

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 1 ทฤษฎีและแนวคิดที่เกี่ยวข้องกับแคดเมียม

##### 1.1 แคดเมียม

แคดเมียมเป็นธาตุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ มักพบอยู่ร่วมกับสังกะสีและตะกั่วแต่มีคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์คล้ายกับสังกะสี คือ ทนทานต่อการผุกร่อน ในเปลือกโลกมีปริมาณแคดเมียมอยู่ระหว่าง 0.07-1.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แคดเมียมถูกนำไปใช้ประโยชน์มากมายทางด้านเกษตรกรรม ใช้เป็นองค์ประกอบของสารกำจัดวัชพืช สารเคมีกำจัดเชื้อรา ทางด้านอุตสาหกรรมใช้แคดเมียมเป็นส่วนประกอบของสีทาบ้าน สีชุบโลหะ สีย้อมเซรามิก เส้นใยแก้ว หมึกพิมพ์ ใช้ในการช่วยชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบต่างๆ อีกด้วย (พิมล และชัยวัฒน์, 2539) ไม่เพียงแค่นั้นแคดเมียมจะไม่มีประโยชน์ต่อสิ่งมีชีวิตแล้ว แคดเมียมยังเป็นพิษสูงต่อสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่ และมีความเป็นพิษสูงกว่าโลหะหนักชนิดอื่นในช่วง 2-20 เท่า (Vassilev, 1998) แคดเมียมเป็นโลหะหนักที่เป็นพิษเป็นอันดับที่ห้าต่อสัตว์มีกระดูกสันหลังและอันดับที่สี่ต่อพืช มีระบบท่อลำเลียง (Oberlunder & Roth, 1978)

##### 1.2 ที่มาและการแพร่กระจายของแคดเมียมสู่สิ่งแวดล้อม

###### 1.2.1 แหล่งจากอากาศ

แคดเมียมที่แพร่กระจายจากบรรยากาศนั้นมาจากหลายแหล่งเช่น จากภูเขาไฟ และจากกิจกรรมของมนุษย์เอง การผลิตโลหะ เช่น การถลุงอลูมิเนียม ถลุง และการทำแร่สังกะสีให้บริสุทธิ์ เป็นสาเหตุสำคัญที่สุด ปริมาณแคดเมียมในอากาศมีอยู่ในช่วงตั้งแต่ 5 นาโนกรัม/ลบ.ม. ในพื้นที่ชนบท ในพื้นที่เขตชานเมืองมีค่าอยู่ในช่วง 0.004 ถึง 0.015 ไมโครกรัมต่อลบ.ม. (World Health Organization, 1992) ส่วนในพื้นที่ใกล้โรงหลอมอาจจะมีค่าเกือบ 0.3 ไมโครกรัม/ลบ.ม. (World Health Organization, 1987)

###### 1.2.2 แหล่งจากน้ำ

กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย พ.ศ. 2541 รายงานไว้ว่า แหล่งที่แพร่กระจายแคดเมียมสู่น้ำนั้น ได้แก่

1.2.2.1 จากอุตสาหกรรมตะกั่วและสังกะสี ได้แก่ การทำเหมือง การหลอมและถลุง อุตสาหกรรมเหล่านี้จะปล่อยน้ำเสีย กากตะกอนที่มีแคดเมียมปนอยู่ออกมา

1.2.2.2 จากอุตสาหกรรมถลุงแร่เหล็กและโลหะอื่นๆ อุตสาหกรรมประเภทนี้จะปล่อยน้ำเสีย กากตะกอน ที่มีแคดเมียมปนอยู่ออกมา

1.2.2.3 จากโรงงานกำจัดน้ำเสีย โรงงานกำจัดน้ำเสียนี้จะปล่อย กากตะกอนของน้ำทิ้ง(sewage sludge) ซึ่งมีปริมาณแคดเมียมปนเปื้อนค่อนข้างสูง

ค่ามาตรฐานของแคดเมียมที่ยอมให้มีได้ในแหล่งน้ำผิวดินซึ่งมีไซทอล กำหนดให้ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร (กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย, 2541)

### 1.2.3 แหล่งจากดิน

กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย พ.ศ. 2541 รายงานไว้ว่า แหล่งแพร่กระจายแคดเมียมสู่ดินนั้น ได้แก่

1.2.3.1 จากปุ๋ยฟอสเฟต ปุ๋ยฟอสเฟตมีแคดเมียมปนอยู่ เนื่องจากหินฟอสเฟตที่เป็นวัตถุดิบมีแคดเมียมประมาณ 2-70 ppm มีรายงานการศึกษาพบว่า การใช้ปุ๋ยฟอสเฟต จะไปเพิ่มปริมาณแคดเมียมในดิน เพราะ Cadmium Phosphate ละลายน้ำได้น้อย และส่วนที่ไม่ละลายพืชไม่สามารถดูดซึมได้ ดังนั้นแคดเมียมส่วนนี้จึงสะสมอยู่ในดิน แต่ถ้ามีการใช้ปุ๋ยแอมโมเนียมร่วมด้วย แคดเมียมจะละลายได้มากขึ้น เนื่องจากแคดเมียมจะไปรวมตัวกับแอมโมเนีย เป็นไอออนที่ละลายน้ำได้ คือ



1.2.3.2 จากกากตะกอนของน้ำทิ้ง จากโรงงานโดยใช้กากตะกอนเหล่านี้เพื่อเป็นปุ๋ย จะเป็นการเพิ่มปริมาณแคดเมียมในดิน

สำหรับในประเทศไทย พิฑิต และสุรสิทธิ์ (2542) รายงานไว้ว่าความเข้มข้นของแคดเมียมในดินที่เกิดจากทุกภาคของประเทศ อยู่ระหว่าง 0.001-0.294 ppm และนอกจากนั้น ธีเรศ (2540) ยังรายงานไว้ว่า จากการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในปุ๋ยหมักจากมูลฝอยชุมชนมีค่าประมาณ 3.90 ppm ส่วนในปุ๋ยหมักจากมูลฝอยชุมชน ผสมกับตะกอนจากโรงงานบำบัดน้ำเสียพบปริมาณแคดเมียมถึง 5.98 ppm

ค่ามาตรฐานปริมาณแคดเมียมที่อนุญาตให้พืชมักมีได้ในดินของประเทศอังกฤษ และปัจจุบันได้เป็นที่ยอมรับเกณฑ์มาตรฐานนี้ได้ในหลาย ๆ ประเทศ ในกลุ่มสหภาพยุโรป คือ 3 ppm ส่วนค่ามาตรฐานปริมาณแคดเมียมสูงสุดที่ยอมให้มีได้ในปุ๋ยหมักจากมูลฝอยชุมชน ในแต่ละประเทศจะไม่เท่ากัน อาทิเช่น ประเทศอังกฤษและอเมริกา 10 ppm ออสเตรเลีย 6 ppm แคนาดา 3 ppm และเนเธอร์แลนด์ 1 ppm (ธีเรศ, 2540)

### 1.3 ความเป็นพิษของแคดเมียม

ความเป็นพิษของแคดเมียมโดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อมนุษย์นั้นจะมีทั้งผลเฉียบพลันและผลเรื้อรัง โดยแคดเมียมสามารถเข้าสู่ร่างกายได้หลายทาง ได้แก่ ระบบทางเดินหายใจ ผิวหนังและระบบทางเดินอาหาร โดยแคดเมียมในอาหารจะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายผ่านทางลำไส้ ร้อยละ 3-8 ระบบทางเดินหายใจดูดซึม ร้อยละ 15-13 จะไปสะสมที่ไตร้อยละ 33 ไปสะสมที่ตับร้อยละ 13.8 สะสมที่ตับอ่อนร้อยละ 3.3 ในเวลา 1 วันแคดเมียมสามารถสะสมไว้ในร่างกาย 2 ไมโครกรัมบางครั้งอาจสูงถึง 3-4 ไมโครกรัมในผู้ที่สูบบุหรี่จัด (ศุภมาศ, 2540) และจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามอายุ เนื่องจากค่าครึ่งชีวิต (biological half life) ของแคดเมียมยาวนานจึงทำให้การสลายตัวของแคดเมียมจึงใช้เวลานาน ความเป็นพิษเฉียบพลันของแคดเมียมถ้าได้รับสูงถึง 326 มิลลิกรัมจากอาหาร จะมีอาการปวดหัว ปวดท้องอย่างรุนแรง เสมหะมาก อาเจียน ท้องเดิน ถ้าได้รับถึง 350 มิลลิกรัมถึง 1 กรัม อาจจะทำให้เกิดอาการช็อค และล้มลงทันที อาจตายได้ภายในเวลา 24 ชั่วโมง หรือภายใน 1-2 สัปดาห์ และในระหว่างนี้ตับและไตอาจถูกทำลาย ผลระยะยาวในการได้รับแคดเมียม 30-40 มิลลิกรัมต่อวันเป็นเวลานานจะมีผลเสียโดยตรงกับการสร้างกระดูก โดยแคดเมียมจะไปลดการสะสมของธาตุแคลเซียม ขณะที่มีการสร้างและซ่อมแซมกระดูกและจะไม่มีการสะสมของคอลลาเจนในกระดูก จึงเป็นสาเหตุทำให้กระดูกผุกร่อนเสียรูปและทำให้เจ็บปวด

### 1.4 โลหะหนัก

#### 1.4.1 พฤติกรรมของโลหะหนักในดิน

##### 1.4.1.1 ความเป็นประโยชน์ของโลหะในดิน

ภายในดิน โลหะหนักมีความสัมพันธ์กับหลายองค์ประกอบคือ ในสารละลายดิน ซึ่งเป็นไอออนโลหะอิสระ และเป็นโลหะเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ ถูกดูดยึดกับส่วนขององค์ประกอบของดินที่เป็นสารอินทรีย์ที่บริเวณการแลกเปลี่ยนไอออนของดิน จับตัวกับอินทรีย์วัตถุในดิน ตกตะกอนเป็นรูป Oxides, Hydroxides, Carbonates และ ถูกตรึงอยู่ในโครงสร้างของแร่ซิลิเกต ในกระบวนการสกัดโลหะหนักจากดินนั้น โลหะที่ปนเปื้อนนั้นจะต้องมีความเป็นประโยชน์ กล่าวคือ พร้อมที่จะถูกดูดซึมโดยรากพืช ซึ่งความเป็นประโยชน์นี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายในสารละลายดิน โดยที่มีโลหะบางตัวนั้นที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนและอยู่ในรูปที่มีความเป็นประโยชน์สูง คือ สังกะสี และ แคดเมียม แต่โลหะตัวอื่น เช่น ตะกั่ว ซึ่งจะตกตะกอนในดินจะมีความเป็นประโยชน์น้อยกว่า

#### 1.4.1.2 พฤติกรรมของแคดเมียมในดิน

แคดเมียมเคลื่อนที่ได้ดีในดินที่มีค่าพีเอชระหว่าง 4.5 ถึง 5.5 ขณะที่ในสภาพดินเป็นด่าง แคดเมียมไม่ค่อยเคลื่อนที่ซึ่งในสภาพดินเป็นกรดสภาพละลายได้ของแคดเมียมจะขึ้นอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและ อลูมินัม และปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน

แคดเมียมเป็นโลหะที่เคลื่อนที่ได้ดีในพืช เมื่อเปรียบเทียบกับทองแดง โคบอลต์ ตะกั่ว และนิกเกิล จึงถูกลำเลียงจากส่วนรากไปยังส่วนต้นและใบอย่างสม่ำเสมอ ความเป็นพิษของแคดเมียมต่อพืช เกิดจากการที่แคดเมียมไปมีผลต่อเมแทบอลิซึมของพืช แคดเมียมมีผลยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์แสงและกระบวนการคายน้ำของพืชด้วย โดยคาดว่าแคดเมียมไปทำให้ปากใบปิด และมีผลไปยับยั้งการสังเคราะห์แสงของพืชทำให้ไม่มีการต้านทานต่อการแพร่กระจาย (diffusive resistance) หรือการเคลื่อนย้ายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น

#### 1.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมโลหะหนักในดินและพืช

คุณสมบัติของดินมีผลต่อการดึงดูดโลหะหนักของพืช คือ สภาพการละลายได้ อันมีบทบาทที่จะบ่งบอกถึงสภาพการขาดแคลน หรือเป็นพิษต่อพืช หรือมีมากจนเป็นสารมลพิษในดิน ซึ่งปัจจัยที่ควบคุมสภาพการละลายได้ของโลหะหนักได้แก่ สภาพกรด-ด่าง ศักย์รีดอกซ์ เนื้อดิน วัตถุต้นกำเนิดดิน ชนิดและปริมาณสารประกอบอินทรีย์ในดินและในสารละลายดิน ไอออนของธาตุอื่นที่มีอยู่ในสารละลายดิน ระดับความชื้นในดิน อุณหภูมิของดิน และกิจกรรมจุลินทรีย์ของดิน (ศุภมาศ, 2540)

ตัวอย่างของคุณสมบัติของดินต่อการสะสมโลหะหนักในดินและในพืชมีดังนี้ ด้านที่เกี่ยวข้องกับความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange capacity; C.E.C) โดยดินที่มีค่า C.E.C สูง จะมีการดูดซับและดึงดูดโลหะหนักได้สูง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเนื้อดิน ดินเหนียว จะมีการดูดซับโลหะหนักได้ดีกว่าดินร่วนและดินทรายตามลำดับ เนื่องจากดินเหนียวค่า C.E.C สูง

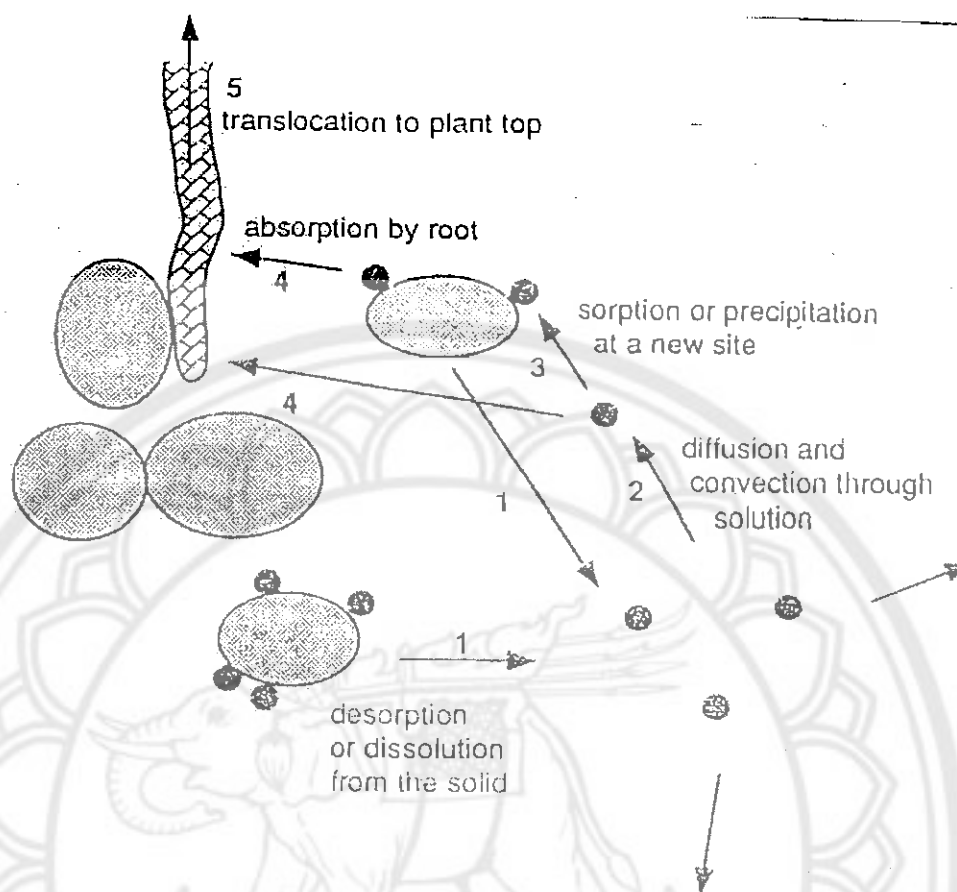
#### 1.6 ความสัมพันธ์ของพืช - โลหะในบริเวณรากพืช

ความเป็นประโยชน์ของโลหะสำหรับการดึงดูดเข้าไปในราก

ปัจจัยหลักของข้อจำกัดการดึงดูดโลหะภายในรากพืชคือการเคลื่อนย้ายแบบช้า ๆ จากอนุภาคดินสู่มิวราก สำหรับโลหะทุกชนิดยกเว้นปรอทที่ระเหยได้ การเคลื่อนย้ายนี้จะเกิดขึ้นในสารละลายดิน ในดิน ความสามารถในการละลายของโลหะจะถูกจำกัดเนื่องจากการดูดยึด (absorption) กับอนุภาคดิน ตะกั่วเป็นสารปนเปื้อนหลัก ๆ ที่รู้จักกันดีสำหรับดินที่ไม่มีการเคลื่อนย้ายซึ่งสาเหตุหลักเนื่องจากการตกตะกอนของโลหะเป็นรูป insoluble phosphates, carbonates

และ (hydr) oxides (Blaylock & Huang, 1999) ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของความสามารถในการละลายของโลหะในดินจึงเป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มศักยภาพในกระบวนการ Pb-phytoextraction โดยกลไกที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนย้ายของโลหะจากดินสู่รากพืช มีดังนี้คือ 1) การพา (convection) หรือ mass flow และ 2) การแพร่ (diffusion) (Corey et al., 1984) เนื่องจากการพา ไอออนโลหะที่ละลายน้ำจะเคลื่อนที่จาก soil solids ไปยังผิวราก จากบริเวณ rhizosphere น้ำจะถูกดูดซึมโดยรากพืชเพื่อนำมาใช้แทนที่น้ำที่ถูกใช้หายใจโดยใบ โดยการดูดน้ำจากบริเวณรากจะสร้าง hydraulic gradient โดยตรงจากดินไปยังผิวราก ไอออนบางตัวจะถูกดูดซึมโดยรากพืชมากกว่าอัตราของการใช้น้ำผ่าน mass flow ดังนั้น จะมีพื้นที่ที่ไม่มีอะไรอยู่เลยที่ถูกสร้างขึ้นใกล้กับรากพืชซึ่งจะสร้าง concentration gradient โดยตรงจากสารละลายดินและอนุภาคดินที่จับตัวกับธาตุที่ถูกดูดยึดอยู่ และสารละลายจะสัมผัสกับพื้นผิวของราก โดยมี concentration gradient เป็นตัวกระตุ้นการแพร่ของไอออนไปยังชั้นที่ว่างเปล่าที่อยู่รอบ ๆ รากพืช

พืชจะมีกลไกพิเศษของกลไกการเพิ่มความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายดิน ยกตัวอย่างเช่น ที่ปริมาณการใช้ไอออนต่ำ ๆ พืชอาจจะเปลี่ยนสิ่งแวดล้อมทางเคมีของบริเวณรากพืชเพื่อกระตุ้นการปล่อยไอออนจากของแข็งในดินเข้าไปในสารละลาย เช่น กลไก rhizosphere acidification อันเนื่องมาจาก  $H^+$  ที่ออกมาจากราก (Crowley et al., 1991) นอกจากนี้ พืชบางชนิดสามารถควบคุมความสามารถในการละลายของโลหะในบริเวณรากโดยการปล่อยสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ ออกจากราก ซึ่ง root exudates complex metal ions จะเก็บไว้ในสารละลายสำหรับการดึงดูดเข้าไปในราก (Romheld & Marschner, 1986)



ภาพ 1 แสดงการเคลื่อนย้ายธาตุอาหารจากดินสู่พืช 5 ระยะ  
ที่มา : McBride (1994)

### 1.7 วิธีการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก

1.7.1 การใส่ปูนขาวเพื่อเพิ่ม pH ของดินให้สูงขึ้น (> 6.5) จะช่วยลดการละลายได้ของโลหะหนักบางชนิด เช่น ตะกั่วและแคดเมียม

1.7.2 เพิ่มอินทรีย์วัตถุในดิน ซึ่งจะให้ผลเช่นเดียวกับการใส่ปูนขาว

1.7.3 เพิ่มการระบายอากาศ โลหะหนักจะถูกออกซิไดซ์ และละลายน้ำได้น้อย

1.7.4 การใช้ปุ๋ยฟอสเฟต การใช้ปุ๋ยฟอสเฟตในปริมาณมากจะลดความเป็นประโยชน์ของไอออนบวกของโลหะ แต่ให้ผลตรงข้ามกับอาร์เซนิก อย่างไรก็ตามการใช้ฟอสฟอรัสมากเกินไปอาจทำให้เกิดมลพิษทางน้ำได้เช่นกัน

1.7.5 ใช้พืชที่มีความทนทาน ถ้าหากจำเป็นก็ใช้พันธุ์พืชที่นำมาจากพื้นที่การทำเหมืองโลหะต่าง ๆ ซึ่งเป็นวิธีการที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้

1.7.6 นำหน้าดินจากแหล่งอื่นมาถมในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน

## 2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการใช้พืชบำบัดสารมลพิษในสิ่งแวดล้อม (phytoremediation)

Phytoremediation เป็นกระบวนการที่ใช้พืชในการบำบัดสิ่งปนเปื้อนในดิน กาก ตะกอนของเสีย น้ำ หรือ น้ำใต้ดิน โดยกระบวนการเคลื่อนย้ายสิ่งปนเปื้อน สลายตัว และในบางกรณี วิธีการเก็บเกี่ยวพืชในบำบัดโลหะ สารกำจัดศัตรูพืช สารละลาย สารระเบิด น้ำมันดิบ สาร Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) และน้ำชะขยะได้ กระบวนการนี้ยังแบ่งออกเป็นวิธีต่าง ๆ ดังนี้ (Environmental Protection Agency, 1999)

2.1 Phytoextraction หรือเรียกว่า phytoaccumulation หมายถึงกระบวนการดึงดูดและเคลื่อนย้ายโลหะที่ปนเปื้อนในดินโดยรากพืชไปยังส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินของพืช

2.2 Rhizofiltration เป็นวิธีการดูดซึม (absorption) หรือการทำให้ตกตะกอนในรากพืช (Precipitation) หรือดูดซึมภายในรากพืชหากสารปนเปื้อนเป็นสารละลายที่อยู่รอบ ๆ รากพืช

2.3 Phytostabilization เป็นกระบวนการใช้พืช ในการดูดยึด (immobilize) สารปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดินโดยการดูดซึมหรือสะสมโดยราก

2.4 Phytodegradation หรือเรียกว่า Phytotransformation เป็นวิธีที่สลายสารปนเปื้อนโดยใช้พืชผ่านกระบวนการเมตาบอลิซึมภายในพืช หรือ การสลายตัวของสารปนเปื้อนภายนอกพืชโดยผลของสารประกอบต่าง ๆ (เช่น เอนไซม์) ที่ถูกสร้างในพืชขึ้น

2.5 Rhizodegradation หรือเรียกอีกอย่างว่า Enhanced Rhizosphere Biodegradation, Phytostimulation หรือ Plant-Assisted Bioremediation/Degradation เป็น การสลายตัวของสารปนเปื้อนในดินผ่านทางการทำงานของจุลินทรีย์ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในระบบรากพืช ซึ่งจะทำหน้าที่ใช้หรือย่อยสารอินทรีย์เพื่อเป็นสารอาหารและพลังงาน

2.6 Phytovolatilization เป็นกระบวนการดึงดูดและการทำให้กลายเป็นไอของสารของปนเปื้อนโดยพืช transpiration ซึ่งจะปลดปล่อยสารปนเปื้อนหรือเปลี่ยนแปลงสารรูปของปนเปื้อนในอากาศจาก (Jerald, 1997)

### 3 พืชที่มีประสิทธิภาพในการสะสมโลหะหนักได้สูง (hyperaccumulator species)

Hyperaccumulator Plants เป็นพืชชนิดที่มีความสามารถในการสะสมโลหะในระดับสูงกว่าพืชโดยทั่วไปไม่น้อยกว่า 100 เท่า เช่น สามารถสะสม 10 ppm Hg, 100 ppm Cd; 1,000 ppm Co, Cu และ Pb; 10,000 ppm Ni และ Zn ทั้งนี้เนื่องจากระดับปกติในพืชทั่วไปของโลหะหนักในพืชของโลหะหนักดังกล่าวมีค่าดังนี้คือ Cd = 0.1-2.4 ppm, Cu = 5-20 ppm, Cr = 0.03-2 ppm, Hg = 0.005-0.17 ppm, Pb = 5-10 ppm, Ni = 0.2-5 ppm และ Zn = 1-400 ppm (Alloway & Ayres, 1993) ในปัจจุบันนี้พบว่ามีพืชประมาณ 400 ชนิด (Species) จากอย่างน้อย 45 วงศ์ (Family) ที่มีรายงานว่าสามารถสะสมโลหะได้ในปริมาณสูง ๆ เช่น *Thaspi carrulescens* สามารถสะสมสังกะสีและแคดเมียมในใบได้ในอัตราส่วน 39,600 : 1,800 ppm (Reeves & Brooks, 1983); (Baker & Walker, 1990)

### 4 กลไกของพืชในการลดความเป็นพิษของโลหะ

แม้ว่าธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณน้อย (micronutrients) เช่น Zn, Mn, Ni และ Cu จะมีความจำเป็นในการเจริญเติบโตของพืช แต่ถ้ามีความเข้มข้นภายในเซลล์สูง ๆ ไอออนของโลหะเหล่านี้ก็เป็นพิษได้ โดย hyperaccumulator plants มีกลไกในการลดความเป็นพิษของโลหะในตัวของมันเอง เช่น โลหะแคดเมียมสามารถลดความเป็นพิษในพืชโดยจับตัวกับ phytochelatins ในหมู่ thiol (SH)-rich peptides (Rausser, 1990)

### 5 ปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการใช้พืชบำบัดโลหะหนักในดิน

#### 5.1 การคัดเลือกพืช

การคัดเลือกพืชนั้นจะมีความสำคัญอย่างมากในการเคลื่อนย้ายโลหะ โดยอัตราการเคลื่อนย้ายโลหะจะขึ้นอยู่กับมวลชีวภาพที่เก็บเกี่ยวของพืชและความเข้มข้นขณะเก็บเกี่ยว โดยทั่วไปพืชธรรมดาจะมีศักยภาพในการสะสมโลหะหนักได้ต่ำแต่มีมวลชีวภาพสูง (Ebbs et al., 1997)

#### 5.2 การใส่ปุ๋ยในดิน

Chaney et al., (1999) ได้ทำการศึกษามลของดินกรดต่อการสกัด Zn และ Cd และการใส่ปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตใส่ลงในดินเพื่อเพิ่มธาตุอาหาร (N และ S) ที่จะทำให้ได้ผลผลิตสูง และทำให้ดินเป็นกรดเพื่อเพิ่มความเป็นประโยชน์ของโลหะ การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสมีส่วนในการเพิ่มมวลชีวภาพของพืชได้ แต่ฟอสฟอรัสก็ยังสามารถยับยั้งการดึงดูดโลหะบางตัวได้ เช่น ตะกั่วเนื่องจากตกตะกอนเป็นรูปของ Chloro-Pyromorphite (Chaney et al., 2000)



### 5.3 การเพิ่มความเป็นประโยชน์ของโลหะโดยสารคีเลตสังเคราะห์

การใช้สารเคมีเฉพาะอย่าง เช่น สารคีเลตสังเคราะห์ (synthetic chelates) ช่วยกระตุ้นศักยภาพในการสะสมตะกั่วในพืชได้ สารนี้ช่วยป้องกันการตกตะกอนและเก็บไว้ในรูป Chelate-Pb Complexes ที่ละลายน้ำได้ และสามารถดึงดูดในรากและขนส่งภายในพืชได้ เช่น การใช้สาร EDTA (Ethylene-Diamine-Tetraacetic Acid) ในอัตรา 10 mmol/kg soil จะกระตุ้นการสะสมตะกั่วในยอดข้าวโพดเพิ่มเป็น 1.6 % (Blaylock et al., 1997)

### 5.4 อัตราปลูก

ปัจจัยสำคัญในการควบคุมการปลูกพืชให้มีชีวมวล (biomass) สูง ๆ คือ ความหนาแน่นของการปลูกพืช (จำนวนต้น/ตารางเมตร) ซึ่งมีผลต่อผลผลิต/ต้น และผลผลิต/ไร่ด้วย โดยทั่วไปความหนาแน่นสูงมักจะให้ผลผลิตต่อต้นต่ำสุด และให้ผลผลิตต่อไร่สูงสุด นอกจากนี้ระยะห่างระหว่างต้นก็มีความเป็นไปได้ต่อผลกระทบต่อระบบรากในการดึงดูดโลหะ

### 5.5 การปลูกพืชหมุนเวียน

หลักการปลูกพืชมีความสำคัญต่อการวิจัยการใช้พืชบำบัดสารพิษมาก เพราะพืชหมุนเวียนทำให้ผลผลิตพืชที่ปลูกตามมาสูง นั้นหมายถึงการดูดโลหะหนักได้มากขึ้น

### 5.6 การบำรุงรักษา การควบคุมศัตรูพืช และการให้น้ำ

ควรทำการกำจัดวัชพืชอยู่เสมอ และมีการให้น้ำที่เหมาะสม เพียงพอต่อความต้องการของพืช เพื่อให้พืชเจริญเติบโตได้ดีที่สุด โดยการให้น้ำต้องคำนึงถึงการระเหยและการหายใจ และต้องไม่มากเกินไปซึ่งอาจจะไปจำกัดการเจริญของรากและลดอัตราการสกัดโลหะได้

### 5.7 การจัดการของเสีย

เป็นวิธีการหลังการเก็บเกี่ยวแล้วเพื่อที่จะไม่ให้มวลชีวมวลของพืชเกิดเป็นของเสียที่แพร่กระจายไปที่อื่นได้ อาจใช้การฝังกลบ ซึ่งใช้ร่วมกับใช้ความร้อน การเผา การใช้จุลินทรีย์ทางกายภาพหรือเคมีเพื่อลดต้นทุน หรือการนำกลับมาใช้ใหม่

### 5.8 ต้นทุนและระยะเวลา

การวิเคราะห์ต้นทุนและเวลามีความจำเป็นเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้พืชบำบัดมลพิษต่าง ๆ ในพื้นที่ปนเปื้อน โดยจะต้องทราบปริมาณการปนเปื้อนในพื้นที่ และความสามารถของพืชในการดึงดูดหรือเคลื่อนย้ายต่อไป

### 5.9 งานวิจัย

เพื่อให้การบำบัดโลหะหรือสารปนเปื้อนอย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องม้งานวิจัย

สนับสนุน โดยงานวิจัยต้องจำแนกชนิดของพืชที่มีความสามารถปลูกหมุนเวียนหรือยังคงรักษา อัตราการสกัดโลหะได้ นอกจากนี้ยังบอกให้ทราบถึงช่วงเวลาที่เหมาะสมในการเก็บเกี่ยว เช่น ทำการเก็บเกี่ยวเมื่ออัตราการสะสมโลหะหนักในพืชเริ่มลดลง

## 6 ข้อมูลเกี่ยวกับหญ้าแฝก

### 6.1 ความเป็นมาของหญ้าแฝก

หญ้าแฝกเป็นพืชวงศ์หญ้า (Gramineae) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Vetiveria spp.* ถิ่นกำเนิดอยู่ในภูมิภาคเขตร้อน ได้แก่ บราซิล แอฟริกา อินเดีย ไทย มาเลเซีย เป็นต้น ในประเทศไทย พบหญ้าแฝกเกิดกระจายทุกภาค ส่วนใหญ่เกิดอยู่ตามขอบหนอง บึง คับนา ไปจนถึง เทือกเขาสูง มีอยู่ 2 ชนิดคือ แฝกดอน (*Vetiveria nemoralis* A. Camus) และแฝกหอม (*Vetiveria zizanioides* (Linn.) Nash.) หญ้าแฝกมีคุณสมบัติพิเศษคือ ทนแล้งและทนสภาพน้ำขัง จึงพบได้ทั้งในสภาพแห้งแล้งจนถึง ดินที่มีน้ำขัง หญ้าแฝกมีระบบรากแบบฝอย การกระจายของรากจะหยั่งลึกลงดินมากกว่าการ กระจายออกไปทางด้านข้าง ดังนั้นรากหญ้าแฝกจึงไม่มีผลกระทบต่อพืชผล เกษตรกรรมที่ปลูก ร่วมกัน รากหญ้าแฝกจะสานพันกันแน่นหนาใต้ผิวดิน ช่วยกักเก็บความชื้นไว้ให้กับ ดินและ ช่วยยึดเนื้อดินให้มีความคงทนถาวรมากขึ้น ปลายรากจะมีลักษณะคล้ายฟองน้ำห่อหุ้ม บาง พันธุ์รากจะมีกลิ่นหอมอันเกิดจากสารอินทรีย์ที่เป็นน้ำมันหอมระเหยทำให้มีศัตรู พืชมาทำลายและ สามารถนำเอารากมาสกัดน้ำมันหอมได้ (พันธุ์ศรีลังกาจะมีเปอร์เซ็นต์น้ำมันสูงสุดที่อายุ 18 เดือน) หญ้าแฝกจัดเป็นสมุนไพรที่มีประโยชน์ในการจับลมในลำได้ แก่ท้องอืดเฟ้อและแก้ไข้

หญ้าแฝกพบอยู่ทั่วไปตามภาคต่างๆ ของประเทศ สามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินเกือบทุกชนิด ทนต่อสภาพความแห้งแล้ง ความเปียกแฉะและสภาพน้ำท่วมขังได้ดี เพราะมีระบบรากลึกและใบแคบ หญ้าแฝกขึ้นเป็นกอใหญ่ ขนาดของกอประมาณ 5-20 เซนติเมตร มีความสูงของลำต้นประมาณ 1-1.5 เมตร ใบแคบยาวประมาณ 75 เซนติเมตรกว้าง 4-10 มิลลิเมตร มีรากเป็นกระจุกเหมือนใยฟองน้ำ สามารถดูดซึมน้ำได้ดี และช่วยรักษาความชุ่มชื้นในดิน ดูดซึมแร่ธาตุและอาหาร ดูดซับสารพิษ ถ้านำมาปลูกเป็นแถว จะช่วยในการดักตะกอนดินและป้องกันการพังทลายของดินได้ดี ช่วยปรับปรุงสภาพดินทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของดินดีขึ้น นอกจากนี้ ต้นและใบ ช่วยกรองเศษพืชและตะกอนดิน ใช้ทำวัสดุคลุมหลังคา ใช้ทำเชือก หมวก ตะกร้า ฯลฯ ใช้เป็นวัสดุคลุมดิน ใช้ทำปุ๋ยหมัก เป็นต้น

บุษราคม ป้อมทอง (2544) ได้กล่าวไว้ถึง ศึกษาความหลากหลายทางพันธุกรรมและการจัดจำแนกหญ้าแฝกในประเทศไทย 42 กลุ่มพันธุ์ จัดเป็นหญ้าแฝกหอม (~*Vetiveria zizanioides*-i) 24 กลุ่มพันธุ์ และหญ้าแฝกดอน (~*V. nemoralis*-i) 18 กลุ่มพันธุ์ โดยอาศัย 3 วิธี

หลัก วิธีที่ 1 คือเทคนิค RAPD (Random Amplified Polymorphic DNA) ด้วยไพรเมอร์ 6 ชนิด คือ OPJ-4 OPS-16 USDA-4 USDA-5 USDA-7 และ USDA-8 ผลการทดลองครั้งที่ ทำซ้ำได้ และสามารถยืนยันผลได้ ด้วยการไฮบริดซ์เซชันกับตัวตรวจสอบที่โคลนได้ วิธีที่ 2 เทคนิค SCAR (Sequence Characterized Amplified Region) ด้วยไพรเมอร์ SCAR-J-4 ผลการทดลองพบว่า ไพรเมอร์ SCAR-J-4 ให้เป็น ดีเอ็นเอเครื่องหมายของหญ้าแฝกหอมได้โดยทุกกลุ่มพันธุ์ ให้ผลการทดลองไม่คงที่ ทำการตรวจสอบด้วยเทคนิคที่ 3 SSCP (Single-Strand Conformational Polymorphism) พบว่า ภายในกลุ่มของหญ้าแฝกตอนจะมีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกันมากกว่าภายในกลุ่มของหญ้าแฝกหอม ซึ่งแยกได้เป็น 2 กลุ่มย่อย ซึ่งรูปแบบของ phylogenetic tree ที่ได้นี้จะแตกต่าง ไปจากเทคนิค SSCP

## 6.2 ความทนทานของหญ้าแฝกต่อความเป็นพิษของแคดเมียม

หญ้าแฝกมีความทนทานต่อความเป็นพิษของแคดเมียมเป็นอย่างมาก ระดับที่เป็นพิษจะอยู่ระหว่าง 10-20 ppm ดินที่มีระดับแคดเมียมมากกว่า 3 ppm ซึ่งถือว่าเป็นระดับที่มีการปนเปื้อนของสารพิษ (กรมพัฒนาที่ดินกระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2541. หน้า 61)

Trapp (1993) ได้อธิบายถึงทฤษฎีการกระจายของสารเคมีเข้าสู่พืช ได้ดังนี้

1. การแพร่กระจายในดินสู่รากพืชอธิบายโดยอาศัยหลักการเปรียบเทียบรากของพืชซึ่งมีลักษณะทรงกระบอก น้ำในดินซึ่งอยู่ตามช่องว่างของอากาศจะแพร่ผ่านช่องว่างของอนุภาคดินอย่างช้า โดยมีดัชนีขึ้นอยู่กับความยาวรัศมีหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของรากพืช
2. การดูดซึมไปกับน้ำได้ดิน ทำให้เกิดการลำเลียงของสารเคมีจากรากพืชเข้าสู่ส่วนต่าง ๆ ของพืชในปริมาณสูงโดยผ่านทางท่อลำเลียงน้ำ (xylem)
3. การดูดซึมโดยส่วนอื่น ๆ ของพืชที่สัมผัสอากาศ เช่น รากอากาศ (modified root) เป็นต้น

หญ้าแฝกสามารถทนทานโลหะหนักในดินได้ในระดับสูง จากการวิเคราะห์โลหะหนักในส่วนหน่อและส่วนของราก โลหะหนักที่เป็นพิษต่อพืชส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 1 และ 10 mg kg<sup>-1</sup> แต่หญ้าแฝกทนทานสูงถึง 72 mg kg<sup>-1</sup> สำหรับหญ้าแฝก Cd เป็นพิษ คือ 48 mg kg<sup>-1</sup> และสำหรับพืชอื่นระหว่าง 5 และ 20 mg kg<sup>-1</sup> Cr และ Ni เป็นพิษสำหรับหญ้าแฝก คือ 18 และ 347 mg kg<sup>-1</sup> ตามลำดับ Cr จะมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชส่วนใหญ่อยู่ ระหว่าง 0.02 และ 0.20 mg kg<sup>-1</sup>

ส่วน Ni พืชส่วนใหญ่จะกระทบกระเทือนระหว่าง 10 และ 30 mg kg<sup>-1</sup> หญ้าแฝกมีความทนทานต่อ Cu คล้ายพืชอื่น ๆ ที่ระดับ 15 mg kg<sup>-1</sup> (Truong, 1998)

### 6.3 การกระจายของโลหะหนักในหญ้าแฝก

การกระจายโลหะหนักในส่วนเหนือ (shoot) และรากหญ้าแฝก ส่วนมาก Cd ที่ถูกดูดซึมไว้ในราก (95% ถึง 99%) ความสำคัญที่ค้นพบสิ่งเหล่านี้ในหญ้าแฝก จึงนำมาปลูกในพื้นที่ที่เจือปนในระดับสูงของ Cd สามารถเจริญเติบโตได้อย่างปลอดภัยจนถึงระยะเวลาเก็บเกี่ยว สำหรับโลหะหนักไม่เคลื่อนย้ายในส่วนเหนือ ถึงแม้ว่าหญ้าแฝกไม่สามารถที่จะเป็นผู้สะสมโลหะหนักได้มากที่สุด แต่สามารถที่จะเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากพื้นที่ที่มีการสะสมโลหะหนักมากทำให้พื้นที่นั้นปลอดภัย ตัวอย่างเช่น รากของหญ้าแฝก และ ส่วนของลำต้น สามารถสะสมได้มากกว่า 5 เท่า ของที่มีอยู่ในดิน (Truong, 1999)

### 6.4 พันธุ์หญ้าแฝกที่ใช้ทดลอง

สายพันธุ์อินเดียนพระราชทาน สำนักงาน กปร. ส่งหญ้าแฝกหอมพันธุ์อินเดียนส่งมาจากนิวเดลี ซึ่งกรมพัฒนาที่ดินได้ขยายพันธุ์ส่งไปยังศูนย์ขยายพันธุ์ 20 แห่งทั่วประเทศ โดยใช้รหัส DLDEXT.09 ซึ่งนิยมเรียกว่าพันธุ์พระราชทาน

สายพันธุ์เลข (V6) การเจริญเติบโตในสภาพพื้นที่เป็นดินร่วนเหนียว การแตกกอ 33 ต้นต่อกอ เส้นผ่าศูนย์กลางกอ 14 cm สูง 115 cm การแตกกอมีลักษณะแน่น ออกดอกเมื่ออายุประมาณ 1 เดือนหลังจากปลูก

สายพันธุ์ศรีลังกา (V4) การเจริญเติบโตในสภาพพื้นที่เป็นดินลูกรัง อากาศหนาวเย็นมีร่มเงามีการแตกกอ 10 ต้นต่อกอ เส้นผ่าศูนย์กลาง 11 cm สูง 101 cm การแตกกอมีลักษณะหลวม หน่อกลมอวบ ดอกสีม่วงแดง เริ่มออกดอก เมื่ออายุประมาณ 1 เดือน หลังจากปลูก

สายพันธุ์นครสวรรค์ (V7) การเจริญเติบโตดีในสภาพพื้นดินทรายถึงดินร่วนเหนียว การแตกกอ 34 ต้นต่อกอ ดอกสีม่วง ออกดอกเมื่ออายุครึ่งเดือนหลังจากปลูก

สายพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ (V22) เจริญเติบโตได้ดีในสภาพพื้นที่เป็นดินร่วนเหนียว และลูกรัง แตกกอ 26 ต้นต่อกอ เส้นผ่าศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร สูง 112 เซนติเมตร แตกกอแน่น หน่อใหญ่ตั้งตรงใบหนาสีเขียวเข้ม ร่องโคนใบขาว กาบใบออกสีขาวนวลออกดอกข้างบางแห่งใน 2 ปีแรกยังไม่ออกดอกหรือมีเปอร์เซ็นต์ออกดอกน้อย ดอกสีม่วงช่อดอกเล็ก

## 7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 7.1 การใช้พืชพวก hyperaccumulators species บำบัดแคดเมียม

การใช้ผักกาดขาวปลี (*Brassica pekinensis*) ซึ่งเป็นพืชที่ให้ผลผลิตสูงสามารถที่จะสะสมตะกั่วในรากและในยอดได้ในปริมาณสูง (Xiong, 1997) นอกจากนี้ยังมีพืชอีกหลายชนิด เช่น ทานตะวัน, ผักกาดเขียวปลี, Rape Seed Plants, บาร์เลย์, Hops, Crucifers, Serpentine Plants, Nettles, Dandelions ที่สามารถสะสมตะกั่วได้ดี (Jerald, 1997) ส่วน สุภาพร (2545) ศึกษาการสะสมของตะกั่วและแคดเมียมในผักประเภทบรืโคโบ คือ ผักบุ้ง ผักคะน้า ผักกาดหอม ผักกาดเขียว และต้นหอม ประเภทบรืโคโบหัว คือ ผักกาดหัว หัวหอม และประเภทบรืโคโบผล คือ แดงกวมะเขือเทศ และข้าวโพดฝักอ่อน พบว่าผักกาดหอมมีการสะสมตะกั่วและแคดเมียมมากกว่าพืชชนิดอื่น ๆ และมีค่าเกินมาตรฐานการปนเปื้อน

ในประเทศอังกฤษมีการใช้พืชบำบัด (phytoremediation) โดยใช้ต้นไม้บำบัดพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน โดยติดตามผลการเจริญเติบโตจากการได้รับโลหะหนัก (Pulford, 2002) ได้กล่าวถึงกระบวนการ phytoremediation หมายถึง กระบวนการการใช้พืชในการกำจัดสารพิษจากสิ่งแวดล้อม หรือทำให้มีความเป็นอันตรายลดลง (Salt et al., 1998) โดยจำแนกออกเป็น 5 แบบด้วยกันคือ

Phytoextraction พืชกำจัดโลหะออกจากดินและทำให้มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ในส่วนที่สามารถเก็บเกี่ยวได้ของพืช

Phytodegradation พืชและจุลินทรีย์ย่อยสลายสารพิษที่เป็นสารอินทรีย์

Rhizofiltration รากพืชดูดซับโลหะจาก waste streams

Phytostabilisation พืชจะลดการเคลื่อนย้ายและความเป็นประโยชน์ของสารพิษในสิ่งแวดล้อมทั้งในรูปการตรึงไว้ (immobilisation) หรือการป้องกันการเคลื่อนย้าย

Phytovolatilisation เป็นความสามารถระเหยได้ของสารพิษไปยังในบรรยากาศผ่านทางพืช (Pulford, 2003)

ในประเทศอิตาลีมีการใช้พืช canola (*Brassica napus*) และ radish (*Raphanus sativus*) ปลูกในดินที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียม ศึกษาการเจริญเติบโตโดยปลูกในกระถางที่ดินมีการปนเปื้อนของแคดเมียม พบว่าพืชทั้ง 2 ชนิด สามารถทนทานได้ในระดับปานกลาง โดย radish มีความสามารถทนทานได้ดี โดยมีน้ำหนักแห้งรวมสูงกว่า และปริมาณการสะสมของโลหะหนักพบว่าสังกะสีมีการดูดซับในส่วนของลำต้น(ที่อยู่เหนือดิน) และรากมากที่สุด (Marchiol, 2004)

## 7.2 การใช้หญ้าแฝก

หญ้าแฝกเป็นพืชในอุดมคติสำหรับบำบัดสารพิษที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม หญ้าแฝกทนทานสูงต่อความเป็นพิษของโลหะหนัก เช่น Al, Mn, As, Cd, Cr, Ni, Pb, Hg, Se และ Zn นอกจากนี้ยังดูดซึม N, P, Hg, Cd และ Pb ที่ละลายอยู่ในน้ำที่ปนเปื้อนได้ (Truong & Baker, 1998)

ในประเทศออสเตรเลียมีการใช้หญ้าแฝกบำบัดมลพิษในพื้นที่ที่ขยะพบว่าสามารถดูดน้ำขยะได้ดี (Truong, 1999) และมีงานวิจัยที่นำหญ้าแฝกมาปลูกในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักเพื่อศึกษา อัตราการเจริญเติบโตและลักษณะของราก และดูการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักที่เพิ่มมากขึ้น ในประเทศจีนมีการใช้หญ้าแฝกปลูกในบริเวณกองขยะและฟาร์มสุกรก็พบว่าสามารถขจัดกลิ่นที่ไม่ดีได้เป็นอย่างดี (Xia, 1998); (Liao, 1999) และมีงานวิจัยใช้หญ้าแฝกหอดักศึกษาศักยภาพของมันในกระบวนการ phytoremediation ของดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยการทดลองในกระถางโดยศึกษาการเคลื่อนย้ายและการดึงดูดตะกั่วในหญ้าแฝก จากดินปนเปื้อนตะกั่วโดยใช้ EDTA ผลการทดลองพบว่าหญ้าแฝกมีความสามารถทนทานตะกั่วได้ในปริมาณสูง โดยการใช้ร่วมกับ EDTA จะมีอัตราการเคลื่อนย้ายของตะกั่วจากรากหญ้าแฝกไปยังส่วนลำต้นเพิ่มอย่างมาก(แตกต่างทางสถิติ) (Yahua, 2004) และมีงานวิจัยที่ใช้หญ้าแฝกในการบำบัดพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก โดยการปรับปรุงดินทางเคมีด้วย calcium carbonate (CC), steel sludge (SS) และ furnace slag (FS) ต่อการเจริญเติบโตและดึงดูด Cd โดย wetland rice, Chinese cabbage และข้าวสาลี 23-95 % เมื่อเปรียบเทียบกับ control โดยระหว่างวิธีการปรับปรุงดินทั้ง 3 แบบพบว่าการใช้ FS มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการระงับการดึงดูดโดยพืชซึ่งอาจเป็นได้จากการที่มีปริมาณ ซิลิกอนสูง(Si) ความเข้มข้นของ Zn, Pb, และ Cd ในลำต้น (shoots) ของหญ้าแฝกมีค่า 42-67 %, 500-1200 % และ 120-260 % ของ control ตามลำดับ การสะสมของ Cd โดยหญ้าแฝกใน shoots เท่ากับ 218 g Cd/ha ที่ความเข้มข้นของ Cd ในดิน 0.33 mg Cd/hg (ppm) ดังนั้นจะเห็นว่า ความสามารถบำบัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินโดยการใช้วิธีทางเคมีและการใช้พืชร่วมกันได้(Chen, 2000) ในประเทศฮ่องกงได้กล่าวถึงการนำหญ้าแฝกปลูกในดินกากแร่เพื่อศึกษาทางสรีรวิทยา พบว่าหญ้าแฝกสามารถทนต่อโลหะหนัก สัดส่วนของตะกั่วและสังกะสีไปยังการเจริญเติบโตของใบ, น้ำหนักแห้ง และกระบวนการสังเคราะห์แสงของใบไปกระตุ้นโพลีเอินและกรดแอบซิซิก(ABA) และไปยังยั้งกิจกรรม SOD, POD, และ CAT, AOS สรีรวิทยาของหญ้าแฝก ในดินการกากแร่ที่มีโลหะหนัก ระหว่างรากและส่วนที่อยู่เหนือดิน การใส่ปุ๋ยไนโตรเจนสามารถช่วยในการเจริญเติบโตของหญ้าแฝกในดินกากแร่ที่มีสัดส่วน ตะกั่วและสังกะสี

ในประเทศไทยมีรายงานว่าหญ้าแฝกสามารถกำจัดสารปนเปื้อนทางเคมีเกษตรได้ดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งพวกสารฆ่าแมลง นอกจากนี้ยังป้องกันการสะสมในพืชปลูก แม่น้ำลำธาร และระบบนิเวศอื่น ๆ อีกด้วย (Pinthong et al., 1996) มีการใช้หญ้าแฝกดูด N, P, K, Ca, Mg, Pb, Cd และ Hg พบว่าหญ้าแฝกดูดสะสมโลหะหนักได้ดี (Sripen et al., 1996); (Roongtanakiat et al., 1999) สำหรับการใช้น้ำหญ้าแฝกบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วและแคดเมียม นวลฉวี รุ่งธนาเกียรติ และประไพ ชัยโรจน์ (2001) ใช้หญ้าแฝกพันธุ์กำแพงเพชร ราชบุรี และ สุราษฎร์ธานี ดูดซับ Mn, Zn, Cu, Cd, Pb ที่ปนเปื้อนในดินในความเข้มข้นที่ต่างกันพบว่าหญ้าแฝกสามารถเจริญเติบโตได้ดีในทุกระดับความเข้มข้น โดยสายพันธุ์ราชบุรีมีปริมาณ Zn, Cd และ Pb สะสมมากกว่าอีก 2 สายพันธุ์ นอกจากนี้ยังพบว่าโลหะหนักสะสมในยอดเมื่ออายุ 120 วันน้อยกว่าอายุ 60 วัน แต่ความเข้มข้นในรากเพิ่มขึ้นโดยอายุ 120 วันมีความเข้มข้นมากกว่า ส่วน Somssaguan Chantachon และ คณะ (2002) ใช้หญ้าแฝกหอม (*Vetiveria zizanioides*) และหญ้าแฝกดอน (*V. nemoralis*) ดูดซึมตะกั่วใน Soil-Culture พบว่าการเคลื่อนย้ายของตะกั่วจากดินมีความสัมพันธ์กับการสะสมในรากและยอดของหญ้าแฝกทั้ง 2 สายพันธุ์ โดยความเข้มข้นของตะกั่ว 9-11 ppm ทำให้การเจริญเติบโตลดลง ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม และมวลชีวภาพของหญ้าแฝกหอมลดลง ในขณะที่หญ้าแฝกดอนตายหลังปลูก 1 สัปดาห์ จะเห็นได้ว่าหญ้าแฝกนั้นมีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดสารพิษเหล่านี้

\* ธนียา เจตยานุกรกุล (2539, หน้า 112) ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้หญ้าแฝกแหล่งพันธุ์ต่าง ๆ ในการบำบัดน้ำทิ้ง โดยใช้หญ้าแฝก 5 แหล่งพันธุ์ ได้แก่ แหล่งพันธุ์ราชบุรี สุราษฎร์ธานี อินโดนีเซีย ศรีลังกา และบราซิล ปลูกลงในกระถางแล้วรดด้วยน้ำทิ้งจากแหล่งต่าง ๆ ผลการทดลองพบว่าปริมาณโลหะหนักตะกั่วและแคดเมียมที่พบในส่วนรากมีปริมาณสูงกว่าในส่วนต้นของหญ้าแฝก โดยรากหญ้าแฝกแหล่งพันธุ์บราซิลมีปริมาณตะกั่วและแคดเมียมสูงกว่าแหล่งพันธุ์อื่น ในขณะที่ต้นหญ้าแฝกแหล่งพันธุ์อินโดนีเซียจะมีปริมาณตะกั่ว 4.9 ppm ส่วนต้นหญ้าแฝกแหล่งพันธุ์บราซิลและสุราษฎร์ธานีพบว่ามีปริมาณแคดเมียมสูงกว่าต้นหญ้าแฝกแหล่งพันธุ์อื่น ๆ

มนพ รุ่งสุข (2538, หน้า 51-86) ศึกษาปริมาณธาตุอาหารและโลหะหนักในหญ้าแฝกหอม โดยพบว่า การดูดซึมปริมาณแคดเมียมของหญ้าแฝกหอมพันธุ์อินเดียในส่วนลำต้น เมื่อเริ่มตัดส่วนใบนำต่อซึ่งมาวิเคราะห์พบปริมาณแคดเมียม  $0.18 \text{ mg kg}^{-1}$  เมื่ออายุ 1 และ 3 เดือน พบปริมาณแคดเมียม  $0.35$  และ  $0.22 \text{ mg kg}^{-1}$  ตามลำดับ จากค่าเฉลี่ย  $0.25 \text{ mg kg}^{-1}$  ปริมาณแคดเมียมจะอยู่ในช่วง  $0.18-0.35 \text{ mg kg}^{-1}$  โดยสูงสุดเมื่ออายุ 1 เดือนคือ  $0.35 \text{ mg kg}^{-1}$  และในส่วนของราก เมื่อเริ่มตัดส่วนใบนำรากมาวิเคราะห์พบปริมาณแคดเมียม  $0.29 \text{ mg kg}^{-1}$

เมื่ออายุ 1 และ 3 เดือนพบปริมาณแคดเมียม 0.39 และ 0.43 mg kg<sup>-1</sup> ตามลำดับ จากค่าเฉลี่ย 0.37 mg kg<sup>-1</sup> ปริมาณแคดเมียมจะอยู่ในช่วง 0.29-0.43 mg kg<sup>-1</sup> โดยสูงสุดเมื่ออายุ 3 เดือนคือ 0.43 mg kg<sup>-1</sup> จากค่าเฉลี่ยส่วนของรากมีความสามารถดูดซึมแคดเมียมได้มากกว่าส่วนลำต้น

อัจจิมา มีพริ้ง (2547) ได้กล่าวถึง การศึกษาความสามารถการดูดซึมโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินของหญ้าแฝกต่างกลุ่มพันธุ์ พบว่า หญ้าแฝกทั้ง 3 กลุ่มพันธุ์มีความสามารถในการดูดซึมปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินได้โดยมีแนวโน้มว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ปริมาณโลหะหนักสะสมในรากมากที่สุด รองลงมาเป็นส่วนใบและลำต้น การเจริญเติบโตหรือความทนทานต่อความเป็นพิษของโลหะหนัก พบว่า หญ้าแฝกกลุ่มพันธุ์มอโตเจริญเติบโตหรือความทนทานต่อความเป็นพิษของโลหะหนักได้มากที่สุด ส่วนปริมาณตกค้างของโลหะหนักในดิน พบว่า สารหนูเหลือปริมาณตกค้าง 50.25 mg kg<sup>-1</sup> ตะกั่ว 50.16 mg kg<sup>-1</sup> แคดเมียมเหลือปริมาณน้อยมากไม่สามารถตรวจวัดได้

อนุรักษ์ บรรณศักดิ์ (2544) ได้กล่าวถึง การวิเคราะห์ตะกั่วและสังกะสีในหญ้าแฝกที่ปลูกบนทางแบริ่งและทางแบริ่งสังกะสีโดยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ พบว่า การเจริญเติบโตของแฝกที่ปลูกบนดินทดลองทางแบริ่งตะกั่วทุกความเข้มข้นที่มีการบำรุงด้วยปุ๋ย มีการเจริญเติบโตดีกว่าแฝกที่ปลูกบนดินที่ไม่บำรุงด้วยปุ๋ย ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของตะกั่วพบว่าแฝกที่ปลูกบนดินทางแบริ่งตะกั่วที่ระดับความเข้มข้นทางแบริ่ง 100 % ที่ได้รับการบำรุงด้วยปุ๋ยเคมีสามารถดูดซึมตะกั่วไว้ได้มากที่สุด คือ 182.7 มิลลิกรัม ส่วนแฝกที่ปลูกบนดินทดลองทางแบริ่งสังกะสีพบว่า ระดับความเข้มข้นของดินทางแบริ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตของแฝก โดยแฝกที่ปลูกบนดินทางแบริ่งสังกะสีที่ระดับความเข้มข้นทางแบริ่ง 50 % จะมีการเจริญเติบโตดีกว่าแฝกที่ปลูกบนดินทางแบริ่งสังกะสีที่มีระดับความเข้มข้นทางแบริ่ง 100 % และจากผลการทดลองพบว่าแฝกที่ปลูกบนดินทางแบริ่งที่บำรุงด้วยปุ๋ยเคมีมีการตายถึง 75 % ส่วนแฝกที่ปลูกบนดินทางแบริ่งที่บำรุงด้วยปุ๋ยอินทรีย์มีการเจริญเติบโตดีที่สุด และสามารถดูดซึมสังกะสีไว้ในปริมาณ 38.1 มิลลิกรัม

วงศ์พงา เส็งสาย (2544) ได้กล่าวไว้ถึง ประสิทธิภาพของหญ้าแฝกหอม *Vetiveria zizanioides* (Linn.) Nash และแฝกดอน *Vetiveria nemoralis* A. Camus ในการกำจัดโครเมียมในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น เพื่อการบำบัดน้ำเสียขั้นสุดท้ายจากโรงฟอกหนัง พบว่าการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้ง และความสูงในบ่อทดลองที่ระดับน้ำเสียทั้ง 3 ระดับไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ( $p < 0.05$ ) ทั้งสองสายพันธุ์ โดยหญ้าแฝกดอนสายพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์มีน้ำหนักแห้ง และความสูงมากกว่าหญ้าแฝกหอมสายพันธุ์ สุราษฎร์ธานีทุกระดับน้ำ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาระยะการสะสมโครเมียมในดิน และในพืช พบว่า หญ้าแฝกทั้ง



สองสายพันธุ์มีการสะสมโครเมียมไว้ในส่วนรากมากกว่าส่วนใบและลำต้น เมื่อพิจารณามวลรวมพบว่าโครเมียมส่วนใหญ่ถูกสะสมอยู่ในดิน ซึ่งมีลักษณะเป็นดินร่วน ก้าวคือมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณโครเมียมทั้งหมดในระบบอยู่ในดิน

