

### บทที่ 3

## ผลการวิจัยและอภิปรายผล

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลโครงการย่อยที่ 1

#### 3.1 การทดลองที่ 1 การคัดเลือกและขยายพันธุ์พืชในเรือนเพาะชำ

##### 3.1.1 การคัดเลือกและขยายพันธุ์พืชในเรือนเพาะชำของพืชทั้ง 5 กลุ่ม



รูปที่ 1-2 การขยายพันธุ์ต้นโหระพาและต้นยี่หระ



รูปที่ 1-3 การขยายพันธุ์ต้นอ้อย



รูปที่ 1-4 การขยายพันธุ์ต้นกล้วยแฝก



รูปที่ 1-5 การเพาะกล้าไม้ต้นชูดา



รูปที่ 1-6 การเพาะกล้าไม้ต้นกระถินเทพา

### 3.2 การทดลองที่ 2 การทดสอบประสิทธิภาพของพืชชนิดต่างๆ ในการลดการสะสมแคดเมียมโดยใช้สารตรึงโลหะหนัก (soil amendment)

#### 3.2.1 การทดลองที่ 2.1 ประสิทธิภาพการตรึงแคดเมียมโดยใช้ปุ๋ยโซเดียมซิลิเกต (sodium silicate) และปุ๋ยขี้วัว (cow manure) ในต้นโหระพา

##### 3.2.1. 1. สมบัติของดินที่ทดลอง

ตารางที่ 1-1 และตารางที่ 1-2 แสดงสมบัติของดินและปุ๋ยที่เริ่มการทดลอง และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (3 เดือน ตามลำดับ) ได้แก่ ดินเกษตร (กลุ่มคววบคุม) ดินแคดเมียม ดินแคดเมียมที่ผสม 10% และ 20% ปุ๋ยขี้วัว ดินแคดเมียมที่ผสม 10% และ 20% ปุ๋ยซิลิเกต จะเห็นได้ว่า pH ของดินทุกกลุ่มมีค่าเป็นกลาง (6.9-7.0) ค่าของ EC ของดินเกษตรและดินแคดเมียม คือ 2.65 และ 2.45 ตามลำดับ เมื่อเติมปุ๋ยขี้วัวและปุ๋ยซิลิเกต ค่าของ EC เพิ่มขึ้นเป็น 3.00-3.91 ซึ่งคือมีค่าความเค็ม (salinity) มากขึ้นนั่นเอง

ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินคือ 17.73-19.30 มก/กก เมื่อสกัดด้วย DTPA พบว่าปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้มีค่าลดลง (12.37-16.43 มก/กก) การเติมปุ๋ยขี้วัวและปุ๋ยซิลิเกต ทำให้ปริมาณแคดเมียมที่สกัดด้วย DTPA มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

ตารางที่ 1-1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของกลุ่มต่างๆ เมื่อเริ่มการทดลอง

Parameter	Cow manure	Control					
		Soil					
		Cd soil	CdCw10%soil	CdCw20%soil	CdSi10%soil	CdSi20%soil	
Sand (%)	-	53	49	49	41	49	
Silt (%)	-	30	28	30	24	34	
Clay (%)	-	17	17	23	21	35	
pH	7.5	7	7.2	7.3	7.1	6.9	
Organic matter (%)	29.22	12.7	10	10.8	10.8	10.9	
CEC (cmol kg <sup>-1</sup> ) (%)	51	53.33	34.33	38.07	33.67	36.67	
Total N (%)	1.63	0.23	0.19	0.25	0.16	0.16	
EC (dS m <sup>-1</sup> )	1.41	2.68	3.09	3.15	3.91	3.65	
Total Cd (mg kg <sup>-1</sup> )	0.5	19.3±0.74	18.19±1.03	17.85±1.68	17.73±1.65	18.22±1.19	
DTPA extractable Cd (mg kg <sup>-1</sup> )	-	16.43±0.70	14.28±10.34	14.83±0.17	12.31±0.16	12.37±0.53	
P (mg kg <sup>-1</sup> )	6600	272	501	471	310	263	
K (mg kg <sup>-1</sup> )	10500	1000	1500	1500	1000	900	
Ca (mg kg <sup>-1</sup> )	15900	6000	7600	8400	11600	11200	
Mg (mg kg <sup>-1</sup> )	6100	600	380	640	630	480	

ตารางที่ 1-2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของดินกลุ่มต่างๆ เมื่อสิ้นสุดการทดลอง (3 เดือน)

Parameter	Control Soil	Cd soil	CdCw10%soil	CdCw20%soil	CdSi10%soil	CdSi20%soil
Sand (%)	48	40	46	46	42	46
Silt (%)	35	33	33	33	35	35
Clay (%)	17	27	21	21	23	19
pH	6.6	6.7	6.9	7.0	6.9	6.9
Organic matter (%)	9.9	10.4	9.9	10.5	9.2	8.4
CEC (cmol kg <sup>-1</sup> ) (%)	41	49	36	36.6	39.2	31.2
Total N (%)	0.18	0.15	0.20	0.26	0.13	0.11
EC (dS m <sup>-1</sup> )	2.65	2.45	3.12	3.45	3.32	3.90
P (mg kg <sup>-1</sup> )	242	260	274	368	253	322
K (mg kg <sup>-1</sup> )	1200	1300	1600	1800	1100	1200
Ca (mg kg <sup>-1</sup> )	2600	2600	2560	2560	2600	2600
Mg (mg kg <sup>-1</sup> )	530	620	620	670	510	400

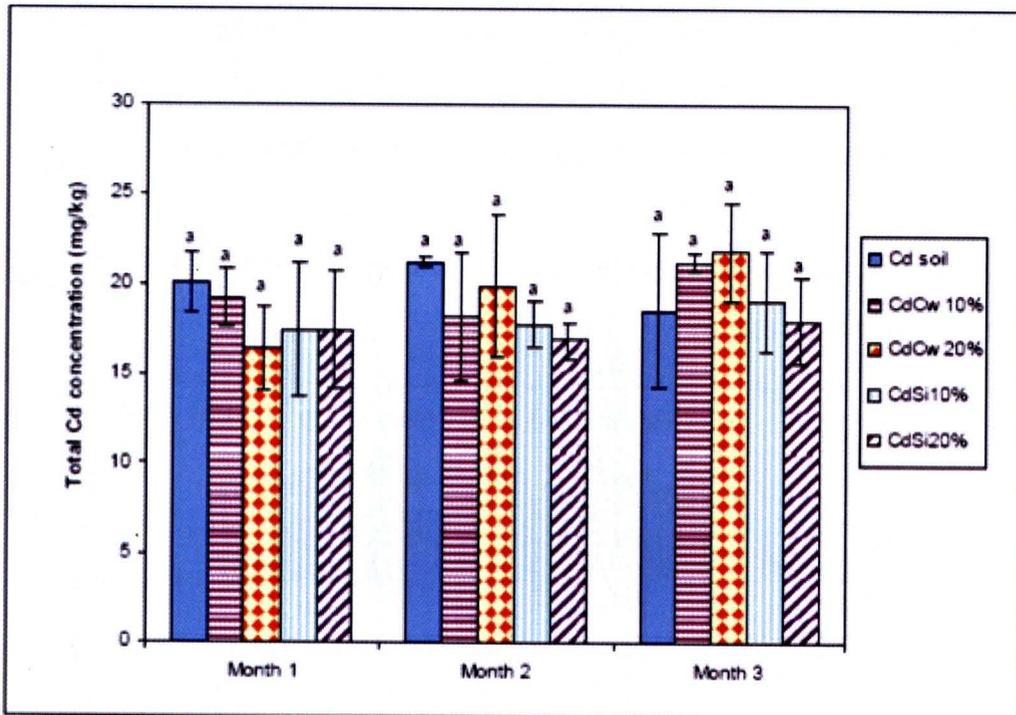
### 3.2.1.2 ปริมาณแคดเมียมในดิน

ตารางที่ 1-3 และรูปที่ 1-7 แสดงปริมาณแคดเมียมทั้งหมด และปริมาณแคดเมียมที่สกัดด้วย DTPA ในดินกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลองต่างๆ ในแต่ละเดือน การเติมปุ๋ยชีวัว และปุ๋ยซิลิเกต ไม่มีผลต่อปริมาณแคดเมียมทั้งหมด ( $p > 0.05$ ) แต่มีผลอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณแคดเมียมที่สกัดด้วย DTPA ( $p < 0.05$ ) เมื่อเติมปุ๋ยชีวัว 20% มีผลทำให้ปริมาณแคดเมียมลดลงในเดือนแรก ส่วน 10% และ 20% ปุ๋ยซิลิเกตสามารถลดปริมาณแคดเมียมในเดือนแรกและเดือนที่ 2 แต่ปุ๋ยทั้งสองชนิดไม่มีผลกับปริมาณแคดเมียมในเดือนที่ 3

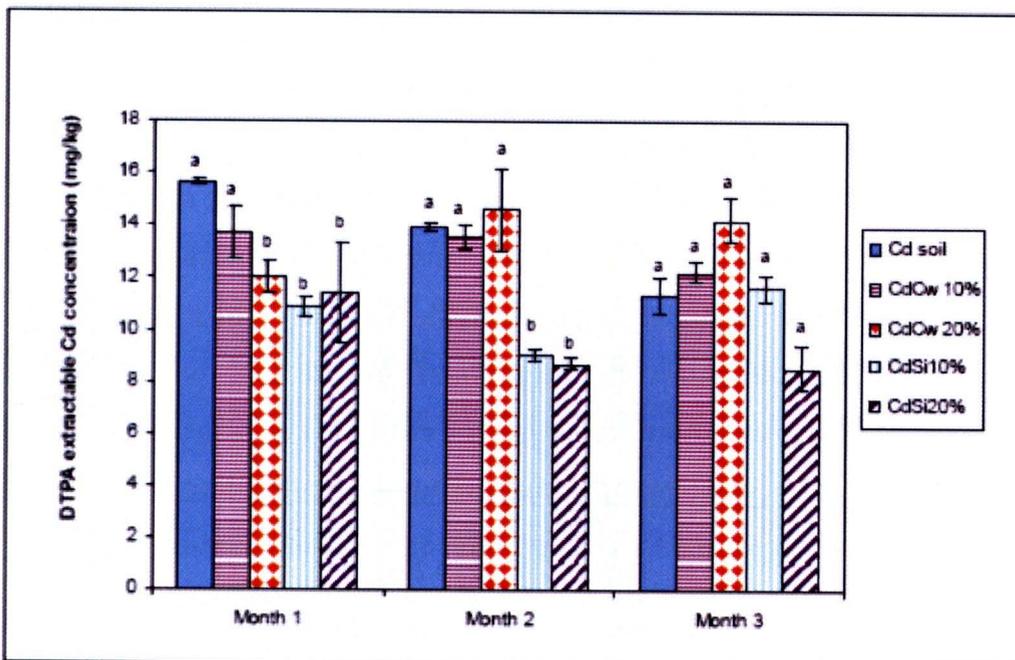
ตารางที่ 1-3 ปริมาณแคดเมียมในดินกลุ่มต่างๆ ในระยะเวลาการทดลอง 3 เดือน

Month	Soil treatment	Cd accumulation (mg/kg)			
		Leave	Stem	Shoot	Root
1	Control	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
	Cd	1.92±0.86 <sup>a</sup>	3.41±0.15 <sup>a</sup>	5.33±0.99 <sup>ab</sup>	25.76±2.32 <sup>a</sup>
	CdCw10%	2.01±0.77 <sup>a</sup>	2.16±1.74 <sup>a</sup>	4.14±2.5 <sup>a</sup>	15.81±2.81 <sup>a</sup>
	CdCw20%	2.82±0.42 <sup>a</sup>	5.27±1.64 <sup>a</sup>	8.09±2.05 <sup>b</sup>	19.32±5.78 <sup>a</sup>
	CdSi10%	3.50±1.56 <sup>a</sup>	4.14±1.08 <sup>a</sup>	6.24±0.20 <sup>a</sup>	28.25±1.80 <sup>a</sup>
	CdSi20%	2.22±1.09 <sup>a</sup>	3.25±0.38 <sup>a</sup>	5.47±1.26 <sup>a</sup>	23.48±4.97 <sup>a</sup>
2	Control	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
	Cd	6.55±2.48 <sup>a</sup>	5.78±1.12 <sup>a</sup>	12.33±4.44 <sup>a</sup>	23.07±1.83 <sup>a</sup>
	CdCw10%	3.52±0.75 <sup>a</sup>	5.72±1.72 <sup>a</sup>	9.24±2.40 <sup>ab</sup>	20.02±3.97 <sup>a</sup>
	CdCw20%	4.46±0.73 <sup>a</sup>	8.36±0.79 <sup>a</sup>	12.83±1.43 <sup>a</sup>	27.15±5.18 <sup>a</sup>
	CdSi10%	1.77±0.15 <sup>b</sup>	5.25±0.73 <sup>a</sup>	7.02±0.58 <sup>b</sup>	27.87±1.03 <sup>a</sup>
	CdSi20%	2.50±0.90 <sup>b</sup>	3.70±2.37 <sup>a</sup>	6.20±3.26 <sup>b</sup>	21.91±5.34 <sup>a</sup>
3	Control	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
	Cd	0.73±0.25 <sup>a</sup>	2.92±1.32 <sup>a</sup>	3.65±1.12 <sup>a</sup>	19.04±2.28 <sup>a</sup>
	CdCw10%	8.47±0.53 <sup>b</sup>	16.82±3.92 <sup>b</sup>	26.76±2.86 <sup>c</sup>	31.97±11.14 <sup>a</sup>
	CdCw20%	6.84±2.71 <sup>b</sup>	11.03±4.39 <sup>c</sup>	17.87±7.09 <sup>b</sup>	31.96±8.45 <sup>a</sup>
	CdSi10%	1.61 ± 1.20 <sup>a</sup>	2.64±0.87 <sup>a</sup>	4.26±2.06 <sup>a</sup>	26.30±4.43 <sup>a</sup>
	CdSi20%	0.74 ± 0.43 <sup>a</sup>	2.62±1.13 <sup>a</sup>	3.36±1.54 <sup>a</sup>	23.12±11.93 <sup>a</sup>

Means followed by the same letters within the same experiment are not significantly different by LSD test at ( $p < 0.05$ ).



A



B

รูปที่ 1-7 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (A) และที่สกัดได้ (B) ของดินกลุ่มควบคุม และกลุ่มทดลองต่างๆ ในระยะเวลา 3 เดือน

### 3.2.1.3 การเติบโตของพืช

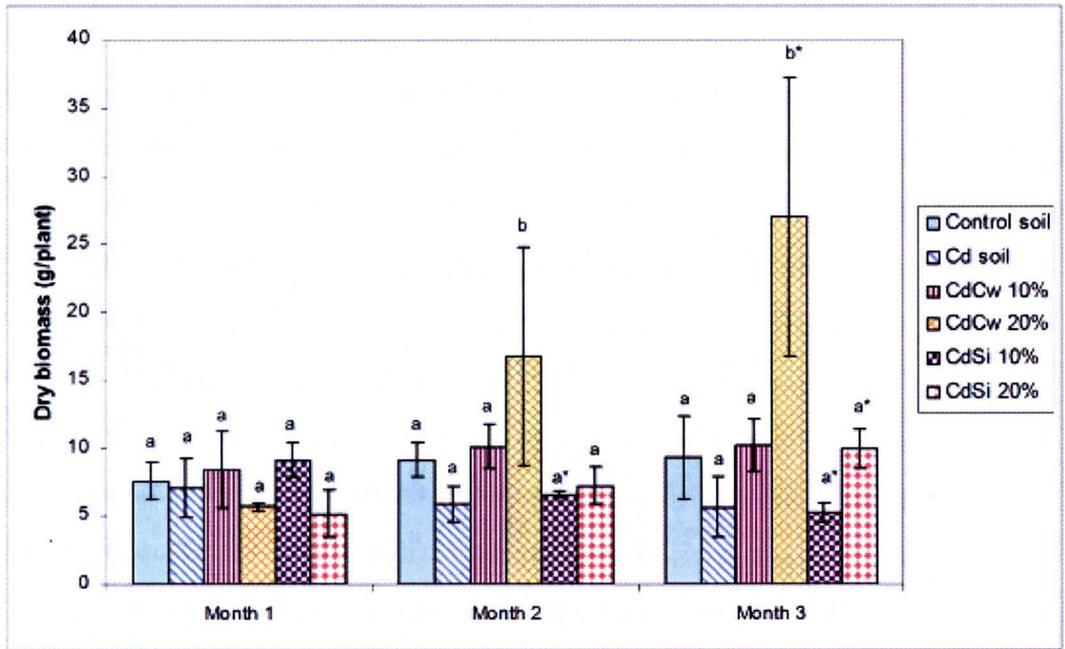
ตารางที่ 1-4 และรูปที่ 1-8 แสดงอัตราการรอดและการเติบโตของต้นโหระพาที่ปลูกในดินที่ไม่มีแคดเมียม (กลุ่มควบคุม) และดินกลุ่มอื่นๆ เป็นเวลา 3 เดือน พืชมีอัตราการรอด 100% แสดงว่าพืชชนิดนี้มีความทนทานต่อแคดเมียมในปริมาณสูง การเติมปุ๋ยขี้วัว และปุ๋ยซัลเฟตไม่มีผลกับน้ำหนัก

แห้งของพืชในเดือนแรก แต่ในเดือนที่ 2 และที่ 3 การเติม 20% ปุ๋ยซีวีวในดินแคดเมียม ทำให้พืชมีน้ำหนักแห้งสูงขึ้นมา (16.79 กรัมในเดือนที่สอง 27.03 กรัมในเดือนที่ 3) พืชที่มีการเติบโตต่ำสุดคือ มีน้ำหนักแห้งน้อยที่สุด (5.17 กรัม) คือ พืชที่ปลูกในดินแคดเมียมที่เติมปุ๋ยซิลิเกต 20%

**ตารางที่ 1-4** อัตราการรอดและน้ำหนักแห้งของ *O. basilicum* ที่ปลูกในดินแคดเมียม (20 มก/กก) ที่เติมปุ๋ยซีวีว และปุ๋ยซิลิเกตเป็นเวลา 3 เดือน

Month	Soil treatment	Survival rate (%)	Dry biomass (g)	Plant relative growth rate (%)
1	Control	100	7.60±1.46 <sup>a</sup>	143.34±18.43 <sup>a</sup>
	Cd	100	7.08±2.12 <sup>a</sup>	134.02±33.24 <sup>a</sup>
	CdCw10%	100	8.41±2.83 <sup>a</sup>	150.75±34.36 <sup>a</sup>
	CdCw20%	100	5.70±0.29 <sup>a</sup>	115.59±5.14 <sup>a</sup>
	CdSi10%	100	9.13±1.27 <sup>a</sup>	162.21±13.75 <sup>a</sup>
	CdSi20%	100	5.17±1.73 <sup>a</sup>	102.55±31.30 <sup>a</sup>
2	Control	100	9.16±1.28 <sup>a</sup>	81.24±7.09 <sup>c</sup>
	Cd	100	5.85±1.28 <sup>a</sup>	58.32±11.74 <sup>a</sup>
	CdCw10%	100	10.11±1.63 <sup>a</sup>	86.09±8.31 <sup>bc</sup>
	CdCw20%	100	16.79±7.99 <sup>b</sup>	107.94±24.56 <sup>b</sup>
	CdSi10%	100	6.55±0.23 <sup>a</sup>	64.80±1.72 <sup>a</sup>
	CdSi20%	100	7.24±1.33 <sup>a</sup>	69.24±9.71 <sup>a</sup>
3	Control	100	9.29±3.06 <sup>a</sup>	53.62±11.33 <sup>a</sup>
	Cd	100	5.68±2.24 <sup>a</sup>	36.87±12.20 <sup>a</sup>
	CdCw10%	100	10.20±1.93 <sup>a</sup>	57.56±6.35 <sup>b</sup>
	CdCw20%	100	27.03±10.04 <sup>b</sup>	88.57±14.43 <sup>c</sup>
	CdSi10%	100	5.32±0.71 <sup>a</sup>	36.07±4.33 <sup>a</sup>
	CdSi20%	100	9.97±1.45 <sup>a</sup>	56.98±5.09 <sup>b</sup>

Means followed by the same letters within the same experiment are not significantly different by LSD test at ( $p < 0.05$ ).



รูปที่ 1-8 แสดงน้ำหนักแห้งของ *O. basilicum* ที่ปลูกในดินแคดเมียม (20 มก/กก) ที่เติมปุ๋ยชีวัว และปุ๋ยซิลิเกตเป็นเวลา 3 เดือน

### 3.2.1.4 วิจัยรณผลการทดลองที่ 2.1

การเพิ่มสารตรึงโลหะหนักในดินได้แก่ ปุ๋ยซิลิเกตและปุ๋ยชีวัวมีผลต่อการเติบโตของพืช การเติมปุ๋ยซิลิเกต 20% มีผลในการลดความเป็นพิษของตะกั่วทำให้พืช (ต้นโหระพา) มีอัตราเติบโตดีขึ้น มีการทดลองหลายอันที่แสดงผลของซิลิกา (Si) ต่อการเจริญเติบโตของพืชทั้งทางตรงและทางอ้อม (Shi et al. 2005) ซิลิกาทำให้พืชเติบโตดีขึ้นโดยการลดความเป็นพิษของแคดเมียม (Liang et al. 2005) และโลหะหนักอื่นๆ ได้แก่ แมงกานีส (Mn) อะลูมิเนียม (Al) เป็นต้น (Savant et al. 1997) เมื่อเปรียบเทียบกับปุ๋ยซิลิเกต การเติมปุ๋ยชีวัว ทำให้พืชมีการผลิตมวลมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ปุ๋ยหมักมักมีธาตุอาหารจำเป็น (ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม) และปริมาณสารอินทรีย์มาก ซึ่งทำให้พืชเจริญเติบโตได้รวดเร็ว โดยสารอินทรีย์เหล่านี้เป็นแหล่งอาหาร ช่วยเพิ่ม CEC และความเป็นกลาง ตลอดจนทำให้ดินมีลักษณะร่วนซุย เหมาะแก่การเติบโตของพืช

ผลการทดลองเกี่ยวกับการสะสมแคดเมียมในต้นโหระพา พบว่าพืชที่ปลูกในดินที่มีปุ๋ยชีวัว 10% สามารถสะสมแคดเมียมได้มากขึ้นในส่วนต้น เมื่อเปรียบเทียบกับพืชที่ปลูกในดินแคดเมียมที่ไม่มีสารตรึง (2 เท่า) ในทางตรงกันข้าม พืชที่ปลูกในดินที่ใส่ปุ๋ยซิลิเกต มีการสะสมแคดเมียมในส่วนต้นน้อยลง อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับพืชกลุ่มควบคุมที่ปลูกในดินที่มีแต่แคดเมียม (3-4 เท่า) อย่างไรก็ตาม ปุ๋ยทั้งสองชนิดไม่มีผลต่อการสะสมแคดเมียมในส่วนรากของพืช

โดยทั่วไปแล้ว การเติมปุ๋ยอินทรีย์ เช่น ชีวัวหรือขี้หมูซึ่งมีปริมาณของอินทรียสารที่มีฮิวมัสสูง (humified organic matter, OM) มักทำให้แคดเมียมในดินที่พืชดูดซับได้มีปริมาณน้อยลง เพราะ OM รวมตัวกับแคดเมียม จึงทำให้แคดเมียมถูกตรึงอยู่กับที่ มีงานวิจัยหลายเรื่องที่แสดงว่า OM ในปุ๋ยคอก

ชนิดต่างๆ มีผลทำให้พืชดูดซับแคดเมียมน้อยลง เช่น ในข้าวโพด ข้าวสาลี ไซเท้า เป็นต้น (Ram & Verloo 1985, Pichtel & Bradway 2008) ในทางตรงกันข้ามก็มียางวิจัยหลายอันที่แสดงผลของ OM ในทางกลับกันซึ่งขึ้นอยู่กับแหล่งของ OM และสปีชีส์ของพืช Haghiri (1994) รายงานว่า OM ไม่มีอิทธิพลในการดูดซับแคดเมียมในดินข้าวโอ๊ต Narwal & Singh (1998) รายงานว่า ดินข้าวสาลีสะสมแคดเมียมมากขึ้นเมื่อปลูกในดินที่เติมปุ๋ยจี๋หมู งานวิจัยนี้แสดงผลของ ปุ๋ยจี๋วัวที่ทำให้ดินโพระพาสะสมแคดเมียมเพิ่มขึ้น ทั้งนี้มีเหตุผลหลายประการที่สามารถใช้อธิบาย ได้แก่ (1) จากการศึกษาพบว่าปุ๋ยจี๋วัวมีผลทำให้ pH ของดินสูงขึ้น (จาก 7 เป็น 7.3) ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการสร้างสารประกอบเชิงซ้อนของแคดเมียม-สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ จึงทำให้ปริมาณแคดเมียมที่พืชดูดซับได้เพิ่มขึ้น (Gregson & Alloway 1984) (2) แคดเมียมอาจรวมตัวกับ OM อย่างหลวมๆ ทำให้หลุดออกมาง่าย (Ramos et al. 1994) (3) OM ที่ละลายได้ (dissolved OM) ทำให้แคดเมียมละลายน้ำได้มากขึ้นและมีการเคลื่อนที่มากขึ้น และ(4) พืชที่ปลูกในดินที่มีปุ๋ยจี๋วัวมีการเติบโตเร็ว มีมวลชีวภาพมาก จึงทำให้มีการสะสมแคดเมียมในส่วนต้นเพิ่มขึ้น

จากการวิจัยนี้ พบว่า การเติมปุ๋ยซิลิเกต 20% ทำให้ดินโพระพามีการสะสมแคดเมียมในส่วนต้นลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับดินโพระพาที่ปลูกในดินที่มีแต่แคดเมียม (จาก 13.7 มก/กก เป็น 3.4 มก/กก) แสดงว่าปริมาณแคดเมียมถูกนำส่งจากรากไปส่วนต้นน้อยลง มีการวิจัยที่รายงานผลในทำนองเดียวกัน Liang et al (2005) รายงานว่า ดินข้าวที่ปลูกในดินที่เติม 50 มก/กก และ 400 มก/กก ของโซเดียมซิลิเกต มีการสะสมแคดเมียมลดลงทั้งในส่วนรากและส่วนต้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่ม pH ในดิน ทำให้ปริมาณแคดเมียมที่พืชดูดซับได้ลดลง (Liang et al. 2005) อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยนี้ ปุ๋ยซิลิเกตไม่มีผลทำให้ pH ของดินเปลี่ยนแปลงหรือเพิ่มขึ้น ดังนั้นในดินโพระพาที่มีการขนส่งแคดเมียมจากรากสู่ส่วนต้นน้อยลงนั้น น่าจะเป็นผลมาจาก การตกตะกอนร่วมกันของแคดเมียมและซิลิเกตในผนังเซลล์ของพืช จึงทำให้ปริมาณแคดเมียมในส่วนต้นลดลง (Pichtel & Bradway 2008) นอกจากนั้น ยังมีงานวิจัยอื่นๆ ที่แสดงว่า ซิลิกาสามารถสกัดกั้นการไหลของแคดเมียมผ่านผนังเซลล์ (apoplast) จากรากสู่ส่วนต้น ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต้น (ลำต้นและใบ) ลดลง

### 3.2.2 การทดลองที่ 2.2 การทดสอบประสิทธิภาพของสารตรึงโลหะหนักไฮดรอกซีอะซิเตตและปุ๋ยจี๋วัวในต้นยี่ห่วย

#### 3.2.2.1 สมบัติของดินที่ทดลอง

ตารางที่ 1-5 แสดงสมบัติของดิน Cd/Zn และปุ๋ยจี๋วัวเมื่อตากแห้งและร่อนแล้ว ดิน Cd/Zn มี pH ค่อนข้างเป็นกลาง (7.3) และมีค่า EC 0.5 dS/m ดินมีลักษณะเป็นดินปนทรายที่มีปริมาณอินทรีย์สารปานกลาง (OM) ประมาณ 2.5% ปริมาณ P ปานกลาง (17 มก/กก) ปริมาณ K ต่ำ (70 มก/กก) และปริมาณ Ca (3200 มก/กก) และ Mg (200 มก/กก) ค่อนข้างสูง ปริมาณ N 0.1%, CEC 13.8% ปริมาณ Cd (67.9 มก/กก) และ Zn (2886.8 มก/กก) สูง เมื่อเปรียบเทียบกับ ปุ๋ยจี๋วัวมี pH สูงกว่าเล็กน้อย (7.5) ค่า EC

สูงกว่า (4.1 dS/m) ค่า CEC (51%) และปริมาณอินทรีย์สารสูงกว่ามาก (29.2%) นอกจากนั้น ปุ๋ยจี้วัวมีปริมาณแร่ธาตุทุกชนิดสูงกว่าดิน Cd/Zn (total N 1.6%, P 6600 มก/กก, K 10500 มก/กก, Ca 19900 มก/กก, Mg 6100 มก/กก) แต่มีปริมาณ Cd ต่ำ (0.5 มก/กก) ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐานของดินเกษตรกรรม (Cd 0.1-0.6 มก/กก, Kabata-Pendias 2001) และมีปริมาณ Zn สูงกว่าค่ามาตรฐานเล็กน้อย (262 มก/กก เมื่อเปรียบเทียบกับ 20-110 มก/กก) (Kabata-Pendias 2001)

ตารางที่ 1-5 สมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน Cd/Zn และปุ๋ยจี้วัวที่ใช้ปลูกต้นยี่หระ (*O. gratissimum*)

Parameter	Cd/Zn soil	Cow manure
pH	7.3	7.5
EC (dS m <sup>-1</sup> )	0.5	4.1
CEC (%)	13.8	51
Organic matter (%)	2.5	29.2
Soil texture	Sandy loam	-
<b>Element concentrations</b>		
N (%)	0.1	1.6
P (mg kg <sup>-1</sup> )	17	6600
Ca (mg kg <sup>-1</sup> )	3200	19900
Mg (mg kg <sup>-1</sup> )	200	6100
K (mg kg <sup>-1</sup> )	70	10500
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	2886.8	262
Cd (mg kg <sup>-1</sup> )	67.9	0.5

ตารางที่ 1-5 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของดินและปริมาณ Cd/Zn ในดินกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลองก่อนการทดลอง การเติมปุ๋ยจี้วัว 10% และ 20% ทำให้ค่า pH ต่ำลง (จาก 7.3 เป็น 7.0 และ 7.1 ตามลำดับ) ค่า EC สูงขึ้น (3.2 และ 4.1 dS/m ตามลำดับ) และค่า CEC สูงขึ้น (21.8% และ 20.2% ตามลำดับ) เมื่อเปรียบเทียบกับดิน Cd/Zn (EC 0.5 dS/m, CEC 13.8%) และดิน Cd/Zn ที่เติม HA (EC 0.6-0.9 dS/m, CEC 14.4%-14.8%) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณ total และ DTPA-extractable ของ Cd และ Zn ในกลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุมก่อนปลูกพืช พบว่าการเติมปุ๋ยจี้วัวทำให้ปริมาณ total Cd ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) (10.9%-20.2%) และ total Zn (10.2%-22.1%) เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่ม

ควบคุมหรือดิน Cd/Zn นอกจากนั้นปุ๋ยชีวภาพ ทำให้ DTPA-extractable Cd ลดลง ตลอดระยะเวลา 3 เดือนของการทดลอง ( $p \leq 0.05$ ) ปริมาณ total Zn ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ปริมาณ DTPA-extractable Zn ลดลงทุกเดือน ( $p \leq 0.05$ ) ในทางตรงกันข้าม HA ไม่มีผลต่อปริมาณ total Cd และ Zn แต่มีผลทำให้ปริมาณ DTPA-extractable Cd และ Zn ลดลงทุกเดือนอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ , ตารางที่ 1-6)

ตารางที่ 1-6 pH, EC, CEC และปริมาณ total และ extractable Cd และ Zn ในกลุ่มทดลองต่างๆ และกลุ่มควบคุมก่อนการปลูกพืช

Treatment	pH	EC (dS m <sup>-1</sup> )	CEC (%)	Cd concentration (mg kg <sup>-1</sup> )		Zn concentration (mg kg <sup>-1</sup> )	
				Total	Extractable	Total	Extractable
				Cd/Zn	7.3	0.5	13.8
Cd/Zn+0.75%HA	7.4	0.6	14.8	66.0 <sup>a</sup>	24.6 <sup>a</sup>	2,817.8 <sup>a</sup>	285.0 <sup>a</sup>
Cd/Zn+1.5%HA	7.1	0.9	14.4	66.4 <sup>a</sup>	23.4 <sup>a</sup>	2,891.8 <sup>a</sup>	285.4 <sup>a</sup>
Cd/Zn+10% cow manure	7.0	3.2	21.8	60.5 <sup>b</sup>	20.8 <sup>b</sup>	2,593.4 <sup>b</sup>	254.6 <sup>b</sup>
Cd/Zn+20% cow manure	7.1	4.1	20.2	54.2 <sup>c</sup>	19.5 <sup>b</sup>	2,250.2 <sup>c</sup>	258.8 <sup>b</sup>

Data with different letter in the same column indicate a significant different at 5% level according to Duncan's test.

ตารางที่ 1-7 ปริมาณ total และ extractable Cd และ Zn ในดินของกลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุมในระยะเวลา 3 เดือน

Soil treatment	Cd concentration (mg kg <sup>-1</sup> )		Zn concentration (mg kg <sup>-1</sup> )	
	Total	Extractable	Total	Extractable
<b>Month 1</b>				
1. Cd/Zn	61.2±1.0 <sup>a</sup>	21.7±1.4 <sup>a</sup>	2,514.8±17.5 <sup>b</sup>	203.1±21.3 <sup>ab</sup>
2. Cd/Zn+0.75%HA	62.4±0.5 <sup>a</sup>	18.7±0.4 <sup>b</sup>	2,512.3±55.2 <sup>b</sup>	188.4±4.8 <sup>ab</sup>
3. Cd/Zn+1.5%HA	61.9±2.3 <sup>a</sup>	19.1±1.2 <sup>b</sup>	2,755.6±211.3 <sup>a</sup>	193.3±22.2 <sup>a</sup>
4. Cd/Zn+10% cow manure	58.2±2.5 <sup>b</sup>	14.7±0.4 <sup>c</sup>	2,515.4±125.0 <sup>b</sup>	156.0±4.4 <sup>c</sup>
5. Cd/Zn+20% cow manure	57.4±0.2 <sup>b</sup>	15.0±0.4 <sup>c</sup>	2,490.5±103.9 <sup>b</sup>	178.4±20.0 <sup>bc</sup>

Data with different letter in the same column indicate a significant different at 5% level according to Duncan's test

ตารางที่ 1-7 ปริมาณ total และ extractable Cd และ Zn ในดินของกลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุมในระยะเวลา 3 เดือน(ต่อ)

Soil treatment	Cd concentration (mg kg <sup>-1</sup> )		Zn concentration (mg kg <sup>-1</sup> )	
	Total	Extractable	Total	Extractable
<b>Month 2</b>				
1. Cd/Zn	63.4±0.2 <sup>a</sup>	20.8±1.3 <sup>a</sup>	2,580.3±75.3 <sup>ab</sup>	206.9±13.9 <sup>a</sup>
2. Cd/Zn+0.75%HA	62.1±0.5 <sup>ab</sup>	18.9±1.0 <sup>ab</sup>	2,591.2±11.1 <sup>ab</sup>	182.6±16.3 <sup>b</sup>
3. Cd/Zn+1.5%HA	62.6±1.0 <sup>ab</sup>	17.8±1.5 <sup>bc</sup>	2,599.6±70.2 <sup>a</sup>	189.4±16.2 <sup>b</sup>
4. Cd/Zn+10% cow manure	57.8±5.9 <sup>bc</sup>	16.1±1.0 <sup>c</sup>	2,432.9±140.1 <sup>bc</sup>	165.3±22.2 <sup>c</sup>
5. Cd/Zn+20% cow manure	54.3±2.5 <sup>c</sup>	15.7±2.0 <sup>c</sup>	2,395.6±91.3 <sup>c</sup>	166.7±27.1 <sup>c</sup>
<b>Month 3</b>				
1. Cd/Zn	62.8±0.4 <sup>a</sup>	22.2±3.0 <sup>a</sup>	2,420.8±337.9 <sup>ab</sup>	216.9±52.4 <sup>a</sup>
2. Cd/Zn+0.75%HA	64.6±1.8 <sup>a</sup>	18.7±0.7 <sup>a</sup>	2,570.7±79.6 <sup>ab</sup>	184.5±25.8 <sup>b</sup>
3. Cd/Zn+1.5%HA	63.9±1.3 <sup>a</sup>	17.0±0.6 <sup>a</sup>	2,652.1±53.0 <sup>a</sup>	189.6±14.9 <sup>b</sup>
4. Cd/Zn+10% cow manure	58.0±2.9 <sup>b</sup>	17.6±0.7 <sup>b</sup>	2,381.3±60.9 <sup>ab</sup>	160.0±17.0 <sup>c</sup>
5. Cd/Zn+20% cow manure	55.2±3.6 <sup>b</sup>	16.7±0.9 <sup>b</sup>	2,279.3±159.5 <sup>b</sup>	168.8±3.5 <sup>bc</sup>

Data with different letter in the same column indicate a significant different at 5% level according to Duncan's test

### 3.2.2.2 การเติบโตของพืช

เมื่อเปรียบเทียบการเติบโตของพืช โดยดูจากน้ำหนักแห้งของต้นยี่หระที่ปลูกในดิน Cd/Zn ที่ไม่มีสารตรึงโลหะหนักเลย ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักแห้งอย่างมีนัยสำคัญ ( $p>0.05$ ) ตลอดระยะเวลา 3 เดือน นอกจากนี้ ยังมีอัตราการรอดต่ำกว่าพืชในกลุ่มอื่นๆ คือ 66.7% หลังจาก 3 เดือน แสดงว่าโลหะหนัก (Cd/Zn) มีความเป็นพิษต่อพืชโดยยับยั้งการเติบโต ส่วนพืชที่ปลูกในดินที่มีปุ๋ยชีวภาพหรือ HA นั้นมีอัตราการเติบโตดีกว่าเมื่อเวลาผ่านไป 2 เดือน ( $p\leq 0.05$ ) กล่าวคือ พืชที่ปลูกในดิน Cd/Zn และปุ๋ยชีวภาพ 20% มีน้ำหนักแห้งมากที่สุด (23 กรัม/ต้น) เมื่อเปรียบเทียบกับ 5.6 กรัม/ต้น คือพืชที่ปลูกในดิน Cd/Zn ระยะหลังจาก 3 เดือน พืชที่ปลูกในดิน Cd/Zn และปุ๋ยชีวภาพมีน้ำหนักแห้งสูงสุด (48.5-59.1 กรัม/ต้น, ตารางที่ 1-8)

ตารางที่ 1-8 การเติบโตของ *O. gratissimum* ที่ปลูกในดิน Cd/Zn ที่เติมสารตรึงโลหะหนักเป็นเวลา 3 เดือน

Soil treatment	Survival rate(%)	Dry biomass production (g plant <sup>-1</sup> )
<b>Month 0</b>		
1. Cd/Zn (control)	100	1.8±0.2 <sup>a</sup>
2. Cd/Zn + 0.75%HA	100	1.7±0.1 <sup>a</sup>
3. Cd/Zn + 1.5%HA	100	1.6±0.9 <sup>a</sup>
4. Cd/Zn + 10% cow manure	100	1.8±0.5 <sup>a</sup>
5. Cd/Zn + 20% cow manure	100	1.7±0.2 <sup>a</sup>
<b>Month 1</b>		
1. Cd/Zn (control)	100	5.4±0.2 <sup>a</sup>
2. Cd/Zn + 0.75%HA	100	4.2±0.9 <sup>a</sup>
3. Cd/Zn + 1.5%HA	100	7.5±0.3 <sup>a</sup>
4. Cd/Zn + 10% cow manure	100	6.9±0.3 <sup>a</sup>
5. Cd/Zn + 20% cow manure	100	11.8±1.1 <sup>a</sup>
<b>Month 2</b>		
1. Cd/Zn (control)	100	5.6±0.2 <sup>a</sup>
2. Cd/Zn + 0.75%HA	100	12.4±4.9 <sup>b</sup>
3. Cd/Zn + 1.5%HA	100	17.0±2.4 <sup>b</sup>
4. Cd/Zn + 10% cow manure	100	17.4±1.1 <sup>b</sup>
5. Cd/Zn + 20% cow manure	100	23.0±1.2 <sup>c</sup>
<b>Month 3</b>		
1. Cd/Zn (control)	66.7	6.2±0.5 <sup>a</sup>
2. Cd/Zn + 0.75%HA	88.9	23.9±4.9 <sup>b</sup>
3. Cd/Zn + 1.5%HA	88.9	24.0±1.9 <sup>b</sup>
4. Cd/Zn + 10% cow manure	88.9	59.1±4.0 <sup>c</sup>
5. Cd/Zn + 20% cow manure	88.9	48.5±5.9 <sup>c</sup>

Data with different letter in the same column indicate a significant different at 5% level according to Duncan's test

### 3.2.2.3 การสะสมโลหะหนัก

ต้นยี่ห่วยมีการสะสมโลหะหนัก (Cd/Zn) ในส่วนรากมากกว่าส่วนต้น (ตารางที่ 1-9) การเติมปุ๋ยชีววั หรือ HA มีผลให้ปริมาณ Zn และ Cd ที่พืชสะสมลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพืชที่ปลูกในดิน Cd/Zn ปุ๋ยชีววั มีผลทำให้พืชสะสม Cd ต่ำที่สุดในส่วนต้น (1.1-1.3 มก/กก ในต้น และ 0.3 มก/กก ในใบ) ในขณะที่ HA มีผลทำให้พืชสะสม Zn ต่ำสุด (23.6-24.7 มก/กก ในต้น และ 34 มก/กก ในใบ) หลังจากปลูกเป็นเวลา 3 เดือน (ตารางที่ 1-10) ปุ๋ยชีววัสามารถลดการสะสม Cd ได้ดีที่สุดในพืชที่มีการสะสม Cd น้อยลงถึง 82% ในส่วนต้น และ 61%-63% ในส่วนราก เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม นอกจากนั้นปุ๋ยชีววั ยังมีผลทำให้พืชมีการสะสม Zn น้อยลงถึง 56%-68% ในส่วนราก เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม การเติม HA ทำให้พืชมีการสะสม Zn ในส่วนต้นน้อยลง 52%-53% เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม

ตารางที่ 1-9 การสะสม Cd และ Zn ใน *O. gratissimum* ที่ปลูกในดิน Cd/Zn ที่เติมสารตรึงโลหะหนักเป็นเวลา 3 เดือน

Soil treatment	Cd accumulation (mg kg <sup>-1</sup> )					TF	Zn accumulation (mg kg <sup>-1</sup> )					TF
	Leaf	Stem	Shoot	Root			Leaf	Stem	Shoot	Root		
<b>Month 0</b>												
1. Cd/Zn (control)	0	0	0	0	0	-	50.2±17.9 <sup>a</sup>	30.3±2.8 <sup>a</sup>	80.5±20.7 <sup>a</sup>	107.6±6.4 <sup>a</sup>	-	-
2. Cd/Zn + 0.75%HA	0	0	0	0	0	-	41.6±11.4 <sup>a</sup>	33.3±2.5 <sup>a</sup>	74.9±23.9 <sup>a</sup>	99.7±17.3 <sup>a</sup>	-	-
3. Cd/Zn + 1.5%HA	0	0	0	0	0	-	28.1±4.2 <sup>a</sup>	28.9±1.5 <sup>a</sup>	57.0±5.7 <sup>a</sup>	95.6±24.6 <sup>a</sup>	-	-
4. Cd/Zn + 10% cow manure	0	0	0	0	0	-	34.1±9.5 <sup>a</sup>	21.8±5.5 <sup>a</sup>	55.9±15.0 <sup>a</sup>	66.3±15.2 <sup>a</sup>	-	-
5. Cd/Zn + 20% cow manure	0	0	0	0	0	-	53.7±13.9 <sup>a</sup>	31.9±4.2 <sup>a</sup>	85.6±18.1 <sup>a</sup>	95.6±12.1 <sup>a</sup>	-	-
<b>Month 1</b>												
1. Cd/Zn (control)	1.9±0.2 <sup>a</sup>	2.1±0.8 <sup>a</sup>	4.0±0.8 <sup>a</sup>	21.8±4.0 <sup>a</sup>	21.8±4.0 <sup>a</sup>	0.18	93.4±9.3 <sup>a</sup>	89.9±11.6 <sup>a</sup>	183.3±13.4 <sup>a</sup>	401.8±37.9 <sup>a</sup>	0.45	0.45
2. Cd/Zn + 0.75%HA	1.8±1.0 <sup>a</sup>	1.6±0.9 <sup>a</sup>	3.4±0.1 <sup>a</sup>	17.1±3.8 <sup>a</sup>	17.1±3.8 <sup>a</sup>	0.20	89.0±27.9 <sup>a</sup>	65.6±27.5 <sup>b</sup>	154.6±30.0 <sup>ab</sup>	364.3±48.0 <sup>a</sup>	0.42	0.42
3. Cd/Zn + 1.5%HA	1.5±0.3 <sup>a</sup>	2.2±0.9 <sup>a</sup>	3.7±0.6 <sup>a</sup>	25.4±3.7 <sup>a</sup>	25.4±3.7 <sup>a</sup>	0.15	56.1±0.4 <sup>b</sup>	62.7±13.8 <sup>b</sup>	118.8±13.8 <sup>b</sup>	450.6±42.6 <sup>a</sup>	0.26	0.26
4. Cd/Zn + 10% cow manure	2.6±1.1 <sup>a</sup>	2.3±1.7 <sup>a</sup>	4.9±1.7 <sup>a</sup>	29.1±1.6 <sup>a</sup>	29.1±1.6 <sup>a</sup>	0.17	105.7±47.1 <sup>a</sup>	65.9±18.6 <sup>b</sup>	171.6±45.2 <sup>a</sup>	404.1±18.2 <sup>a</sup>	0.42	0.42
5. Cd/Zn + 20% cow manure	2.5±0.3 <sup>a</sup>	1.5±1.2 <sup>a</sup>	4.0±1.5 <sup>a</sup>	20.2±8.3 <sup>a</sup>	20.2±8.3 <sup>a</sup>	0.20	81.6±33.6 <sup>a</sup>	52.0±6.0 <sup>b</sup>	134.0±27.6 <sup>ab</sup>	460.6±33.2 <sup>a</sup>	0.29	0.29
<b>Month 2</b>												
1. Cd/Zn (control)	2.0±0.7 <sup>a</sup>	3.8±1.0 <sup>a</sup>	5.8±1.6 <sup>a</sup>	47.2±9.0 <sup>a</sup>	47.2±9.0 <sup>a</sup>	0.12	81.6±14.3 <sup>a</sup>	63.1±16.8 <sup>a</sup>	144.7±2.9 <sup>a</sup>	829.1±58.4 <sup>a</sup>	0.17	0.17
2. Cd/Zn + 0.75%HA	1.0±0.6 <sup>bc</sup>	3.8±0.4 <sup>a</sup>	4.8±0.9 <sup>ab</sup>	20.0±3.0 <sup>bc</sup>	20.0±3.0 <sup>bc</sup>	0.24	41.2±7.5 <sup>bc</sup>	61.5±20.0 <sup>a</sup>	102.7±27.4 <sup>b</sup>	465.9±106.1 <sup>c</sup>	0.22	0.22
3. Cd/Zn + 1.5%HA	1.4±0.4 <sup>ab</sup>	3.1±0.3 <sup>a</sup>	4.5±0.3 <sup>bc</sup>	25.0±4.8 <sup>b</sup>	25.0±4.8 <sup>b</sup>	0.18	67.1±18.9 <sup>ab</sup>	37.8±5.4 <sup>b</sup>	104.9±14.8 <sup>b</sup>	625.1±27.1 <sup>b</sup>	0.17	0.17
4. Cd/Zn + 10% cow manure	1.2±0.5 <sup>bc</sup>	2.8±1.4 <sup>a</sup>	4.0±0.9 <sup>bc</sup>	17.6±4.0 <sup>bc</sup>	17.6±4.0 <sup>bc</sup>	0.23	62.9±18.5 <sup>ab</sup>	52.4±15.3 <sup>a</sup>	115.2±18.6 <sup>ab</sup>	390.4±7.6 <sup>c</sup>	0.30	0.30
5. Cd/Zn + 20% cow manure	0.4±0.1 <sup>c</sup>	2.6±0.4 <sup>a</sup>	3.0±0.4 <sup>c</sup>	13.8±2.5 <sup>c</sup>	13.8±2.5 <sup>c</sup>	0.22	35.7±12.4 <sup>c</sup>	30.3±6.0 <sup>b</sup>	66.0±15.7 <sup>c</sup>	22.3±66.9 <sup>d</sup>	0.30	0.30
<b>Month 3</b>												
1. Cd/Zn (control)	1.5±0.2 <sup>a</sup>	6.4±1.6 <sup>a</sup>	7.9±1.6 <sup>a</sup>	35.0±7.2 <sup>a</sup>	35.0±7.2 <sup>a</sup>	0.23	69.3±6.1 <sup>a</sup>	54.2±17.3 <sup>a</sup>	123.5±23.1 <sup>a</sup>	626.4±7.4 <sup>a</sup>	0.20	0.20
2. Cd/Zn + 0.75%HA	0.4±0.1 <sup>b</sup>	3.4±0.9 <sup>b</sup>	3.8±1.0 <sup>b</sup>	25.1±3.8 <sup>b</sup>	25.1±3.8 <sup>b</sup>	0.15	34.0±6.4 <sup>b</sup>	24.7±1.6 <sup>bc</sup>	58.6±7.9 <sup>c</sup>	499.1±49.4 <sup>b</sup>	0.12	0.12
3. Cd/Zn + 1.5%HA	0.5±0.0 <sup>b</sup>	3.1±0.3 <sup>b</sup>	3.6±0.3 <sup>b</sup>	19.4±1.0 <sup>bc</sup>	19.4±1.0 <sup>bc</sup>	0.19	34.0±9.1 <sup>b</sup>	23.6±2.9 <sup>bc</sup>	57.6±11.8 <sup>c</sup>	311.5±61.1 <sup>c</sup>	0.17	0.17
4. Cd/Zn + 10% cow manure	0.3±0.2 <sup>b</sup>	1.3±0.4 <sup>c</sup>	1.6±0.5 <sup>c</sup>	12.9±3.2 <sup>c</sup>	12.9±3.2 <sup>c</sup>	0.12	47.6±6.7 <sup>b</sup>	32.7±10.0 <sup>b</sup>	80.4±16.0 <sup>b</sup>	260.5±29.0 <sup>d</sup>	0.31	0.31
5. Cd/Zn + 20% cow manure	0.3±0.1 <sup>b</sup>	1.1±0.2 <sup>c</sup>	1.4±0.2 <sup>c</sup>	13.5±1.8 <sup>c</sup>	13.5±1.8 <sup>c</sup>	0.10	39.7±9.3 <sup>b</sup>	37.5±13.7 <sup>b</sup>	77.2±17.9 <sup>b</sup>	195.4±10.8 <sup>d</sup>	0.40	0.40

Data with different letter in the same column indicate a significant different at 5% level according to Duncan's test

### 3.2.2.4 วิจัยการทดลองที่ 2.2

การทดลองไฮโดรโปนิกส์คือการปลูกพืชในสารละลายที่มีโลหะหนักเป็นเวลา 15-20 วันนั้น เป็นวิธีการทดสอบความทนทานของพืชและการสะสมโลหะหนักได้ในเวลาเร็ว ผลการวิจัยแสดงว่า ต้นยี่หระที่ปลูกในสารละลายที่มี Cd และ Zn มีความทนทานและสะสม Cd และ Zn ได้ในปริมาณมาก ในส่วนราก ส่วนค่า TF ที่น้อยกว่า 1 ทั้งใน Cd และ Zn แสดงว่าพืชขนส่ง Cd และ Zn จากส่วนรากไปสู่ ส่วนต้นได้ในปริมาณน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับพืชที่ผลิตน้ำมันระเหย (aromatic plant) ชนิดอื่นๆ เช่น ต้นสะระแหน่ ต้นโหระพา (Zheljazkov et al. 2008) พบว่า ต้นยี่หระมีการสะสม Cd ในส่วนต้นมากกว่า 100 มก/กก (362.2 มก/กก) ซึ่งอาจสามารถจัดเป็นพืชแอกควิมิวเลเตอร์ในระดับเดียวกับ ผักกาดเขียว ผักกวางตุ้ง (*Brassica juncea*, *B. napus*, *B. rapa*) หรือผักบุ้ง (*Ipomoea aquatica*) (Ebbs & Kochian 1997, Wang et al. 2008)

ในทางตรงกันข้าม ต้นยี่หระไม่จัดว่าเป็นพืชแอกควิมิวเลเตอร์ของ Zn เพราะมีปริมาณ Zn ที่สะสมในส่วนต้นเพียง 749.4 มก/กก ที่ 20 มก/ลิตร (ถ้าเป็นแอกควิมิวเลเตอร์ต้องมากกว่า 1000 มก/กก; Baker & Brooks 1989) แต่ก็มีค่าใกล้เคียงกับพวกผักกาดอื่นๆ เช่น *B. pekinensis* (494 มก/กก ที่ 25 มก/ลิตร) *B. chinensis* (975 1 มก/กก ที่ 25 มก/ลิตร) (Islam et al. 2007) ดังนั้น ผลการทดลองไฮโดรโปนิกส์แสดงว่า เมื่อปลูกต้นยี่หระในดินที่ปนเปื้อน Cd และ Zn พืชก็อาจมีโอกาที่จะสะสม Cd และ Zn ในปริมาณที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคได้ (Zheljazkov et al. 2008)

ผลการทดลองจากการปลูกต้นยี่หระในดินที่ปนเปื้อน Cd และ Zn ควรจะสะท้อนสถานการณ์จริงได้ดีกว่าการทดลองไฮโดรโปนิกส์ (McGrath et al. 2001) ดินในบริเวณอำเภอแม่สอด จังหวัดตากมีปริมาณ Cd (67.9 มก/กก) และ Zn (2886.8 มก/กก) สูงกว่าค่ามาตรฐานของดินเกษตรมาก (0.1-0.6 มก/กก Cd, 20-110 มก/กก Zn; Kabata-Pendias 2001) ผลการวิจัยจากการปลูกต้นยี่หระในดินที่มี Cd และ Zn ซึ่งได้เติมปุ๋ยซีวีวและไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxyapatite, HA) แสดงว่าปุ๋ยซีวีวมีผลในการลดปริมาณ Cd และ Zn ในดินได้ดีกว่า HA เมื่อเปรียบเทียบกับดิน Cd/Zn ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้ส่วนหนึ่งก็คือ เป็นผลมาจากการเจือจาง (dilution effect) เมื่อผสมปุ๋ยซีวีวกับดิน Cd/Zn (Friedland 1989) นอกจากนี้ อาจเกิดจากการกีดกันหรือการตกตะกอนของ Cd และ Zn ในดิน การรวมตัวของ Cd และ Zn กับ OM ในปุ๋ยซีวีวตลอดจนการดูดซับ Cd และ Zn โดย OM (Friedland 1989, Ross 1994) ส่วนการเติม HA ในดินมีผลทำให้ Cd และ Zn ที่สกัดได้ (extractable) มีปริมาณลดลง ซึ่งอาจเป็นเพราะความเข้มข้นของ HA ที่ใช้ในการทดลอง (0.75% และ 1.5%) มีไม่พอที่จะมองเห็น การตรึง Cd และ Zn อย่างชัดเจน Boisson et al. (1999) แสดงการลดลงของ Cd และ Zn ในดินอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเติม HA ลงไป 5% Keller et al. (2005) ก็รายงานผลอย่างเดียวกันในดินที่มี Cd ดังนั้น HA อาจจะทำให้ผลการตรึงที่ดีเมื่อใส่ในดินที่ปนเปื้อน Cd และ Zn ในปริมาณที่ต่ำกว่าดินที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้

ผลการศึกษาแสดงว่า ทั้งปุ๋ยซีวีวและ HA ช่วยให้อัตราการรอดของต้นยี่หระดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพืชที่ปลูกในดิน Cd/Zn ปุ๋ยซีวีว มีผลทำให้น้ำหนักแห้งของพืชเพิ่มขึ้น 8-10 เท่า ในขณะที่

ที่ HA เพียง 4 เท่า Walker et al. (2003) และ Clemente et al. (2003) ก็รายงานผลในทำนองเดียวกัน การเติมปุ๋ยชีววัในดินมีข้อดีในการเพิ่ม OM ซึ่งเป็นอาหารของพืช ทำให้มีการหมุนเวียนของแร่ธาตุในดิน ลดความแน่นของดิน ตลอดจนความเป็นพิษของโลหะหนักในดิน (Stewart et al. 2000) ในทางตรงข้าม HA ไม่มีผลต่อสมบัติของดิน แต่สามารถลดความเป็นพิษของ Cd และ Zn โดยทำให้ปริมาณ Cd และ Zn ที่พืชดูดซับได้ลดลง (Mench et al. 1998)

ทั้งปุ๋ยชีววั และ HA สามารถลดปริมาณ Cd และ Zn ที่สะสมในส่วนต้น (ลำต้นและใบ) ได้อย่างมีนัยสำคัญ ปุ๋ยชีววั (10% และ 20%) ลดปริมาณ Cd ที่สะสมในใบถึง 5 เท่า ในลำต้น 6 เท่า และในราก 4 เท่า โดยปริมาณ Cd ในใบลดลงจาก 1.5 มก/กก เป็น 0.3 มก/กก ในทางตรงกันข้าม HA มีผลต่อการสะสมของ Zn มากกว่าปุ๋ยชีววั กล่าวคือ สามารถลดปริมาณ Zn ที่สะสมในใบจาก 69.3 มก/กก เป็น 34 มก/กก

ผลการทดลองหลายเรื่องที่แสดงประสิทธิภาพของปุ๋ยชีววัและ HA ในการลดปริมาณโลหะหนักที่สะสมในพืช (Ram & Verloo 1985, Narwal & Singh 1998, Boisson et al. 1999, Clemente et al. 2003, 2005, Walker et al. 2003, Keller et al. 2005, Pichtel & Bradway 2008) สารอินทรีย์สามารถตรึงโลหะหนักไว้ในดิน โดยการเปลี่ยนรูปของโลหะหนักที่พืชดูดซับได้เป็นรูปแบบที่รวมกับ OM คาร์บอนเนต หรือออกไซด์ (Walker et al. 2003) มีรายงานเกี่ยวกับการตรึง Cd และ Zn ไว้ในดินโดย HA หลายอัน เช่น ในพืชเศรษฐกิจชนิดต่างๆ (Chlopecka & Adriano 1997, Boisson et al. 1999, Knox et al. 2001, 2003, Keller et al. 2005) HA สามารถดูดซับ Zn และ Cd โดยการรวมตัวที่ผิว (surface complexation) และการตกตะกอน (coprecipitation) (Mench et al. 1999) อย่างไรก็ตาม ปริมาณ HA ที่มากเกินไป (เช่น 5%) อาจมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของพืช และลดการดูดซับธาตุอาหารของพืชได้เหมือนกัน (Boisson et al. 1999) ข้อจำกัดของ HA อีกประการหนึ่งคือมีราคาแพง

ในการทดลองนี้ สารตรึง Cd และ Zn สำหรับต้นยี่หระที่ให้ผลดีที่สุดคือ ปุ๋ยชีววั 20% เพราะสามารถลดปริมาณ Cd ที่สะสมในใบของต้นยี่หระเหลือเพียง 0.3 มก/กก เท่านั้น ปริมาณ Cd นี้มีค่ามากกว่าค่ามาตรฐานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (0.2 มก/กก; Commission of the European Communities 2001, Codex Alimentarius Commission 2004) ส่วน HA มีผลทำให้ปริมาณ Zn ในใบลดลงเป็น 34 มก/กก ซึ่งถือว่ามีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดสำหรับ Zn (99.4 มก/กก; Codex Alimentarius Commission 2001)

### 3.2.3 การทดลองที่ 2.3 การทดสอบประสิทธิภาพของสารตรึงโลหะหนัก (ไคแคลเซียมฟอสเฟต และซีโอไลต์) ในการลดการสะสม Cd ในกลุ่มพืชเศรษฐกิจ

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลในระยะเวลา 1 เดือน เกี่ยวกับอัตราการเติบโต (น้ำหนักสด ความยาวราก ความยาวลำต้น) (ตารางที่ 1-10) และปริมาณ Cd ที่พืชสะสมในส่วนราก ลำต้นและใบ (ตารางที่ 1-11)

ตารางที่ 1-10 แสดงการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน Cd ที่มีการปรับสภาพดินด้วยสารซีโอไลต์และไคแคลเซียมฟอสเฟตเป็นเวลา 1 เดือน พืชแต่ละชนิดมีการตอบสนองต่อดินที่มีการปรับสภาพแตกต่างกัน จากผลการทดลองเมื่อปลูกพืชเป็นเวลา 1 เดือน พบว่า อ้อยและยูคาลิปตัสมีความทนทานต่อดินที่มี Cd (ประมาณ 30 มก/กก) สามารถเติบโตได้ดีโดยมีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งมากกว่ากลุ่มทดลองอื่นๆ ส่วนพืชที่มีอัตราการเติบโตลดลงเมื่อปลูกในดิน Cd เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ได้แก่ ข้าวโพด หนุ่ยเลี้ยงสัตว์ หนุ่ยแฝก ถั่วเหลือง และกระถินเทพา โดยภาพรวมไคแคลเซียมฟอสเฟตกระตุ้นการเติบโตของพืชได้ดีกว่าซีโอไลต์ เพราะไคแคลเซียมฟอสเฟตมี P ซึ่งเป็นธาตุอาหารหลักของพืช จึงทำให้พืชมีการเติบโตเร็วกว่าสารซีโอไลต์ซึ่งมี Na, Si และ Al ซึ่งมีได้เป็นธาตุอาหารของพืช

ตารางที่ 1-11 แสดงการสะสมของ Cd ในส่วนต่างๆ ของพืชเมื่อปลูกพืชเป็นเวลา 1 เดือน พืชทุกชนิดมีการสะสม Cd ในรากมากกว่าส่วนต้น พืชที่สามารถขนส่ง Cd จากรากสู่ต้นและใบได้คือ ข้าวโพด อ้อย หนุ่ยเลี้ยงสัตว์ ถั่วเหลือง ยูคาลิปตัส ส่วนพืชที่มีการสะสม Cd ในรากเท่านั้น ได้แก่ หนุ่ยแฝก และกระถินเทพา สารปรับสภาพทั้งซีโอไลต์และไคแคลเซียมฟอสเฟตมีผลต่อปริมาณ Cd ที่สะสมในรากที่เพิ่มขึ้น เช่นในข้าวโพด อ้อย หนุ่ยแฝก ยูคาลิปตัส และกระถินเทพา มีความเป็นไปได้ว่าไคแคลเซียมฟอสเฟตเพิ่มการเติบโตของพืช เมื่อพืชมีมวลชีวภาพมากขึ้นที่ทำให้ปริมาณ Cd ที่สะสมเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนซีโอไลต์อาจมีส่วนในการลดความเป็นพิษของ Cd ทำให้การเติบโตดีขึ้น และดูดซับ Cd ได้มากขึ้น



ตารางที่ 1-11 แสดงการสะสมของแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของพืช

พืช	ส่วน	Control		Cd		Cd + Zeolite		Cd + Dicalcium phosphate	
		เดือนที่ 0	เดือนที่ 1	เดือนที่ 0	เดือนที่ 1	เดือนที่ 0	เดือนที่ 1	เดือนที่ 0	เดือนที่ 1
ข้าวโพด	ใบ	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.52±0.73	0.00±0.00	0.21±0.37	0.00±0.00	0.00±0.00
	ลำต้น	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.91±1.29	0.00±0.00	0.64±1.06	0.00±0.00	0.00±0.00
	ผล	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.82±1.15	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
	ราก	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	5.88±0.58	0.00±0.00	39.18±12.34	0.00±0.00	11.69±10.15
อ้อย	ต้น	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.20±0.23	0.00±0.00	0.15±0.26
	ราก	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	8.80±1.88	0.00±0.00	21.20±4.31	0.00±0.00	19.50±6.02
หญ้าเลี้ยงสัตว์	ต้น	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	6.28±3.32	0.00±0.00	10.42±1.26	0.00±0.00	7.87±1.96
	ราก	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	16.05±0.33	0.00±0.00	26.58±5.08	0.00±0.00	17.17±2.83
หญ้าแฝก	ต้น	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
	ราก	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	2.25±2.76	0.00±0.00	6.76±5.72	0.00±0.00	4.03±2.14
ถั่วเหลือง	ใบ	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	1.62±2.01	0.00±0.00	1.23±0.45	0.00±0.00	0.00±0.00
	ลำต้น	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.12±0.17	0.00±0.00	0.20±0.34	0.00±0.00	0.00±0.00
	ผล	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
	ราก	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	1.35±1.91	0.00±0.00	17.39±6.52	0.00±0.00	0.68±1.17
ขุขาว	ใบ	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	1.13±1.96
	ลำต้น	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	4.09±1.92	0.00±0.00	3.32±5.76
	ราก	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	1.69±2.39	0.00±0.00	19.20±2.39	0.00±0.00	7.59±4.33
กระถินเทพา	ใบ	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
	ลำต้น	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
	ราก	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.47±0.67	0.00±0.00	11.91±7.48	0.00±0.00	10.42±13.80



### 3.3 การทดลองที่ 3 การทดลองบำบัดแคดเมียมในน้ำและตะกอนดินโดยใช้พืชน้ำและพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำที่ไม่ใช่พืชท้องถิ่นในระดับห้องปฏิบัติการและเรือนทดลอง

#### 3.3.1 การบำบัดแคดเมียมในน้ำโดยใช้พืชลอยน้ำ (floating plants)

เมื่อครบกำหนด 14 วัน ทำการเก็บตัวอย่างน้ำและพืช ทำการบันทึกน้ำหนักสดของพืชและวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมที่พืชแต่ละชนิดสะสมไว้ โดยจอกหูหนูและผักตบชวานำมาแยกส่วนเป็นส่วนรากและส่วนเหนือราก ส่วนสาหร่ายหางกระรอกนำมาแยกส่วนเป็นส่วนใบและลำต้น ค่า pH ของน้ำระหว่างการทดลองมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 7.73-9.14 ผลการศึกษาการเจริญเติบโต โดยวัดจากน้ำหนักสดก่อนและหลังการทดลอง และปริมาณการสะสมแคดเมียมของพืชแสดงในตารางที่ 1-12 และ ตารางที่ 1-13 ตามลำดับ ส่วนลักษณะภายนอกของพืชในกลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 1-9

ตารางที่ 1-12 การเจริญเติบโตของพืชที่ปลูกในสารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ระยะเวลา 14 วัน

ชนิดพืช	น้ำหนักสด (กรัม)		
	เริ่มต้น	กลุ่มควบคุม	กลุ่มทดลอง
จอกหูหนู	50	45.13	37.03
ผักตบชวา	40	44.38	42.11
สาหร่าย	30	25.18	28.00

จากผลการทดลองในตารางที่ 1-12 และรูปที่ 1-9 พบว่าการเจริญเติบโตของพืชลอยน้ำทั้ง 3 ชนิด เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 14 วัน น้ำหนักสดของพืชแต่ละชนิดในกลุ่มทดลอง มีค่าน้อยกว่าพืชชนิดเดียวกันในกลุ่มควบคุม อย่างไรก็ตาม ค่าน้ำหนักสดที่ได้ของพืชแต่ละชนิดในกลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุม ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $P < 0.05$  และจากการสังเกตลักษณะภายนอกของพืชแต่ละชนิด พบว่า หลังจากการทดลองผ่านไป 7 วัน ใบและลำต้นของสาหร่ายหางกระรอกเริ่มมีสีซีด และมีใบหลุดร่วง ส่วนใบของจอกหูหนูเริ่มเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล เมื่อการทดลองผ่านไปเพียง 4 วัน และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า ใบของจอกหูหนูเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลทั้งหมด ส่วนผักตบชวายังคงมีสีและลักษณะของใบและลำต้นปกติตลอดระยะเวลาการทดลอง ซึ่งจากการที่มีสีซีดหรือมีสีน้ำตาลของพืช อาจเนื่องมาจากการลดอัตราการสังเคราะห์แสงและการสร้างคลอโรพลาสต์ของพืช ดังเช่นการศึกษาของ Viren Kumar Mishra and B.D. Tripathi, 2008 พบว่า พืชน้ำทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ *Pistia stratiotes* (water lettuce), *Spirodela polyrrhiza* W.Koch (duckweed) and *Eichhornia crassipes* สามารถเจริญเติบโตได้ในสารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 1.0, 2.0 และ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชน้ำทั้ง 3 ชนิด ขณะที่ P.Garg et al, 1996 พบว่าแคดเมียมทำให้มี

ผลต่อการสร้างคลอโรพลาสต์ของ *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle ลดลง เมื่อปริมาณความเข้มข้นของ แคลเซียมสูงกว่า 5 ไมโครโมล

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ว่าน้ำหนักสดในชุดทดลองและชุดควบคุม ไม่มีความแตกต่างกัน แต่ปริมาณความเข้มข้นของแคลเซียมในน้ำ อาจมีผลต่อกลไกการสังเคราะห์แสง ซึ่งส่งผลให้ลักษณะภายนอกของจอกหูหนูและสาหร่ายเปลี่ยนแปลงไป แต่ไม่มีผลกระทบต่อลักษณะภายนอกของผักตบชวา



จอกหูหนู



สาหร่ายหางกระรอก



ผักตบชวา

รูปที่ 1-9 ลักษณะภายนอกของพืชลอยน้ำในกลุ่มทดลอง (ซ้าย) และกลุ่มควบคุม (ขวา)

ตารางที่ 1-13 ปริมาณแคดเมียมในน้ำและส่วนต่างๆ ของพืชลอยน้ำเมื่อทดลองครบระยะเวลา 14 วัน

ส่วนต่างๆของพืช	ปริมาณแคดเมียม	
	กลุ่มควบคุม	กลุ่มทดลอง
น้ำ + ผักตบชวา (mg/l)	0.077	0.051
ใบผักตบชวา (mg/kg dry wt)	-	8.683
ลำต้นผักตบชวา (mg/kg dry wt)	-	22.947
รากผักตบชวา (mg/kg dry wt)	-	1068.133
น้ำ + จอกหูหนู (mg/l)	0.077	0.062
ใบจอกหู (mg/kg dry wt)	-	607.133
รากจอกหูหนู (mg/kg dry wt)	-	NA
น้ำ + สาหร่ายหางกระรอก (mg/l)	0.077	0.022
ลำต้นสาหร่ายหางกระรอก (mg/kg dry wt)	-	401.733
ใบสาหร่ายหางกระรอก (mg/kg dry wt)	-	734.600
รากสาหร่ายหางกระรอก (mg/kg dry wt)	-	NA

จากตารางที่ 1-13 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณแคดเมียมในน้ำในกลุ่มทดลองมีค่าลดลง โดยสาหร่ายหางกระรอก สามารถลดปริมาณแคดเมียมในน้ำได้มากที่สุดถึง 71.43% เมื่อเปรียบเทียบกับพืชอีก 2 ชนิด ขณะที่ผักตบชวาและจอกหูหนูสามารถลดปริมาณแคดเมียมในน้ำได้ 33.77% และ 19.48% ตามลำดับ และเมื่อวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของพืชแต่ละชนิด พบว่า ส่วนใบของจอกหูหนูและรากผักตบชวาสามารถสะสมแคดเมียมได้มากกว่าส่วนต้นและใบ ซึ่งในสาหร่ายหางกระรอกจะพบที่ส่วนใบกับลำต้นเท่านั้น โดยจากการวิเคราะห์ ไม่พบแคดเมียมสะสมในส่วนรากของสาหร่ายหางกระรอกในทุกชุดการทดลอง จากงานวิจัยของ S.H. Hasan et al (2007) พบว่า ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) สามารถเจริญเติบโตได้ตามปกติในสารละลายแคดเมียมที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งหากความเข้มข้นมากกว่านี้ (4.00 และ 6.00 มิลลิกรัมต่อลิตร) จะทำให้การเจริญเติบโตของผักตบชวาลดลง และจากการศึกษาถึงปริมาณการสะสมแคดเมียมในผักตบชวา พบว่าเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการทดลองที่ 16 วัน พบว่า ผลการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของผู้วิจัย เนื่องจากการสะสมแคดเมียมในส่วนรากของผักตบชวา จะมีค่าสูงกว่าการสะสมในส่วนเหนือราก นอกจากนี้ผลการศึกษาของ Virendra Kumar Mishra and B.D. Tripathi (2009) พบว่า ในระยะเวลา 11 วัน ผักตบชวาสามารถใช้กำจัดโครเมียมและสังกะสีในน้ำได้ดีอีกด้วย โดยมีเปอร์เซ็นต์ในการกำจัดสูงถึง 95% และ 84% ตามลำดับ

ในส่วนของสาหร่ายหางกระรอก ได้มีรายงานการวิจัย พบว่า *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle มีความสามารถสะสมแคดเมียมได้ถึง 13.71 ไมโครโมลต่อกรัมน้ำหนักแห้ง เมื่ออยู่ในแคดเมียมที่เข้มข้น 25 ไมโครโมลเป็นเวลา 168 ชั่วโมง (P.Garg et al, 1996) และจากการศึกษาของ Shweta Saraswat and J.P.N. Rai, 2010 พบว่า เซลล์ที่ตายแล้วของ *E. crassipes* มีการดูดซับ Cd (II) ในน้ำได้ดีที่สุดที่ pH 5

มีรายงานวิจัยพบว่าพืชน้ำหลายชนิด สามารถนำมาใช้กำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำได้ เช่น Water Pennywort (*Hydrocotyle umbellata*), Duckweed (*Lemna minor*), Water Hyacinth (*Eichornia crassipes* (Mart.) Solms) (Dierberg et al., 1987, (Mo et al., 1989, and zhu et al., 1999) การกำจัดหรือการที่พืชน้ำสามารถสะสมโลหะหนักไว้ในส่วนต่างๆ ของพืชได้ เนื่องจากพืชน้ำมีการนำโลหะหนักผ่านเข้าทางเซลล์ผิวรากพืชโดยกระบวนการ Rhizofiltration ซึ่งพืชที่มีระบบรากฝอยจะสามารถนำโลหะหนักเข้าสู่เซลล์ผิวรากได้ดีกว่าพืชที่มีระบบรากแบบอื่น ซึ่งจากการศึกษาของ Zhu et al., 1999 พบว่าผักตบชวาสามารถกำจัด ตะกั่วและแคดเมียมได้ดี โดยที่ไม่มีอาการหรือลักษณะที่เกิดจากได้รับพิษจากสารเหล่านี้

### 3.3.2 การบำบัดแคดเมียมในตะกอนดินโดยใช้พืชโผล่พ้นน้ำ (emerged plants)

ก่อนทำการทดลองได้ทำการตรวจวัดคุณสมบัติต่างๆ ของตะกอนดิน รวมทั้งปริมาณแคดเมียม เริ่มต้น ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1-14

ตารางที่ 1-14 คุณสมบัติของตะกอนดินที่ใช้ในการทดลอง

คุณสมบัติตะกอนดิน	ค่าที่วัดได้
texture	Loamy sand
pH	5.69 ± 0.24
OM	3.04 %
CEC	26.76 emol/kg
Total N	0.15 mg/kg
P	155 mg/kg
K	245 mg/kg
Cadmium เริ่มต้น	122.97 mg/kg

เมื่อครบกำหนด 1 เดือน ทำการเก็บตัวอย่างตะกอนดินและพืช เพื่อดูลักษณะภายนอกและวัดการเจริญเติบโตของพืช โดยใช้น้ำหนักสดรวมทั้งวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในตะกอนดินและส่วนต่างๆ ของพืชได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1-15 และ ตารางที่ 1-16 ตามลำดับ ส่วนลักษณะภายนอกของพืชชนิดต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 1-10

ตารางที่ 1-15 การเจริญเติบโตของพืชที่ปลูกในตะกอนดินเมื่อครบระยะเวลา 30 วัน

ชนิดพืช	น้ำหนักพืช (กรัม)		
	เริ่มต้น	กลุ่มควบคุม	กลุ่มทดลอง
คล้าน้ำ	500	480.45	512.53
อะเมซอนใบกลม	300	228.10	219.65
ป๊อปปี้น้ำ	300	88.89	77.62



ป๊อปปี้น้ำ



อะเมซอนใบกลม



คล้าน้ำ

รูปที่ 1-10 ลักษณะภายนอกของพืชโผล่พ้นน้ำในกลุ่มทดลอง (ซ้าย) และกลุ่มควบคุม (ขวา)



จากผลการศึกษาพบว่า อัตราการเจริญเติบโตของพืชทั้ง 3 ชนิดลดลงทั้งในกลุ่มควบคุม (ไม่มี แคลเมียม) และกลุ่มทดลอง (มีแคลเมียม) ตะกอนดินมีค่า pH ก่อนไปทางกรดอ่อนๆ ธาตุอาหารใน ตะกอนดิน พบว่ามีค่าไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียมเท่ากับ 0.15 ,155 และ 295 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนค่า organic matter มีค่าเท่ากับ 3.04%

ตารางที่ 1-16 ปริมาณแคลเมียมในตะกอนดินและส่วนต่างๆ ของพืชไผ่พันธุ์น้ำเมื่อทดลองครบ ระยะเวลา 30 วัน

กลุ่มทดลอง	ปริมาณแคลเมียม ในตะกอนดิน เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)	ปริมาณแคลเมียม ในตะกอนดินเมื่อ สิ้นสุดการทดลอง (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)	ปริมาณแคลเมียมใน ส่วนต่างๆของพืช (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)
ตะกอนดิน + cd - คล้าน้ำ	122.197	141.610	-
ส่วนลำต้นคล้าน้ำ	-	-	2.757
ส่วนใบคล้าน้ำ	-	-	2.990
ส่วนรากคล้าน้ำ	-	-	23.197
ตะกอนดิน+ cd- อะเมซอน	122.197	106.820	-
ส่วนลำต้นอะเมซอนน้ำ	-	-	30.633
ส่วนใบอะเมซอนน้ำ	-	-	7.143
ส่วนรากอะเมซอนน้ำ	-	-	80.853
ตะกอนดิน + cd - ป๊อปปี้	122.197	165.333	-
ส่วนลำต้นป๊อปปี้	-	-	62.853
ส่วนใบป๊อปปี้	-	-	22.370
ส่วนรากป๊อปปี้	-	-	361.337

จากผลการทดลอง พบว่าปริมาณการสะสมแคลเมียมของพืชทั้ง 3 ชนิดต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ป๊อปปี้สามารถสะสมแคลเมียมได้มากที่สุด รองลงมาได้แก่ อะเมซอนน้ำและต้นคล้าน้ำ โดยส่วนรากของป๊อปปี้สามารถสะสมแคลเมียมได้สูงสุด รองลงมาคือส่วนลำต้นและใบ ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกับอะเมซอนน้ำที่แคลเมียมส่วนใหญ่จะสะสมอยู่ที่รากของอะเมซอน ส่วนต้นคล้าน้ำ ซึ่งมีความสามารถสะสมแคลเมียมได้น้อยที่สุด พบว่าแคลเมียมจะอยู่ที่รากเป็นส่วนใหญ่ ส่วนปริมาณแคลเมียมในลำต้นและใบไม่แตกต่างกัน

อย่างไรก็ตาม พืชน้ำที่เลือกใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นพืชน้ำที่จัดเป็น ไม้ประดับ ซึ่งยังไม่มีผู้ใดได้ทำการศึกษามาก่อน จากผลการทดลองในเบื้องต้นของงานวิจัยนี้ พบว่าป๊อปปี้่น้ำและอะเมซอนน้ำมีแนวโน้มในการนำมาใช้กำจัดแคดเมียมในตะกอนดินได้ โดยความสามารถของพืชทั้ง 3 ชนิดเมื่อเทียบต่อหน่วยน้ำหนักแห้งพบว่า การสะสมแคดเมียมของพืชทั้ง 3 ชนิดสามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ ป๊อปปี้่น้ำ > อะเมซอนใบกลม > คล้าน้ำ

จากการศึกษาพืชน้ำในการดูดซับโลหะหนัก ส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาการดูดซับโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำโดยใช้พืชชุ่มน้ำ เช่น หญ้าแฝก ฐปถายี กก ผักตบชวา สามารถดูดซับโลหะหนักได้ โดยผักตบชวาสามารถดูดซับ ทองแดง ตะกั่ว แคดเมียม นิกเกิล และสังกะสี ได้ ซึ่งโลหะหนักเหล่านี้จะสะสมอยู่ที่ส่วนรากมากกว่าส่วนเหนือราก 3-15 เท่า และปริมาณการสะสม ทองแดง > สังกะสี > นิกเกิล > ตะกั่ว > แคดเมียม ตามลำดับ (Shao Weiliao and Wen-lian Chang, 2003)

### 3.3.3 การทดลองประสิทธิภาพของพืชในการบำบัดแคดเมียมในตะกอนดิน โดยระบบบึงประดิษฐ์แบบ surface flow ดังแสดงในรูปที่ 1-11



รูปที่ 1-11 การทดลองประสิทธิภาพของพืชในการบำบัดแคดเมียมในตะกอนดิน โดยระบบบึงประดิษฐ์แบบ surface flow

จากผลการศึกษาในข้อ 2 พบว่า พืชที่มีความสามารถในการลดปริมาณแคดเมียมในตะกอนดินที่ดีที่สุดคือ ป๊อปปี้่น้ำ จึงได้ทำการทดสอบความสามารถของพืชชนิดนี้ในการลดปริมาณแคดเมียมในตะกอนดินที่เก็บตัวอย่างจากพื้นที่ศึกษา โดยทำการคัดเลือกตะกอนดินจากพื้นที่ศึกษามา 3 จุดที่มีความเข้มข้นต่างๆ กันมาทดลอง โดยได้ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนดินดังแสดงในตารางที่ 1-17

ตารางที่ 1-17 คุณสมบัติของตะกอนดินที่เก็บจากพื้นที่ศึกษา

คุณสมบัติตะกอนดิน	ค่าที่วัดได้		
	ตะกอนดินจุดที่ 1	ตะกอนดินจุดที่ 2	ตะกอนดินจุดที่ 3
texture	Loamy sand	Sandy loam	Sand
pH	8.17	7.63	5.4
OM (%)	1.98	2.56	2.95
CEC (emol/kg)	4.51	6.59	2.95
Total N (mg/kg)	0.02	0.02	0.05
.P (mg/kg)	11	22	4
K (mg/kg)	28	49	26
Cadmium (mg/kg)	44.65	15.35	6.1

ส่วนการศึกษาประสิทธิภาพของป๊อปปี้น้ำในการสะสมแคดเมียมในตะกอนดิน โดยใช้ระบบ บึงประดิษฐ์ในระดับเรือนทดลองสามารถแสดงผลการทดลองได้ดังตารางที่ 1-18

ตารางที่ 1-18 ประสิทธิภาพการสะสมแคดเมียมของป๊อปปี้น้ำ

กลุ่มทดลอง	ปริมาณแคดเมียมใน ตะกอนดินเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)	ปริมาณแคดเมียมใน ตะกอนดินเมื่อสิ้นสุด การทดลอง (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)	ปริมาณแคดเมียม ในพืช (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)
ตะกอนดินจุดที่ 1 + cd - พืช	44.65	43.70	-
ตะกอนดินจุดที่ 1 + cd + พืช	44.65	32.60	-
ส่วนลำต้นพืช	-	-	2.90
ส่วนใบพืช	-	-	2.70
ส่วนรากพืช	-	-	17.30
ตะกอนดินจุดที่ 2 + cd - พืช	15.35	14.25	-
ตะกอนดินจุดที่ 2 + cd + พืช	15.35	5.2	-
ส่วนลำต้นพืช	-	-	1.90
ส่วนใบพืช	-	-	1.70
ส่วนรากพืช	-	-	5.75

## ตารางที่ 1-18 ประสิทธิภาพการสะสมแคดเมียมของปือปี่น้ำ (ต่อ)

กลุ่มทดลอง	ปริมาณแคดเมียมใน ตะกอนดินเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)	ปริมาณแคดเมียมใน ตะกอนดินเมื่อสิ้นสุด การทดลอง (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)	ปริมาณแคดเมียม ในพีช (มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)
ตะกอนดินจุดที่ 3 + cd - พีช	6.1	1.82	-
ตะกอนดินจุดที่ 3 + cd + พีช	6.1	0.26	-
ส่วนลำต้นพีช	-	-	ND
ส่วนใบพีช	-	-	ND
ส่วนรากพีช	-	-	0.80

คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษา โดยใช้พีชน้ำที่เป็นกลุ่มไม้ประดับ ซึ่งยังไม่มีรายงานวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพของพีชเหล่านี้มาก่อน จากผลการศึกษาการบำบัดแคดเมียมในตะกอนดิน โดยใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบริเวณผิวหน้า พบว่าปือปี่น้ำสามารถบำบัดแคดเมียมในตะกอนดินได้ โดยประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง เมื่อความเข้มข้นของปริมาณแคดเมียมในตะกอนดินสูงขึ้น กล่าวคือ ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 85.67%, 63.51%, และ 25.40% เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมเท่ากับ 6.1, 15.35, และ 44.65 mg/kg ตามลำดับ

J.I.Nirmal Kumar et al., 2008 ได้ทำการศึกษาการสะสมโลหะหนักชนิดต่างๆ ได้แก่ แคดเมียม โคบอลต์ ทองแดง นิเกิล ตะกั่ว และสังกะสีในน้ำและตะกอนดินโดยใช้พีช 7 ชนิดที่พบในพื้นที่ศึกษาได้แก่ *Ipomoea aquatica* Forsk, *Eichhornia crassipes*, (Mart.) Solms, *Typha angustata* Bory&Chaub, *Echinochloa colonum* (L.) Link, *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle, *Nelumbo nucifera* Gaerth. และ *Vallisneria spiralis* L. ผลการศึกษาพบว่า พีชที่สะสมโลหะหนักได้มากที่สุดคือ *Nelumbo nucifera* Gaerth. (ทองแดง > สังกะสี > ตะกั่ว > โคบอลต์ > นิเกิล > แคดเมียม) ส่วนพีชที่สะสมโลหะหนักได้น้อยที่สุดคือ *Echinochloa colonum* (L.) Link. (สังกะสี > ทองแดง > นิเกิล > โคบอลต์ > ตะกั่ว > แคดเมียม) โดยพีชที่สะสมแคดเมียมได้ดีที่สุดคือ *Ipomoea aquatica* Forsk

มีรายงานวิจัย พบว่าการใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบชนิดน้ำไหลใต้ผิวดินในการบำบัดซัลไฟเนียมโดยใช้ ต้นอ้อ (*Phragmites australis*) และธูปฤาษี (*Typha latifolia*) พบว่าพีชทั้ง 2 ชนิดสามารถสะสมซัลไฟเนียมได้ โดย *Typha latifolia* สะสมซัลไฟเนียมไว้ที่ส่วนรากมากกว่า ขณะที่ *Phragmites australis* สามารถสะสมซัลไฟเนียมไว้ที่ส่วนใบมากกว่า (Azaizeh et al, 2006) ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยของ Asa

Fritioft and Maria Greger (2006) ที่พบว่า *Potamogeton natans* สามารถสะสม สังกะสี ทองแดง แคลเซียม และตะกั่วไว้ในส่วนราก ลำต้น และใบได้ โดยส่วนรากเป็นส่วนที่สะสมโลหะหนักได้มากที่สุด ซึ่งการสะสมโลหะหนักในส่วนต่างๆ ของพืชแต่ละชนิด ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดพืช ปริมาณและรูปของโลหะหนัก ความเป็นพิษของโลหะหนักต่อพืชชนิดนั้นๆ สภาพของสิ่งแวดล้อมที่พืชเจริญเติบโตอยู่เช่นลักษณะของตะกอนดิน คุณภาพน้ำ ซึ่งจากการศึกษาของ Qian Wang et al., 2010 พบว่า humic acids มีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง และแคลเซียมในตะกอนดินของ *Vallisneria spiralis* L. ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.01$ )

### 3.4 การทดลองที่ 4 การศึกษาประสิทธิภาพของการใช้จุลินทรีย์ร่วมกับพืชในกระบวนการบำบัด แคลเซียม

#### 3.4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและสกุลของแบคทีเรียที่เรียกค้นพบที่คัดแยกได้จากพื้นที่ปนเปื้อนแคลเซียม

ผลการจำแนกสกุลของแบคทีเรียที่เรียกค้นพบที่คัดแยกได้สายพันธุ์ TM6 และ TN6 โดยใช้วิธีการหาลำดับเบสบางส่วนของยีน 16s rRNA พบว่า แบคทีเรีย TM6 คือแบคทีเรียในสกุล *Arthrobacter* sp. TM6 และ TN 6 คือแบคทีเรียในสกุล *Alcaligenes* sp. TN6 นอกจากนี้ ยังนำแบคทีเรียที่เรียกค้นพบอีก 1 สายพันธุ์ที่คัดแยกได้จากดินที่ปนเปื้อนแคลเซียม โดย Prapagdee และ Watcharamusik (2009) คือ *Ralstonia* sp. TAK1 มาศึกษาพร้อมด้วย สำหรับลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโคโลนีบนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง LB และลักษณะรูปร่างเซลล์แบคทีเรียที่เรียกค้นพบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ *Arthrobacter* sp. TM6, *Alcaligenes* sp. TN6 และ *Ralstonia* sp. TAK1 ดังแสดงในรูปที่ 1-12 ก 1-12 ข และ 1-12 ค ตามลำดับ



(ก) *Arthrobacter* sp. TM6

ข) *Alcaligenes* sp. TN6ค) *Ralstonia* sp. TAK1

รูปที่ 1-12 ลักษณะโคโลนีของแบคทีเรียที่เรียด้านทานแคดเมียมบนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง LB

ก) *Arthrobacter* sp. TM6; ข) *Alcaligenes* sp. TN6; ค) *Ralstonia* sp. TAK1

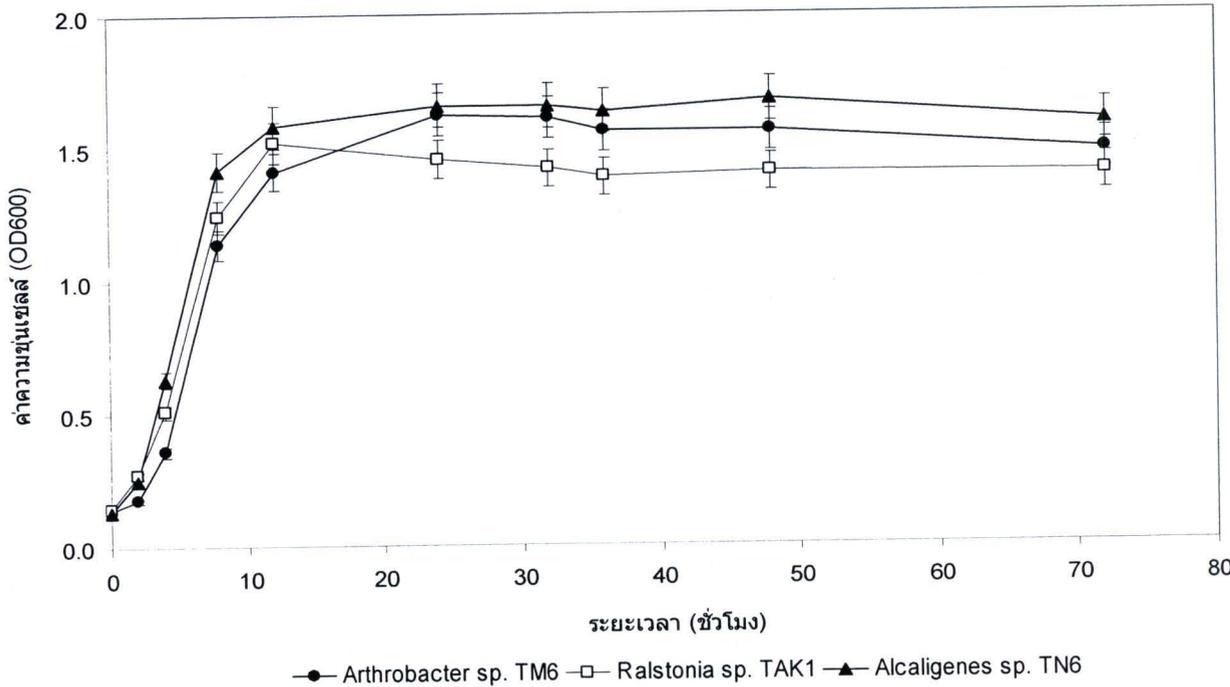
พบแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบหลายสกุลที่สามารถต้านทานโลหะหนักจากบริเวณที่ปนเปื้อนโลหะหนัก เช่น *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Ralstonia*, *Enterobacter*, *Bacillus*, *Arthrobacter*, *Corynebacterium* เป็นต้น (Trojanovska et al., 1997; Brim et al., 1999; Roane and Pepper, 2000; Goris et al., 2001; Iyer et al., 2005) Roane และ Pepper (2000) รายงานว่า *Arthrobacter* ที่แยกได้จากดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมมีระดับความต้านทานแคดเมียมสูงสุด (Maximum resistance level) น้อยกว่า 5 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร นอกจากนี้ ยังมีรายงานที่ *Ralstonia* หลายสปีชีส์ที่มีความสามารถในการต้านทานต่อโลหะหนักได้ โดยเฉพาะ *R. metallidurans* ความต้านทานต่อความเป็นพิษของแคดเมียม สังกะสี และโคบอลต์ได้ดี (Goris et al., 2001) ซึ่งกลไกการต้านทานต่อความเป็นพิษต่อแคดเมียมของแบคทีเรียส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับกลไกการปั๊มแคดเมียมออกจากเซลล์ (Cadmium efflux pump mechanism) เช่น *Alcaligenes eutrophus* กำจัดแคดเมียมออกจากเซลล์โดยอาศัย RND

(Resistance-nodulation-cell division) driven system ที่มี CzcABC หรือ CzcCBA complex เป็น Efflux pump โดยอาศัยพลังงานจาก Proton gradient ทำหน้าที่นำสังกะสีและโคบอลต์ออกจากเซลล์ (Nies, 1999)

นอกจากการใช้แบคทีเรียในการกำจัดโลหะหนักแล้ว ยังมีการนำจุลินทรีย์อีกหลายกลุ่มมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดโลหะหนัก โดยเฉพาะโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำ ซึ่งอาศัยกระบวนการจับหรือดูดซับโลหะหนักกับเซลล์จุลินทรีย์ (Metal binding หรือ Biosorption) ซึ่งการดูดซับนี้มีการใช้ทั้งเซลล์ที่มีชีวิต (Living cell) และ ไม่มีชีวิต (Nonliving biomass) ของจุลินทรีย์มาเป็นตัวดูดซับ (Biosorbent) หรือตัวจับกับโลหะหนักในสารละลาย ซึ่งการดูดซับโลหะหนักเกิดขึ้นบริเวณผนังเซลล์ของจุลินทรีย์อาศัยการเกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange reaction) โดยเกิดการจับกันระหว่างประจุลบบริเวณผนังเซลล์จุลินทรีย์ (Polyanionic cell wall) หรือเรียกว่า Binding site กับประจุบวกของโลหะหนัก ดังนั้นจึงมีการนำชีวมวล (Biomass) ของจุลินทรีย์กลุ่มต่างๆ มาใช้เป็น Biosorbent ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย เนื่องจากเป็นวิธีที่เสียค่าใช้จ่ายน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทางเคมี ตัวอย่างการใช้ชีวมวลของจุลินทรีย์มาใช้ในการดูดซับโลหะหนัก ได้แก่ การใช้เซลล์ยีสต์มาดูดซับโครเมียม แคลเดียม ตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำ การใช้สาหร่ายทะเล (Marine macroalgae หรือ Seaweed) สีนํ้าตาล (*Ecklonia radiata*) มาดูดซับทองแดง หรือการนำชีวมวลของกลุ่มจุลินทรีย์จากตะกอนสลัดจ์ (Sludge) ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน มาตากแห้งและบดให้มีขนาดเล็กประมาณ 0.84-1.18 มิลลิเมตร เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวการสัมผัสให้มากขึ้น และนำมาใช้เป็น Biosorbent และบรรจุลงในคอลัมน์เพื่อนำไปใช้ในการดูดซับโลหะหนักในน้ำ (Hawari and Mulligan, 2006)

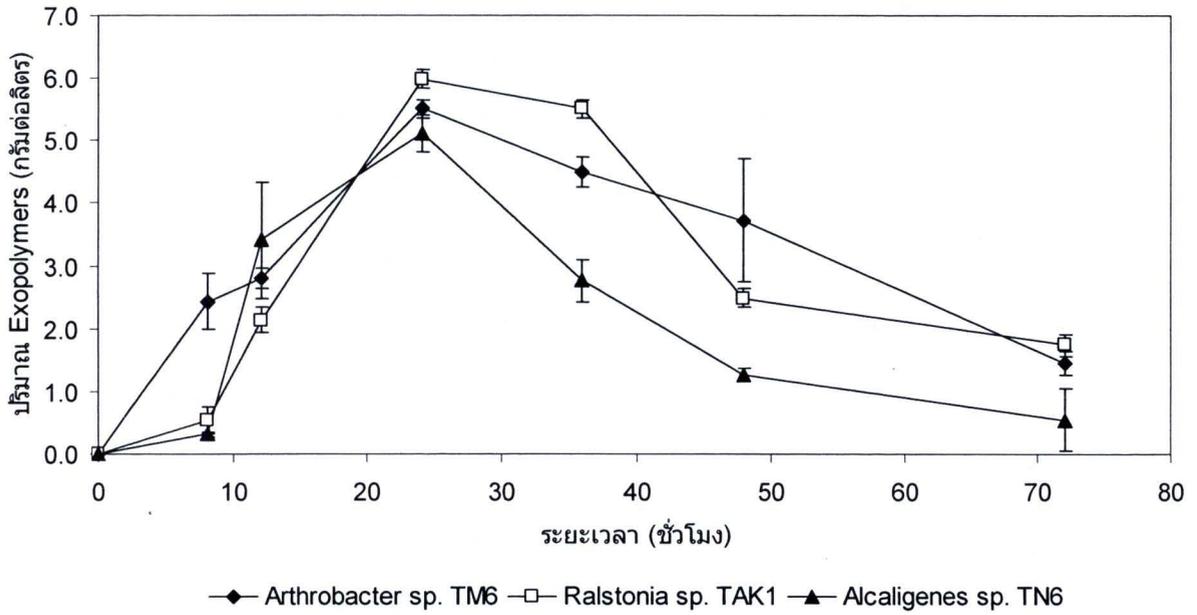
#### 3.4.2. การเจริญและการสร้าง Exopolymers ของแบคทีเรียด้านทานแคดเมียมที่ระยะเวลาต่างๆ

เพาะเลี้ยงแบคทีเรียด้านทานแคดเมียมทั้ง 3 สายพันธุ์คือ *Arthrobacter* sp. TM6, *Alcaligenes* sp. TN6 และ *Ralstonia* sp. TAK1 ในอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว LB และนำเชื้อไปบ่มแบบเขย่าที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส และเก็บตัวอย่างเซลล์แบคทีเรียที่ระยะเวลาการเพาะเลี้ยง 2, 4, 8, 12, 24, 36, 48 และ 72 ชั่วโมง มาวัดค่าความขุ่นเซลล์ (Cell density) ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร และนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นของเซลล์ กับระยะเวลาการเจริญในกราฟรูปที่ 1-13



รูปที่ 1-13 การเจริญของแบคทีเรียที่เรียต้้านทานแคดเมียมเมื่อเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว LB

เก็บตัวอย่างเซลล์แบคทีเรียที่เรียต้้านทานแคดเมียมแต่ละสายพันธุ์ ที่เพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว LB ที่เวลา 12, 24, 36, 48 และ 72 ชั่วโมง เนื่องจากมีรายงานว่า แบคทีเรียส่วนใหญ่มีการสร้าง Exopolymers ปริมาณสูงเมื่อเซลล์เจริญเข้าสู่ระยะ Stationary phase เนื่องจาก Exopolymers ทำหน้าที่ป้องกันเซลล์ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม (Watcharamusik et al., 2008) และนำเซลล์แบคทีเรียที่เก็บในแต่ละช่วงเวลามาสกัด Exopolymers ออกจากเซลล์และน้ำเลี้ยงเซลล์ ก่อนนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของ Exopolymers โดยใช้วิธี Phenol-Sulfuric acid เปรียบเทียบกับมาตรฐานของน้ำตาลกลูโคส สำหรับปริมาณของ Exopolymers ที่สร้างจากแบคทีเรียที่เรียต้้านทานแคดเมียมแต่ละสายพันธุ์ที่ระยะเวลาการเจริญต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1-14 และ ตารางที่ 1-19



รูปที่ 1-14 การสร้าง Exopolymers ของแบคทีเรียด้นทานแคดเมียมที่ระยะเวลาต่างๆ ในการเจริญ

ตารางที่ 1-19 ปริมาณ Exopolymers ที่สร้างจากแบคทีเรียด้นทานแคดเมียม

ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณ Exopolymers (กรัมต่อลิตร)		
	<i>Arthrobacter</i> sp. TM6	<i>Alcaligenes</i> sp. TN6	<i>Ralstonia</i> sp. TAK1
8	2.43 ± 0.45	0.31 ± 0.03	0.53 ± 0.21
12	2.80 ± 0.17	3.41 ± 0.93	2.14 ± 0.21
24	5.51 ± 0.15	5.12 ± 0.29	5.98 ± 0.15
36	4.49 ± 0.24	2.76 ± 0.33	5.51 ± 0.15
48	3.73 ± 0.99	1.27 ± 0.10	2.49 ± 0.15
72	1.45 ± 0.18	0.55 ± 0.50	1.75 ± 0.18

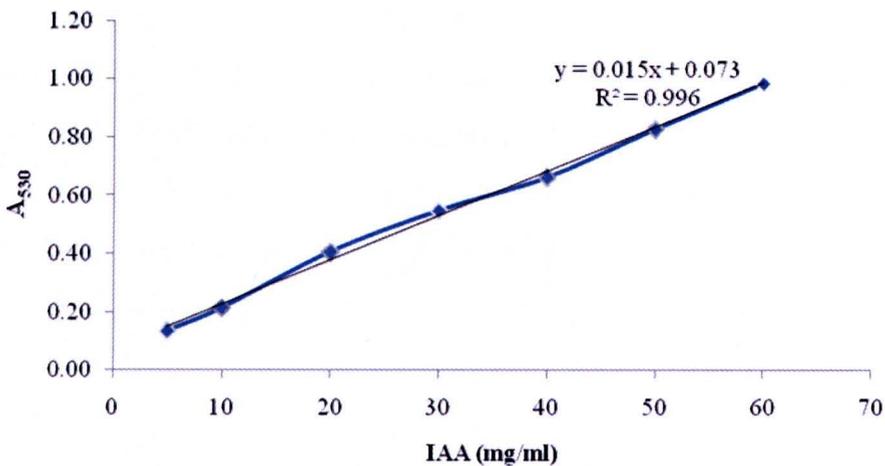
จากผลการสร้าง Exopolymers ของแบคทีเรียด้นทานแคดเมียมแต่ละสายพันธุ์ พบว่าแบคทีเรีย *Ralstonia* sp. TAK1 สร้าง Exopolymers ได้สูงสุดในช่วง 24 ชั่วโมงของการเจริญ ( $5.98 \pm 0.15$  กรัมต่อลิตร) และมีการสร้าง Exopolymers สูงกว่าแบคทีเรียอีก 2 สายพันธุ์ ถึงแม้ว่า *Arthrobacter* sp. TM6 สร้าง Exopolymers ต่ำกว่า *Ralstonia* sp. TAK1 โดย *Arthrobacter* sp. TM6 สร้าง Exopolymers ได้  $5.51 \pm 0.15$  กรัมต่อลิตร แต่ *Arthrobacter* sp. TM6 สามารถสร้าง Exopolymers ได้ต่อเนื่องในระดับสูงจนถึงช่วง 72 ชั่วโมงของการเจริญเช่นเดียวกับ *Ralstonia* sp. TAK1 ดังนั้นในการศึกษานี้ จึงมีการนำแบคทีเรียด้นทานแคดเมียมทั้ง 2 สายพันธุ์คือ *Ralstonia* sp. TAK1 และ

*Arthrobacter* sp. TM6 ไปทดสอบประสิทธิภาพในการช่วยเพิ่มการเคลื่อนที่ (Mobilization) หรือละลาย (Solubilization) แคลเซียมออกจากดินที่ปนเปื้อนแคลเซียม เนื่องจาก Exopolymers มีประจุลบ (Anionic charge) จึงมีประสิทธิภาพจับกับสารที่มีประจุบวกได้ดี (Roane, 1999; Bruin et al., 2000)

การต้านทานโลหะหนักของแบคทีเรีย ส่วนใหญ่จะอาศัยพลังงานในการปั๊มโลหะออกจากเซลล์ (Energy-dependent efflux pump) (Silver and Phung, 1996) สำหรับกลไกการต้านทานแคลเซียมที่พบในแบคทีเรียต้านทานแคลเซียมทั้ง 2 สายพันธุ์ที่ทำการศึกษานี้ เกี่ยวข้องกับการสร้าง Exopolymers หรือ Extracellular polymeric substances (EPS) ซึ่งเป็นสารที่มีลักษณะคล้ายเมือกที่สร้างจากจุลินทรีย์หลายชนิด เช่น แบคทีเรีย ฟังไจ สาหร่าย โดยจุลินทรีย์จะหลั่งสารนี้ออกมาภายนอกเซลล์ เพื่อใช้ในการดูดซับหรือจับกับอนุภาคของแข็ง เช่น ตะกอนของโลหะซัลไฟด์ หรือออกไซด์ ซึ่ง Exopolymers เป็นส่วนผสมของคาร์โบไฮเดรต มิวโคโพลิแซคคาไรด์ และโปรตีน (Gadd, 2004) โดยมีการศึกษาการดูดซับโลหะหนักของ *Enterobacter cloacae* ซึ่งเป็นแบคทีเรียทะเล พบว่า *E. cloacae* สามารถสร้าง Exopolymers ที่มีคุณสมบัติเป็นสาร Chelator ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับแคลเซียม ทองแดง และโคบอลต์ได้ถึง 65, 20 และ 8% ตามลำดับ แต่ Exopolymers ไม่สามารถตรึงปรอทได้ (Iyer et al., 2005) ในขณะที่ *Pseudomonas marginalis* สร้าง Exopolymers ในปริมาณมากเพื่อใช้ในการต้านทานความเป็นพิษของตะกั่ว เนื่องจาก Exopolymers มีประสิทธิภาพในการจับกับโลหะที่มีประจุบวกได้ดี จึงช่วยตรึงโลหะไว้ภายนอกเซลล์ไม่เข้าสู่ภายในเซลล์ (Roane, 1999)

### 3.4.3 การสร้างสาร Indole-3-acetic acid (IAA) ในแบคทีเรียต้านทานแคลเซียมที่สร้าง Exopolymers

นำแบคทีเรียต้านทานแคลเซียมที่สร้าง Exopolymers คือ *Ralstonia* sp. TAK1 และ *Arthrobacter* sp. TM6 มาตรวจวัดความสามารถในการสร้างสาร IAA ผลการศึกษาพบว่า *Ralstonia* sp. TAK1 และ *Arthrobacter* sp. TM6 สามารถสร้างสาร IAA ได้ในปริมาณ 71.84 และ 12.96 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกราฟมาตรฐานของสาร IAA (รูปที่ 1-15) การสร้างสาร IAA ของแบคทีเรียบางชนิดสามารถช่วยในการส่งเสริมการเจริญของพืชได้ จึงเรียกว่า Plant-growth promoting bacteria (PGPB) หรือ Plant-growth promoting rhizobacteria (PGPR) ตัวอย่างเช่น *Pseudomonas putida* GR12-2 สามารถสร้างสาร IAA ที่ไปช่วยส่งเสริมการงอกของรากต้น Canola ได้ (Patten and Glick, 2002) นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าสาร IAA สามารถช่วยป้องกันพืชจากผลของสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม หรือ Environmental stress ได้ เช่น สาร IAA ช่วยกระตุ้นการงอกของรากและความยาวของยอดต้นข้าวสาลีที่ปลูกในพื้นที่ที่มีเกลือสูงได้ (Egamberdieva, 2009) รวมทั้งการเพิ่มความต้านทานของ *Medicago truncatula* ต่อสภาพแวดล้อมที่มีเกลือเข้มข้นเมื่อมีการเติม *Sinorhizobium meliloti* DR-64 ที่สร้างสาร IAA ในปริมาณสูง (Bianco and Defez, 2009)



รูปที่ 1-15 กราฟมาตรฐานสาร IAA

### 3.4.4. ความสามารถของแบคทีเรียต้านทานแคดเมียมที่สร้าง Exopolymers ในการเคลื่อนที่ (Mobilization) แคดเมียมออกจากดินที่ปนเปื้อน

ตัวอย่างดินที่เก็บมาจากบริเวณสวนสมุนไพร มหาวิทยาลัยมหิดล ศาลายา มีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินดังนี้

- Sand	17%
- Silt	36.9%
- Clay	46.1%
- Texture class	Clay
- pH (1:1)	7.31
- EC (1:5)	0.68 mS/cm
- CEC	26.30 cmol/kg
- Organic matter	4.64%
- Total nitrogen	0.23%
- Available Phosphorous	54 mg/kg
- Extractable (NH <sub>4</sub> OAC) Potassium	285 mg/kg
- Extractable (NH <sub>4</sub> OAC) Calcium	2,936 mg/kg

นำดินตัวอย่างมาเติมสารละลายแคดเมียมไนเตรท (Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) โดยคำนวณให้มีความเข้มข้นในรูปของแคดเมียมในดินเท่ากับ 25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และฝังดินในที่ร่มประมาณ 3 สัปดาห์ เพื่อให้แคดเมียมเสถียรในดิน แล้วจึงนำดินที่เติมแคดเมียมมาทำให้ปราศจากเชื้อ โดยใช้หม้อนึ่งไอน้ำก่อนนำไปทดสอบการเคลื่อนที่หรือการละลายของแคดเมียมในดิน ตามวิธีการที่ดัดแปลงจาก Rajkumar และ Freitas (2008) โดยเติมแบคทีเรียต้านทานแคดเมียม 2 สายพันธุ์ คือ *Ralstonia* sp. TAK1 และ

*Arthrobacter* sp. TM6 ลงในตัวอย่างดิน และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 สัปดาห์ และเติม Deionized water เพื่อสกัดแคดเมียมที่ละลายน้ำออกจากดิน และนำสารแขวนลอยดินไปกรองด้วยกระดาษกรอง เพื่อแยกเก็บส่วนดินไปตรวจวัดปริมาณแคดเมียมโดยใช้เครื่อง FAAS และนำส่วนน้ำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 8,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 10 นาที ก่อนนำส่วนน้ำใสไปตรวจวัดปริมาณแคดเมียม โดยใช้เครื่อง FAAS สำหรับผลการตรวจวัดปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในส่วนดินและส่วนน้ำในชุดการทดลองที่มีการเติมและไม่เติมแบคทีเรียด้านทานแคดเมียมที่สร้าง Exopolymers ดังแสดงในตารางที่ 1-20

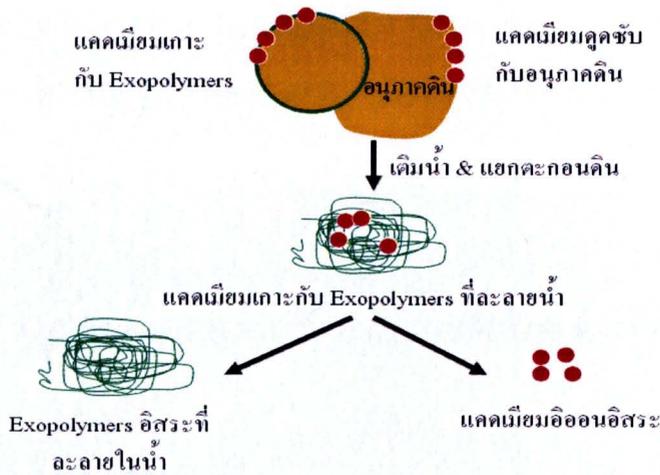
ตารางที่ 1-20 การส่งเสริมการเคลื่อนที่ของแคดเมียมออกจากดิน โดยแบคทีเรียด้านทานแคดเมียมที่สร้าง Exopolymers

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นแคดเมียม	
	ส่วนน้ำ (Aqueous solution) (มิลลิกรัม/ลิตร)	ส่วนเนื้อดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
T1: ดินปนเปื้อนแคดเมียม (ชุดควบคุม)	$0.8 \pm 0.2^a$	$28.9 \pm 0.3^a$
T2: ดินปนเปื้อนแคดเมียม + <i>Ralstonia</i> sp. TAK1	$0.9 \pm 0.1^a$	$19.3 \pm 0.4^b$
T3: ดินปนเปื้อนแคดเมียม + <i>Arthrobacter</i> sp. TM6	$0.5 \pm 0.1^a$	$21.1 \pm 0.7^b$

\* ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่แสดงด้วยตัวอักษรเดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $p \leq 0.05$

ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณแคดเมียมในดินที่มีการเติมแบคทีเรียด้านทานแคดเมียมที่สร้าง Exopolymers ทั้งสองสายพันธุ์มีปริมาณลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) เมื่อเทียบกับชุดควบคุม (T1) เนื่องจาก Exopolymers สามารถจับกับประจุบวก (Cation-binding) ได้ดี โดยอาศัย Electrostatic interaction ดังนั้น Exopolymers จึงสามารถไปแย่งจับกับแคดเมียมที่เกาะบนอนุภาคดินได้ และเกิดเป็น Complex ระหว่างแคดเมียมอไอออนกับ Exopolymers (Pal and Paul, 2008) และเมื่อนำน้ำไปล้างดิน ส่วนของ Exopolymers ที่มีแคดเมียมเกาะอยู่จะละลายอยู่ในส่วนน้ำ เนื่องจาก Exopolymers ที่มีแคดเมียมเกาะติดอยู่สามารถละลายน้ำได้ ทำให้แคดเมียมเคลื่อนที่หรือละลายออกจากดิน และยังสามารถแยกส่วนของแคดเมียมออกจาก Exopolymers ได้อีกด้วย (Chen et al., 1995) รูปที่ 1-16 แสดง

กลไกของ Exopolymers ที่สร้างจากแบคทีเรียที่ช่วยทำให้โลหะหนักที่ยึดเกาะกับอนุภาคดินละลายออกมาในน้ำ



รูปที่ 1-16 กระบวนการเคลื่อนที่แคดเมียมออกจากอนุภาคดินโดย Exopolymers (ดัดแปลงจาก Chen และคณะ 1995)

อย่างไรก็ตาม ปริมาณแคดเมียมที่พบในส่วนน้ำ (Aqueous solution) ของชุดการทดลองที่มีการเติมแบคทีเรียด้านทานแคดเมียมที่สร้าง Exopolymers ทั้งสองสายพันธุ์มีปริมาณไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับชุดควบคุม (T1) แสดงให้เห็นว่าแคดเมียมบางส่วนที่ละลายหรือเคลื่อนที่ออกจากอนุภาคดินไม่ได้อยู่ในส่วนน้ำ แต่ไปดูดซับกับเซลล์แบคทีเรีย แต่ตะกอนของเซลล์แบคทีเรียที่แขวนลอยในส่วนน้ำและแยกออกจากส่วนน้ำโดยการนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 8,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมได้ เนื่องจากมีปริมาณน้อยมาก โดยมีรายงานว่าเซลล์ของ *Azotobacter chroococcum* และ *Bacillus megaterium* สามารถดูดซับไอออนของแคดเมียมและตะกั่วในสารละลายได้ (Wu et al., 2009) และ *Pseudomonas* sp. PsM6 และ *Pseudomonas jessenii* PjM15 สามารถดูดซับทองแดง สังกะสีและนิกเกิลได้ (Rajkumar and Freitas, 2008) โลหะที่มีประจุบวกสามารถจับกับผนังเซลล์ของแบคทีเรียที่มีประจุลบได้ (Palmisano and Hazen, 2003) ซึ่งการจับระหว่างเซลล์แบคทีเรียกับแคดเมียมอาศัยการจับกันระหว่างประจุบวกของแคดเมียมกับผนังเซลล์แบคทีเรียที่เป็นประจุลบ ซึ่ง Binding site บนผนังเซลล์ของเซลล์แบคทีเรียที่ทำหน้าที่เป็น Biosorbent มีหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) หมู่ฟอสเฟต (Phosphate group) หมู่ซัลไฮดริล (SH group) และหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) (Volesky, 1990) นอกจากนี้ มีงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าแคดเมียมไอออนในน้ำสามารถจับกับเซลล์แบคทีเรียที่มี Exopolymers ได้ดีกว่าการจับกับ Exopolymers อย่างเดียวหรือจับกับเซลล์แบคทีเรียที่ไม่มี Exopolymers (Chompoothawat et al., 2010)

### 3.4.5. ผลของความเป็นพิษของแคดเมียมต่อการเจริญของยี่หระและหญ้าแฝก

เตรียมต้นกล้ายี่หระ (*Ocimum gratissimum*) โดยการเพาะเมล็ดคอายุประมาณ 3 เดือน ที่มีความสูงของต้นประมาณ 30 เซนติเมตร (รูปที่ 1-17 ก) และต้นกล้าหญ้าแฝก (*Vetiveria nemoralis* A. Camus; Nakhonsawan ecotype) อายุประมาณ 1 ปี โดยตัดรากและใบบางส่วนให้เหลือความสูงของต้นประมาณ 40 เซนติเมตร ก่อนนำมาเพาะชำ (รูปที่ 1-17 ข)



(ก) ยี่หระ (*Ocimum gratissimum*)



(ข) หญ้าแฝก (*Vetiveria nemoralis* A. Camus; Nakhonsawan ecotype)

#### รูปที่ 1-17 ต้นกล้ายี่หระและหญ้าแฝกที่นำมาใช้ในการทดลอง

นำตัวอย่างดินที่เก็บมาจากบริเวณสวนสมุนไพร มหาวิทยาลัยมหิดล ศาลายา ซึ่งเป็นจุดควบคุมที่ตรวจวัดแล้ว ไม่พบการปนเปื้อนแคดเมียมมาผึ่งให้แห้งในที่ร่ม ก่อนนำมาบดและร่อนด้วยตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร และเติมสารละลายแคดเมียมไนเตรท ( $Cd(NO_3)_2$ ) โดยคำนวณให้มีความเข้มข้นในรูปของแคดเมียมเท่ากับ 25 และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และผึ่งดินในที่ร่มประมาณ 3 สัปดาห์ เพื่อให้แคดเมียมเสถียร แล้วจึงนำดินที่เติมแคดเมียมมาตรวจวัดปริมาณแคดเมียมโดยใช้เครื่อง FAAS พบว่ามีปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างดินเท่ากับ  $26.8 \pm 0.7$  และ  $102.5 \pm 3.3$

มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นำต้นยี่หระ (รูปที่ 1-18) มาปลูกในดินที่เคดเมียม  $26.8 \pm 0.7$  และ  $102.5 \pm 3.3$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และดินที่ไม่มีเคดเมียม (ชุดควบคุม) ส่วนหญ้าแฝก (รูปที่ 1-19) ปลูกในดินที่มีเคดเมียม  $26.8 \pm 0.7$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และดินที่ไม่มีเคดเมียม (ชุดควบคุม) ในกระถางพลาสติก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร กระถางละ 1 ต้น และแต่ละกระถางมีดินน้ำหนัก 2.5 กิโลกรัม และนำกระถางตั้งไว้ในโรงเรือนทดลองและรดน้ำทุกวัน



ดินที่ไม่มีเคดเมียม



ดินที่มีเคดเมียม  $26.8 \pm 0.7$   
มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม



ดินที่มีเคดเมียม  $102.5 \pm 3.3$   
มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

รูปที่ 1-18 การปลูกยี่หระในดินที่มีเคดเมียมและไม่มีเคดเมียมในสัปดาห์ที่ 1 ของการทดลอง



ดินที่ไม่มีเคดเมียม



ดินที่มีเคดเมียม  $26.8 \pm 0.7$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

รูปที่ 1-19 การปลูกหญ้าแฝกในดินที่มีเคดเมียมและไม่มีเคดเมียมในสัปดาห์ที่ 1 ของการทดลอง

ตรวจวัดการเจริญของยี่หระและหญ้าแฝก โดยวัดความสูงต้นยี่หระและหญ้าแฝกทุกสัปดาห์ และเมื่อครบ 2 สัปดาห์จะนำต้นยี่หระและหญ้าแฝกมาวัดน้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งของส่วนรากและ ส่วนต้นและใบ ดังแสดงความสูงของต้นยี่หระและหญ้าแฝกในตารางที่ 1-21 และ 1-22 ตามลำดับ ส่วนน้ำหนักสดและน้ำหนักของส่วนรากและส่วนต้นและใบของยี่หระ และส่วนรากและส่วนใบของ หญ้าแฝกดังแสดงในตารางที่ 1-23 และตารางที่ 1-24 ตามลำดับ

ตารางที่ 1-21 ผลของเคดเมียมในดินต่อความสูงของต้นยี่หระ

ชุดทดลอง	ความสูงของต้นยี่หระ (ส่วนเหนือดิน) (เซนติเมตร)		
	วันที่ 1	วันที่ 7	วันที่ 14
ดินที่ไม่มีเคดเมียม (ชุดควบคุม)	27.67 ± 1.11	32.00 ± 2.00	35.00 ± 1.73
ดินที่มีเคดเมียม 26.8 ± 0.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	26.67 ± 0.89	28.00 ± 1.73	33.33 ± 2.52
ดินที่มีเคดเมียม 102.5 ± 3.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	30.00 ± 1.33	32.67 ± 0.58	34.67 ± 0.58

ตารางที่ 1-22 ผลของเคดเมียมในดินต่อความสูงของต้นหญ้าแฝก

ชุดทดลอง	ความสูงของต้นหญ้าแฝก (ส่วนเหนือดิน) (เซนติเมตร)		
	วันที่ 1	วันที่ 7	วันที่ 14
ดินที่ไม่มีเคดเมียม (ชุดควบคุม)	38.00 ± 1.73	40.33 ± 2.08	42.50 ± 2.18
ดินที่มีเคดเมียม 26.8 ± 0.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	35.33 ± 3.06	37.83 ± 3.33	40.17 ± 2.57

ตารางที่ 1-23 ผลของแคดเมียมในดินต่อการเจริญของยี่ห่วยในรูปน้ำหนัสดและน้ำหนักแห้ง

ชุดทดลอง	น้ำหนัสด (กรัม)		น้ำหนักแห้ง (กรัม)		
	ราก	ต้นและใบ	ราก	ต้นและใบ	รวม
วันที่ 1	2.77 ± 0.10	19.28 ± 1.49	0.88 ± 0.02	4.27 ± 0.21	5.15 ± 0.21
สัปดาห์ที่ 2					
- T1: ดินที่ไม่มีแคดเมียม	4.27 ± 0.30	20.20 ± 1.18	0.96 ± 0.03	4.55 ± 0.16	5.52 ± 0.17 <sup>a</sup>
- T2: ดินที่มีแคดเมียม 26.8 ± 0.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	4.46 ± 0.41	20.36 ± 2.36	0.93 ± 0.01	4.58 ± 0.30	5.51 ± 0.30 <sup>a</sup>
- T3: ดินที่มีแคดเมียม 102.5 ± 3.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	4.20 ± 0.45	19.75 ± 0.84	0.92 ± 0.07	3.82 ± 0.32	4.74 ± 0.29 <sup>b</sup>

\* ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่แสดงด้วยตัวอักษรเดียวกัน แสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $p \leq 0.05$

ตารางที่ 1-24 ผลของแคดเมียมในดินต่อการเจริญของหญ้าแฝกในรูปน้ำหนัสดและน้ำหนักแห้ง

ชุดทดลอง	น้ำหนัสด (กรัม)		น้ำหนักแห้ง (กรัม)		
	ราก	ใบ	ราก	ใบ	รวม
วันที่ 1	3.23 ± 0.38	7.25 ± 1.17	1.22 ± 0.07	2.15 ± 0.06	3.37 ± 0.01
สัปดาห์ที่ 2					
- T1: ดินที่ไม่มีแคดเมียม	4.75 ± 1.58	8.14 ± 1.68	1.32 ± 0.25	2.33 ± 0.16	3.66 ± 0.13 <sup>a</sup>
- T2: ดินที่มีแคดเมียม 26.8 ± 0.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	3.47 ± 0.87	7.31 ± 2.99	0.90 ± 0.28	1.98 ± 0.55	2.88 ± 0.83 <sup>b</sup>

\* ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่แสดงด้วยตัวอักษรเดียวกัน แสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $p \leq 0.05$

ผลการทดลองพบว่า ต้นยี่ห่วยที่ปลูกในดินที่มีแคดเมียม  $26.8 \pm 0.7$  และ  $102.5 \pm 3.3$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เป็นเวลา 2 สัปดาห์มีอัตราการรอดชีวิต 100% และไม่พบลักษณะที่แสดงอาการผิดปกติของพืชที่อาจเกิดจากความเครียดของแคดเมียม เช่น ใบเหลือง นอกจากนี้ ยังพบว่าน้ำหนักแห้งของยี่ห่วยที่ปลูกในดินที่มีแคดเมียม  $26.8 \pm 0.7$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และดินที่ไม่เติมแคดเมียมเป็นเวลา 2 สัปดาห์ไม่มีความแตกต่างกัน แต่ยี่ห่วยที่ปลูกในดินที่มีแคดเมียม  $102.5 \pm 3.3$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมมีน้ำหนักแห้งน้อยกว่าดินที่ไม่มีแคดเมียมและดินที่มีแคดเมียม  $26.8 \pm 0.7$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แสดงให้เห็นว่า แคดเมียมในดินที่ระดับความเข้มข้น  $26.8 \pm 0.7$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่มีผลต่อการยับยั้งการเจริญของยี่ห่วย แต่ดินที่มีแคดเมียมสูงถึง  $102.5 \pm 3.3$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมมีผลยับยั้งการเจริญของยี่ห่วย สำหรับหญ้าแฝกที่ปลูกในดินที่มีแคดเมียม  $26.8 \pm 0.7$  เป็นเวลา 2 สัปดาห์มีอัตราการรอดชีวิต 100% และไม่พบลักษณะที่แสดงอาการผิดปกติของพืช ที่อาจเกิดจากความเครียดของแคดเมียม เช่นเดียวกับยี่ห่วย แต่น้ำหนักแห้งของหญ้าแฝกที่ปลูกในดินที่แคดเมียม  $26.8 \pm 0.7$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้อยกว่าหญ้าแฝกที่ปลูกในดินที่ไม่มีแคดเมียม แสดงว่าหญ้าแฝกมีความทนทานต่อความเป็นพิษของแคดเมียมในดินได้น้อยกว่ายี่ห่วย อย่างไรก็ตาม Alloway และคณะ (1990) พบว่าแคดเมียมมีผลให้ต้นผักกาดหอม กะหล่ำปลี และแครอทแคระแกร็น และพืชจะแสดงอาการเกิดพิษของแคดเมียมที่ใบพืชเมื่อระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่พบในต้นพืชส่วนเหนือรากมีค่า 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยมีรายงานว่าแคดเมียมที่ความเข้มข้น 100-200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลไปลดการคายน้ำและการสังเคราะห์แสงของพืช (IPCS, 1992)

จากผลการศึกษา แสดงให้เห็นว่า ยี่ห่วยและหญ้าแฝกเป็นพืชที่มีความทนทานต่อความเป็นพิษของแคดเมียมได้ จึงมีแนวโน้มที่จะนำยี่ห่วยและหญ้าแฝกไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมโดยใช้กระบวนการ Phytoextraction ซึ่งพืชที่นำมาใช้ในกระบวนการ Phytoextraction สามารถสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณสูงกว่าพืชปกติ 100 เท่าหรือเรียกว่า Hyperaccumulator plant (Salt et al., 1998) โดยพืชเหล่านี้มีกลไกในการแยกหรือลดความเป็นพิษของโลหะได้ (Metal sequestration mechanism) (Shen et al., 1997) พืชกลุ่ม Hyperaccumulator สะสมโลหะหนักในส่วนของยอดพืชมากกว่าส่วนของรากพืช ซึ่งการสะสมโลหะหนักเกี่ยวข้องกับบทบาททางด้านนิเวศวิทยา ในการป้องกันตัวของพืชต่อเชื้อราหรือแมลงที่มาทำลายพืช (Chaney et al., 1997) สำหรับลักษณะของพืชที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในกระบวนการ Phytoextraction คือ เป็นพืชที่สามารถเจริญได้ในดินที่ขาดแคลนสารอาหาร มีอัตราการเจริญเร็ว มีระบบรากที่ลึก และทนทานต่อโลหะหนัก (Pulford and Watson, 2003)

### 3.4.6. ประสิทธิภาพของแบคทีเรียต้านทานแคดเมียมที่สร้าง Exopolymers ต่อการส่งเสริมยี่หระและหญ้าแฝกในการดูดซับแคดเมียมจากดินในระดับเรือนทดลอง

นำต้นยี่หระอายุประมาณ 3 เดือน ที่มีความสูงประมาณ 30 เซนติเมตร และต้นหญ้าแฝกอายุประมาณ 1 ปี ที่ตัดรากและใบบางส่วนให้เหลือความสูงของต้น 40 เซนติเมตร มาปลูกในดินปนเปื้อนแคดเมียมที่เก็บมาจากบริเวณริมลำห้วยแม่ดาว หมู่บ้านพะเค๊ะ ตำบลพระธาตุผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยนำดินปนเปื้อนแคดเมียมมาผึ่งให้แห้งในที่ร่ม ก่อนนำมาบดและร่อนด้วยตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร และตรวจวัดสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน ซึ่งแสดงผลการศึกษา ดังนี้

- Sand	83.4%
- Silt	7.8%
- Clay	8.8%
- Texture class	Loamy sand
- pH	7.87
- EC	0.07 mS/cm
- CEC	4.44 cmol/kg
- Organic matter	0.23%
- Total nitrogen	0.01%
- Available Phosphorous	7.8 mg/kg
- Extractable (NH <sub>4</sub> OAC) Potassium	73 mg/kg
- Extractable (NH <sub>4</sub> OAC) Calcium	2,441 mg/kg
- Total cadmium	16.7 ± 2.5 mg/kg

จากผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน พบว่าตัวอย่างดินที่เก็บมาจากพื้นที่ เป็นดินที่เกิดจากการพัดพาของน้ำและมาทับถมบริเวณริมตลิ่งของลำห้วย จึงมีองค์ประกอบของ Sand ในปริมาณสูง (83.4%) และมีค่า CEC ต่ำ (4.44 cmol/kg) และไม่สามารถจำแนกเป็นชุดดินตามมาตรฐานชุดดินของพื้นที่ได้ แต่ในการศึกษารั้งนี้ เน้นเฉพาะในส่วนปริมาณของแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินตามธรรมชาติ เพื่อนำมาศึกษาถึงความสามารถของพืชร่วมกับจุลินทรีย์ในการดูดซับและสะสมแคดเมียมในพืช ดังนั้น การศึกษานี้ จึงนำตัวอย่างดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมมาแบ่งเป็น 5 ชุดการทดลอง (3 ซ้ำ) และปลูกพืชกระถางละ 1 ต้น และนำกระถางตั้งไว้ในโรงเรือนทดลอง รดน้ำทุกวัน เก็บตัวอย่างดินและพืชที่ 2 สัปดาห์หลังการปลูก ผลการตรวจวัดปริมาณแคดเมียมในดินและปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่างๆ ของต้นยี่หระและหญ้าแฝกแสดงในตารางที่ 1-25 และตารางที่ 1-26 ตามลำดับ

ตารางที่ 1-25 ปริมาณแคดเมียมในดินและส่วนต่างๆ ของต้นยี่หระ

ชุดการทดลอง	ปริมาณแคดเมียมในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมในยี่หระ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		
		ราก	ส่วนเหนือดิน	
			ต้น	ใบ
วันที่ 1 (เริ่มต้น)	16.7 ± 2.5	< 0.01	< 0.01	< 0.01
สัปดาห์ที่ 2				
- T1: พืช	14.2 ± 3.7	2.8 ± 0.1	0.5 ± 0.1	0.4 ± 0.1
- T2: พืช + TAK1	14.2 ± 3.5	2.9 ± 0.2	1.1 ± 0.3	0.1 ± 0.1
- T3: พืช + TM6	15.3 ± 3.4	3.4 ± 0.2	1.4 ± 0.5	1.0 ± 0.2
- T4: พืช+TAK1 + TM6	17.2 ± 0.8	3.6 ± 0.7	1.2 ± 0.7	0.7 ± 0.1
- T5: พืช + EDTA	17.5 ± 2.8	3.1 ± 2.3	1.5 ± 0.3	1.2 ± 0.5

หมายเหตุ รายละเอียดในแต่ละชุดการทดลอง

- T1 ต้นยี่หระที่ปลูกในดินปนเปื้อนแคดเมียม
- T2 ต้นยี่หระที่ปลูกในดินปนเปื้อนแคดเมียม + 2% เชลล์ *Ralstonia* sp. TAK1
- T3 ต้นยี่หระที่ปลูกในดินปนเปื้อนแคดเมียม + 2% เชลล์ *Arthrobacter* sp. TM6
- T4 ต้นยี่หระที่ปลูกในดินปนเปื้อนแคดเมียม + 1% เชลล์ *Ralstonia* sp. TAK1 + 1% เชลล์ *Arthrobacter* sp. TM6
- T5 ต้นยี่หระที่ปลูกในดินปนเปื้อนแคดเมียม + EDTA 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ตารางที่ 1-26 ปริมาณแคดเมียมในดินและส่วนต่างๆ ของต้นหญ้าแฝก

ชุดการทดลอง	ปริมาณแคดเมียมในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมในหญ้าแฝก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	
		ราก	ใบ
วันที่ 1 (เริ่มต้น)	16.7 ± 2.5	< 0.01	< 0.01
สัปดาห์ที่ 2			
- T1: พืช	12.8 ± 1.6	3.1 ± 0.6	1.3 ± 0.1
- T2: พืช + TAK1	14.1 ± 0.8	3.5 ± 1.0	1.2 ± 0.2
- T3: พืช + TM6	15.3 ± 1.4	2.5 ± 1.2	1.0 ± 0.2
- T4: พืช+TAK1 + TM6	20.3 ± 4.6	1.6 ± 0.2	0.9 ± 0.2
- T5: พืช + EDTA	22.2 ± 1.8	3.7 ± 0.4	0.8 ± 0.1

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในยี่หระและหญ้าแฝกในสัปดาห์ที่ 2 ของการทดลอง (ตารางที่ 27 และตารางที่ 28) พบว่า ดินยี่หระสามารถสะสมแคดเมียมในส่วนรากได้สูงกว่าดินและใบได้ในทุกชุดการทดลอง เช่นเดียวกับหญ้าแฝกที่สามารถสะสมแคดเมียมในส่วนรากได้มากกว่าใบ ซึ่งสามารถนำมาพืชแต่ละชนิดในแต่ละชุดการทดลอง มาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการ Phytoextraction โดยเปรียบเทียบจากค่า Phytoextraction coefficient หรือเรียกว่า Bioconcentration factor (BCF) สำหรับการคำนวณค่า Phytoextraction coefficient (Kumar et al., 1995) หรือค่า Bioconcentration factor (Rosselli et al., 2003) ของพืชใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\text{Phytoextraction coefficient} = \frac{\text{ความเข้มข้นของแคดเมียมในพืช (ส่วนรากและส่วนเหนือดิน)}}{\text{ความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน}}$$

หรือ Bioconcentration factor

นอกจากนี้ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ Phytoextraction คือการเคลื่อนย้ายโลหะหนักที่อยู่บริเวณรากไปสะสมยังบริเวณส่วนยอดหรือส่วนเหนือดินของพืช ซึ่งเป็นส่วนที่สามารถเก็บเกี่ยวและนำไปกำจัดได้ โดยค่าการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในพืช หรือ Translocation factor (TF) ที่แสดงถึงความสามารถของพืชในการเคลื่อนย้ายโลหะหนัก จากส่วนรากไปสู่ส่วนเหนือดินของพืช สามารถคำนวณโดยใช้สมการดังนี้ (Mattina et al., 2003)

$$\text{Translocation factor (TF)} = \frac{\text{ความเข้มข้นของแคดเมียมในส่วนเหนือดิน (Aerial part หรือ Aboveground)}}{\text{ความเข้มข้นของแคดเมียมในส่วนราก (Underground)}}$$

สำหรับค่า Phytoextraction coefficient ของยี่หระและหญ้าแฝกในสัปดาห์ที่ 2 ของการทดลอง แสดงในตารางที่ 1-27 ส่วนค่า Translocation factor ของยี่หระและหญ้าแฝกดังแสดงในตารางที่ 1-28

ตารางที่ 1-27 ค่า Phytoextraction coefficient ของแคดเมียมในยี่หระและหญ้าแฝก

ชุดการทดลอง	ยี่หระ	หญ้าแฝก
T1: พืช	0.26	0.34
T2: พืช+TAK1	0.29	0.33
T3: พืช+ TM6	0.38	0.23
T4: พืช+TAK1 + TM6	0.32	0.12
T5: พืช + EDTA	0.33	0.20

ตารางที่ 1-28 ค่า Translocation factor (TF) ของแคดเมียมในยี่หระและหญ้าแฝก

ชุดการทดลอง	ยี่หระ	หญ้าแฝก
T1: พีช	0.32	0.42
T2: พีช+TAK1	0.41	0.34
T3: พีช+ TM6	0.71	0.40
T4: พีช+TAK1 + TM6	0.53	0.56
T5: พีช + EDTA	0.87	0.22

จากผลการศึกษาในสัปดาห์ที่ 2 หลังจากปลูกพีชในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม พบว่า ชุดการทดลองที่เติม *Arthrobacter* sp. TM6 (T3) สามารถช่วยให้ยี่หระมีการสะสมแคดเมียมได้ดีกว่าชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมแบคทีเรีย (T1) หรือชุดการทดลองที่เติม *Ralstonia* sp. TAK1 (T2) และค่า Phytoextraction coefficient ของยี่หระในชุดการทดลองที่เติม *Arthrobacter* sp. TM6 (T3) ยังมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองที่เติม EDTA (T5) อีกด้วย ส่วนการสะสมแคดเมียมของหญ้าแฝกพบว่าชุดการทดลองที่เติม *Ralstonia* sp. TAK1 (T2) มีค่า Phytoextraction coefficient มากกว่าชุดการทดลองที่เติม *Arthrobacter* sp. TM6 (T3) และมีค่าใกล้เคียงกับชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมแบคทีเรีย (T1) ส่วนการเติม EDTA ไม่มีผลต่อการเพิ่มการสะสมของแคดเมียมในหญ้าแฝก และจากค่า Phytoextraction coefficient ของพีชทั้งสองชนิด แสดงให้เห็นว่ายี่หระในชุดการทดลองที่มีการเติม *Arthrobacter* sp. TM6 มีประสิทธิภาพในการสะสมแคดเมียมได้สูงกว่าหญ้าแฝก สำหรับค่า Translocation factor แคดเมียมของยี่หระในชุดการทดลองที่เติม EDTA (T5) มีค่าสูงสุด รองลงมาคือชุดการทดลองที่เติม *Arthrobacter* sp. TM6 (T3) แสดงว่า EDTA และ *Arthrobacter* sp. TM6 สามารถช่วยส่งเสริมการเคลื่อนที่ของแคดเมียมจากรากสู่ยอดของต้นยี่หระได้ดี แต่ค่า Translocation factor แคดเมียมของหญ้าแฝกมีค่าสูงสุดในชุดการทดลองที่มีการเติมแบคทีเรียด้านทานแคดเมียมทั้ง 2 ชนิด (T4) อย่างไรก็ตาม ค่า Translocation factor แคดเมียมของหญ้าแฝกมีค่าน้อยกว่ายี่หระ แสดงให้เห็นว่ายี่หระมีความสามารถในการเคลื่อนย้ายแคดเมียมจากรากไปสู่ต้นและใบได้ดีกว่าหญ้าแฝก

การศึกษาของ Chaiyarat และคณะ (2010) พบว่าการดูดซับแคดเมียมและสังกะสีของยี่หระ (*O. gratissimum*) ที่ปลูกในระบบ Hydroponic condition ที่มีแคดเมียม 2.5 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และสังกะสีที่ความเข้มข้น 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 15 วัน พบว่ายี่หระสามารถสะสมแคดเมียมได้ดีกว่าสังกะสี โดยปริมาณแคดเมียมที่สะสมในยอดของต้นยี่หระสูงถึง 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แต่ค่า Translocation factor ของแคดเมียมและสังกะสีของยี่หระมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่ายี่หระมีความสามารถในการเคลื่อนย้ายแคดเมียมและสังกะสีจากรากไปสู่ยอดได้ไม่ดี และจากการศึกษาของ Zhuang และคณะ (2005) รายงานว่าการเติม EDTA ลงในดินช่วยเพิ่ม Phytoavailability ของตะกั่วและ

สังกะสี แต่ EDTA ไม่มีผลในการเพิ่มค่าการดูดซับแคดเมียมของพืช โดย EDTA ไปช่วยส่งเสริมการเคลื่อนที่ (Translocation) ของแคดเมียมจากจากสู่ยอดของพืชได้ (Jiang et al., 2003) การเติม EDTA ในดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักช่วยลดความเป็นพิษของโลหะหนัก และช่วยส่งเสริมให้พืชมีการสะสมโลหะหนักที่ส่วนยอดได้มากขึ้น โดย EDTA ไปจับกับโลหะหนักอยู่ในรูป Metal-EDTA complexes อย่างไรก็ตาม การเติม EDTA ในปริมาณมากเกินไป ทำให้มีผลไปลดการสะสมของแคดเมียมและสังกะสีในส่วนรากและส่วนยอดของต้น *Cynara cardunculus* L. (Hernandez-Allica et al., 2007)

การเจริญของพืชในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมตรวจวัดจากชีวมวล (Biomass) ในรูปน้ำหนักแห้งของพืชแต่ละชนิด และวัดความสูงของต้นพืช ซึ่งผลการเจริญของต้นยี่หระและหญ้าแฝกที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมของชุดการทดลองต่างๆ แสดงในตารางที่ 1-29 และตารางที่ 1-30 ตามลำดับ

ตารางที่ 1-29 การเจริญเติบโตของต้นยี่หระที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม

ชุดทดลอง	ความสูงของต้น (เซนติเมตร)	น้ำหนักแห้ง (กรัม)			
		ราก	ต้น	ใบ	รวม
วันที่ 1	29.33 ± 2.08	0.32 ± 0.04	0.38 ± 0.09	1.13 ± 0.01	1.82 ± 0.04
สัปดาห์ที่ 2					
- T1: พืช	33.67 ± 1.53	0.28 ± 0.04	0.50 ± 0.06	1.06 ± 0.37	1.83 ± 0.47
- T2: พืช + TAK1	32.67 ± 1.15	0.20 ± 0.07	0.44 ± 0.07	0.82 ± 0.17	1.46 ± 0.29
- T3: พืช + TM6	33.33 ± 1.15	0.29 ± 0.10	0.52 ± 0.07	0.77 ± 0.29	1.57 ± 0.12
- T4: พืช+TAK1 + TM6	32.67 ± 4.04	0.21 ± 0.07	0.42 ± 0.12	0.67 ± 0.50	1.30 ± 0.68
- T5: พืช + EDTA	34.00 ± 1.00	0.16 ± 0.08	0.38 ± 0.05	0.71 ± 0.29	1.24 ± 0.39

ตารางที่ 1-30 การเจริญเติบโตของต้นหญ้าแฝกที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม

ชุดทดลอง	ความสูงของต้น (เซนติเมตร)	น้ำหนักแห้ง (กรัม)		
		ราก	ใบ	รวม
วันที่ 1	40.00 ± 0.00	1.10 ± 0.10	2.90 ± 0.56	4.00 ± 0.62
สัปดาห์ที่ 2				
- T1: พืช	57.67 ± 3.06	1.49 ± 0.31	3.34 ± 0.39	4.83 ± 0.32
- T2: พืช + TAK1	62.60 ± 0.57	1.13 ± 0.08	3.23 ± 0.02	4.36 ± 0.06
- T3: พืช + TM6	58.50 ± 7.78	1.69 ± 0.52	5.15 ± 1.15	6.84 ± 1.68
- T4: พืช+TAK1 + TM6	57.50 ± 2.12	1.42 ± 0.32	3.64 ± 0.94	5.05 ± 1.02
- T5: พืช + EDTA	55.00 ± 2.83	0.87 ± 0.32	3.57 ± 0.72	4.44 ± 1.04

จากผลการศึกษา พบว่าในสัปดาห์ที่ 2 หลังจากปลูกยี่ห่วย้าในดินปนเปื้อนแคดเมียม ยี่ห่วย้าในชุดการทดลองที่มีการเติมแบคทีเรียด้านทานแคดเมียมและ EDTA (T2-T5) มีน้ำหนักแห้งลดลง และยี่ห่วย้าที่ปลูกในชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA (T5) มีน้ำหนักแห้งน้อยกว่ายี่ห่วย้าที่ไม่มีการเติม EDTA (T1) ถึงแม้ว่า *Ralstonia* sp. TAK1 และ *Arthrobacter* sp. TM6 สามารถสร้างสาร IAA ได้ ซึ่งมีรายงานว่าสาร IAA นี้ช่วยส่งเสริมการงอกของรากและการเจริญของพืชได้ (Egamberdieva, 2009) แต่ในชุดการทดลองของยี่ห่วย้าที่มีการเติม *Ralstonia* sp. TAK1 และ/หรือ *Arthrobacter* sp. TM6 ไม่มีผลต่อการเจริญส่งเสริมการเจริญของยี่ห่วย้าในช่วง 2 สัปดาห์แรก ซึ่งอาจเนื่องมาจากปริมาณของแบคทีเรียที่เติมน้อยเกินไป หรือแบคทีเรียมีการปรับตัวในสภาวะแวดล้อมที่ปลูกต้นยี่ห่วย้าได้ไม่ดี จึงไม่มีการสร้างสาร IAA ในขณะที่การเจริญของหญ้าแฝกที่ปลูกในดินที่มีแคดเมียมเป็นเวลา 2 สัปดาห์เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักแห้งเริ่มต้นก่อนปลูกในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม แสดงว่าดินจากพื้นที่ปนเปื้อนเหมาะต่อการเจริญของหญ้าแฝกมากกว่ายี่ห่วย้า และในชุดการทดลองที่มีการเติม *Arthrobacter* sp. TM6 (T3) และหญ้าแฝกมีการเจริญได้ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมแบคทีเรีย (T1) แสดงว่า *Arthrobacter* sp. TM6 (T3) อาจมีผลไปช่วยส่งเสริมการเจริญของหญ้าแฝกได้ ในปัจจุบันมีการนำหญ้าแฝกมาใช้ในการป้องกันการพังทลายของดินในหลายพื้นที่ และมีการนำหญ้าแฝกมาใช้ในการฟื้นฟูพื้นที่เหมืองแร่เก่าในหลายประเทศ และมีรายงานว่าอัตราการเจริญของใบ น้ำหนักแห้ง และการสังเคราะห์แสงของหญ้าแฝกที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนหางแร่ที่มีตะกั่วและสังกะสีถูกยับยั้ง โดยอัตราการยับยั้งเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของหางแร่ที่มีตะกั่วและสังกะสีในดินเพิ่มมากขึ้น ตะกั่วและสังกะสี มีผลกระทบต่อรากพืชมากกว่ายอดพืช และการเติมปุ๋ยไนโตรเจนสามารถช่วยลดผลของโลหะหนักที่มีผลยับยั้งการเจริญของพืชได้ (Pang et al., 2003)

### 3.5 การทดลองที่ 5 การบำบัดแคดเมียมโดยการใช้ชีวมวลเป็นวัสดุในการดูดซับ (Biosobents)

#### 3.5.1 การบำบัดแคดเมียมในน้ำโดยใช้วัสดุชีวมวล

จากการศึกษาผลการดูดซับแคดเมียมในสารละลายของวัสดุชีวมวล ได้ผลประสิทธิภาพการดูดซับดังแสดงในตารางที่ 1-31

ตารางที่ 1-31 ประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมโดยวัสดุชีวมวลชนิดต่างๆ

วัสดุชีวมวล	ปริมาณแคดเมียมในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	% การดูดซับ
ใบสาหร่าย	23.30 ± 1.56	76.16
ลำต้นสาหร่าย	18.70 ± 1.61	80.87
ใบจอกหูหนู	37.50 ± 2.01	61.63
รากจอกหูหนู	22.43 ± 0.71	77.05

ตารางที่ 1-31 ประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมในน้ำโดยวัสดุชีวมวลชนิดต่างๆ (ต่อ)

วัสดุชีวมวล	ปริมาณแคดเมียมในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	% การดูดซับ
ใบผักตบชวา	71.00 ± 3.39	27.35
ลำต้นผักตบชวา	72.23 ± 9.65	26.09
รากผักตบชวา	45.03 ± 1.00	53.92
แกลบ	97.30 ± 0.69	0.44
ซังข้าวโพด	98.23 ± 1.46	-0.52
ใบอ้อย	86.65 ± 9.26	11.34

จากผลการศึกษาการดูดซับแคดเมียมในน้ำโดยใช้วัสดุชีวมวลชนิดต่างๆ พบว่า เซลล์แห้งของพืชน้ำ ได้แก่ ลำต้นสาหร่ายหางกระรอก มีประสิทธิภาพการดูดซับดีที่สุด (80.87%) รองลงมาคือ รากจอกหูหนู > ใบสาหร่าย > ใบจอกหูหนู > รากผักตบชวา > ใบผักตบชวา > ลำต้นผักตบชวา > ใบอ้อย > แกลบ > ซังข้าวโพด โดยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับ 77.05, 76.16, 61.63, 53.92, 27.35, 26.09, 11.34, 0.44, และ -0.52 ตามลำดับ

จากผลการศึกษาของ Shwepo Saraswat and J.P.N. Rai 2010 พบว่าเซลล์ที่ตายแล้วของผักตบชวาสามารถดูดซับแคดเมียมในน้ำได้ดีที่สุดที่ pH มีค่า 5 ซึ่งประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมมีค่าเท่ากับ 12.4 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง มีการศึกษาถึงการใช่วัสดุชีวมวลของสาหร่ายหลายชนิดในการดูดซับโลหะหนักในน้ำ และพบว่ามีสาหร่ายหลายชนิดที่สามารถนำมาใช้เป็นพืชในการกำจัดแคดเมียมในน้ำได้ เช่น *Fucus spiralis*, *Laminaria hyperborean*, *Sargassum filipendula* ( O.M.M. Fagundes-Klen et al., 2008, M.R. Fagundes-Klen et al., 2007)

### 3.5.2 การบำบัดแคดเมียมในตะกอนดินโดยใช้วัสดุชีวมวล

จากการศึกษาผลการดูดซับแคดเมียมในตะกอนดินของวัสดุชีวมวล ได้ผลประสิทธิภาพการดูดซับดังแสดงในตารางที่ 1-32

ตารางที่ 1-32 ประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมในตะกอนดินโดยวัสดุชีวมวลชนิดต่างๆ

กลุ่มทดลอง	ปริมาณแคดเมียมในสารละลายแต่ละประเภทตะกอนดิน (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	ตะกอนดินที่เติมแคดเมียม 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	% การดูด ซับ	ตะกอนดิน ในพื้นที่	% การดูดซับ
ใส่วัสดุชีวมวล	0.00	100.00	0.00	100.00
ไม่ใส่วัสดุชีวมวล	5.83	94.17	0.33	99.67

ตารางที่ 1-33 คุณสมบัติตะกอนดินที่เดิมแคะเมี่ยมกับตะกอนดินจากพื้นที่ศึกษา

คุณสมบัติตะกอนดิน	ตะกอนดินจากพื้นที่ศึกษา	ตะกอนดินที่เดิมแคะเมี่ยม 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
texture	Loamy sand	Loamy sand
pH	8.17	5.69 ± 0.24
OM (%)	1.98	3.04 %
CEC (emol/kg)	4.51	26.76 emol/kg
Total N (mg/kg)	0.02	0.15 mg/kg
P (mg/kg)	11	155 mg/kg
K (mg/kg)	28	245 mg/kg
Cadmium (mg/kg)	44.65	122.97 mg/kg

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์สาหร่ายในการดูดซับแคะเมี่ยมในตะกอนดินพบว่าเซลล์แห้งของสาหร่ายมีประสิทธิภาพในการดูดซับแคะเมี่ยมให้อยู่กับอนุภาคดินได้เล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการดูดซับแคะเมี่ยมในสารละลายของเซลล์สาหร่าย โดยเมื่อเปรียบเทียบกลุ่มทดลองกับกลุ่มควบคุมพบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของตะกอนดินที่เดิมแคะเมี่ยมกับตะกอนดินที่นำมาจากพื้นที่ศึกษาซึ่งมีเนื้อตะกอนดินเป็น loamy sand เช่นเดียวกัน แต่ตะกอนดินในพื้นที่ศึกษามีความเป็นด่างมากกว่าตะกอนดินที่เดิมแคะเมี่ยม ซึ่งมีค่า pH เป็นกรดอ่อนๆ ที่แคะเมี่ยมสามารถละลายได้ จึงอาจเป็นสาเหตุทำให้มีแคะเมี่ยมจากตะกอนดินในกลุ่มนี้ละลายออกมาอยู่ในส่วนที่เป็นน้ำง่ายกว่าแคะเมี่ยมจากตะกอนดินที่เก็บจากพื้นที่ศึกษา จึงทำให้วิเคราะห์พบแคะเมี่ยมในส่วนที่เป็นน้ำประมาณ 5.83 %

อย่างไรก็ตามการศึกษากการดูดซับโลหะหนักโดยวัสดุชีวมวลส่วนใหญ่เป็นการศึกษากการดูดซับโลหะหนักในน้ำ การศึกษากการดูดซับในตะกอนดินหรือดินค่อนข้างน้อย ดังเช่นการวิจัยของ M. Rajfur et al., (article in press) พบว่าสาหร่าย *Spirogyra* sp. สามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักแมงกานีส ทองแดง สังกะสีและแคะเมี่ยมในน้ำได้ โดยมีสมมูลของการดูดซับที่ 30 นาที โดยที่ 10 นาทีแรกประสิทธิภาพในการดูดซับของไอออนเหล่านี้อยู่ที่ 90-95 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ E.Romera et al., (2007) ได้ทำการศึกษากการดูดซับโลหะหนักในน้ำโดยสาหร่าย 6 ชนิดในกลุ่มสาหร่ายสีเขียว สาหร่ายสีน้ำตาล และสาหร่ายสีแดง ผลการศึกษากพบว่า สาหร่ายสีน้ำตาล *Fucus spiralis* ปริมาณ 0.5 กรัมต่อลิตรมีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนของโลหะหนักดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสาหร่ายกลุ่มอื่น โดย

ประสิทธิภาพการดูดซับของตะกั่วดีที่สุดในสภาวะ ร่องลงมาได้แก่ แคลเมียม ทองแดง สังกะสี และนิเกิลตามลำดับ

จากการศึกษาของ V.K. Verma et al. (2008) พบว่าเซลล์แห้งของ *Eichhornia crassipes*, *Valisneria spiralis* และ *Pistia stratiotes* สามารถดูดซับโลหะ แคลเมียม นิเกิล สังกะสี ทองแดง โครเมียมและตะกั่วในสารละลาย pH  $6.0 \pm 0.1$  ได้ โดย *Valisneria spiralis* มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้ดีที่สุด ส่วน *Eichhornia crassipes* ดูดซับโลหะหนักได้น้อยที่สุด โดยโลหะหนักที่ถูกดูดซับได้ดี ได้แก่ แคลเมียม ตะกั่วและสังกะสี นอกจากนี้ยังพบว่ากลไกในการดูดซับโลหะหนักของพืชในการวิจัยนี้คือกลไกการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) เป็นหลัก

การศึกษาในขั้นตอนนี้เพื่อความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุชีวมวลในการดูดซับแคลเมียมในตะกอนดินบริเวณห้วยแม่ดาว-แม่ภู ซึ่งตะกอนดินที่ใช้มาจากถนนพื้นที่ซึ่งมีคุณสมบัติที่ต่างกัน ทั้งในส่วนของปริมาณสารอาหาร ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ระยะเวลาในการปนเปื้อนแคลเมียมซึ่งจากผลการศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แห้งของสาหร่ายหางกระรอกในการดูดซับแคลเมียมในตะกอนดินในเบื้องต้น พบว่าคุณสมบัติของตะกอนดินมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับและเซลล์แห้งของสาหร่ายหางกระรอกมีประสิทธิภาพในการดูดซับแคลเมียมในตะกอนดินทั้ง 2 กลุ่ม ค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับแคลเมียมในสารละลายในการทดลองที่ 6.1