บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยพบปัญหาการปนเปื้อนแคดเมียมในดินและน้ำบริเวณลำห้วยแม่ตาว ตำบลพระธาตุผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก (กลุ่มวิชาการและมาตรฐาน สำนักบริหารและฟื้นฟูสิ่งแวดล้อม, 2547) ซึ่งในบริเวณดังกล่าวมีการทำเหมืองแร่สังกะสี และในการสกัดแร่สังกะสีนั้นจะมีการชะล้างเอาแคดเมียมออกมาด้วย เพราะแคดเมียมและสังกะสีเป็นสายแร่ที่อยู่คู่กัน ทำให้ปริมาณแคดเมียมที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมมีมากตามปริมาณการผลิตสังกะสี (Fergusson, 1985; IPCS, 1992b) นอกจากนี้การบุกเบิกพื้นที่เพื่อทำการเกษตรของประชาชนในพื้นที่ และการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตในทางการเกษตรเพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน โดยในปุ๋ยฟอสเฟตไม่ได้มีเฉพาะธาตุและสารอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของพืช แต่ยังมีโลหะปนเปื้อนอีกหลายชนิด (Metal impurity) รวมทั้งแคดเมียม โดยมีการศึกษาพบว่าการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน (Nicholson and Jones, 1994; Taylor and Perciva, 2001) ดังนั้นเมื่อมีการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตเป็นจำนวนมาก จึงทำให้มีการสะสมแคดเมียมในดินเพิ่มมากขึ้น

การบริหารจัดการลุ่มน้ำ ที่ขาดความระมัดระวัง ทำให้เกิดผลกระทบโดยตรงต่อสุขภาพของประชาชน พื้นที่ลุ่มน้ำแม่ตาวเป็นตัวอย่างหนึ่งของการบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมที่ขาดความระมัดระวัง จึงก่อให้เกิดผลกระทบกับคุณภาพชีวิต และคุณภาพสิ่งแวดล้อม โดยมีสาเหตุมาจากการแพร่กระจายของแคดเมียม จากกิจกรรมการใช้ประโยชน์ที่ดินของมนุษย์อันประกอบด้วย การทำเหมืองแร่ การตัดไม้ทำลายป่า การทำการเกษตร และการแพร่กระจายของแคดเมียมที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ

เมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมในดินสูงขึ้น อัตราการดูดซึมแคดเมียมเข้าสู่พืช ก็จะมากขึ้นด้วย โดยเฉพาะในดินที่มีค่า pH ต่ำ จึงทำให้มีการสะสมแคดเมียมในพืชในปริมาณสูง โดยพืชจะดูดซึมแคดเมียมเข้าไปในเซลล์ โดยอาศัยระบบการนำเข้าของแคลเซียม (Calcium uptake system) ขึ้นไปในปริมาณสูง (Clemens et al., 1998) และแคดเมียมอาจเกิดการชะล้างลงสู่แหล่งน้ำในปริมาณสูงเช่นเดียวกัน ทำให้มีการสะสมแคดเมียมในสัตว์น้ำ โดยปกติแล้วดินมีความเข้มข้นของโลหะสูงกว่าในน้ำ เพราะว่าโลหะมีการสะสมในดินได้ดีกว่าน้ำ เนื่องจากโลหะที่ปนเปื้อนในน้ำจะถูกทำให้เจือจางหรือถูกพาไปแหล่งอื่น หรือสะสมอยู่ในดินตะกอนท้องน้ำ นอกจากนี้ ในดินมีแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบซึ่งตามธรรมชาติแร่ธาตุประกอบด้วยโลหะในปริมาณที่สูง การแลกเปลี่ยนประจุของดินมีผลให้โลหะสามารถเกาะติดกับอนุภาคของดินได้ดี จึงทำให้มีการสะสมโลหะในดินได้มาก เมื่อมนุษย์บริโภคพืชหรือสัตว์ที่ปนเปื้อนแคดเมียมเข้าสู่ร่างกาย ทำให้เกิดการสะสมแคดเมียมและเกิดพิษต่อระบบต่างๆ ของ

ร่างกาย โดยแคดเมียมจะไปจับกับโมเลกุลโปรตีนในร่างกาย ซึ่งสามารถตรวจวัดปริมาณแคดเมียมในปัสสาวะในรูป Proteinuria ซึ่งการได้รับแคดเมียมเป็นระยะเวลานานทำให้เกิดพิษต่อไต โดยไตเป็นอวัยวะเป้าหมายหลักในการเกิดพิษของแคดเมียม นอกจากนี้คนงานที่ได้รับแคดเมียมจากการทำงานโดยวิธีการสูดดมเป็นเวลานาน จะทำให้เกิดอาการหายใจขัด (Airway obstruction) โดยแคดเมียมไปมีผลที่ปอดและอาจนำไปสู่มะเร็งปอดได้ (IPCS, 1992a; IPCS, 1992b)

เทคโนโลยีการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักโดยใช้พืช

เทคโนโลยีการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักโดยใช้พืชมีหลายวิธีการ แต่ที่สำคัญมี 2 วิธี คือ การตรึงโลหะหนักในดิน (containment technology) หรือ phytostabilization และการกำจัดโลหะหนักออกจากดิน (removal technology) หรือ phytoextraction ทั้งนี้โดยอาศัยกลไกการทนโลหะหนักของพืชที่แตกต่างกัน พืชทนโลหะหนักอาศัยกลไก 2 แบบคือ การหลีกเลี่ยงโลหะหนักคือไม่นำเข้าไป (metal exclusion) และการนำเข้าไป (metal accumulation) แต่มีการทำลายพิษโลหะหนักในเซลล์พืช (metal detoxification) (Baker 1981) พืชที่เป็นเอกซ์คลูเดอร์มีการสะสมโลหะหนักน้อยมาก หรือสะสมได้เฉพาะในรากเท่านั้น จึงสามารถตรึงโลหะหนักได้โดยการตกตะกอนของโลหะหนักบริเวณรอบๆ ราก (Dahmani-Muller et al. 2000) ในทางตรงกันข้ามพืชที่เป็นแอกคิวมิวเลเตอร์สามารถดูดซับโลหะหนักโดยรากและขนส่งโลหะหนักขึ้นไปสะสมในส่วนต้นได้ มีกลไกการทำลายพิษโลหะหนักโดยโปรตีนชนิดพิเศษ ดังนั้นในเทคโนโลยี phytostabilization ใช้พืชเอกซ์คลูเดอร์ ส่วนเทคโนโลยี phytoextraction ใช้พืชแอกคิวมิวเลเตอร์ (รูปที่ 1)

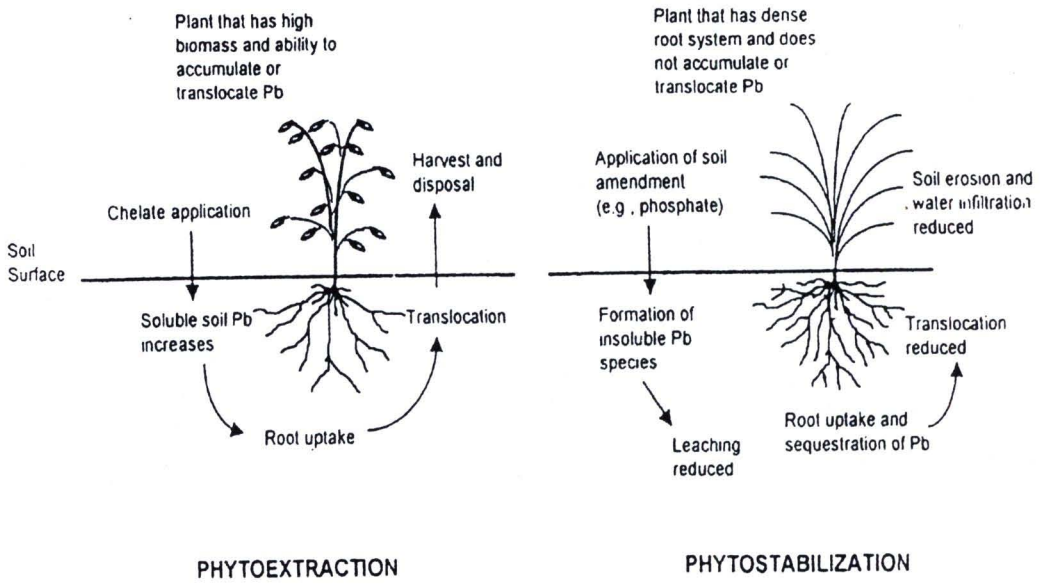

FIGURE 19.1 Comparison of the processes involved in phytoextraction and phytostabilization for Pb-contaminated soils.

รูปที่ 1-1 เทคโนโลยี phytoextraction และ phytostabilization

Phytoextraction

Phytoextraction เป็นเทคโนโลยีที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก (Lasat 2002, Wong 2003, Thangavel and Subbhuraam 2004) ในทางปฏิบัติคือปลูกพืชแอกคิวมิวเลเตอร์บนดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักโ ดยใช้การหว่านเมล็ดหรือใช้ต้นกล้า รากของพืชดูดซับโลหะหนักจากดินและขนส่งขึ้นไปในส่วนต้นและใบ สำหรับโลหะหนักที่มักจับกับดิน เช่น ตะกั่ว อาจใช้ตัวช่วยดึงตะกั่วออกจากดิน เช่น สารคีเลตต่างๆ หรือคีเลเตอร์ (chelator) วิธีการนี้ทำให้พืชดูดซับตะกั่วได้มากขึ้น (Huang and Cunningham 1996, Huang et al.1997, Lombi et al. 2001) เมื่อพืชเจริญเติบโตเต็มที่ก็จะตัดส่วนต้นและใบที่สะสมโลหะหนัก เหลือไว้แต่รากที่สามารถงอกเป็นต้นใหม่ได้ ดังนั้นโลหะหนักจะถูกดึงออกจากดินมาสะสมอยู่ในส่วนต้นและใบของพืช ซึ่งก็ยังเป็นปัญหาในการกำจัดเหมือนกันKumar et al. (1995) แนะนำวิธีการเผาด้วยไฟสูงมาก (incineration) เพื่อให้มวลชีวภาพลดลงอย่างมากมายง่ายต่อการกำจัดโดยการฝังกลบอีกทีหนึ่ง Comis (1996) และ Cunningham and Ow (1996) ใช้วิธีกำจัดโดยการเผาแล้วนำมาถลุงในกรณีที่โลหะหนักมีค่า เช่น นิกเกิล เทคโนโลยี phytoextraction ใช้เวลานานในการกำจัดโลหะหนัก ต้องปลูกพืชหลายๆ ครั้งเพื่อลดปริมาณโลหะหนักในดินให้เหลือเท่ากับค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ไม่เป็นพิษต่อคนหรือสัตว์ (Kumar et al. 1995) เวลาที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดและปริมาณของโลหะหนักที่ปนเปื้อนอัต ราการเติบโตของพืช วงจรชีวิตของพืช และประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของพืช อาจใช้เวลา 1-20 ปี (Kumar et al. 1995, Blaylock and Huang 2000) เทคโนโลยีนี้เหมาะกับบริเวณที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักที่ผิวดิน (น้อยกว่า 20 ซม.) และปริมาณที่ปนเปื้อนไม่สูงมากนัก (Kumar et al. 1995, Blaylock and Huang 2000) นอกจากนั้นเทคโนโลยีนี้จะให้ผลดี ก็เมื่อโลหะหนักอยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดซับได้ พืชที่ปลูกควรมีมวลชีวภาพมาก และเป็นพืชไฮเปอร์แอกคิวมิวเลเตอร์/ทนทานต่อโลหะหนัก มีอัตราการเติบโตสูง เจริญได้ดีในดินที่เสื่อมโทรม มีระบบรากที่หนาแน่น ไม่เป็นโรคง่าย

Phytostabilization

ในดินที่มีปริมาณโลหะหนักสูงมาก จนกระทั่งถ้าใช้วิธี phytoextraction อาจใช้เวลาเป็นร้อยปี ก็ควรใช้เทคโนโลยี phytostabilization เช่น ดินบริเวณเหมืองที่มีปริมาณโลหะหนักสูงอยู่แล้วในธรรมชาติ วิธีการบำบัดฟื้นฟูสภาพดินคือปลูกพืชคลุมดินเพื่อยึดดินไว้ป้องกันการถูกชะล้างหรือรั่วไหลของโลหะหนัก พืชที่ปลูกจะต้องเป็นพืชทนโลหะหนัก แต่เนื่องจากดินมีความเป็นพิษมากจนพืชไม่สามารถเจริญเติบโตได้ดี วิธีแก้ไขคือ ถมดินบริเวณนี้ก่อนด้วยสารที่ทำให้โลหะหนักถูกตรึงอยู่กับที่ เช่น ดินเหนียว ปูนขาว เบนโนไลต์ โดโลไมต์ หนาพอสมควร เพื่อตรึงโลหะหนักมิให้แทรกซึมขึ้นมาในชั้นที่รากของพืชเจริญได้ดี แล้วถมอีกชั้นหนึ่งด้วยหน้าดินที่มีแร่ธาตุอาหาร แล้วจึงปลูกพืช สำนักบริหารและฟื้นฟูสิ่งแวดล้อม กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม ได้กำหนดวิธีการดังกล่าวในการฟื้นฟูสภาพแวดล้อมเมื่อกิจการการทำเหมืองแร่สิ้นสุดลง พืชเหล่านี้นอกจากจะทนต่อโลหะหนักแล้ว ยังมีการสะสมโลหะหนักไว้ในรากเท่านั้น โดยลำเลียงขึ้นไปสู่ลำต้น

และใบน้อยมาก (Cunningham et al. 1995, Salt et al. 1995, Flathman and Lanza 1998, Berti and Cunningham 2000, Schnoor 2000) วิธีการนี้ช่วยลดอัตราเสี่ยงในการกระจายของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อสุขภาพคนและสัตว์และลดปัญหามลภาวะด้วย

Berti and Cunningham (2000) ได้บรรยายกระบวนการ phytostabilization โดยละเอียดคือก่อนปลูกพืช บริเวณพื้นที่ที่มีโลหะหนักจะถูกไถให้เรียบเพื่อเตรียมหว่านเมล็ด ใส่ปูนขาวหรือปุ๋ยหรือสารอื่นๆ ที่ช่วยตรึงโลหะหนัก เช่น ปุ๋ยฟอสเฟต อินทรียสารหรือ biosolid เหล็กหรือแมงกานีสออกซีไฮดรอกไซด์ (manganese ox hydroxide) ดินเหนียวธรรมชาติหรือดินเหนียวสังเคราะห์ หลังจากนั้นจึงปลูกพืชทนโลหะหนัก ซึ่งควรจะโตเร็ว มีระบบรากที่แน่น Smith and Bradshaw (1992) ได้ค้นพบพืชที่เหมาะสมกับกระบวนการนี้คือ *Agrostis tenuis* และ *Festuca rubra* ซึ่งในขณะนี้ได้มีการผลิตเชิงพาณิชย์ แล้วเทคโนโลยี phytostabilization จะมีประสิทธิภาพสูง ถ้าประยุกต์ใช้กับบริเวณดินละเอียดมีการปนเปื้อนโลหะหนักบริเวณผิวดิน(Cunningham et al. 1995, Berti and Cunningham 2000) กระบวนการนี้มีข้อดีคือมีค่าใช้จ่ายต่ำ ทำได้ง่ายและไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม (Berti and Cunningham 2000, Schnoor 2000)

การปรับสภาพดินเพื่อใช้ในเทคโนโลยี phytostabilization

การปรับสภาพดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักโดยใช้เทคโนโลยี phytostabilization มักนิยมใช้พืชเบิกนำ (pioneer species) จำพวกพืชตระกูลหญ้า เช่น หญ้าแฝก และหญ้าชนิดอื่นๆ (Shu et al. 2000, Pang et al. 2003, Chen et al. 2004) พืชตระกูลถั่ว เช่น *Sesbania rostrata* (Yang et al. 1997) *Leucaena leucocephala* (Zhang et al. 2001) โดยใช้สารช่วยตรึงตะกั่ว จำพวก ซีโอไลต์ (zeolite) เบรินไจต์ (beringite) ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxyl-apatite) (Lothenbach et al. 1998) นอกจากสารตรึงตะกั่วดังกล่าว มีการทดลองใช้สารอื่นๆ ในการลดพิษตะกั่ว และช่วยในการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ ปูนขาว มูลวัว มูลไก่ ปุ๋ยคอก มูลหมู ตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย biosolid ฟางป่น แคลเซียมคาร์บอเนต เกลือฟอสเฟต เหล็กออกไซด์ แมงกานีสออกไซด์ ปุ๋ยเคมี ซึ่งได้มีการทดลองกับพืชหายชนิด เช่น หญ้าแฝก ผักกาดเขียว ข้าวสาลี เป็นต้น (Ye et al. 1999, Chen et al. 2000, Garcia et al. 2004, Walker et al. 2004, Clemente et al. 2005, Chiu et al. 2005, Gisbert et al. 2005) โดยพืชเหล่านี้มีการเจริญเติบโตดีขึ้น

นอกจากพืชตระกูลหญ้า และพืชล้มลุกดังกล่าวแล้ว มีการใช้ไม้ยืนต้น (tree) ในการปรับสภาพดินเพื่อใช้ในกระบวนการ phytostabilization ในหลายพื้นที่ เนื่องจากการเพิ่มจำนวนไม้ยืนต้นในพื้นที่หลังจากที่สภาพพื้นที่ถูกเปลี่ยนสภาพ หรือมีการปนเปื้อนเป็นการปรับสภาพพื้นที่ที่ลงทุนต่ำกว่าวิธีการอื่นๆ (Cannell 1999, Dickinson 2000b, Paulson et al. 2003, Pulford and Watson 2003) นอกจากนี้การปลูกไม้ยืนต้น ยังสามารถแก้ปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักในดินทั้งในรูปของการตรึงโลหะเหล่านั้นในอยู่ในดิน (immobilization) หรือดูดเข้าไปเก็บไว้ในส่วนต่างๆ ของลำต้น (Lepp and Dickinson 1998, Vangronsveld and Cunningham, 1998, Bardos et al. 1999, Dickinson 2000a, Pulford and Watson 2003, Berndes et al. 2004) เช่น การใช้ *Salix* (willow) ที่มีอายุสั้นในการตรึงแคดเมียม (Dickinson and

Pulford 2004) อย่างไรก็ตามการทดลองส่วนใหญ่ มักกระทำในห้องปฏิบัติการ หรือการทดลองในกระถาง แต่การทดลองที่นำไปใช้จริงในภาคสนาม ยังไม่ค่อยมีรายงานออกมามากนัก (French et al. 2006) ส่วนใหญ่มักสนใจพืชขนาดเล็กที่เป็นไฮเปอร์แอกคิวมิวเลเตอร์มากกว่า ได้แก่ *Thlaspi* (Brassicaceae) ที่สามารถสะสมสังกะสี มากกว่าร้อยละ 3% (30,000 มก/กก) ตะกั่ว มากกว่า 0.5% (5,000 มก/กก) และแคดเมียม มากกว่า 0.1% (1,000 มก/กก) ในลำต้น (Baker et al. 1991, Brown et al. 1994) และ *Alyssum* (Brassicaceae) สามารถสะสมนิกเกิลมากกว่า 1% (10,000 มก/กก) (Brooks et al. 1979)

การทดลองภาคสนาม

ในระยะเวลาที่ผ่านมา ได้มีรายงานการทดลองภาคสนามเกี่ยวกับการใช้เทคโนโลยี phytoremediation ในการบำบัดโลหะหนักพอสมควร บางโครงการก็กำลังอยู่ในขั้นดำเนินการ บางโครงการก็สิ้นสุดแล้วดังรายงานต่อไปนี้

บริษัท Phytotech ซึ่งเป็นบริษัทแนวหน้าในการนำเทคโนโลยี phytoremediation มาใช้ในพื้นที่จริงได้นำต้นผักกาดเขียว (*Brassica juncea*) มาปลูกในพื้นที่ๆ ปนเปื้อนด้วยตะกั่ว ในมลรัฐ New Jersey ประเทศสหรัฐอเมริกา ร้อยละ 40 ของพื้นที่มีการปนเปื้อนของตะกั่ว 400 มก/กก (มากกว่าค่ามาตรฐาน 70-100 มก/กก) ส่วนอีกร้อยละ 7 ของพื้นที่มีปริมาณตะกั่วถึง 1,000 มก/กกในดิน ต้นผักกาดเขียวสามารถสะสมตะกั่วได้ประมาณ 3,000 มก/กก คือ สามารถกำจัดตะกั่วได้ประมาณ 20-30 มก/กก ในดินที่ลึกไม่เกิน 18 นิ้ว ในพื้นที่อีกแห่งหนึ่งที่ปนเปื้อนด้วยตะกั่วในมลรัฐเดียวกัน บริษัท Phytotech ก็ได้ปลูกต้นผักกาดเขียว เพื่อบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนตะกั่วเป็นจุดประมาณ 1,000 มก/กก พบว่า การปลูกต้นผักกาดเขียวเพียง 3 ชุด (ชุด ๆ ละประมาณ 6 สัปดาห์) ก็สามารถกำจัด ตะกั่วในดินลงมาถึงค่ามาตรฐานได้ (Saxena et al. 1999)

ในมลรัฐ Minnesota ประเทศสหรัฐอเมริกามีพื้นที่ปนเปื้อน Cd, Zn และ Pb Dr. Rufus Chaney และคณะจาก USDA และUniversity of Maryland ได้ทดลองปลูกต้น *Thlaspi caerulescens* ในพื้นที่นี้ พบว่าพืชสามารถสะสมสังกะสีได้ถึง 30,000 มก/กก ในส่วนต้น โดยที่พืชไม่แสดงอาการเป็นพิษเลย เพราะพืชทั่วไปจะแสดงอาการเป็นพิษ เมื่อมีสังกะสีประมาณ 500 มก/กก ในดิน

เทคโนโลยีการบำบัดแคดเมียมโดยพืชและจุลินทรีย์ (Remediation of cadmium by plants and microorganisms)

สำหรับเทคโนโลยีการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมเป็นแนวทางหนึ่งในนำมาใช้ เพื่อบำบัดแคดเมียมซึ่งมีการใช้วิธีการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ โดยเฉพาะวิธีทางชีวภาพ ได้รับความนิยมและมีการพัฒนาขึ้นตามลำดับ ซึ่งการใช้วิธีทางชีวภาพจะรวมทั้งการใช้จุลินทรีย์และการใช้พืชในการบำบัดสารพิษจากสิ่งแวดล้อม ทั้งในดิน น้ำและอากาศ (Vidali, 2001) นับเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้กระบวนการทางธรรมชาติที่มีอยู่ในการช่วยบำบัดสารพิษหรือสารเคมีต่างๆ ที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำได้ ไม่ว่าสารนั้นจะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ ซึ่งรวมทั้งโลหะหนัก เนื่องจากพืชที่ขึ้นอยู่ตามธรรมชาติหลากหลาย

ชนิดมีกลไกในการบำบัดสารพิษ โดยเกิดจากการทำงานร่วมกันของพืชและจุลินทรีย์ที่อยู่ในบริเวณนั้น (Horne A.J., 2000) มีงานวิจัยจำนวนมากรายงานว่า พืชสามารถดูดซับโลหะหนักชนิดต่างๆ จากดินหรือน้ำและสะสมโลหะหนักไว้ในเซลล์ได้ หรือ Phytoextraction เช่น Cd, Cr, Pb, Co, Ag, Se and Hg (Baker and Brooks, 1989; Raskin et al., 1994). แต่โลหะหนักอาจยึดเกาะติดกับอนุภาคของดินตะกอนอย่างแน่นหนา เนื่องจากมีการแลกเปลี่ยนประจุของดินตะกอนกับโลหะหนัก ทำให้พืชไม่สามารถดูดซับโลหะหนักเข้ามาในเซลล์ได้ จึงต้องมีการส่งเสริมประสิทธิภาพของพืชในการนำโลหะหนักเข้าสู่เซลล์ การใช้วิธีการทางเคมี สามารถช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพของกระบวนการ Bioremediation โดยการเติมสารที่มีคุณสมบัติเป็น Chelating agent มีรายงานว่าการเติม Chelating agent ลงไปในดินช่วยเพิ่มการเคลื่อนที่ของโลหะ Pb, Cd, Cu, Ni และ Zn จากดินเข้าสู่พืช (Indian mustard plants) มากขึ้น (Blaylock et al., 1997) Raskin และคณะ(1997) พบว่าการเติม Ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) ลงไปในดิน ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของพืชในการดูดซึม Cd, Cu, Ni, Pb และ Zn เข้าสู่เซลล์

ดังนั้นการใช้จุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการสร้าง Exopolymers ช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนักในพื้นที่ปนเปื้อน เนื่องจากเป็นสารที่ช่วยในการดึงโลหะหนักที่ยึดติดแน่นกับอนุภาคดิน (Metal desorption) ทำให้โลหะหนักถูกปลดปล่อยออกมา (Metal mobility) (Jensen-Spaulding et al., 2004) และช่วยให้พืชหรือจุลินทรีย์สามารถดูดซึมโลหะเข้าสู่เซลล์ได้ดีขึ้น จากการศึกษาของ Iyer และคณะ (2005) รายงานว่า *E. cloaceae* สามารถสร้าง Exopolymer ที่มีคุณสมบัติเป็น Chelator และมีประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียม ทองแดง และโคบอลท์ได้ถึง 65, 20 และ 8% ตามลำดับ แต่ ESP ไม่สามารถตรึงปรอทได้ นอกจากนี้การสร้าง Exopolymer ยังช่วยให้จุลินทรีย์มีความสามารถในการต้านทานต่อความเป็นพิษของโลหะหนักหลายชนิด เนื่องจาก Exopolymer มีประจุลบ จึงประสิทธิภาพในการจับโลหะที่มีประจุบวก เพื่อตรึงโลหะไม่ให้เข้าสู่เซลล์ (Roane, 1999) Singh และ Cameotra (2004) รายงานว่า Exopolymers และ Biosurfactants ที่สร้างจากจุลินทรีย์สามารถช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของพืชและจุลินทรีย์ในการบำบัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในพื้นที่ได้

จากความสามารถของจุลินทรีย์ที่สามารถดึงโลหะหนักที่ปนเปื้อนออกจากอนุภาคดิน (Metal mobilization) ทำให้พืชสามารถดูดซับโลหะหนักได้มากขึ้น ทำให้มีการนำจุลินทรีย์บางกลุ่มมาใช้ร่วมกับพืชในกระบวนการ Phytoremediation ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดหรือฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนด้วยกระบวนการทางชีวภาพให้ดียิ่งขึ้น โดยเฉพาะการใช้จุลินทรีย์กลุ่มที่ช่วยในการส่งเสริมการเจริญของพืช (Plant growth-promoting microorganisms) ซึ่งมีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้แบคทีเรียมาช่วยส่งเสริมการเจริญของพืชหรือเรียกว่า Plant growth-promoting bacteria (PGPB) โดยกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีการศึกษากันมากคือ กลุ่มแบคทีเรียที่อาศัยบริเวณรากพืช หรือเรียกว่า Plant growth-promoting rhizabacteria (PGPR) ซึ่งแบคทีเรีย PGPR นี้อาศัยอยู่บริเวณผิวรากและอาจเกาะแน่นกับช่องว่างระหว่างรากพืชกับดิน หรือแบคทีเรีย PGPR บางกลุ่มสามารถแทรกเข้าไปเจริญในเซลล์รากพืชได้ จนกลายเป็น Endophytic bacteria (Compant et al., 2005) ตัวอย่างของแบคทีเรีย PGPR ได้แก่ *Agrobacterium*,

Alcaligenes (*Ralstonia*), *Arthrobacter*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Burkholderia Serratia*, *Pseudomonas* และ *Rhizobium* เป็นต้น สำหรับความสำคัญของแบคทีเรียกลุ่ม PGPR ในกระบวนการ Phytoremediation เกี่ยวข้องกับการเพิ่มอัตราในการสะสมโลหะหนักของพืชและเพิ่มชีวมวลของพืช หรือช่วงเร่งการเจริญเติบโตของพืช (Lebeau et al. 2008)

นอกจากนี้ แบคทีเรีย PGPR บางกลุ่ม ยังสามารถช่วยป้องกันพืชจากความเป็นพิษของโลหะหนัก โดยในสภาวะที่มีโลหะหนักในปริมาณสูง พืชส่วนใหญ่รวมทั้งพืชที่เป็น Hyperaccumulator จะเกิดความเครียด จึงทำให้มีการเจริญเติบโตช้า และส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักออกจากพื้นที่ปนเปื้อน ซึ่งในสภาวะดังกล่าวพืชจะมีการสร้างสาร Ethylene ขึ้นมาปริมาณมากเกินความจำเป็น ถึงแม้ว่าสาร Ethylene จัดเป็น Gaseous phytohormone ที่จำเป็นในช่วงเริ่มต้นในการงอกของพืช แต่ถ้ามีสาร Ethylene มากเกินไปในบริเวณรากพืช จะมีผลไปยับยั้งการเจริญขยายขนาดของรากพืช (Root elongation) โดยกลุ่มแบคทีเรีย PGPR บางชนิดสามารถสร้างเอนไซม์ 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) deaminase ซึ่งเป็นเอนไซม์นี้ไปทำให้ให้เกิดปฏิกิริยา Deamination โดยไปไฮโดรไลซ์กับสาร ACC ที่เป็นสารตั้งต้น (Immediate precursor) ในการสร้างสาร Ethylene ไปเป็นสาร α–ketobutyrate และแอมโมเนีย ทำให้ปริมาณสาร Ethylene ที่สร้างจากพืชลดลง และมีผลส่งเสริมให้รากพืชเจริญยาวขึ้น และทำให้พืชเจริญเติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมที่มีโลหะหนักปริมาณสูง (Glick, 2003; Penrose and Glick, 2003) ตัวอย่างเช่น *Kluyvera ascorbata* SUD165 จัดเป็นแบคทีเรียในกลุ่ม PGPR ที่สามารถสร้าง ACC deaminase ช่วยป้องกันความเป็นพิษของนิคเกิ้ลต่อต้น Canola และมะเขือเทศ และ *K. ascorbata* SUD165 ยังผลิตสาร Siderphores ที่ช่วยในการเพิ่มอัตราการดูดซับนิคเกิ้ลของพืชอีกด้วย (Burd et al., 1998)

แบคทีเรีย PGPR บางชนิดยังสามารถช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชในทางอื่นๆ ได้อีก เช่น การช่วยเพิ่มธาตุอาหารที่จำเป็นแก่พืช การสร้างฮอร์โมนการเจริญของพืช (Plant growth hormones) รวมทั้งช่วยในการลดการเกิดโรคพืชหรือป้องกันโรคพืชที่เกิดจากจุลินทรีย์ก่อโรค (Plant pathogens) ดังนั้น จึงมีการเติมจุลินทรีย์ ลงไปในดินที่ปลูกพืช (Soil bioaugmentation) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดิน อย่างไรก็ตาม ในการนำแบคทีเรีย PGPR ไปใช้ร่วมกับพืชในการส่งเสริมกระบวนการ Phytoremediation ของพืชในพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียม แบคทีเรีย PGPR เหล่านี้ต้องมีคุณสมบัติในการต้านทานต่อความเป็นพิษของแคดเมียมได้ดี จึงจะสามารถรอดชีวิตและเจริญได้ในสภาพแวดล้อมที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก

นอกจากนี้การใช้พืชน้ำหรือพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำในการบำบัดสารปนเปื้อนในแหล่งน้ำ รวมทั้งตะกอนดิน ซึ่งเป็นการอาศัยกระบวนการทางธรรมชาติของพืช สภาพแวดล้อม และจุลินทรีย์บริเวณนั้น นับเป็นเทคโนโลยีทางเลือกชนิดหนึ่งในการฟื้นฟูสภาพแหล่งน้ำโดยไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม และใช้งบประมาณในการลงทุนน้อย มีรายงานการวิจัยพบว่าพืชน้ำและพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำ เช่น หญ้าแฝก ธูปฤาษี กก ผักตบชวา ฯลฯ สามารถดูดซับโลหะหนักได้ โดยผักตบชวาสามารถดูดซับ ทองแดง ตะกั่ว

แคดเมียม นิเกิล และสังกะสี ได้ ซึ่งโลหะหนักเหล่านี้จะสะสมอยู่ที่ส่วนรากมากกว่าส่วนเหนือราก 3-15 เท่า และปริมาณการสะสม ทองแดง > สังกะสี > นิเกิล > ตะกั่ว > แคดเมียม ตามลำดับ (Shao Weiliao and Wen-lian Chang, 2003) การใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบชนิดน้ำไหลใต้ผิวชั้นดินในการบำบัดซิลิเนียม พบว่าพืชจำพวกอ้อ *Phragmites australis* และธูปฤาษี *Typha latifolia* สามารถสะสมซิลีเนียมได้ โดย *Typha latifoli* สะสมซิลิเนียมไว้ที่ส่วนรากมากกว่า ขณะที่ *Phragmites australis* สามารถสะสมซิลิเนียมไว้ที่ส่วนใบมากกว่า (Azaizeh et al, 2006)

เทคโนโลยีทางเลือกอีกชนิดหนึ่งที่ได้รับความนิยมและมีงานค้นคว้าวิจัยกันอย่างกว้างขวาง คือ การใช้วัสดุชีวมวลในการดูดซับสารปนเปื้อน โดยเฉพาะโลหะหนักที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม วัสดุชีวมวลอาจได้มาจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร กระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม และจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ จากการศึกษาของ Matheickal and Yu , 1999 พบว่า *Dusvillaea potatorum* and *Ecklonia radiate* สามารถดูดซับตะกั่วและทองแดงจากน้ำเสียได้ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดถึง 90 %นอกจากนี้ยังพบด้วยว่าการเติมสารคีเลตเตอร์ ช่วยทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักดังกล่าวได้ดีขึ้น วัสดุอื่นๆ เช่น แกลบ เปลือกมะพร้าว ส่วนต่างๆของพืชผัก ผลไม้ สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักในสภาพแวดล้อมได้ ซึ่งมีรายงานว่าส่วนใบในรูปแบบที่เป็นผงของต้น poplar มีประสิทธิภาพในการดูดซับ ยูเรเนียมในสารละลายได้ 2.3 มิลลิกรัมต่อกรัมและส่วนที่เป็นก้านสามารถดูดซับตะกั่วและแคดเมียมได้ 1.7 และ 2.1 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (Al-Masri et al ,2009) ซึ่งการศึกษาการใช้วัสดุชีวมวลในการดูดซับโลหะหนักส่วนใหญ่ จะเป็นการศึกษาการปนเปื้อนที่อยู่ในรูปของของเหลวหรือสารละลาย แต่ในสภาพแวดล้อมจริงการปนเปื้อนของโลหะหนักสามารถพบได้ในส่วนของดินและตะกอนดินเช่นเดียวกัน ดังนั้นการนำคุณสมบัติที่มีความสามารถในการดูดซับของวัสดุชีวมวลมาศึกษาวิจัยเพิ่มเติม เพื่อนำผลที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการบำบัดโลหะหนักในดินและตะกอนดิน จึงเป็นเทคโนโลยีทางเลือกอีกวิธีหนึ่งที่ช่วยทำให้ลดการปนเปื้อนของแคดเมียมในพื้นที่ศึกษาได้

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่านอกจากการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินบริเวณพื้นที่ศึกษาแล้ว ยังพบว่ามีการปนเปื้อนของแคดเมียมในแหล่งน้ำอีกด้วย ซึ่งสิ่งมีชีวิตเช่น ปลา กุ้ง หอย หรือสัตว์น้ำชนิดอื่นๆสามารถรับเอาสารแคดเมียมเข้าสู่ตัวของสิ่งมีชีวิตเหล่านี้ได้ และเมื่อคนที่อาศัยอยู่ในชุมชนนำสัตว์ต่างๆ เหล่านี้ไปบริโภค ก็จะได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายได้เช่นกัน คณะผู้วิจัยจึงเห็นว่า หากมีวิธีการที่เหมาะสมที่สามารถทำให้ปริมาณแคดเมียมในดินและในแหล่งน้ำลดลง คนในชุมชนจะสามารถดำรงชีวิตและประกอบอาชีพได้ตามปกติและสามารถนำน้ำไปใช้ใน เพื่อการอุปโภคบริโภคได้อย่างปลอดภัย การใช้ระบบที่มีอยู่แล้วในทางธรรมชาติร่วมกับองค์ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์ในการใช้เทคโนโลยีฟื้นฟูสิ่งแวดล้อม นับเป็นวิธีที่เหมาะสมเนื่องจากไม่ต้องลงทุนสูงมาก การใช้พืชบำบัดแคดเมียมในดิน น้ำและตะกอนดินรวมทั้งวัสดุธรรมชาติมาใช้ในการบำบัดแคดเมียมและโลหะหนักชนิดอื่น จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ทางคณะผู้วิจัยเห็นว่า สามารถนำมาใช้เพื่อการฟื้นฟูดิน แหล่งน้ำ รวมทั้งตะกอนดินในพื้นที่ศึกษาให้ปลอดภัยจากการปนเปื้อนแคดเมียมได้

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อคัดเลือกพรรณพืชและทดสอบขีดความสามารถของพืช ในการสะสมและความทนทานต่อแคดเมียมโดยการปรับสภาพดินวิธีการต่างๆ (Soil amendment) ในเรือนควบคุมอุณหภูมิ

2. เพื่อคัดเลือกชนิดพืชที่ไม่ใช่พืชท้องถิ่น ที่สามารถใช้ในการบำบัดแคดเมียมในแหล่งน้ำและตะกอนดินในระดับห้องปฏิบัติการและเรือนทดลอง

3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ต้านทานแคดเมียมที่สร้าง Exopolymers ในการช่วยส่งเสริมพืชในการดูดซับแคดเมียมออกจากดินในระดับเรือนทดลอง

4. เพื่อศึกษาการบำบัดแคดเมียมโดยการใช้ชีวมวลเป็นวัสดุในการดูดซับ (Biosorption)

1.3 ขอบเขตการวิจัย

เทคโนโลยีการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยวิธีทางชีวภาพ เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยม และมีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย แต่ในประเทศไทยการนำหลักการที่มีอยู่นำไปสู่การปฏิบัติจริงยังค่อนข้างมีในวงที่จำกัด คณะผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นที่จะใช้พืช จุลินทรีย์ รวมทั้งวัสดุชีวมวลเป็นตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการนำหลักการทางชีวภาพมาใช้ในการฟื้นฟูดิน แหล่งน้ำและดินตะกอนในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่ตาว โดยมีเป้าหมายหลักคือเพื่อให้คนในชุมชนสามารถเรียนรู้และนำไปปรับใช้เพื่อการดำรงชีวิต ลดการปนเปื้อนของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม รวมทั้งลดปริมาณการได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกาย โดยเมื่อการวิจัยได้ผลการถ่ายทอดองค์ความรู้ในรูปแบบต่างๆ เช่น การจัดประชุมแบบมีส่วนร่วม การจัดทำสื่อสิ่งพิมพ์ การทำคู่มือหรือหนังสือ จะเป็นการวางแนวทางให้ประชาชนและผู้ที่เกี่ยวข้องได้ตระหนัก และมีส่วนร่วมในการแก้ไขปัญหาด้วยกัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ได้วิธีในการบำบัดแคดเมียมในพื้นที่ที่มีประสิทธิภาพ ลงทุนน้อย

2. พัฒนาศักยภาพของนักวิจัย นักศึกษาในการทำวิจัยด้าน Phytoremediation technology Bioremediation และ Biosorption Technology

3. พัฒนาเทคโนโลยีการบำบัดโลหะหนักโดยใช้พืช(Phytoremediation technology) เทคโนโลยีการฟื้นฟูโดยใช้จุลินทรีย์ การบำบัดโลหะหนักโดยใช้วัสดุชีวมวลเป็นตัวดูดซับ และสามารถถ่ายทอดเทคโนโลยีดังกล่าวให้แก่หน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้แก่ สำนักบริหารและฟื้นฟูสิ่งแวดล้อม กรมพัฒนาที่ดิน กรมควบคุมมลพิษ เป็นต้น

4. คนในชุมชนได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีการฟื้นฟู โดยวิธีทางชีวภาพในการกำจัดแคดเมียมออกจากสิ่งแวดล้อม และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับชุมชนของตนเองได้