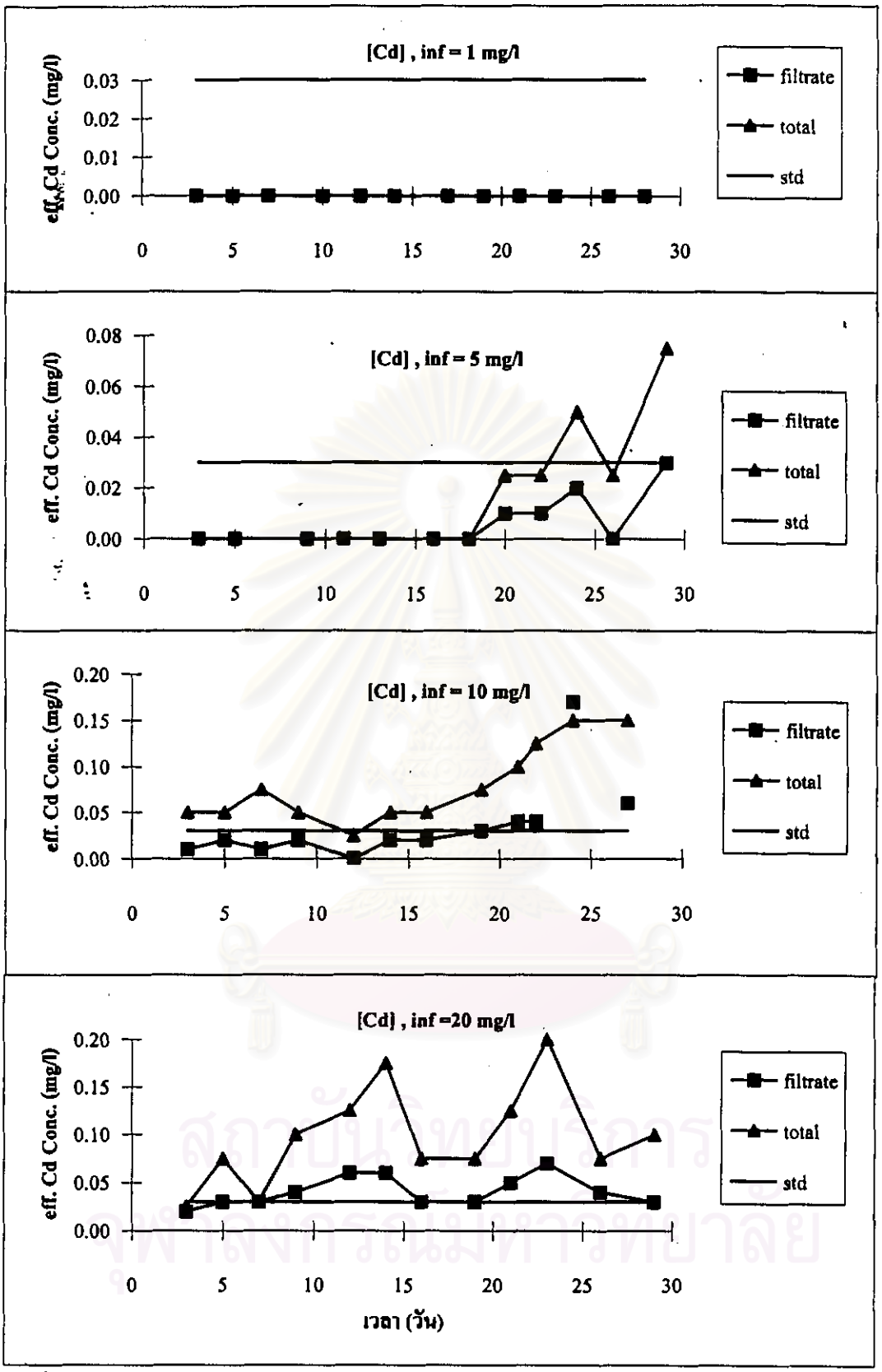
แต่อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเท่ากับ 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร นั้น ระบบยังคงมีความสามารถในการกำจัดแคดเมียมได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ คือมีแคดเมียมสะสมในระบบทั้งหมด 3994.2 มิลลิกรัม โดยปริมาณแคดเมียมในน้ำทิ้งและประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในแต่ละความเข้มข้น ดังรูปที่ 5.4 และ 5.5 ตามลำดับ

2) ตัวกลางดินปนทราย

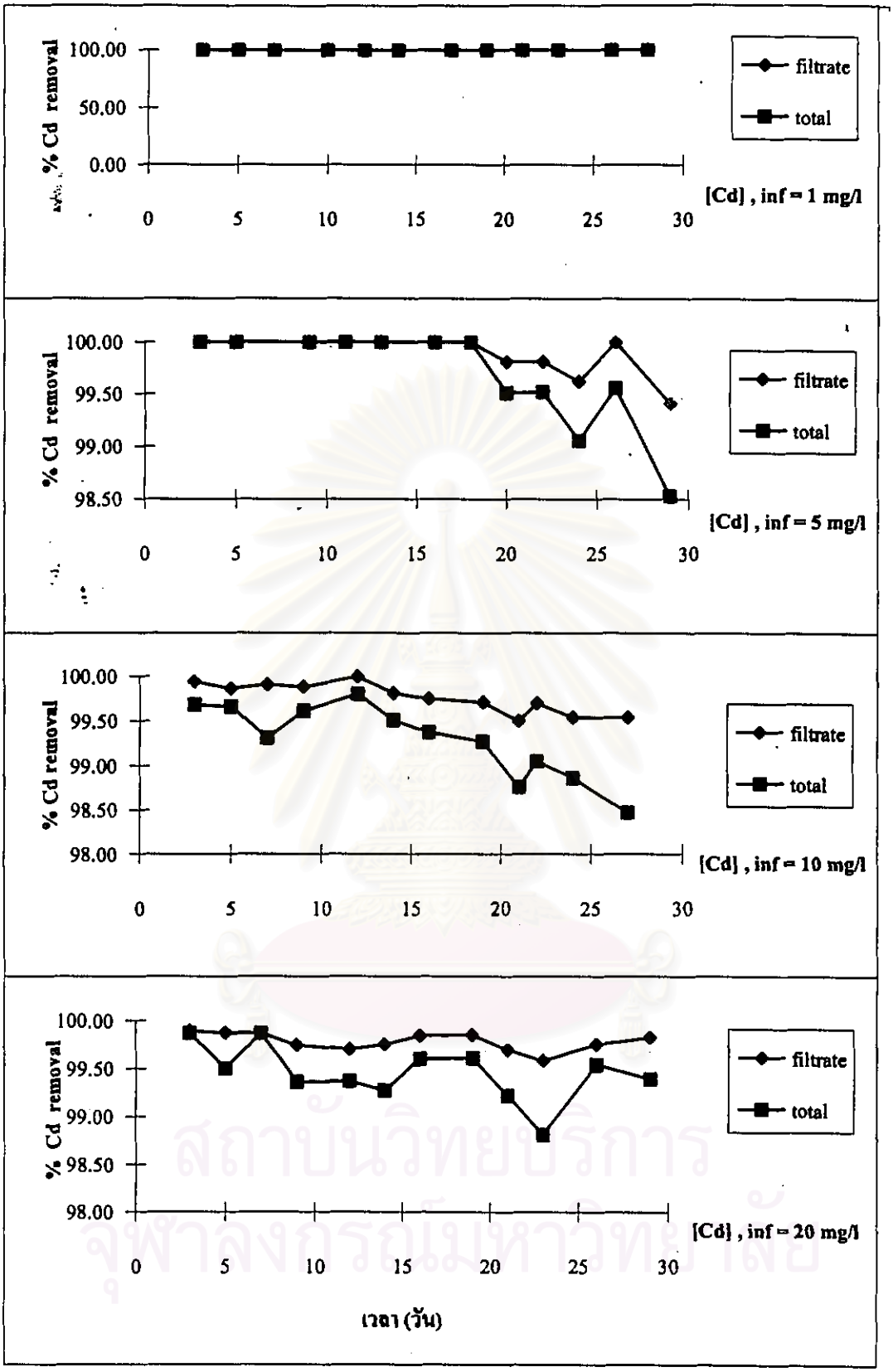
สำหรับตัวกลางดินปนทราย ที่ความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเป็น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร นั้นเป็นเช่นเดียวกันกับในตัวกลางทรายคือ ตลอดการทดลองไม่มีแคดเมียมในน้ำทิ้งเลย และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเป็น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นได้ว่าในช่วง 19 วันแรกน้ำที่ออกจากระบบยังคงเป็นศูนย์ ซึ่งมีระยะเวลาที่กำจัดได้หมดมากกว่าในตัวกลางทราย แต่หลังจากนั้นก็มีแคดเมียมในน้ำทิ้งและเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 0.01 ถึง 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งยังไม่เกินค่ามาตรฐานเช่นกัน โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.006 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นปริมาณแคดเมียมในระบบเท่ากับ 104.2 และ และ 656.0 มิลลิกรัม ที่ $[Cd]_{inf}$ เท่ากับ 1 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดเฉลี่ยเท่ากับ 100 และ 99.89 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเป็น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีแคดเมียมออกมากับน้ำทิ้งตั้งแต่วันแรกของการทดลองโดยมีค่าตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วง 20 วันแรกที่ทำการทดลอง ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้ง หลังจากนั้นแคดเมียมที่ออกมากับน้ำทิ้งเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.04 ถึง 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่โดยเฉลี่ยแล้วความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำทิ้งเท่ากับ 0.027 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดเฉลี่ยเท่ากับ 99.75 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นปริมาณแคดเมียมในระบบเท่ากับ 1426.0 มิลลิกรัม

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีแคดเมียมออกมากับน้ำทิ้งตั้งแต่ในวันแรกของการทดลองเช่นเดียวกับที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่มีปริมาณแคดเมียมในน้ำทิ้งสูงกว่า คือเท่ากับ 0.02 ถึง 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้ง แต่หลังจาก 8 วันแรกของการทดลอง แคดเมียมในน้ำทิ้งเพิ่มขึ้นจาก 0.04 ถึง 0.07 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.041 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งไม่เป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้ง ประสิทธิภาพในการกำจัดเฉลี่ยเท่ากับ 99.78 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นปริมาณแคดเมียมในระบบเท่ากับ 2307.2 มิลลิกรัม



รูปที่ 5.6 ปริมาณแคดเมียมในน้ำออกจากระบบของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีตัวกลางดินปนทราย



รูปที่ 5.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีตัวกลางดินปนทราย

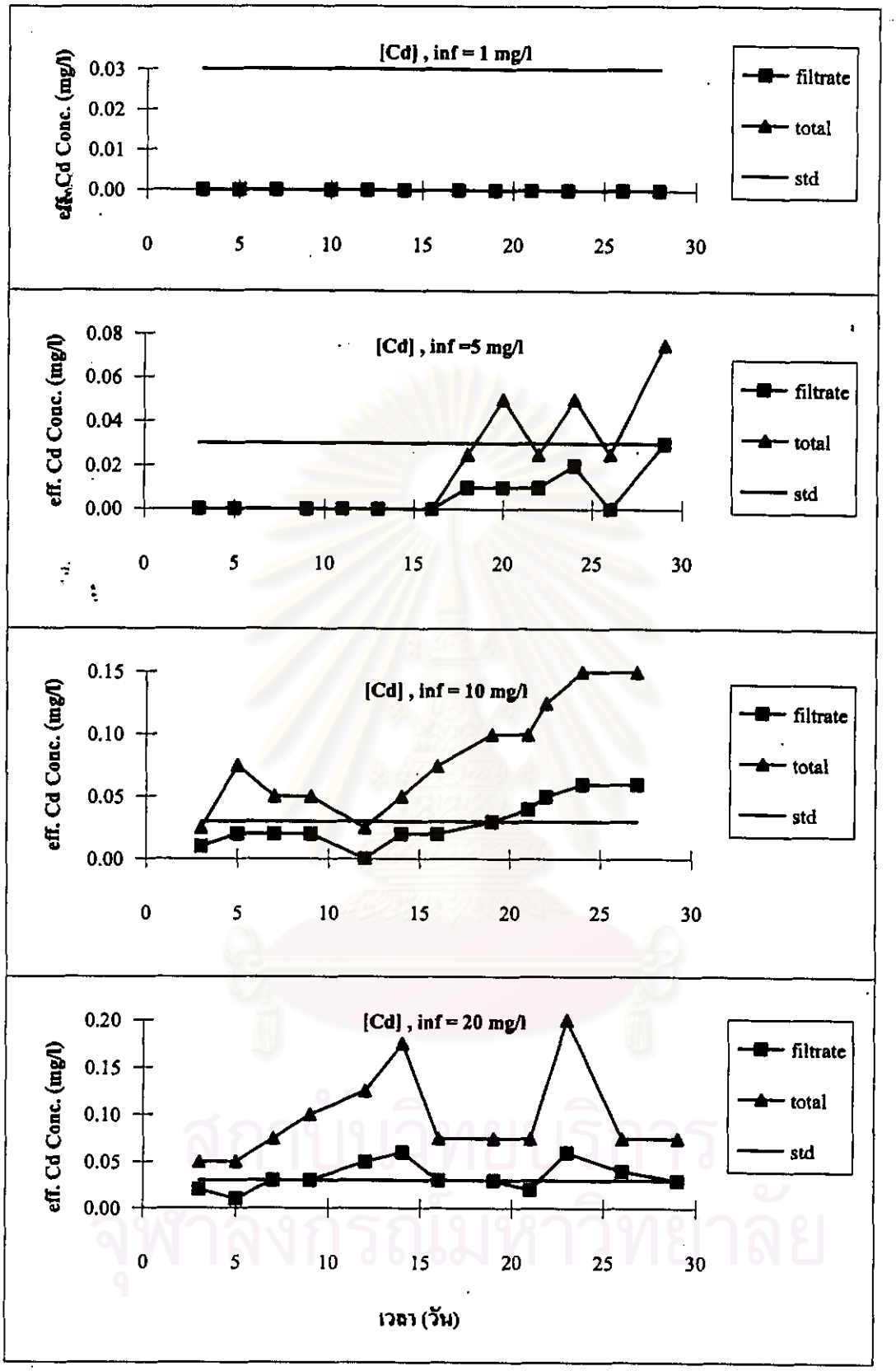
โดยสรุปแล้วในระบบบึงประดิษฐ์ที่มีตัวกลางดินปนทรายมีแคดเมียมสะสมในระบบเท่ากับ 4493.4 มิลลิกรัม ซึ่งสูงกว่าตัวกลางทรายและที่ความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเท่ากับ 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร นั้น ระบบยังคงมีความสามารถในการกำจัดแคดเมียมได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกันกับในตัวกลางทราย โดยปริมาณแคดเมียมในน้ำทิ้งและประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในแต่ละความเข้มข้น ดังรูปที่ 5.6 และ 5.7 ตามลำดับ

3) ตัวกลางดิน

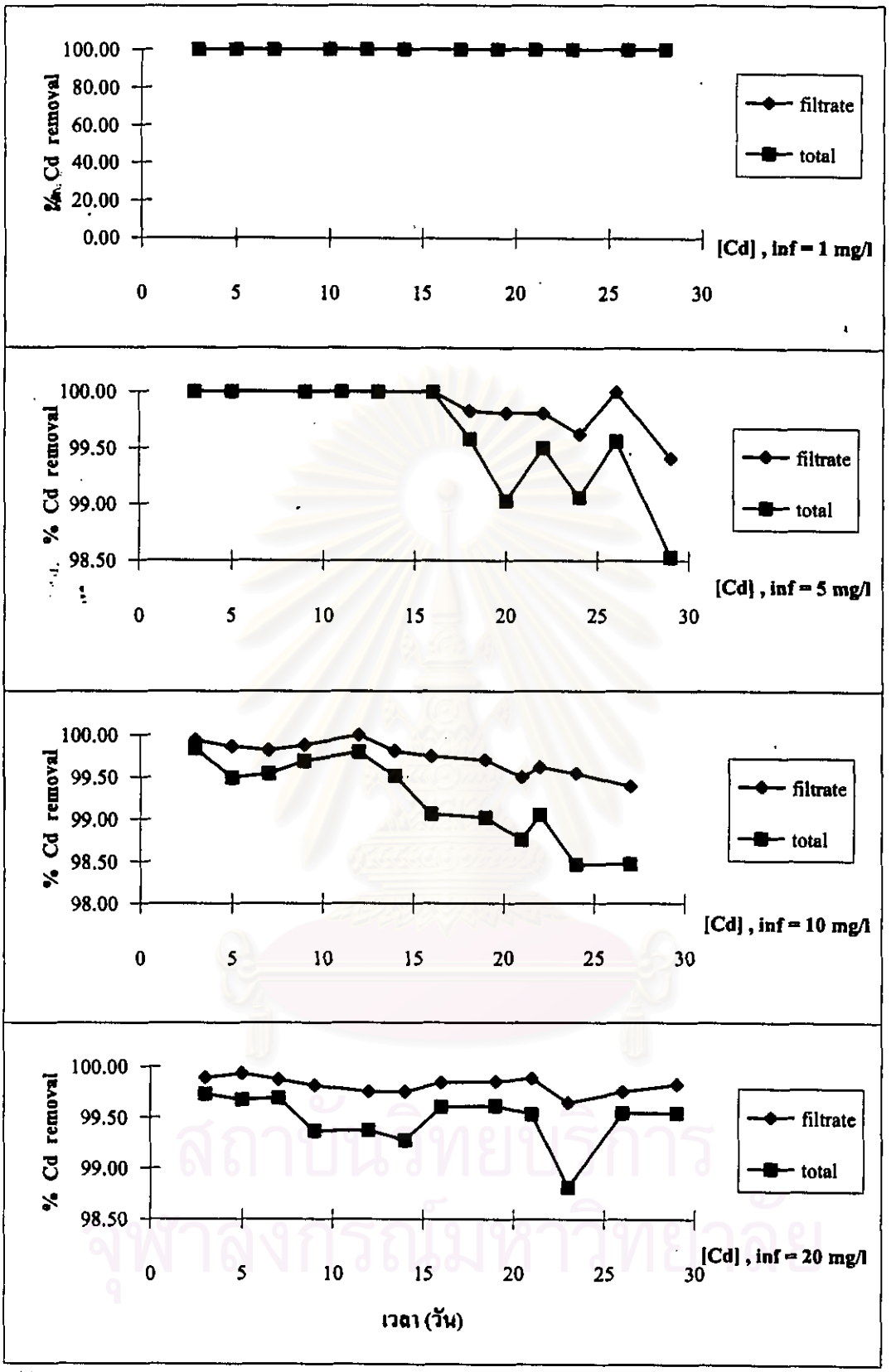
เมื่อเริ่มปล่อนน้ำเข้าที่มีแคดเมียมความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เข้าไปในระบบบึงประดิษฐ์นั้น ตลอดการทดลองไม่มีแคดเมียมหลุดออกมากับน้ำทิ้งจากระบบเลย แคดเมียมที่เข้าไปในระบบจึงสะสมอยู่ในระบบทั้งหมดคิดเป็นปริมาณ 115.7 มิลลิกรัม และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเป็น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วง 17 วันแรกของการทดลองไม่พบว่ามีแคดเมียมออกมาในน้ำทิ้ง แต่หลังจากนั้นมีแคดเมียมออกมากับน้ำทิ้งและเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งยังคงเป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้ง โดยค่าเฉลี่ยความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำทิ้งเท่ากับ 0.0067 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นปริมาณแคดเมียมสะสมในระบบ 728.4 มิลลิกรัม ประสิทธิภาพในการกำจัดเฉลี่ยเท่ากับ 100 และ 99.87 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ในขณะที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเป็น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นได้ว่ามีแคดเมียมออกมาในน้ำทิ้งตั้งแต่วันแรกที่ทำการทดลอง โดยมีความเข้มข้นตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ใน 20 วันแรกที่ทำการทดลอง แต่หลังจากนั้นปริมาณแคดเมียมในน้ำทิ้งก็เพิ่มขึ้นเป็น 0.04 ถึง 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยค่าเฉลี่ยปริมาณแคดเมียมในน้ำทิ้งเท่ากับ 0.029 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดเฉลี่ยเท่ากับ 99.73 คิดเป็นปริมาณแคดเมียมสะสมในระบบ 1584.3 มิลลิกรัม

นอกจากนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเป็น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร แคดเมียมในน้ำทิ้งที่ออกจากระบบในวันแรกมีค่าสูงกว่า ที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร คือมีค่าเท่ากับ 0.02 ถึง 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงที่ทำการทดลองเป็นเวลา 10 วัน หลังจากนั้นปรากฏว่าแคดเมียมที่ออกมากับน้ำทิ้งเพิ่มขึ้นเป็น 0.04 ถึง 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีความเข้มข้นเฉลี่ยในน้ำทิ้งเท่ากับ 0.034 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดเฉลี่ยเท่ากับ 99.82 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นปริมาณแคดเมียมสะสมในระบบ 2564.7 มิลลิกรัม



รูปที่ 5.8 ปริมาณแคดเมียมในน้ำออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่มีตัวกลางดิน



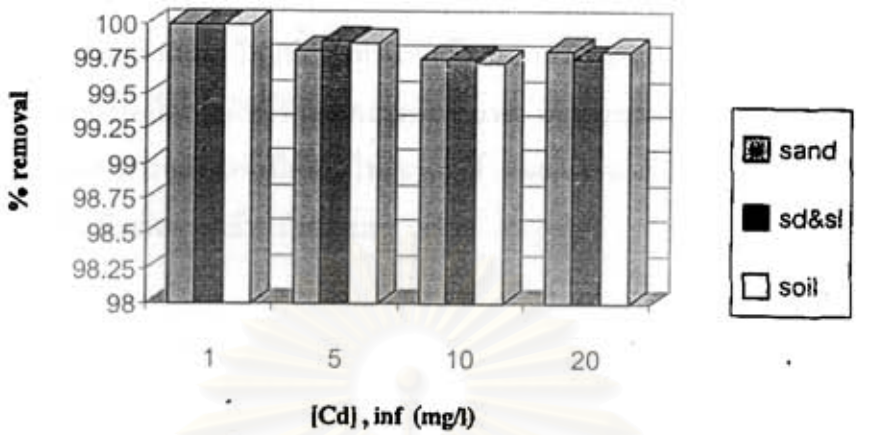
รูปที่ 5.9 ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีตัวกลางดิน

โดยสรุปแล้วแคดเมียมที่สะสมอยู่ในระบบทั้งหมดตลอดการทดลองเท่ากับ 4993.1 มิลลิกรัม ซึ่งมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับตัวกลางทั้ง 2 ประเภท ถึงแม้ว่าน้ำทิ้งที่ได้จากน้ำเข้าที่มีแคดเมียมความเข้มข้น 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าไม่เป็นไปตามมาตรฐาน(เช่นเดียวกันกับในตัวกลางทรายและดินปนทราย) นั้น อย่างไรก็ตามระบบยังคงสามารถกำจัดแคดเมียมได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ เช่นกัน โดยปริมาณแคดเมียมในน้ำทิ้งและประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในแต่ละความเข้มข้น ดังรูปที่ 5.8 และ 5.9 ตามลำดับ

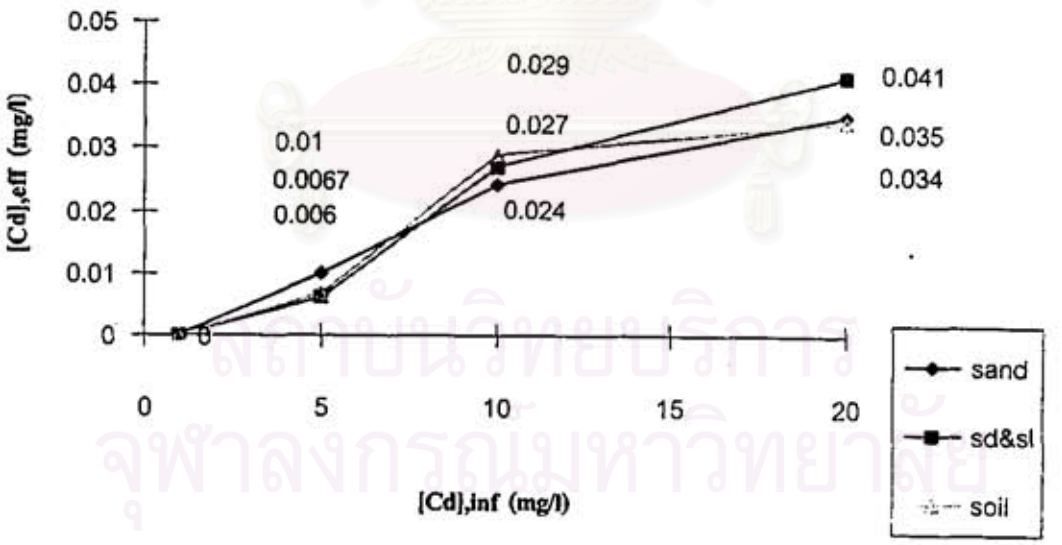
4) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโดยตัวกลางทั้ง 3 ชนิด

จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียดิบเข้านั้น ระบบบำบัดบึงประดิษฐ์แบบน้ำขังใต้ดินสามารถกำจัดแคดเมียมจากน้ำเสียได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ ทั้งในตัวกลางทราย ดินปนทราย และดิน ดังรูปที่ 15.10 เมื่อปริมาณแคดเมียมในน้ำเข้าเพิ่มขึ้น ปริมาณแคดเมียมในน้ำทิ้งก็เพิ่มขึ้นด้วย คือที่ $[Cd]_{inf}$ เท่ากับ 1 5 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นแคดเมียมเฉลี่ยในน้ำทิ้งจากระบบที่มีตัวกลางทรายเท่ากับ 0.00 0.01 0.024 และ 0.035 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในตัวกลางดินปนทรายน้ำทิ้งมีปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยเท่ากับ 0.00 0.006 0.027 และ 0.041 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และในตัวกลางดินน้ำทิ้งมีปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยเท่ากับ 0.00 0.0067 0.029 และ 0.034 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 5.11 ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่าเพียงแต่ที่ $[Cd]_{inf}$ เท่ากับ 1 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่านั้นที่ปริมาณแคดเมียมในน้ำออกเป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรมคือไม่มากกว่า 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนที่ $[Cd]_{inf}$ เท่ากับ 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร นั้นมีค่าสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้ง ซึ่งจำเป็นต้องนำไปบำบัดด้วยวิธีอื่นต่อไป ก่อนทิ้งลงในแหล่งน้ำสาธารณะ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโดยใช้ตัวกลางทั้ง 3 ชนิด พบว่าตัวกลางดินสามารถกำจัดแคดเมียมได้ดีที่สุดโดยมีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยเท่ากับ 100 99.87 99.73 และ 99.82 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ความแตกต่างน้อยมาก) นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมที่สะสมในระบบทั้งหมด ตัวกลางดินก็ยังสามารถสะสมแคดเมียมในระบบได้มากกว่าดินปนทรายและทราย คือ 4993.1 4493.4 และ 3994.2 มิลลิกรัม ตามลำดับ หรือคิดเป็นความสามารถของตัวกลางในการจับแคดเมียมเท่ากับ 0.086 0.089 และ 0.093 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมตัวกลางทราย ดินปนทราย และดิน ตามลำดับ



รูปที่ 5.10 แสดงประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดแคดเมียมในบึงประดิษฐ์ที่มีตัวกลางต่างชนิดกัน



รูปที่ 5.11 แสดงปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยในน้ำทิ้งจากบึงประดิษฐ์ที่มีตัวกลางต่างชนิดกัน

5.3.2 การกำจัดแคดเมียมที่ระยะต่าง ๆ ในระบบ

จากการทดลอง เมื่อป้อนน้ำเข้าที่มีแคดเมียมความเข้มข้น 1 5 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ผ่านระบบบำบัดบึงประดิษฐ์ที่มีตัวกลางเป็นทราย ดินปนทราย และดินนั้น จะเห็นได้ว่าตัวกลางทั้งสามชนิดสามารถกักแคดเมียมไว้ในระบบได้ โดยที่ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเข้าจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเริ่มผ่านเข้ามาในระบบ

1) ตัวกลางทราย

เมื่อป้อนน้ำเข้าที่มีแคดเมียม 1 มิลลิกรัมต่อลิตรเข้าไปในระบบ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมเฉลี่ยคือ 35.24 98.15 100 100 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะ 0 15 30 45 และ 60 เซ็นติเมตร ตามลำดับจากทางน้ำเข้า ที่ความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมเฉลี่ยคือ 70.29 99.62 99.81 99.81 และ 99.81 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมเฉลี่ยคือ 80.30 99.33 99.75 99.75 และ 99.83 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเป็น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดเฉลี่ยคือ 68.46 93.97 99.66 99.78 และ 99.78 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 5.9

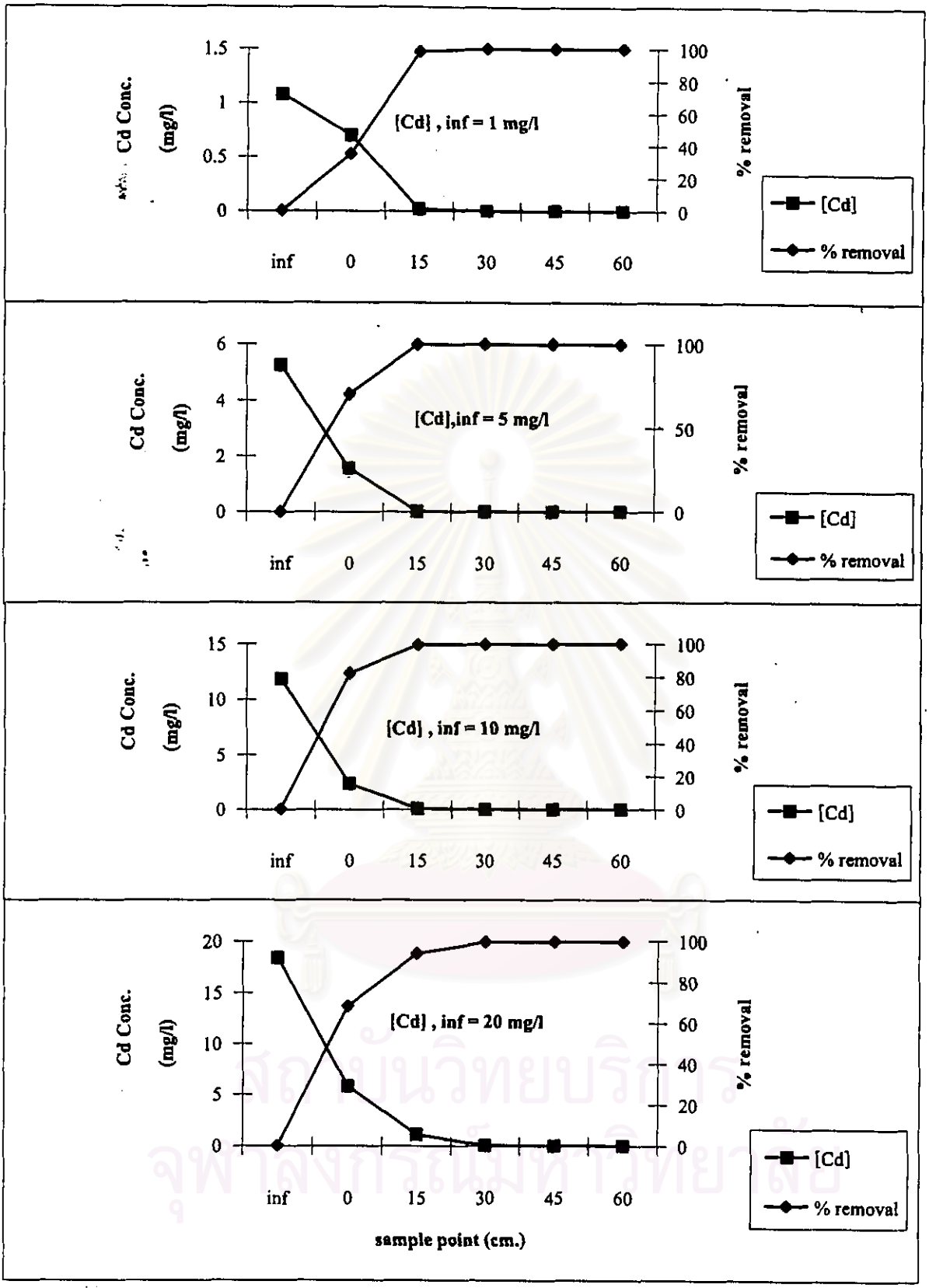
ตารางที่ 5.9 ปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยและประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมจากสารละลายที่ระยะใด ๆ ในระบบบึงประดิษฐ์ที่มีตัวกลางทราย

ชุดทดลองที่		Cd ในสารละลาย ณ จุดเก็บตัวอย่างที่...., มก./ล.						
		inf	1	2	3	4	5	eff
1-1	[Cd]	1.081	0.70	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
	% การกำจัด	0	35.24	98.15	100	100	100	100
2-1	[Cd]	5.25	1.56	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
	% การกำจัด	0	70.29	99.66	99.81	99.81	99.81	99.81
3-1	[Cd]	11.88	2.34	0.08	0.03	0.03	0.02	0.024
	% การกำจัด	0	80.30	99.33	99.75	99.75	99.83	99.76
4-1	[Cd]	18.42	5.81	1.11	0.07	0.04	0.04	0.035
	% การกำจัด	0	68.46	93.97	99.62	99.78	99.78	99.81

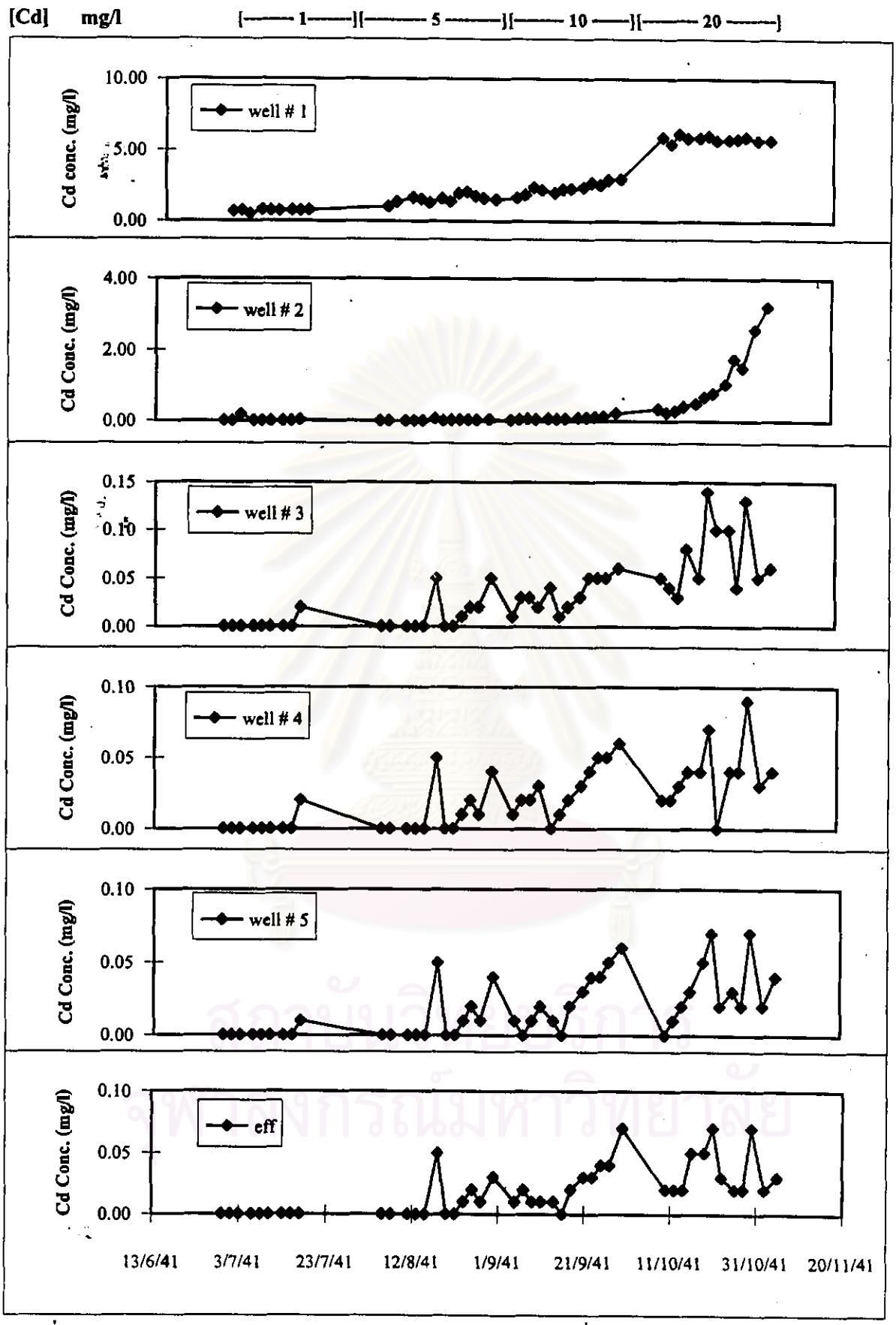
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าที่ $[Cd]_{inf}$ เท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบสามารถกำจัดแคดเมียมได้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ โดยการกำจัดเกิดขึ้นที่ระยะ 0 ถึง 15 เซ็นติเมตรแรกของตัวกลางเป็นส่วนใหญ่ เมื่อน้ำเข้าผ่านตัวกลางที่ระยะ 30 เซ็นติเมตร ก็ไม่ปรากฏว่ามีแคดเมียมอยู่ในสารละลาย ส่วนที่ $[Cd]_{inf}$ เท่ากับ 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร นั้นระบบสามารถกำจัดแคดเมียมจากน้ำเข้าได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ ในระยะ 0 ถึง 15 เซ็นติเมตร ของตัวกลาง แต่สำหรับ $[Cd]_{inf}$ เป็น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเท่ากับ 30 เซ็นติเมตร ดังรูป 5.12

นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าในส่วนแรกของตัวกลาง (บ่อเก็บตัวอย่างที่ระยะ 0 ซม) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเป็น 1 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัดยังคงแปรผันตามความเข้มข้นแคดเมียมอยู่ นั่นคือเท่ากับ 35.24 70.29 และ 80.30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่เมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเข้าเป็น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดกลับลดลงเป็น 68.46 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงว่าในระบบส่วนนี้แอกทีฟ ไซต์ของตัวกลางเริ่มเป็นตัวจำกัดในการกำจัดแคดเมียม นั่นคือเริ่มอิ่มตัวนั่นเอง ดังนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดจึงลดลง

โดยปริมาณแคดเมียมในน้ำเข้าขณะไหลผ่านบ่อเก็บตัวอย่าง ในตำแหน่งที่ 1 2 3 4 และ 5 ที่ระยะทาง 0 15 30 45 และ 60 เซ็นติเมตร พบว่าเมื่อปริมาณแคดเมียมในสารละลายเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการทดลองเพิ่มขึ้น นั่นคือที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างที่ 1 ความเข้มข้นแคดเมียมจะอยู่ในช่วง 0.45 ถึง 0.80 1.01 ถึง 6.00 1.66 ถึง 2.97 และ 5.43 ถึง 6.15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเท่ากับ 1 5 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างที่ 2 ความเข้มข้นแคดเมียมจะอยู่ในช่วง 0.00 ถึง 0.07 0.02 ถึง 0.21 และ 0.23 ถึง 3.21 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเท่ากับ 5 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างที่ 3 ความเข้มข้นแคดเมียมจะอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.05 0.01 ถึง 0.06 และ 0.03 ถึง 0.14 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างที่ 4 ความเข้มข้นแคดเมียมจะอยู่ในช่วง 0.00 ถึง 0.05 0.00 ถึง 0.06 และ 0.00 ถึง 0.09 ตามลำดับ และที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างที่ 5 ความเข้มข้นแคดเมียมจะอยู่ในช่วง 0.00 ถึง 0.05 0.01 ถึง 0.06 และ 0.00 ถึง 0.14 ตามลำดับ ส่วนที่ความเข้มข้นแคดเมียมเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตรนั้น ในตำแหน่งเก็บตัวอย่างที่ 2 3 4 และ 5 ไม่พบว่ามีแคดเมียมอยู่ในสารละลายเลย แต่ในวันที่ 21 ของการทดลองจะมีปริมาณแคดเมียมในสารละลายเท่ากับ 0.03 0.02 0.02 และ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.12 ปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยและประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมจากสารละลายที่ระยะใด ๆ ในระบบที่มีตัวกลางทราย



รูปที่ 5.13 ปริมาณแคดเมียมในบ่อตัวอย่างของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีตัวกลางทราย

2) ตัวกลางดินปนทราย

สำหรับตัวกลางดินปนทราย เมื่อความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเป็น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมเฉลี่ยเท่ากับ 39.87 100 100 100 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะ 0 15 30 45 และ 60 เซ็นติเมตร ตามลำดับ ส่วนที่ความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเป็น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมเฉลี่ยคือ 71.43 99.62 99.81 99.81 และ 99.81 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเป็น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมเฉลี่ยคือ 82.15 99.33 99.58 99.75 และ 99.75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเป็น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมเฉลี่ยคือ 69.05 98.97 99.46 99.73 และ 99.78 ตามลำดับ ดังตารางที่ 5.10

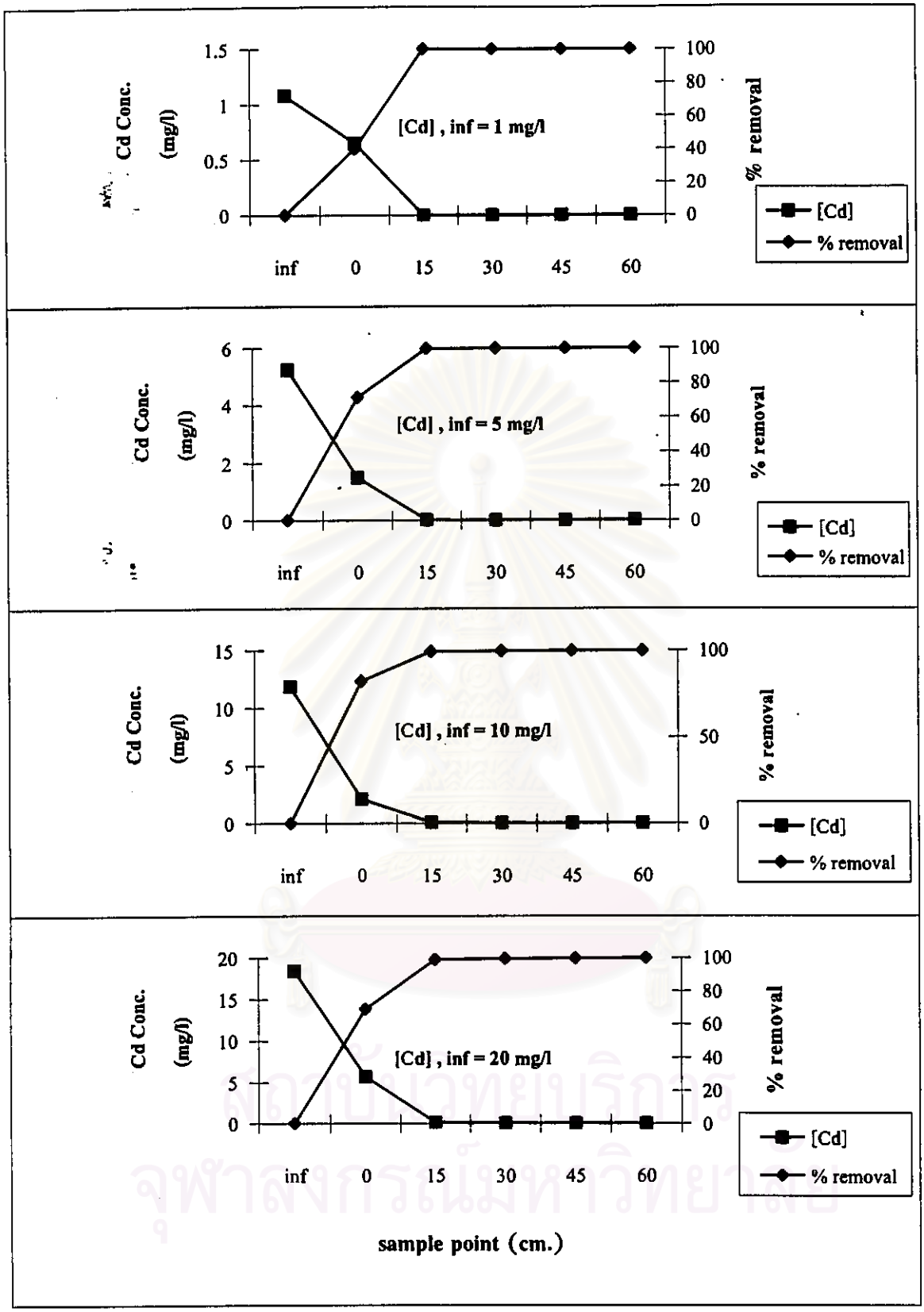
ตารางที่ 5.10 ปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยและประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมจากสารละลายที่ระยะใด ๆ ในระบบบึงประดิษฐ์ที่มีตัวกลางดินปนทราย

ชุดทดลองที่		Cd ในสารละลาย ที่ตำแหน่ง....(ซม.) , มก./ล.						
		inf	1	2	3	4	5	eff
1-2	[Cd]	1.081	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	% การกำจัด	0	39.87	100	100	100	100	100
2-2	[Cd]	5.25	1.50	0.02	0.01	0.01	0.01	0.006
	% การกำจัด	0	71.43	99.63	99.81	99.81	99.81	99.89
3-2	[Cd]	11.88	2.12	0.08	0.05	0.03	0.03	0.027
	% การกำจัด	0	82.15	99.33	99.58	99.75	99.75	99.75
4-2	[Cd]	18.42	5.70	0.16	0.10	0.05	0.04	0.041
	% การกำจัด	0	69.05	98.97	99.46	99.73	99.78	99.78

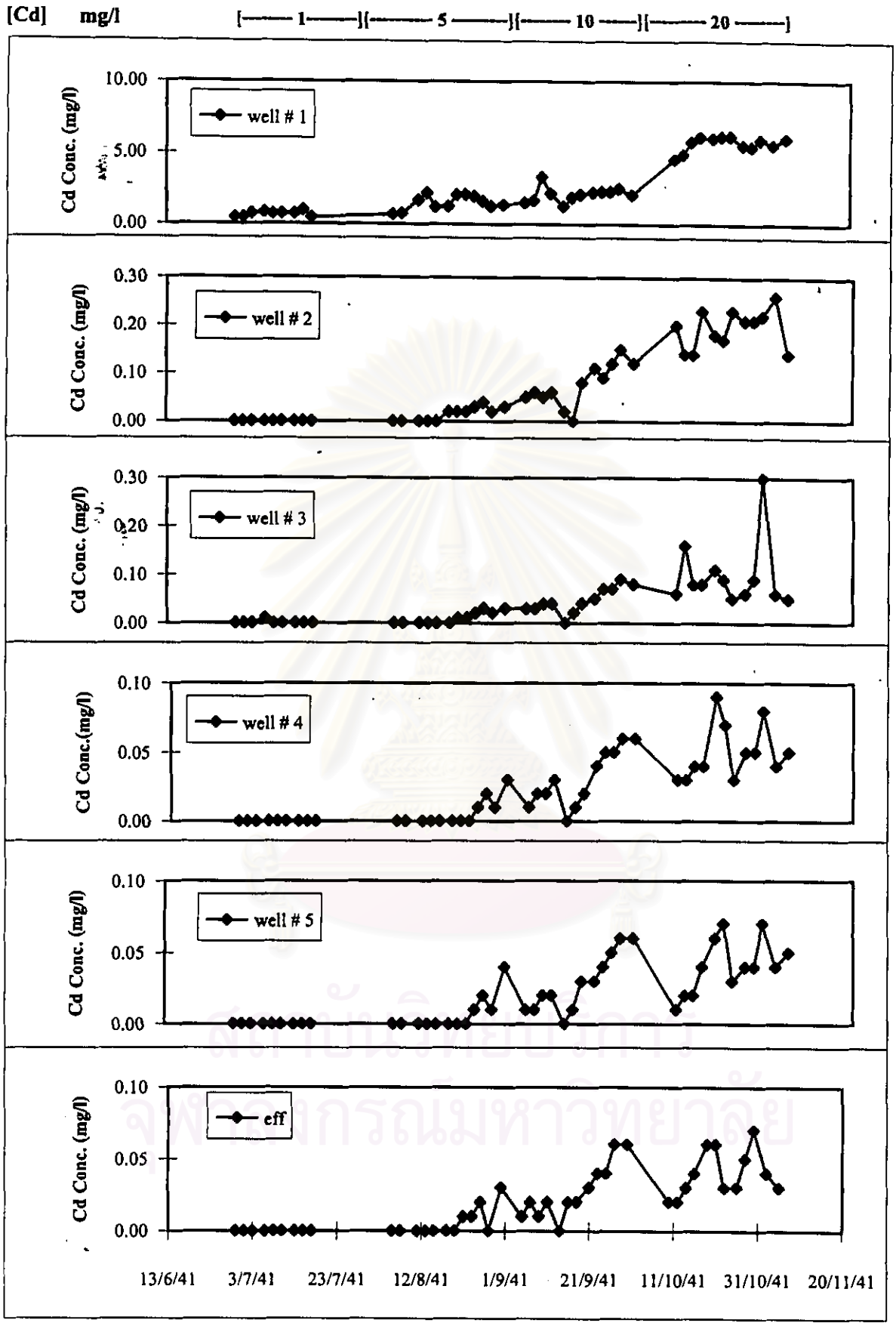
จากผลการทดลองที่ $[Cd]_{inf}$ เท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบสามารถกำจัดแคดเมียมในน้ำเข้าได้ทั้งหมดเมื่อผ่านตัวกลางในระบบเป็นระยะ 15 เซ็นติเมตร จากทางน้ำเข้าเท่านั้น เมื่อเพิ่ม $[Cd]_{inf}$ เป็น 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบสามารถกำจัดแคดเมียมได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ เมื่อน้ำเข้าผ่านเข้ามาในตัวกลาง 15 เซ็นติเมตร เช่นกัน และเมื่อเพิ่ม $[Cd]_{inf}$ เป็น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำเข้าจะต้องผ่านตัวกลางเป็นระยะ 30 เซ็นติเมตร (กึ่งกลางถัง) ประสิทธิภาพในการกำจัดจึงจะมากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 5.14

นอกจากนี้แล้วในพื้นที่ส่วนแรกของตัวกลางดินปนทรายก็เป็นในลักษณะเดียวกันกับในตัวกลางทรายคือเริ่มอิ่มตัว เมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเข้าเป็น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร นั่นคือประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมของระบบเพิ่มขึ้นโดยเริ่มต้นจาก 39.87 71.43 และ 82.15 เปอร์เซ็นต์ที่ $[Cd]_{inf}$ เท่ากับ 1 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และลดลงเป็น 69.05 เปอร์เซ็นต์ ที่ $[Cd]_{inf}$ เท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปริมาณแคดเมียมในน้ำเข้าขณะไหลผ่านบ่อเก็บตัวอย่าง ในตำแหน่งที่ 1 2 3 4 และ 5 ที่ระยะทาง 0 15 30 45 และ 60 เซ็นติเมตร พบว่าเมื่อปริมาณแคดเมียมในสารละลายเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการทดลองเพิ่มขึ้น นั่นคือที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างที่ 1 ความเข้มข้นแคดเมียมจะอยู่ในช่วง 0.43 ถึง 0.96 0.66 ถึง 2.17 1.26 ถึง 2.54 และ 4.59 ถึง 6.20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเท่ากับ 1 5 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างที่ 2 ถึง 5 ไม่พบว่ามีแคดเมียมในสารละลายเลย เมื่อน้ำเข้ามีแคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร) ที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างที่ 2 ความเข้มข้นแคดเมียมจะอยู่ในช่วง 0.00 ถึง 0.04 0.02 ถึง 0.15 และ 0.14 ถึง 0.26 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเท่ากับ 5 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างที่ 3 ความเข้มข้นแคดเมียมจะอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.03 0.00 ถึง 0.09 และ 0.05 ถึง 0.16 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างที่ 4 ความเข้มข้นแคดเมียมจะอยู่ในช่วง 0.00 ถึง 0.03 0.00 ถึง 0.06 และ 0.03 ถึง 0.08 ตามลำดับ และที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างที่ 5 ความเข้มข้นแคดเมียมจะอยู่ในช่วง 0.00 ถึง 0.04 0.00 ถึง 0.06 และ 0.01 ถึง 0.07 ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.14 ปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยและประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมจากสารละลายที่ระยะใด ๆ ในระบบที่มีตัวกลางดินปนทราย



รูปที่ 5.15 ปริมาณแคดเมียมในบ่อตัวอย่างของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีตัวกลางดินปนทราย

3) ตัวกลางดิน

ที่แคดเมียมในน้ำเข้ามีความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมเฉลี่ยเท่ากับ 52.82 100 100 100 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะ 0 15 30 45 และ 60 เซ็นติเมตร ตามลำดับ และที่ ความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมเฉลี่ยของระบบเท่ากับ 83.10 99.79 99.85 99.89 และ 99.89 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มปริมาณแคดเมียมในน้ำเข้าให้มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมเฉลี่ยเท่ากับ 87.20 99.33 99.66 99.75 และ 99.75 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมเฉลี่ยเท่ากับ 71.01 98.59 99.62 99.73 และ 99.73 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังตารางที่ 5.11

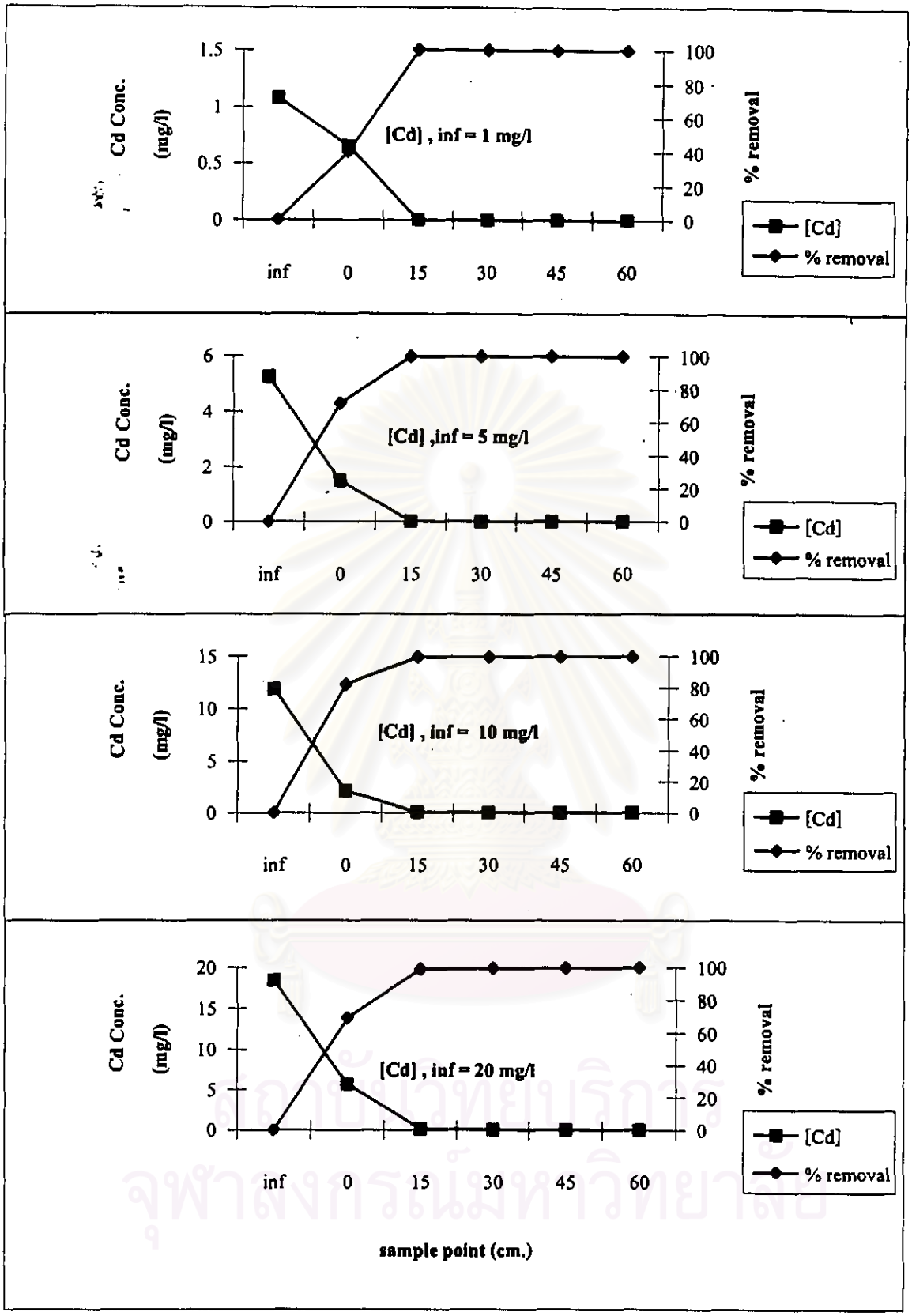
ตารางที่ 5.11 ปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยและประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมจากสารละลายที่ระยะใด ๆ ในระบบบึงประดิษฐ์ที่มีตัวกลางดิน

ชุดทดลองที่		Cd ในสารละลาย ที่ตำแหน่ง....(ซม.) , มก./ล.						
		inf	1	2	3	4	5	eff
1-3	[Cd]	1.081	0.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	% การกำจัด	0	52.82	100	100	100	100	100
2-3	[Cd]	5.25	0.887	0.011	0.008	0.006	0.006	0.007
	% การกำจัด	0	83.10	99.79	99.85	99.89	99.89	99.87
3-3	[Cd]	11.88	1.52	0.08	0.04	0.03	0.03	0.029
	% การกำจัด	0	87.20	99.33	99.66	99.75	99.75	99.73
4-3	[Cd]	18.42	5.34	0.26	0.07	0.05	0.05	0.034
	% การกำจัด	0	71.01	98.59	99.62	99.73	99.73	99.82

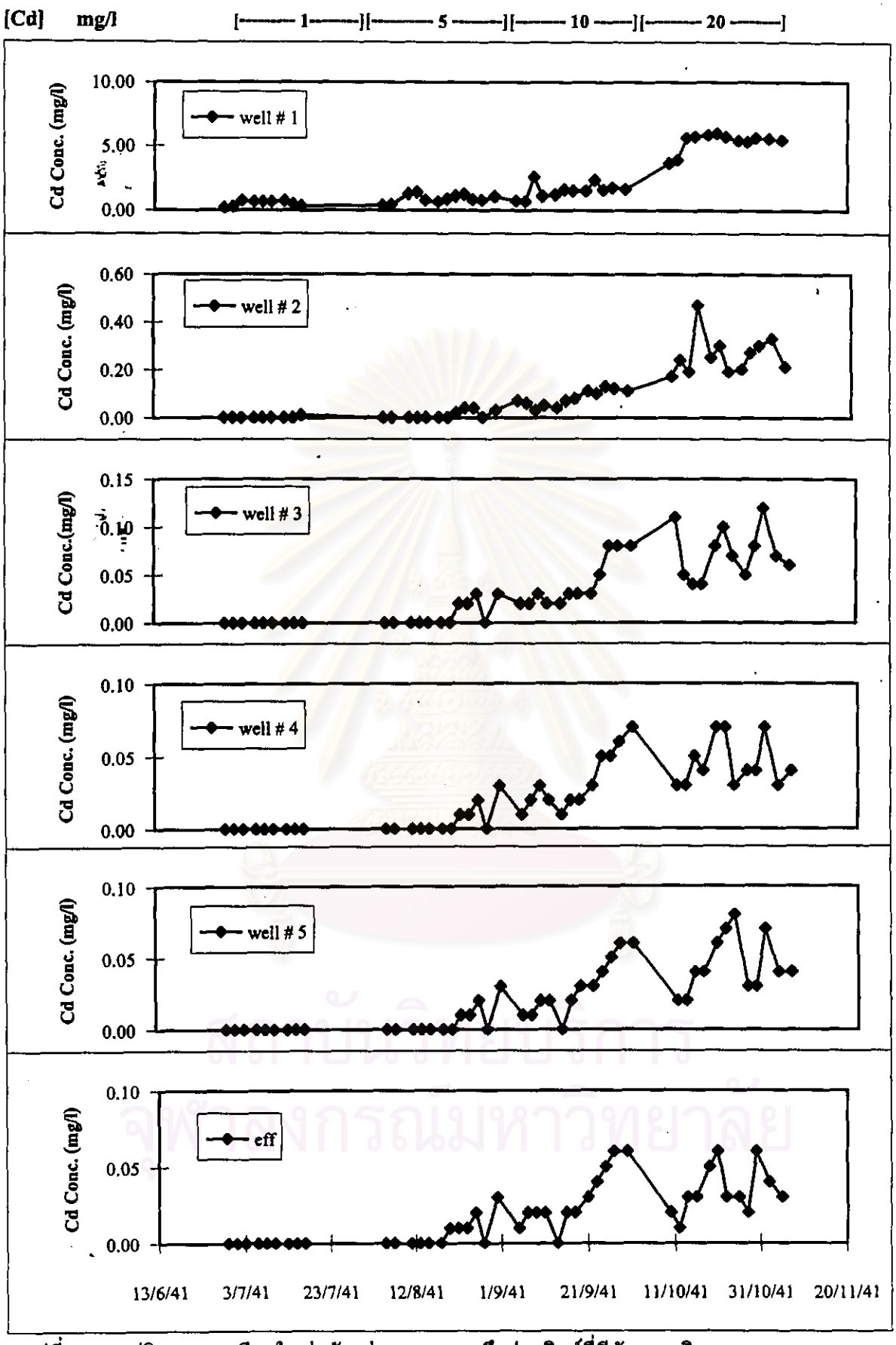
จากผลการทดลอง ที่ $[Cd]_{inf}$ เท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบสามารถกำจัดแคดเมียมในน้ำเข้าได้หมด คือมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมถึง 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อน้ำเข้าผ่านเข้าไปในระบบได้ 15 เซ็นติเมตร และที่ตำแหน่งเดียวกันนี้ เมื่อเพิ่ม $[Cd]_{inf}$ เท่ากับ 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ โดยที่เมื่อเพิ่ม $[Cd]_{inf}$ เท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร แคดเมียมจะถูกกำจัดได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์เมื่อผ่านตัวกลางไปในระยะ 30 เซ็นติเมตร ดังรูปที่ 5.16

สำหรับในส่วนแรกของตัวกลางดินเริ่มอิ่มตัวเมื่อป้อน $[Cd]_{inf}$ เท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เข้าไปในระบบเช่นเดียวกันกับตัวกลางทั้ง 2 ชนิดข้างต้น โดยที่ $[Cd]_{inf}$ เท่ากับ 1 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรนั้น ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมเป็น 52.82 83.10 และ 87.20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และลดลงเป็น 71.01 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่ม $[Cd]_{inf}$ เท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

โดยปริมาณแคดเมียมในน้ำเข้าขณะไหลผ่านบ่อเก็บตัวอย่าง ในตำแหน่งที่ 1 2 3 4 และ 5 ที่ระยะทาง 0 15 30 45 และ 60 เซ็นติเมตร พบว่าเมื่อปริมาณแคดเมียมในสารละลายเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการทดลองเพิ่มขึ้น นั่นคือที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างที่ 1 ความเข้มข้นแคดเมียมจะอยู่ในช่วง 0.18 ถึง 0.73 0.36 ถึง 1.38 0.97 ถึง 2.58 และ 3.66 ถึง 6.01 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเท่ากับ 1 5 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างที่ 2 ถึง 5 ไม่พบว่ามีแคดเมียมในสารละลายเลย เมื่อน้ำเข้ามีแคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร) ที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างที่ 2 ความเข้มข้นแคดเมียมจะอยู่ในช่วง 0.00 ถึง 0.04 0.03 ถึง 0.13 และ 0.17 ถึง 0.47 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเท่ากับ 5 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างที่ 3 ความเข้มข้นแคดเมียมจะอยู่ในช่วง 0.00 ถึง 0.03 0.02 ถึง 0.08 และ 0.04 ถึง 0.12 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างที่ 4 ความเข้มข้นแคดเมียมจะอยู่ในช่วง 0.00 ถึง 0.03 0.01 ถึง 0.07 และ 0.03 ถึง 0.07 ตามลำดับ และที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างที่ 5 ความเข้มข้นแคดเมียมจะอยู่ในช่วง 0.00 ถึง 0.03 0.01 ถึง 0.06 และ 0.02 ถึง 0.08 ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.17



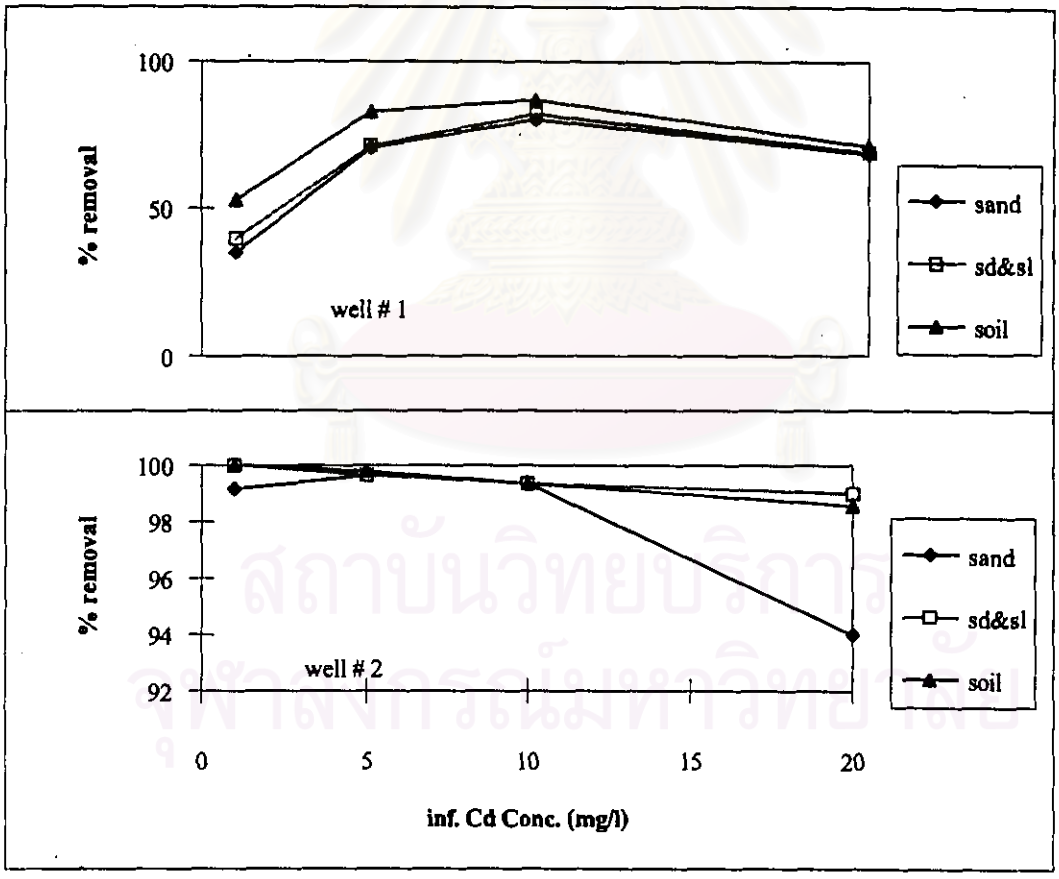
รูปที่ 5.16 ปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยและประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมจากสารละลายที่ระยะใด ๆ ในระบบที่มีตัวกลางดิน



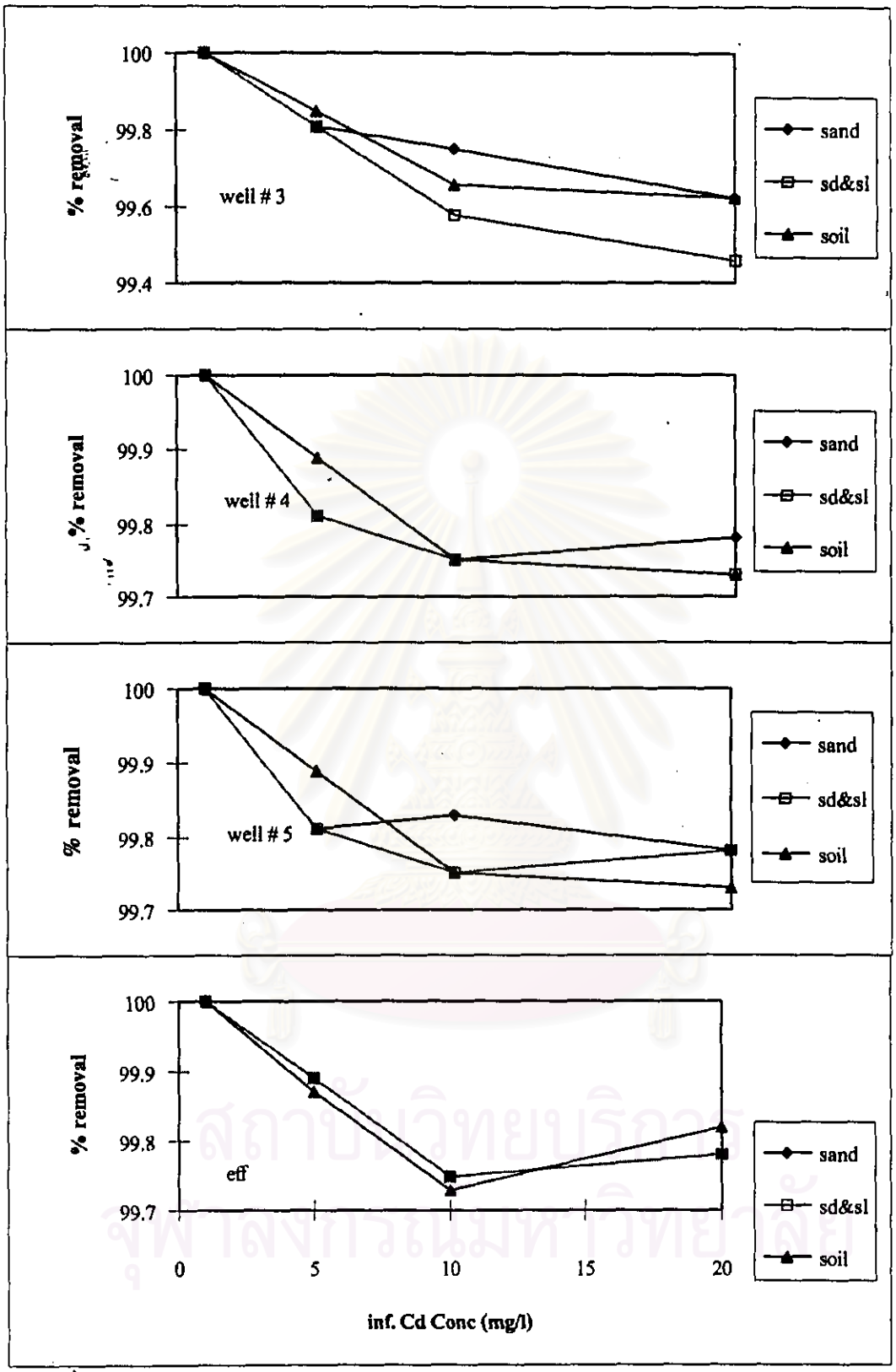
รูปที่ 5.17 ปริมาณแคดเมียมในบ่อตัวอย่างของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีตัวกลางดิน

4) เปรียบเทียบการกำจัดในส่วนต่าง ๆ ของระบบสำหรับตัวกลางทั้ง 3 ชนิด

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าการกำจัดแคดเมียมส่วนใหญ่เกิดขึ้น ที่ส่วนแรกของตัวกลางทั้ง 3 ชนิด มีโดยสามารถเปรียบเทียบได้ดังนี้คือ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเข้าเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมเท่ากับ 35.24 39.87 และ 52.82 เปอร์เซ็นต์ ในตัวกลางทราย ดินปนทราย และดิน ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเข้าเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากับ 70.29 71.43 และ 83.10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเข้าเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากับ 80.30 82.15 และ 87.20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเข้าเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากับ 68.46 69.05 และ 71.01 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับดังรูปที่ 5.18 นั่นก็แสดงว่าระบบบึงประดิษฐ์ที่มีตัวกลางดินมีประสิทธิภาพในการสะสมแคดเมียมในระบบได้มากกว่าดินปนทราย และทราย ตามลำดับ



รูปที่ 5.18 ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างต่าง ๆ ของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีตัวกลางต่างกัน



รูปที่ 5.18 ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างต่าง ๆ ของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีตัวกลางต่างกัน (ต่อ)

5.3.3 การเก็บสะสมแคดเมียมในตัวกลางในระบบบึงประดิษฐ์

1) ในระบบบึงประดิษฐ์

เมื่อพิจารณาจากค่าพีเอชและค่าโออาร์พีที่เกิดขึ้นในระบบของตัวกลางทั้ง 3 ชนิด ก็สามารถระบุได้ว่ากระบวนการที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดจากการดูดซับโดยตัวกลาง ซึ่งปริมาณแคดเมียมในตัวกลางทั้งที่ละลายน้ำได้และถูกย่อยด้วยกรดชนิดต่าง ๆ ซึ่งเก็บสะสมในตัวกลางตลอดการทดลอง รวมแล้วมีค่าดังตารางที่ 5.12 โดยตัวอย่างตัวกลางที่ผ่านการอบที่ 105 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 5.19

รูปที่ 5.19 แสดงตัวอย่างของตัวกลาง ทราย ดินปนทราย และดิน หลังอบที่ 105 °C

ตารางที่ 5.12 ปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยในตัวกลาง

ตัวกลาง	Cd (มก./กก.ตัวกลาง)	Cd ที่สะสมในระบบ (มก.)
ทราย	65.9	3824.31
ดินปนทราย	81.1	4099.12
ดิน	109.3	4706.02

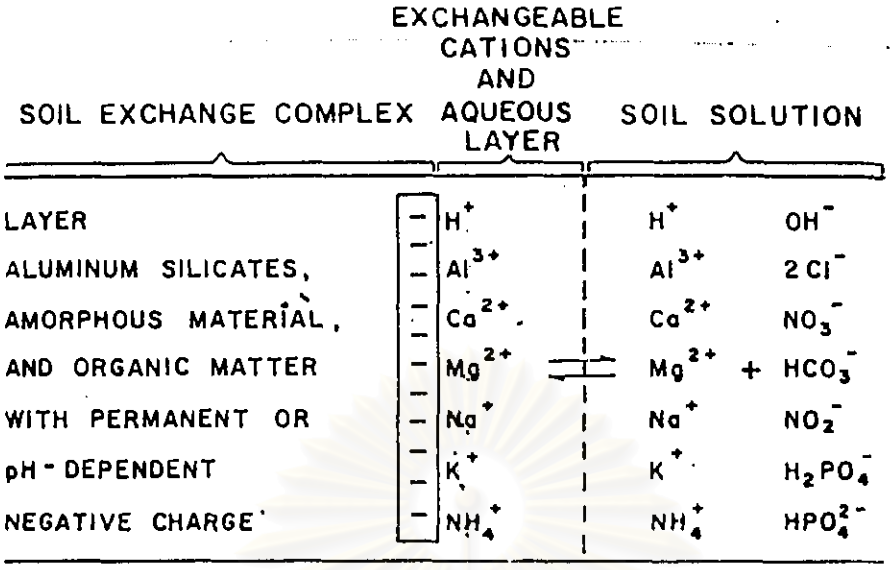
ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในตัวกลางแต่ละชนิดนั้นมีค่าแตกต่างกันมาก เนื่องจากมีกลไกการดูดซับแคดเมียมไม่เหมือนกัน โดยดินจะมีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมได้เร็วและแน่นกว่าทรายดังจะเห็นได้จากกราฟการการกำจัดแคดเมียมที่ระยะต่างๆ ของระบบซึ่งแสดงให้เห็นว่าแคดเมียมความเข้มข้นเดียวกันเมื่อถูกดูดซับโดยดิน ความเข้มข้นแคดเมียมในสารละลาย (ปริมาณเท่ากัน) จะลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งต่างกับตัวกลางทราย ที่ค่อย ๆ ลดลง ส่วนเหตุผลที่ว่าดินมีความสามารถในการจับแคดเมียมได้แน่นกว่าทรายนั้น จะเห็นได้จากค่าการชะละลายของทรายและดิน ซึ่งโดยเฉลี่ย ทราย ดินปนทราย และดิน ถูกชะละลายด้วยกรดเท่ากับ 52.25% 12.97 % และ 5.34 % ตามลำดับ

5.3.4 กลไกการกำจัดแคดเมียมโดยตัวกลาง

1) ทราย

องค์ประกอบส่วนใหญ่ของทรายคือซิลิกาซึ่งจะฟอร์มอยู่ในรูปของออกไซด์ ซึ่งมีประจุที่ผิวเป็นลบถาวรโดยเกิดจากแทนที่ แบบนอนสตอยคิโอเมตริก ไอโซมอร์ฟัส ของประจุบวกภายในโครงสร้าง โดยทั่วไป Al^{+} แทนที่ Si^{+} ในเตตระฮีดรัล ชีท ในช่องว่างระหว่างชั้นจะเกิดพันธะโดย Si-O-Si เตตระฮีดรัล ชีท ซึ่งจะมีประจุเป็นลบ (-1) ชั้นประจุที่เป็นลบ (negative layer charge) ถูกทำให้สมดุลโดยการดูดซับหรือแตกตัวของประจุตรงข้าม

การแลกเปลี่ยนประจุของมิเนอรัล เฟส ไม่เป็นที่เข้าใจกันดีนักแต่คิดว่าในขั้นต้นเป็นผลมาจากการแตกตัวของไฮโดรเจนอิออนจากโครงสร้างที่อยู่ริมผลึกของอลูมิโนซิลิเกต มิเนอรัล (Aluminosilicate mineral) โดยมีปฏิกริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวดังรูป 5.20 แต่โดยทั่วไปแล้วความจุในการแลกเปลี่ยน (exchange capacity) โดยส่วนมากจะอิ่มตัวด้วยประจุบวกสามัญ (commom cation) ในรูปของ Ca^{2+} และ Na^{+} ดังนั้นเมื่อป้อนน้ำเสียที่มีโลหะหนักเข้าไปจะเกิดการแทนที่โดยปล่อยอิออนบวกสามัญเหล่านี้ออกมาโดยโครงสร้างของอลูมิโนซิลิเกต ดังเช่น $NaAlSi_3O_8$ เป็นต้น แต่เนื่องจากก่อนการป้อนแคดเมียมเข้าไปในระบบจะมีโปตัสเซียมในสารละลายที่ป้อนเข้าระบบอยู่แล้วดังนั้นโครงสร้างของอลูมิโนซิลิเกต จึงควรอยู่ในรูปของ $KAlSi_3O_8$ ดังรูป 5.21 (ก) สำหรับปฏิกริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในระบบ คือการดูดซับ (adsorption) นั่นคือแคดเมียมในสารละลายจะถูกดูดซับโดยประจุลบที่ผิวของทราย ในรูป $AlSi_3O_8Cd^{+}$ และ $AlSi_3O_8Cd^{2+}$ ดังสมการ 5.2 และ 5.3

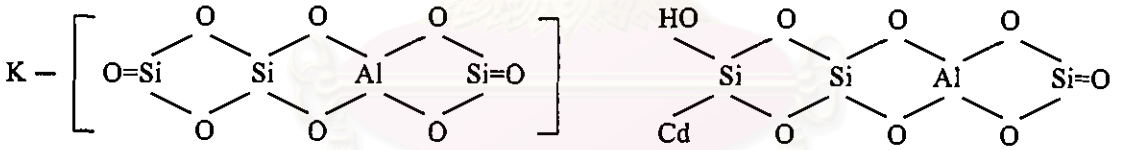


รูปที่ 5.20 ปรากฏการที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 เฟส

(Murramann & Koutz , 1972)

$$KAlSi_3O_8 + Cd^+ \rightleftharpoons AlSi_3O_8Cd^+ + K^+ \qquad (5.2)$$

$$2\,KAlSi_3O_8 + Cd^+ \rightleftharpoons (AlSi_3O_8)_2Cd + 2K^+ \qquad (5.3)$$



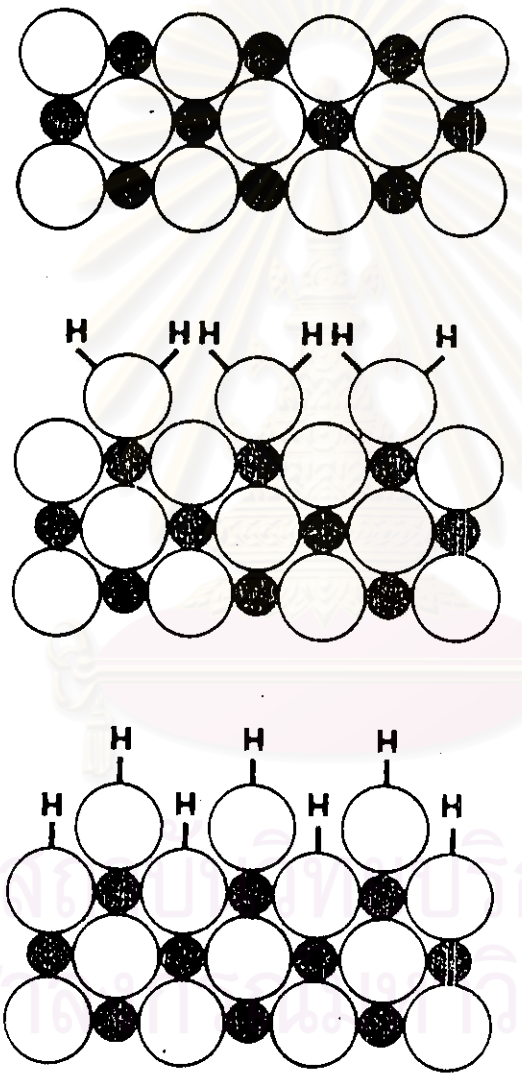
(ก) $KAlSi_3O_8$ (ข) $CdAlSi_3O_7(OH)$

รูปที่ 5.21 โครงสร้างเตตระฮีดรัลของอลูมิโนซิลิเกต

แต่จากการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเข้าเป็น 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชของน้ำเข้าลดลงแต่พีเอชของน้ำออกจากระบบที่มีตัวกลางทรายกลับสูงขึ้นดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่า Cd อาจจะทำปฏิกริยากับ Si ที่อยู่ริมผลึกดังสมการที่ 5.4 รูปที่ 5.21(ข)

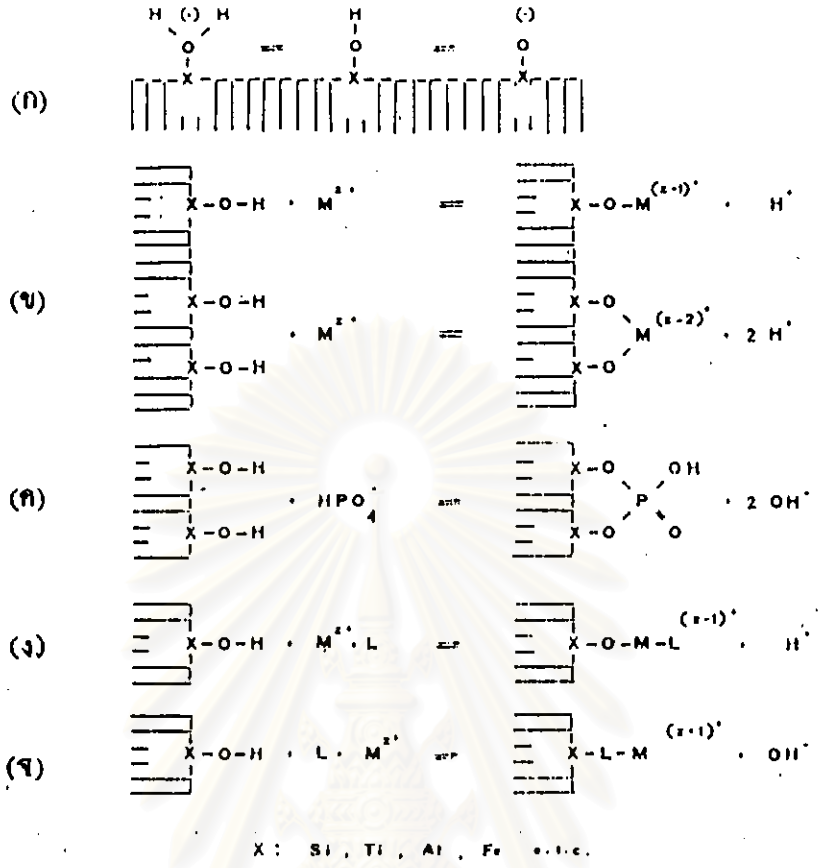
$$KAlSi_3O_8 + Cd^+ + H_2O \rightleftharpoons CdAlSi_3O_7(OH) + K^+ + OH^- \qquad (5.4)$$

แต่สำหรับการดูดซับที่เป็นกระบวนการจับและยึดไว้ (sorption , Catch-all and fixation process) ภายในโครงสร้างของอลูมิโนซิลิเกต จะไม่เกิดขึ้น เนื่องจากแคดเมียมมีขนาดโมเลกุลใหญ่ (ธาตุที่มีรัศมีอิออนระหว่าง 0.52 และ 0.93 A สามารถเกิดขึ้นได้) นอกจากนี้แล้ว แคดเมียมอาจจะถูกดูดซับบนโลหะออกไซด์ที่อยู่ในสารละลายโดยฟอร์มไฮดรอกซิลกรุ๊ปบนผิวของ Fe_2O_3 เป็นต้น ดังรูปที่ 5.22 และ 5.23



รูปที่ 5.22 ภาคตัดชั้นผิวของโลหะออกไซด์

(Anderson & Rubin , 1981)



รูปที่ 5.23 ปรากฏการระหว่างผิวออกไซด์และน้ำ (Anderson & Rubin , 1981)

ก) ปฏิกริยากรด-เบส ของผิวไฮดรอกซิลกรุ๊ป

ข) การแทนที่ประจุบวกที่ผิวไฮดรอกซิลด้วยประจุโลหะหนัก

ค) ไฮดรอกซิลที่ผิวถูกแทนที่ด้วยลิแกนด์

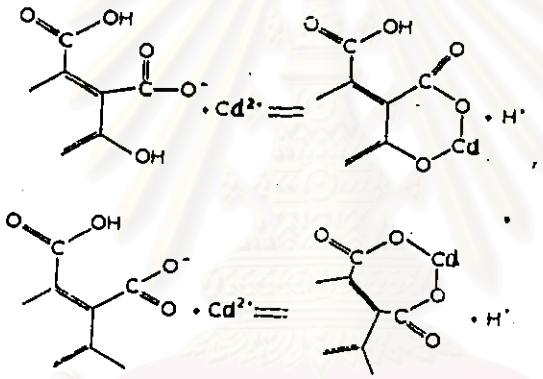
ง) การแทนที่ประจุบวกที่ผิวไฮดรอกซิลด้วยประจุโลหะหนักที่จับกับลิแกนด์

จ) การแทนที่ประจุบวกที่ผิวไฮดรอกซิลด้วยลิแกนด์ที่จับกับประจุโลหะหนัก

จากการทดลองความเข้มข้นของเหล็กเฉลี่ยทั้งหมดในน้ำเข้าเท่ากับ 0.048 มิลลิกรัมต่อลิตร ตลอดการทดลองซึ่งจัดว่ามีปริมาณน้อย กระบวนการนี้จึงเกิดขึ้นได้เป็นส่วนน้อยในระบบ จากการทดสอบการดูดซับแคดเมียมบนดัวกลางทราย มีค่า k เท่ากับ 0.5288 ลิตรต่อกรัม

2) ดิน

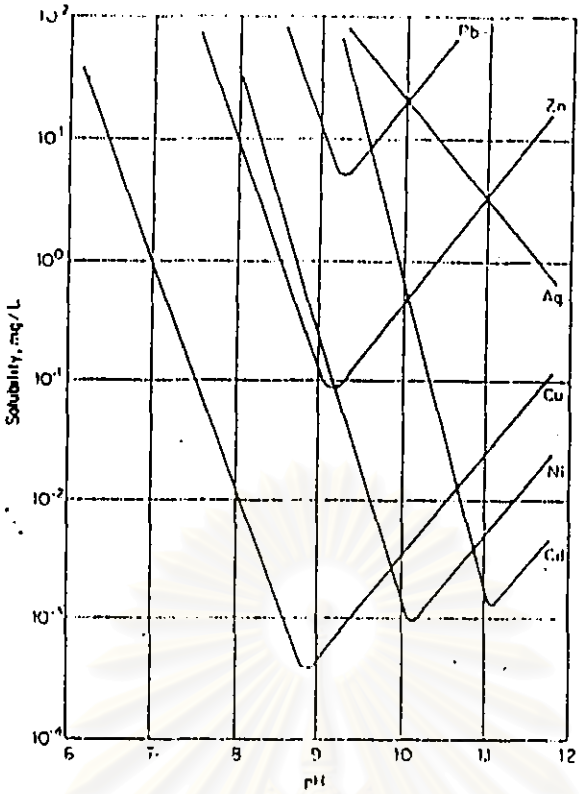
ดินมีองค์ประกอบส่วนใหญ่คือสารอินทรีย์ซึ่งดินที่ใช้ในการทดลองมีสารอินทรีย์ถึง 71 มิลลิกรัมต่อกรัม โลหะสามารถถูกดูดซับอย่างแน่นหนาโดยสารอินทรีย์ที่เป็นเฟสของแข็ง หรือเกิดสารเชิงซ้อนโดยสารฮิวมิกซึ่งประกอบด้วย กรดฮิวมิก และ กรดฟัลวิก ซึ่งจะฟอร์มสารเชิงซ้อนที่คงตัวกับอิออนบวกของโลหะซึ่งจะป้องกันอิออนบวกจากปฏิกริยาไฮโดรไลสิส และการตกตะกอน โดยใช้ฟังก์ชันกรุ๊ปคือ คาร์บอกซีลิกกรุ๊ป (COOH) และไฮดรอกซิลกรุ๊ป (OH) โดยแคดเมียมสามารถเกิดปฏิกริยากับสารฮิวมิก ดังรูปที่ 5.24



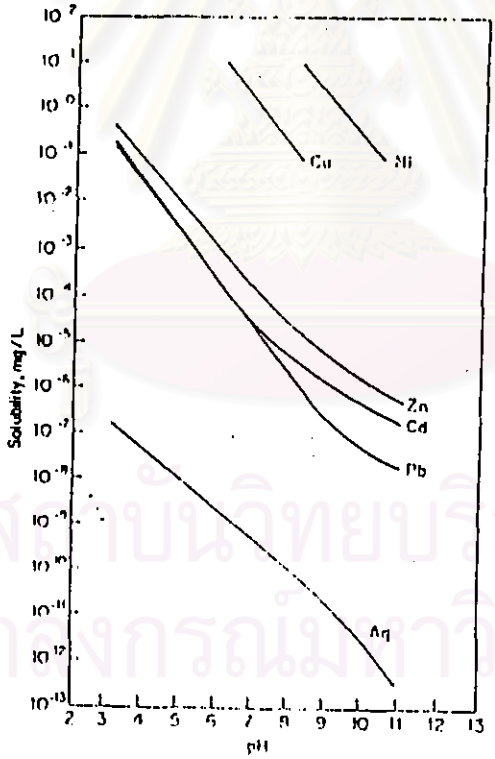
รูปที่ 5.24 การเกิดสารเชิงซ้อนระหว่างสารอินทรีย์กับโลหะ

สารฮิวมิกเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้ค่า CEC ของดินสูง จากข้อมูลการดูดซับแคดเมียมของตัวกลาง จะเห็นได้ว่าดินที่ใช้ในการทดลองมีค่าความสามารถในการดูดซับแคดเมียมสูงกว่าทรายคือมีค่า k เท่ากับ 1.6565 ลิตรต่อกรัม คิดเป็น 3.13 เท่า ที่ช่วงพีเอชเป็นกลาง

นอกจากกระบวนการที่เกิดขึ้นเนื่องจากสมบัติของดินและทรายแล้วการตกตะกอนก็เป็นส่วนหนึ่งที่น่าจะเกิดขึ้นเช่น $CdCO_3$ ที่พีเอชมากกว่า 8 $CdPO_4$ ที่พีเอชเป็นกลางและ $Cd(OH)_2$ ที่พีเอชมากกว่า 10 แต่ในระบบไม่น่าจะเกิดขึ้น(หรือมีเป็นส่วนน้อยสำหรับ $CdCO_3$ ซึ่งมีคาร์บอร์เนตในน้ำประปาค่อนข้างสูง) ดังค่าความสามารถในการละลายของแคดเมียมที่พีเอชต่าง ๆ ดังรูป 5.25



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.25 ความสามารถในการละลาย

(ก) โลหะไฮดรอกไซด์

(ข) โลหะซัลไฟด์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.4 การดูดซับแคดเมียมของตัวกลาง

ในระบบบึงประดิษฐ์นั้นองค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งในระบบคือ ตัวกลาง ซึ่งการสะสมโลหะในตัวกลางก็เป็นส่วนหนึ่งในกลไกการกำจัดของระบบประเภทนี้ จากการทดลองมีการนำตัวกลาง 3 ประเภทคือ ทราย ดินปนทราย (อัตราส่วน 1:1) และดิน มาใช้ในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

จากการทดลองได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของตัวกลางทรายและดินนั้น ทำการทดลองโดยใช้ตัวกลางที่ต้องการศึกษาจำนวน 5 กรัม ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 103 ถึง 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำไปใส่ในกระป๋องพลาสติกขนาด 1000 มิลลิลิตร เติมสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 5 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรแคดเมียม ในแต่ละชุดการทดลอง จำนวน 500 มิลลิลิตร นำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าในอัตรา 100 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 5.26 และเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในสารละลายนั้น ตามเวลาจนเข้าสู่สมดุล ข้อมูลดังตารางที่ 5.13 และแสดงปริมาณแคดเมียมในสารละลายเมื่อเวลาผ่านไป ดังรูป 5.27 และ 5.28

รูปที่ 5.26 ชุดการทดลองความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของตัวกลาง

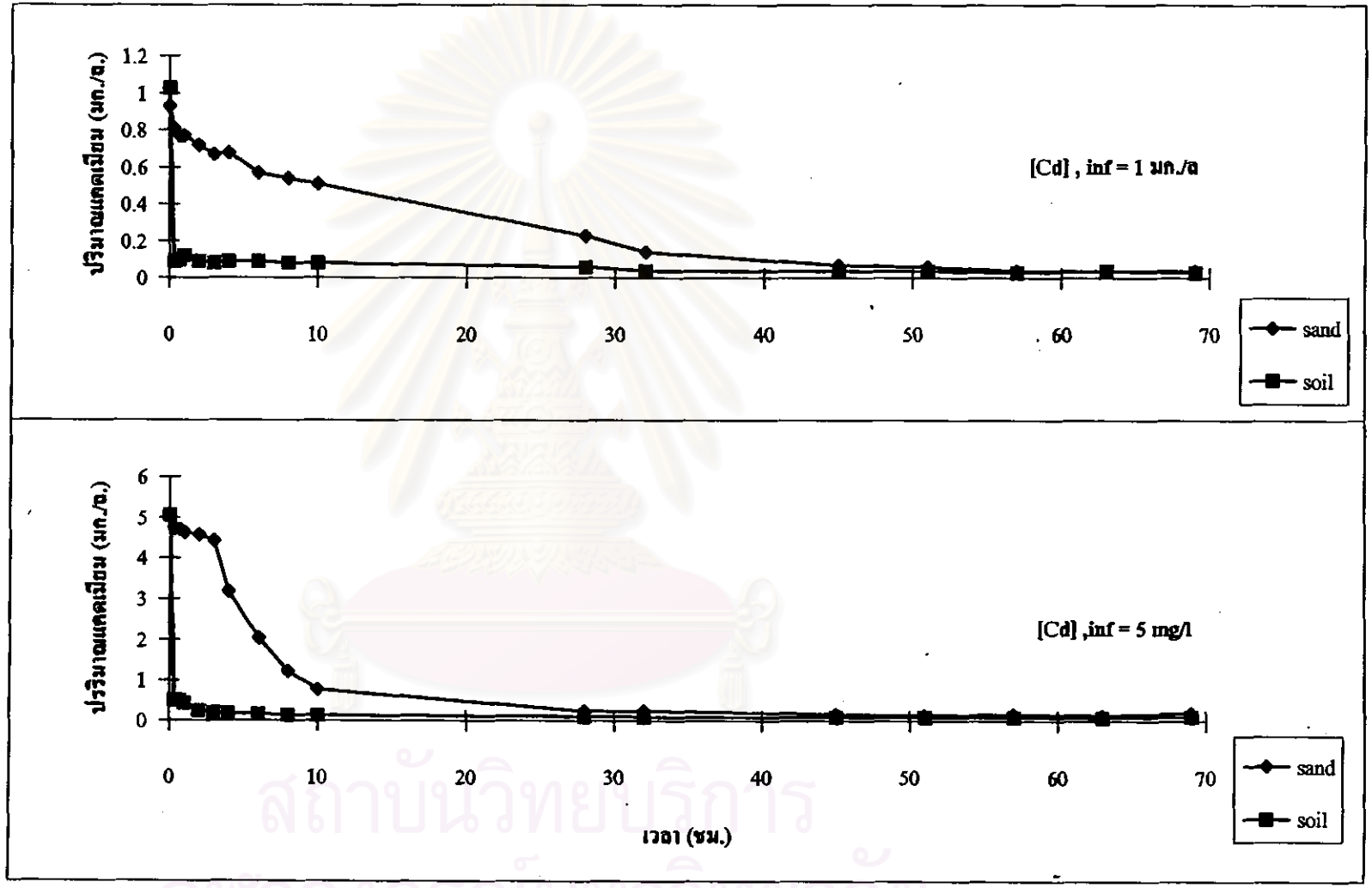
ตารางที่ 5.13 ปริมาณแคดเมียมในสารละลายที่ถูกดูดซับโดยทรายและดิน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 1 5 10 และ 20 มก./ล. ตามลำดับ

เวลา(ชม.)	[Cd] ที่เหลือในสารละลาย (มก./ล.)							
	ทราย				ดิน			
	1	5	10	20	1	5	10	20
0	0.93	5.05	9.40	19.20	1.03	5.06	9.40	19.30
20 นาที	0.81	4.72	9.20	18.70	0.09	0.52	8.70	15.30
40 นาที	0.77	4.71	8.80	18.40	0.10	0.50	6.20	12.40
1	0.77	4.63	9.00	18.10	0.12	0.44	5.35	10.40
2	0.72	4.57	7.15	16.70	0.09	0.25	2.09	10.60
3	0.67	4.43	6.95	11.60	0.08	0.20	1.53	2.10
4	0.68	3.18	6.00	6.60	0.09	0.18	1.45	1.50
6	0.57	2.04	5.85	3.20	0.09	0.17	0.95	1.20
8	0.54	1.22	3.50	4.92	0.08	0.14	0.84	1.04
10	0.51	0.78	1.65	4.55	0.08	0.13	0.83	0.90
24	0.26	0.38	*	*	0.07	0.12	*	
28	0.23	0.24	0.64	1.56	0.06	0.11	0.44	0.95
32	0.14	0.24	0.59	1.23	0.04	0.09	0.35	0.84
45	0.07	0.16	*	*	0.04	0.10	*	
51	0.06	0.14	0.53	0.64	0.04	0.09	0.27	0.51
57	0.04	0.16	0.43	0.55	0.03	0.09	0.27	0.28
63	0.04	0.14	*	*	0.04	0.08	*	
69	0.04	0.21	*	*	0.03	0.11	*	
75	*	*	0.29	0.39	*	*	0.20	0.30
81	*	*	0.24	0.32	*	*	0.21	0.28

* ไม่เก็บตัวอย่าง

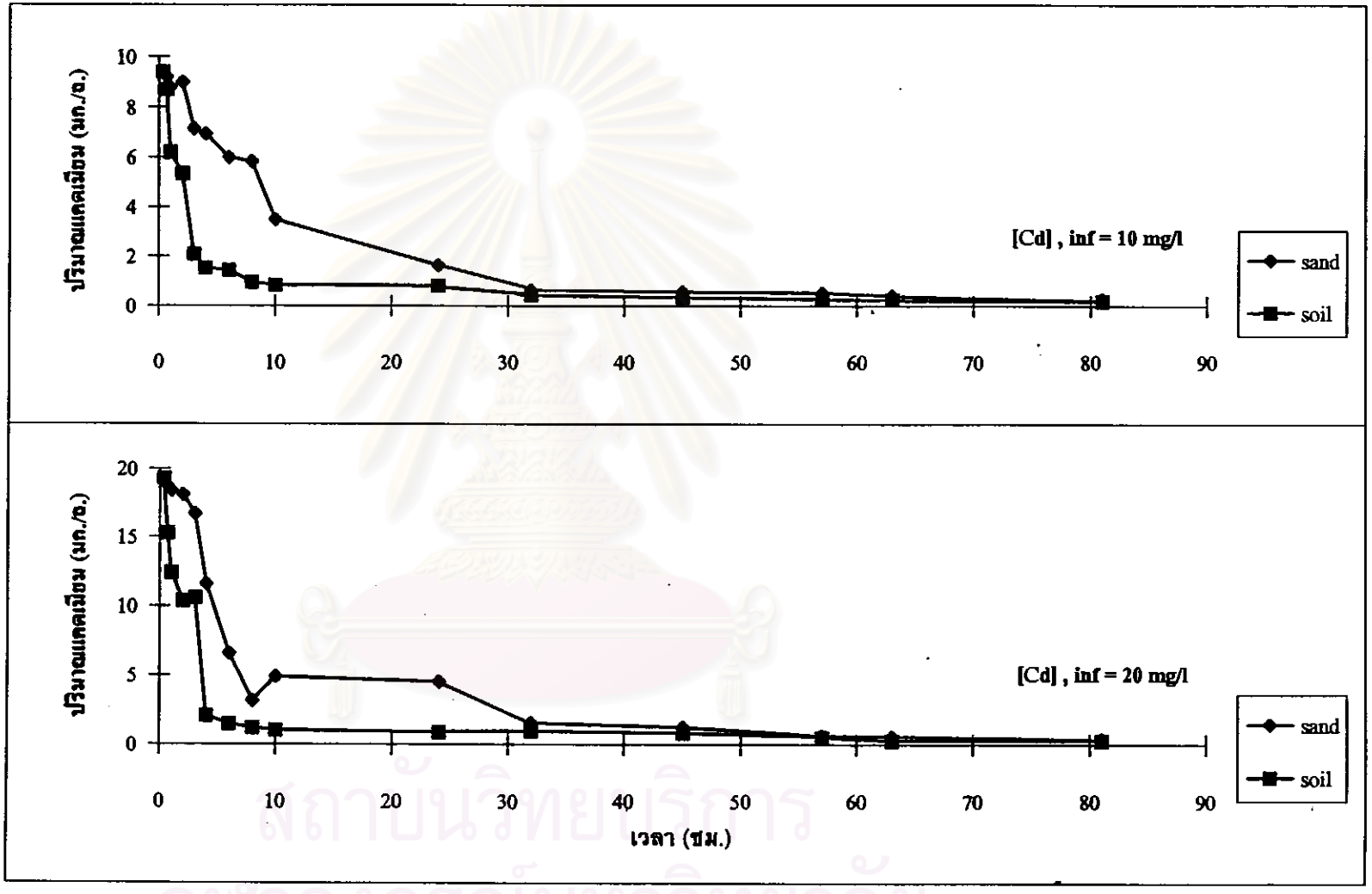
- ปริมาณการดูดซับแคดเมียมสูงสุด : ทราย 13.9 มก./ก.

ดิน 17.9 มก./ก.



รูปที่ 5.27 แสดงความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของตัวกลางต่อเวลา ที่ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้นเป็น 1 และ 5 มก./ล.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.28 แสดงความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของตัวกลางต่อเวลา ที่ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้นเป็น 10 และ 20 มก./ล.

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ที่ความเข้มข้นต่ำตัวกลางดินสามารถดูดซับแคดเมียมจากสารละลายเริ่มต้นได้อย่างรวดเร็ว ภายใน 20 นาทีแรก สามารถดูดซับแคดเมียมได้ถึง 91.26 และ 89.72 เปอร์เซ็นต์ เมื่อแคดเมียมเริ่มต้นเท่ากับ 1 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนที่แคดเมียมเริ่มต้นเท่ากับ 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ดินสามารถดูดซับแคดเมียมได้ 89.89 และ 89.12 เปอร์เซ็นต์ที่ 3 ชั่วโมงแรกของการทดลอง หลังจากนั้นความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลายจะค่อย ๆ ลดลงจนถึงจุดสมดุลที่ 0.04 0.09 0.21 และ 0.28 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้นในสารละลายเท่ากับ 1 5 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่เวลา 32 และ 81 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการดูดซับแคดเมียมโดยตัวกลางดินอย่างเดียวไม่สามารถกำจัดแคดเมียมให้มีความเข้มข้นต่ำกว่าที่มาตรฐานน้ำทิ้งกำหนดได้

สำหรับในตัวกลางทรายแคดเมียมในสารละลายจะถูกดูดซับได้ช้ากว่าตัวกลางดินซึ่งปริมาณแคดเมียมจะลดลงอย่างช้า ๆ ตลอดเวลาของการทดลอง และจะเข้าสู่สมดุลเมื่อทำการทำการทดลองผ่านไป 45 ชั่วโมง สำหรับความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้นที่ 1 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 75 ชั่วโมงที่ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้นที่ 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่สมดุลจะมีปริมาณแคดเมียมเท่ากับ 0.04 0.14 0.24 และ 0.32 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้นในสารละลายเท่ากับ 1 5 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งที่ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้นต่ำที่สุด 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ทรายอย่างเดียวก็ไม่สามารถกำจัดแคดเมียมให้มีความเข้มข้นต่ำกว่าที่มาตรฐานน้ำทิ้งกำหนดได้เช่นกัน

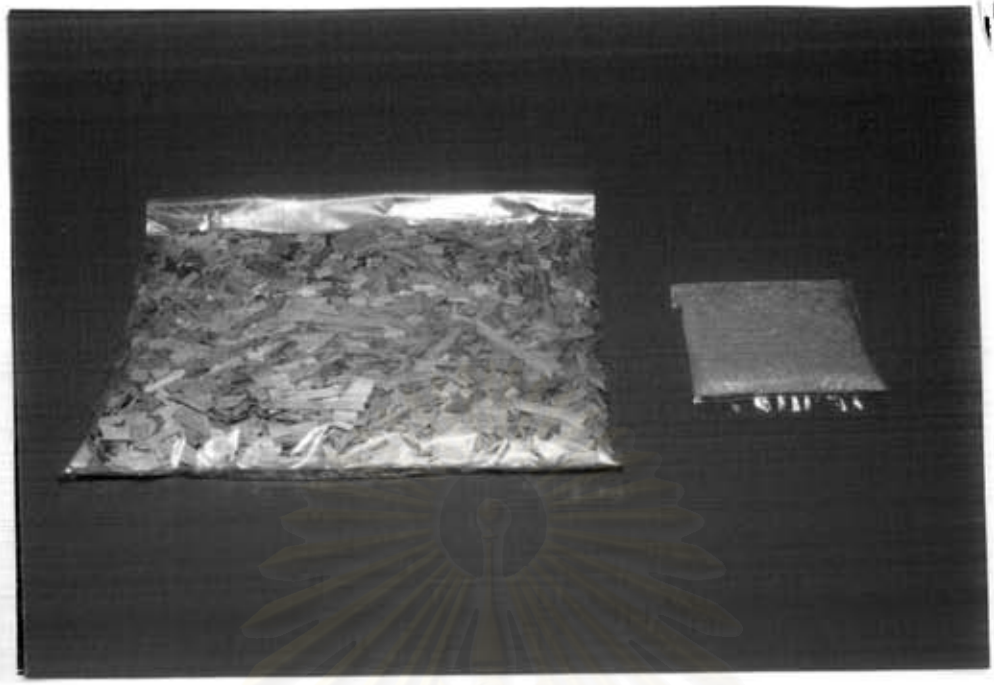
5.5 การสะสมแคดเมียมในพืช

กลไกที่เกิดขึ้นในการบำบัดแคดเมียมโดยระบบบึงประดิษฐ์นอกจากโดยตัวกลางแล้วส่วนหนึ่งก็เป็นการสะสมของแคดเมียมในพืช จากการทดลองต้นธูปฤาษีจะถูกนำมาวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในส่วนต่าง ๆ ดังรูปที่ 5.29 โดยข้อมูลที่ได้ดังตาราง 5.14 และ 5.15

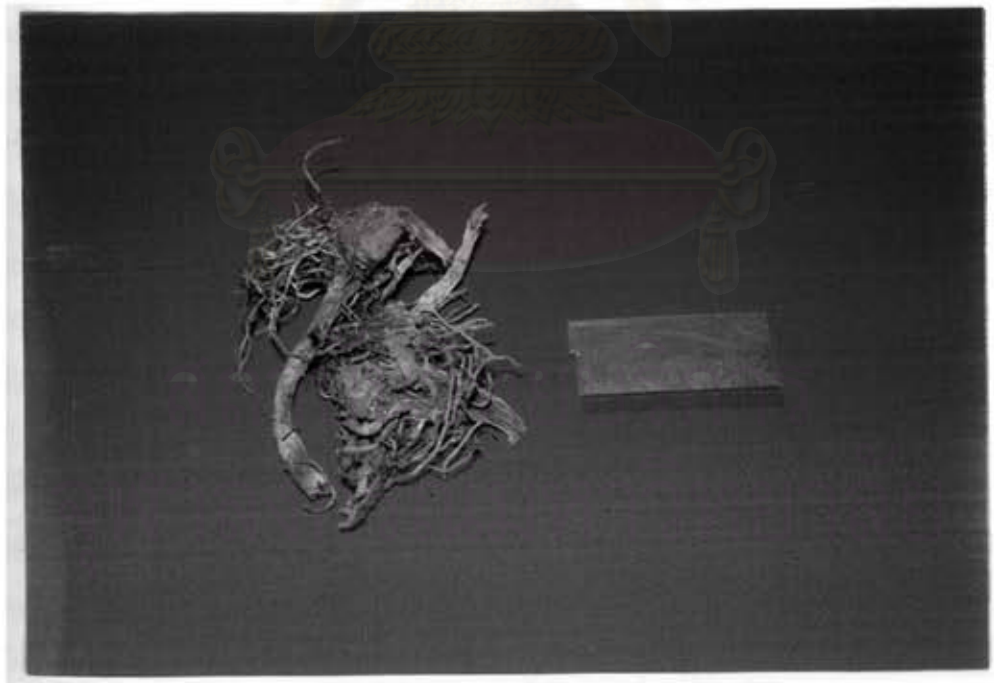
ตารางที่ 5.14 ปริมาณแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของพืช (dry weight basis)

ตัวกลาง	ความเข้มข้น Cd (มก./ก.)		
	ใบ	ต้น	ราก
ทราย	0.0082	0.0323	0.1442
ดินปนทราย	0.0088	0.0416	0.0296
ดิน	0.0006	0.0345	0.0560

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) ต้นและใบ ก่อนและหลังการบด



(ข) ราก ก่อนและหลังการบด

รูปที่ 5.29 แสดงส่วนต่างของพืชหลังจากอบที่ 105 C เป็นเวลา 24 ชม.

ตารางที่ 5.15 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในส่วนต่าง ๆ ของพืช (dry weight basis)

ตัวกลาง	Cd ที่สะสมในพืช (มก.)				% Cd ที่สะสมในพืช		
	ใบ	ต้น	ราก	ทั้งหมด	ใบ	ต้น	ราก
ทราย	0.4185	0.8417	2.0432	3.3032	12.67	25.48	61.85
ดินปนทราย	0.5912	1.5980	0.7247	2.9139	20.29	54.84	24.87
ดิน	0.5938	1.5834	1.6188	3.7960	15.64	41.71	42.65

จากตารางข้างต้น จะเห็นได้ว่าส่วนใหญ่แล้วแคดเมียมจะสะสมอยู่ที่ต้นและรากพืช โดยจะมีการสะสมอยู่ในใบในปริมาณที่ใกล้เคียงกันทั้งในตัวกลางทราย ดินปนทราย และดิน สำหรับตัวกลางทราย ปริมาณแคดเมียมที่สะสมอยู่ในใบ ต้น และรากนั้น เท่ากับ 0.4185 0.8417 และ 2.0432 มิลลิกรัม (หรือเท่ากับ 12.67 25.48 และ 61.85 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณแคดเมียมที่สะสมในพืช) ตามลำดับ สำหรับตัวกลางดินปนทรายเท่ากับ 0.5912 1.5980 และ 0.7247 มิลลิกรัม (หรือเท่ากับ 20.29 54.84 และ 24.87 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณแคดเมียมที่สะสมในพืช) และเท่ากับ 0.5938 1.5834 และ 1.6188 มิลลิกรัม (หรือเท่ากับ15.64 41.71 และ 42.65 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณแคดเมียมที่สะสมในพืช) สำหรับตัวกลางดิน โดยพบว่าพืชในตัวกลางทรายและดินนั้นมีแคดเมียมสะสมอยู่ในส่วนรากมากที่สุด รองลงมาคือ ต้น และใบ ส่วนในตัวกลางดินปนทรายนั้น สะสมอยู่ในส่วนต้นมากที่สุด รองลงมาคือ ราก และใบ เมื่อพิจารณาปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในพืชพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาความเข้มข้นแคดเมียมในใบพืช จากตารางที่ 5.14 จะพบว่าดินมีความเข้มข้นแคดเมียมน้อยที่สุด ทั้งนี้ก็เนื่องจากต้นธูปฤาษีในตัวกลางดินจะเติบโตได้ดีกว่าในตัวกลางดินปนทราย และทราย ตามลำดับ โดยมวลของส่วนต่าง ๆ ของต้นธูปฤาษีคือ ใบ ต้น และราก ในแต่ละตัวกลางเท่ากับ 51.0342 26.0158 และ 14.1679 กรัม สำหรับตัวกลางทราย เท่ากับ 61.1867 38.4135 และ 24.4844 กรัม สำหรับตัวกลางดินปนทราย และเท่ากับ 98.9757 45.8972 และ 29.9062 กรัม สำหรับตัวกลางดิน นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมที่สะสมในพืชกับปริมาณแคดเมียมที่ป้อนเข้าไปในระบบพบว่ามีปริมาณแคดเมียมสะสมในพืชคิดเป็น 0.08 % ในตัวกลางทราย 0.06 % ในตัวกลางดินปนทราย และ 0.08 % ในตัวกลางดิน เมื่อพืชถูกเก็บเกี่ยวนั้นจะมีเพียงใบเท่านั้นที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไฟเบอร์และเยื่อกระดาษสำหรับทำกระดาษหรือในการเตรียมเฟอร์นิเจอร์และวัสดุฉนวน ดังนั้นการที่มีโลหะหนักอยู่ในธูปฤาษีก็จะไม่ก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสาธารณสุข อย่างไรก็ตามข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 5.14 ถึง 5.15 นั้นเป็นการศึกษาในช่วงสั้น ๆโลหะหนักที่อยู่ในต้นธูปฤาษี และตัวกลางในระบบอาจจะมีผลเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์ของบึงประดิษฐ์ในการดำเนินการในระยะยาว ซึ่งต้องทำการศึกษาต่อไป

5.6 การดุลมวลแคดเมียมในระบบ

จากผลการทดลองปริมาณแคดเมียมที่เข้าและออกจากระบบบึงประดิษฐ์ที่มีตัวกลางทราย ดินปนทราย และดิน ดังตาราง 5.16

ตารางที่ 5.16 ปริมาณแคดเมียมที่เข้าและออกจากระบบ

ตัวกลาง		ปริมาณแคดเมียมที่เข้าและออกจากระบบ ,(มก.)					% Cd ที่สะสม
		1	5	10	20	รวม	ในระบบ
ทราย	น้ำเข้า	92.5	583.4	1270.6	2055.6	4002.1	99.80
	น้ำออก	0	1.3	2.8	3.8	7.9	
ดินปนทราย	น้ำเข้า	104.2	656.8	1429.4	2312.5	4502.9	99.79
	น้ำออก	0	0.8	3.4	5.3	9.5	
ดิน	น้ำเข้า	115.7	729.3	1588.3	2569.5	5002.8	99.81
	น้ำออก	0	0.9	4.0	4.8	9.7	

ปริมาณแคดเมียมที่สะสมอยู่ในระบบส่วนใหญ่จะอยู่ในตัวกลาง คือ ทราย ดินปนทราย และดิน โดยมีปริมาณ 58023 50544 และ 43056 กรัม ตามลำดับ โดยสมการดุลมวลสารของแต่ละระบบ คือ

$$\text{แคดเมียมเข้า} = \text{แคดเมียมออก} + \text{แคดเมียมที่สะสมในระบบ}$$

$$\text{Cd เข้า} = \text{Cd ออก} + \text{Cd ที่สะสม(ในดิน + ในพืช)} + \text{Cd ในน้ำที่ค้างในระบบ} + \text{อื่น ๆ}$$

5.6.1 การดูดซับแคดเมียมในตัวกลางดินและทราย

จากการทดสอบการดูดซับแคดเมียมโดยตัวกลางดินและทราย อธิบายได้โดยใช้โมเดลการดูดซับ (adsorption model) ซึ่งแลงเมอร์ไอโซเทอร์ม และฟรุนดลิชไอโซเทอร์ม เป็นสมการที่นิยมใช้แสดงข้อมูลการดูดซับจากสารละลาย สำหรับการทดลองนี้ใช้ฟรุนดลิช ไอโซเทอร์มในการอธิบาย ดังสมการ

$$x = kc^{1/n} \qquad \text{(Anderson \& Rubin , 1981)} \qquad (5.2)$$

เมื่อ x = ปริมาณแคดเมียมที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

c = ความเข้มข้นแคดเมียมในสารละลายที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

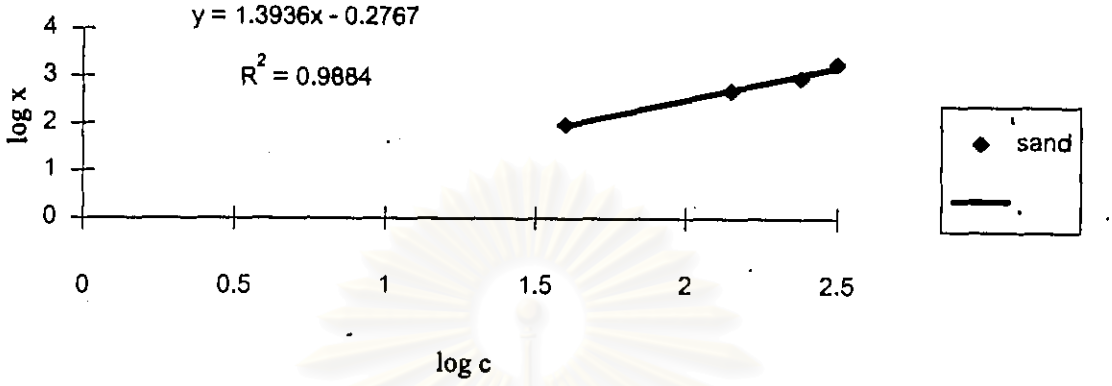
k = ค่าคงที่ของฟรุนดลิช (ลิตรต่อกรัม)

1/n = "----------" (-)

จากผลการทดลองจะได้ปริมาณแคดเมียมที่ถูกดูดซับโดยตัวกลาง และความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมที่สมดุล ดังแสดงได้ดังตารางที่ 5.17 และจากข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแคดเมียมในสารละลายที่จุดสมดุล ตามสมการฟรุนดลิชไอโซเทอร์มได้ดังรูป 5.30 และ 5.31 สำหรับตัวกลางทราย และดิน ตามลำดับ และจะได้ค่าคงที่ของฟรุนดลิช (k และ 1/n) เท่ากับ 0.5288 ลิตรต่อกรัม และ 1.3939 สำหรับตัวกลางทราย และเท่ากับ 1.6565 ลิตรต่อกรัม และ 1.2297 สำหรับตัวกลางดิน ตามลำดับ

ตารางที่ 5.17 ปริมาณแคดเมียมที่ถูกดูดซับโดยตัวกลางและความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุล

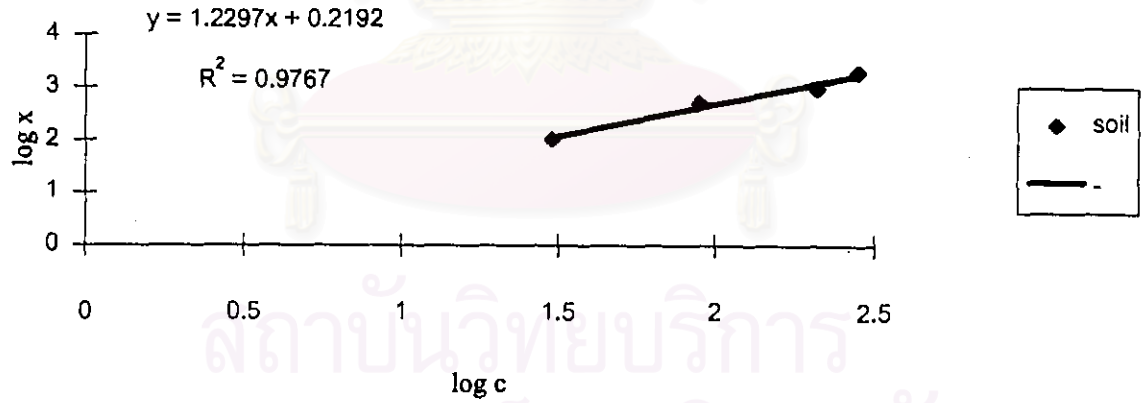
ตัวกลาง	$[Cd]_{inf}$ (mg/l)	[Cd] feed (mg)	$vol_{sol\text{-}equi}$ (ml)	$[Cd]_{equi}$ (mg/l)	Cd_{abs} (mg/g)
ทราย	0.93	0.465	275	0.04	0.0908
	5.05	2.525	290	0.14	0.4969
	9.40	4.700	275	0.24	0.9268
	19.20	9.600	275	0.32	1.9024
ดิน	1.03	0.515	275	0.03	0.1013
	5.06	2.530	320	0.09	0.5002
	9.40	4.700	275	0.21	0.9284
	19.30	9.615	305	0.28	1.9059



รูปที่ 5.30 แสดงฟรุนดลิชไอโซเทอร์มของแคดเมียมบนตัวกลางทราย

1/n = 1.3936

k = 0.5288



รูปที่ 5.31 แสดงฟรุนดลิชไอโซเทอร์มแคดเมียมบนตัวกลางดิน

1/n = 1.2297

k = 1.6565

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.6.2 ดุลมวลแคดเมียม

1) ตัวกลางทราย

สำหรับตัวกลางทรายปริมาณแคดเมียมที่ป้อนเข้าระบบทั้งหมดเท่ากับ 4002.1 มิลลิกรัม โดยแคดเมียมที่ออกจากระบบพร้อมกับน้ำทิ้งเท่ากับ 7.9 มิลลิกรัม (0.20 %) นอกจากนี้มีแคดเมียมที่ค้างในระบบเท่ากับ 150.3 มิลลิกรัม (3.76 %) นั่นคือมีปริมาณแคดเมียมสะสมในระบบเท่ากับ 3843.9 มิลลิกรัม ในจำนวนนี้จะสะสมอยู่ในรูปต่าง ๆ คือถูกดูดซับบนตัวกลาง ตกตะกอนในรูปต่าง ๆ สะสมในพืช และอื่น ๆ ซึ่งอาจจะเกาะตามผนัง หรือมุมถัง หรืออาจจะอยู่ในสาหร่ายที่เกิดขึ้นในระบบ

สำหรับการสะสมแคดเมียมบนตัวกลาง จากผลการทดลองการหาปริมาณแคดเมียมในตัวกลางจากระบบบึงประดิษฐ์โดยการย่อยด้วยกรดปรากฏว่ามีแคดเมียมบนตัวกลางจำนวน 3824.3 มิลลิกรัม คิดเป็น 95.56 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งควรจะเกิดจากการดูดซับโดยตัวกลาง เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 5.17 สำหรับการทดลองการดูดซับแคดเมียมบนตัวกลางทราย ที่ความเข้มข้นแคดเมียมในสารละลายเริ่มต้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณแคดเมียมที่ถูกดูดซับบนตัวกลางเท่ากับ 1.9024 มิลลิกรัมต่อกรัมทราย ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณแคดเมียมบนตัวกลางของระบบบึงประดิษฐ์ซึ่งมีแคดเมียมเท่ากับ 0.0659 มิลลิกรัมต่อกรัมทราย เท่านั้น

สำหรับการสะสมแคดเมียมในพืชนั้น จากผลการทดสอบปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในส่วนต่าง ๆ ของพืช พบว่ามีแคดเมียมสะสมอยู่ในพืชทั้งหมด 3.3032 มิลลิกรัม คิดเป็น 0.08 เปอร์เซ็นต์

แคดเมียมที่สะสมอยู่ในส่วนอื่น ๆ ของระบบไม่ว่าจะเป็นตามผนังหรือมุมถัง หรือแม้กระทั่งสาหร่ายที่เกิดขึ้นในระบบนั้นมีค่าเท่ากับ 16.30 มิลลิกรัม คิดเป็น 0.41 เปอร์เซ็นต์ โดยสามารถเขียนสมการดุลมวลสารได้ดังนี้

Cd เข้า = Cd ออก + Cd ที่สะสม(ในดิน + ในพืช) + Cd ในน้ำที่ค้างในระบบ + อื่น ๆ

4002.1 = 7.9 + 3824.3 + 3.3032 + 150.3 + 16.3

2) ตัวกลางดินปนทราย

สำหรับตัวกลางดินปนทรายปริมาณแคดเมียมที่ป้อนเข้าระบบทั้งหมดเท่ากับ 4502.9 มิลลิกรัม โดยแคดเมียมที่ออกจากระบบพร้อมกับน้ำทิ้งเท่ากับ 9.5 มิลลิกรัม (0.21 %) นอกจากนี้มีแคดเมียมที่ค้างในระบบเท่ากับ 153.1 มิลลิกรัม (3.40 %) นั่นคือมีปริมาณแคดเมียมสะสมในระบบเท่ากับ 4340.3 มิลลิกรัม ในจำนวนนี้จะสะสมอยู่ในรูปต่าง ๆ คือถูกดูดซับบนตัวกลาง ตกตะกอนในรูปต่าง ๆ สะสมในพืช และอื่น ๆ ซึ่งอาจจะเกาะตามผนัง หรือมุมถัง หรืออาจจะอยู่ในสาหร่ายที่เกิดขึ้นในระบบ

สำหรับการสะสมแคดเมียมบนตัวกลาง จากผลการทดลองการหาปริมาณแคดเมียมในตัวกลางจากระบบบึงประดิษฐ์โดยการย่อยด้วยกรดปรากฏว่ามีแคดเมียมบนตัวกลางจำนวน 4301.3 มิลลิกรัม คิดเป็น 95.53 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งควรจะเกิดจากการดูดซับโดยตัวกลาง เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 5.17 ตัวกลางทรายสามารถดูดซับแคดเมียมเมื่อทำการทดลองความสามารถในการดูดซับแคดเมียม ที่ความเข้มข้นแคดเมียมในสารละลายเริ่มต้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณแคดเมียมที่ถูกดูดซับบนตัวกลางเท่ากับ 1.9024 มิลลิกรัมต่อกรัมทราย และตัวกลางดินเท่ากับ 1.9059 มิลลิกรัมต่อกรัมดิน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณแคดเมียมบนตัวกลางดินปนทรายของระบบบึงประดิษฐ์ มีแคดเมียมเท่ากับ 0.0811 มิลลิกรัมต่อกรัมดินปนทราย เท่านั้น

สำหรับการสะสมแคดเมียมในพืชนั้น จากผลการทดสอบปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในส่วนต่าง ๆ ของพืช พบว่ามีแคดเมียมสะสมอยู่ในพืชทั้งหมด 2.9139 มิลลิกรัม คิดเป็น 0.06 เปอร์เซ็นต์

แคดเมียมที่สะสมอยู่ในส่วนอื่น ๆ ของระบบไม่ว่าจะเป็นตามผนังหรือมุมถัง หรือแม้กระทั่งสาหร่ายที่เกิดขึ้นในระบบนั้นมีค่าเท่ากับ 36.1 มิลลิกรัม คิดเป็น 0.80 เปอร์เซ็นต์ โดยสามารถเขียนสมการดุลมวลสารได้ดังนี้

Cd เข้า = Cd ออก + Cd ที่สะสม(ในดิน + ในพืช) + Cd ในน้ำที่ค้างในระบบ + อื่น ๆ

4502.9 = 9.5 + 4301.3 + 2.9139 + 153.1 + 36.1

1) ตัวกลางดิน

สำหรับตัวกลางทรายปริมาณแคดเมียมที่ป้อนเข้าระบบทั้งหมดเท่ากับ 5002.8 มิลลิกรัม โดยแคดเมียมที่ออกจากระบบพร้อมกับน้ำทิ้งเท่ากับ 9.7 มิลลิกรัม (0.19 %) นอกจากนี้มีแคดเมียมที่ค้างในระบบเท่ากับ 163.6 มิลลิกรัม (3.27 %) นั่นคือมีปริมาณแคดเมียมสะสมในระบบเท่ากับ 4829.5 มิลลิกรัม ในจำนวนนี้จะสะสมอยู่ในรูปต่าง ๆ คือถูกดูดซับบนตัวกลาง ตกตะกอนในรูปต่าง ๆ สะสมในพืช และอื่น ๆ ซึ่งอาจจะเกาะตามผนัง หรือมุมถัง หรืออาจจะอยู่ในสาหร่ายที่เกิดขึ้นในระบบ

สำหรับการสะสมแคดเมียมบนตัวกลาง จากผลการทดลองการหาปริมาณแคดเมียมในตัวกลางจากระบบบึงประดิษฐ์โดยการย่อยด้วยกรดปรากฏว่ามีแคดเมียมบนตัวกลางจำนวน 4706.0 มิลลิกรัม คิดเป็น 94.07 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งควรจะเกิดจากการดูดซับโดยตัวกลาง เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 5.17 สำหรับการทดลองความสามารถในการดูดซับแคดเมียม ที่ความเข้มข้นแคดเมียมในสารละลายเริ่มต้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณแคดเมียมที่ถูกดูดซับบนตัวกลางเท่ากับ 1.9059 มิลลิกรัมต่อกรัมดิน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณแคดเมียมบนตัวกลางของระบบบึงประดิษฐ์ มีแคดเมียมเท่ากับ 0.1093 มิลลิกรัมต่อกรัมดิน เท่านั้น

สำหรับการสะสมแคดเมียมในพืชนั้น จากผลการทดสอบปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในส่วนต่าง ๆ ของพืช พบว่ามีแคดเมียมสะสมอยู่ในพืชทั้งหมด 3.7960 มิลลิกรัม คิดเป็น 0.08 เปอร์เซ็นต์

แคดเมียมที่สะสมอยู่ในส่วนอื่น ๆ ของระบบไม่ว่าจะเป็นตามผนังหรือมุมถัง หรือแม้กระทั่งสาหร่ายที่เกิดขึ้นในระบบนั้นมีค่าเท่ากับ 119.70 มิลลิกรัม คิดเป็น 2.39 เปอร์เซ็นต์ โดยสามารถเขียนสมการดุลมวลสารได้ดังนี้

Cd เข้า = Cd ออก + Cd ที่สะสม(ในดิน + ในพืช) + Cd ในน้ำที่ค้างในระบบ + อื่น ๆ

5002.8 = 9.7 + 4706.0 + 3.7960 + 163.6 + 119.7

โดยสรุปแล้วแคดเมียมที่อยู่ในส่วนต่าง ๆ ของระบบสามารถจำแนกได้ดังนี้คือ ส่วนที่อยู่ในชั้นตัวกลาง ในพืช ในน้ำออกจากระบบ และอื่น ๆ ดังตารางที่ 5.18 สำหรับตัวกลางทรายทั้ง 3 ชนิด และ เปอร์เซ็นต์แคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของระบบ ดังรูปที่ 5.32

ตารางที่ 5.18 ปริมาณแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของระบบ

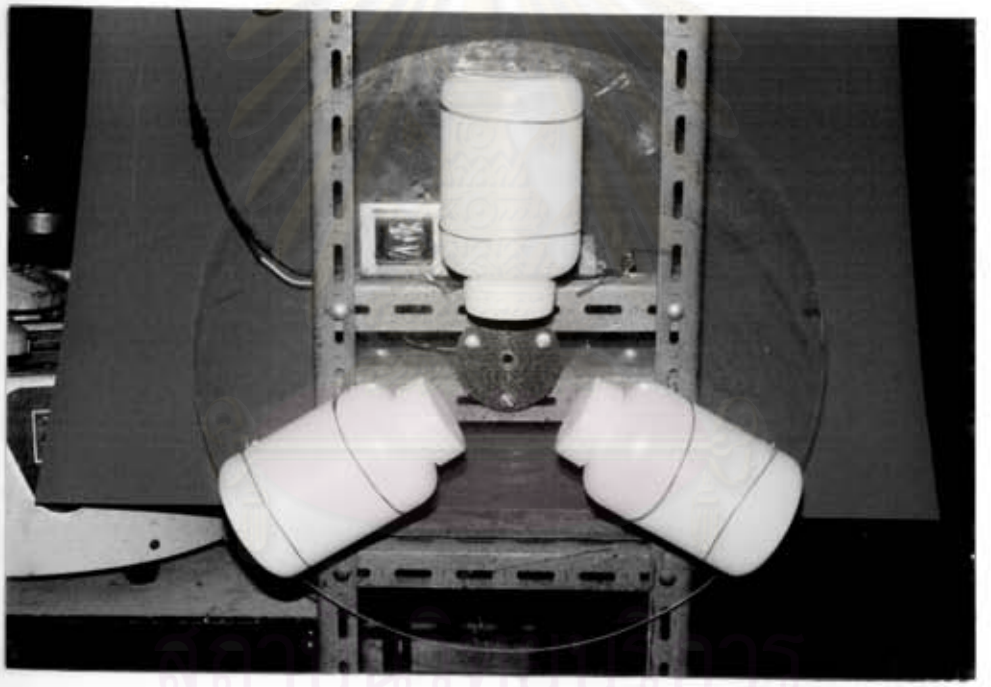
ตัวกลาง	Cd เข้า (มก.)	Cd ออก (มก.)	Cd สะสม (มก.)			
			ตัวกลาง	พืช	ค้างในระบบ	อื่น ๆ
ทราย	4002.1	7.5	3824.3	3.3032	150.3	16.30
ดินปนทราย	4502.9	9.5	4301.3	2.9139	153.1	36.1
ดิน	5002.8	9.7	4706.0	3.7960	163.6	119.7

รูปที่ 5.32 แสดงปริมาณแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของระบบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.7 การทดสอบการชะละลายแคดเมียมจากตัวกลาง

เมื่อสิ้นสุดการทดลอง หลังจากเดินระบบโดยป้อนน้ำเข้าที่มีความเข้มข้นแคดเมียม 1 5 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วนั้น เก็บตัวอย่างทราย ดินปนทราย และดิน จากระบบที่ระยะจากทางน้ำเข้าเท่ากับ 15 30 และ 45 เซ็นติเมตร นำมาชะละลายโดยวิธีสกัดสาร (Leachate extraction procedure) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) โดยใช้เครื่องมือดังรูป 5.33 ทำการทดลองเป็นเวลา 18 ชั่วโมงต่อ 1 ชุดทดลอง เพื่อหาปริมาณแคดเมียมที่สามารถถูกชะละลายได้จากตัวกลางที่ผ่านการบำบัดแคดเมียมของระบบบึงประดิษฐ์ ปรากฏผลดังตารางที่ 5.19



รูปที่ 5.33 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการสกัดสาร

ประกอบด้วย

1. จานหมุนความเร็ว 30 รอบต่อนาที
2. ขวดสกัดสาร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.19 ผลการชะละลายของตัวกลางทราย ดินปนทรายและดิน

ตัวกลาง	หน่วย	[Cd] ที่ถูกชะจากตัวกลางที่จุดเก็บตัวอย่าง.....(ซม.)		
		15	30	45
ทราย	มก./ล.	3.265	2.875	0.03,
	มก./ก.	0.0653	0.0575	0.0006
	% ที่ถูกชะละลาย	56.29	86.47	20.00
ดินปนทราย	มก./ล.	0.14	0.03	0.015
	มก./ก.	0.0028	0.0006	0.0003
	% ที่ถูกชะละลาย	6.44	15.00	12.00
ดิน	มก./ล.	0.015	0.02	0.015
	มก./ก.	0.0003	0.0004	0.0003
	% ที่ถูกชะละลาย	0.56	8.87	6.67

จากผลการชะละลายของตัวกลางทั้ง 3 ชนิด จะเห็นได้ว่าแคดเมียมในตัวกลางทรายถูกชะละลายออกมาได้มากที่สุด คือเท่ากับ 56.29 86.47 และ 20.00 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะ 15 30 และ 45 เซ็นติเมตร จากทางน้ำเข้า รองลงมาคือ ดินปนทรายและดิน ตามลำดับ โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การชะละลายเฉลี่ยเท่ากับ 54.25 11.15 และ 5.37 ตามลำดับ

สำหรับข้อกำหนดเกี่ยวกับสารที่ถูกชะละลายได้นั้น จะต้องมีปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในน้ำสกัด เท่ากับหรือมากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการชะละลายข้างต้นจะเห็นได้ว่ามีเพียงทรายชนิดเดียวเท่านั้นที่มีค่าการชะละลายออกมาในน้ำสกัดมากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร คือเท่ากับ 3.265 และ 2.875 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะ 15 และ 30 เซ็นติเมตร จากทางน้ำเข้า จึงจัดว่าเป็นของเสียอันตรายจำเป็นต้องนำไปจัดการอย่างถูกวิธี ส่วนดินและดินปนทรายนั้นสามารถนำไปฝังกลบแบบขยะชุมชน หรือนำไปถมที่ได้ เนื่องจากดินมีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมได้ดีซึ่งเกิดจากพันธะปฏิกริยากับสารฮิวมิก จึงทำให้แคดเมียมไม่ถูกชะละลายออกจากตัวกลางหลังจากบำบัดแล้ว ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าตัวกลางดินและดินปนทรายเหมาะสมในการกำจัดโลหะแคดเมียมในน้ำเสียต่ำกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือน้ำที่ผ่านระบบบำบัดทางเคมีแล้ว ส่วนน้ำเสียที่มีความเข้มข้นมากขึ้น (10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) แม้ว่าระบบที่มีตัวกลางทราย ดินปนทราย และดิน จะไม่สามารถกำจัดแคดเมียมให้ต่ำกว่าที่กำหนดในมาตรฐานน้ำทิ้งได้ แต่มีประสิทธิภาพในการกำจัด

แคดเมียมได้สูงถึง 99 เปอร์เซ็นต์ จึงเหมาะที่จะใช้เป็นระบบบำบัดขั้นต้น นอกจากนี้ตัวกลางหลังจากการใช้งานแล้วก็สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นต่อไปได้ เช่น ใช้ถมที่ เนื่องจากผลการชะละลายสำหรับดินปนทราย และดิน มีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้มาก

5.8 การนำไปใช้งาน

จากผลการทดลองจะได้ข้อมูลซึ่งเป็นการเสนอแนวทางการเสนอข้อมูลการออกแบบระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำขังใต้ดินในการบำบัดแคดเมียมจากน้ำเสีย โดยที่เมื่อความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเสียอยู่ในช่วง 1 ถึง 5 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำทิ้งที่ออกจากระบบบึงประดิษฐ์มีปริมาณแคดเมียมน้อยกว่ามาตรฐานที่กำหนดให้มีในน้ำทิ้ง สำหรับตัวกลางทั้ง 3 ชนิด ที่เวลากักน้ำ 5 วัน พีเอชของน้ำเข้าอยู่ในช่วง 6.10 ถึง 7.72 ดังนั้นน้ำเสียที่มีปริมาณแคดเมียมอยู่ในช่วงความเข้มข้นนี้สามารถนำระบบบึงประดิษฐ์ไปใช้ได้เลย โดยมีเกณฑ์กำหนดที่ได้จากการทดลอง ดังตารางที่ 5.20

ตารางที่ 5.20 เกณฑ์ในการออกแบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำขังใต้ดินในการกำจัดแคดเมียม

พารามิเตอร์	หน่วย	ทราย	ดินปนทราย	ดิน
1. HRT	วัน	5	5	5
2. L/W ratio	-	2:1	2:1	2:1
3. ตัวกลาง				
-ความหนาชั้นตัวกลาง	ซม.	30	30	30
-เส้นผ่านศูนย์กลาง	มม.	2-3	<3	<1
4. พืช	-	ธูปฤาษี	ธูปฤาษี	ธูปฤาษี
5. [Cd]inf	มก./ล.	1-5	1-5	1-5
6. พีเอชน้ำเสีย	-	6.10-7.72	6.10-7.72	6.10-7.72

ส่วนน้ำเสียที่มีแคดเมียมมากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (จากการทดลอง $[Cd]_{inf}$ เท่ากับ 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) ระบบบึงประดิษฐ์เพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำให้น้ำทิ้งที่ออกมากจากระบบมีปริมาณแคดเมียมต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดได้ แต่ก็ยังสามารถกำจัดได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นที่ความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเสียมีค่ามากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงอาจจะใช้ระบบบึงประดิษฐ์เป็นระบบบำบัดขั้นต้นในการกำจัดแคดเมียมจากน้ำเสีย

จากการสังเกตจะเห็นได้ว่าในช่วงปลายของการทดลองตัวกลางดินจะเริ่มกลายเป็นดินโคลนซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาในการซึมผ่านน้ำ ถึงแม้ว่าดินมีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมและทนต่อการชะละลายได้มากว่าดินปนทราย และทราย ในระบบบึงประดิษฐ์ที่มีตัวกลางดินจึงอาจจะผสมวัสดุอื่น ๆ ซึ่งช่วยในการซึมผ่านน้ำได้ดีขึ้น เช่น ทราย และ ขี้เลื่อย (sawdust) เป็นต้น เพื่อให้มีการใช้งานได้ในระยะยาว ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม สำหรับทรายนั้นเมื่อผ่านการดูดซับแคดเมียมแล้ว ถึงแม้ว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมสูง และมีความสามารถในการซึมผ่านน้ำได้ดี แต่ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมยังน้อยกว่าดิน และมีการชะละลายแคดเมียมออกมามากเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด ดังนั้นในการนำไปใช้จึงต้องพิจารณาถึงการนำตัวกลางชนิดนี้ไปกำจัดด้วยเนื่องจากถือว่าเป็นของเสียอันตราย

จากข้อมูลการกำจัดแคดเมียมด้วยวิธีอื่น ๆ ดังตารางที่ 5.21 จะเห็นได้ว่า มีเพียงระบบแอกติเวทเตด สลัดจ์ ไนตริฟิเคชั่น และกระบวนการไดแอกกูเลชั่น-ฟลอกกูเลชั่น-เซดิเมนเตชั่น เท่านั้นที่สามารถกำจัดแคดเมียมได้มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 5.21 ดังนั้นจึงจัดว่าระบบบึงประดิษฐ์เป็นระบบหนึ่งที่สามารถกำจัดแคดเมียมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.21 กระบวนการที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียและประสิทธิภาพในการกำจัด

(Metcalf and Eddy , 1991)

Constituent	Unit process or operation																	
	Primary treatment	Activated sludge	Nitrification	Denitrification	Trickling filter	RBC	Coag.-Floc.-Sed.	Filtration after A/S	Carbon adsorption	Ammonia stripping	Selective ion exchange	Breakpoint chlorination	Reverse osmosis	Overland flow	Irrigation	Infiltration-percolation	Chlorination	Ozone
BOD	X	+	+	O	+	+	+	X	+		X		+	+	+	+		O
COD	X	+	+	O	+		+	X	X	O	X		+	+	+	+		+
TSS	+	+	+	O	+	+	+	+	+		+		+	+	+	+		
NH_3-N	O	+	+	X		+	O	X	X	+	+	+	+	+	+	+		
NO_3-N				+				X	O					X				
Phosphorus	O	X	+	+			+	+	+				+	+	+	+		
Alkalinity		X					X	+								X		
Oil & grease	+	+	+				X		X					+	+	+		
Total coliform		+	+		O		+		+			+		+	+	+	+	+
TDS													+					
Arsenic	X	X	X				X	+	O									
Barium		X	O				X	O										
Cadmium	X	+	+		O	X	+	X	O							O		
Chromium	X	+	+		O	+	+	X	X									
Copper	X	+	+		+	+	+	O	X							+		
Fluoride							X		O							X		
Iron	X	+	+		X	+	+	+	+									
Lead	+	+	+		X	+	+	O	X							X		
Manganese	O	X	X		O		X	+	X				+					
Mercury	O	O	O		O	+	O	X	O									
Selenium	O	O	O				O	+	O									
Silver	+	+	+		X		+		X									
Zinc	X	X	+		+	+	+		+									
Color	O	X	X		O		+	X	+				+	+	+			+
Foaming agents	X	+	+		+		X		+				+	+	+			O
Turbidity	X	+	+	O	X		+	+	+				+	+	+			
TOC	X	+	+	O	X		+	X	+	O	O		+	+	+	+		+

Symbols: O = 25% removal of influent concentration
X = 25–50%
+ = > 50%
Blank denotes no data, inconclusive results, or an increase

[a] Adapted from Ref. 11.