# บทที่ 4
# สรุปผลและข้อเสนอแนะ

## 4.1 สรุปผลการศึกษาโครงการย่อยที่ 1

ในด้านการใช้เทคโนโลยีการฟื้นฟูจากการสำรวจชนิดพืชในพื้นที่ พบว่าพืชที่ขึ้นตามธรรมชาติในพื้นที่ที่ไม่ใช่เป็นพืชบริโภค และไม่ได้เป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ มีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมได้ค่อนข้างน้อย ทางคณะผู้วิจัย จึงได้คัดเลือกพันธุ์พืชชนิดอื่นที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ พืชที่เป็นไม้ประดับ รวมทั้งการนำจุลินทรีย์มาใช้ร่วมกับพืช เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในดิน น้ำและตะกอนดิน โดยการศึกษาวิจัยในปีที่ 2 เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการและเรือนทดลอง เพื่อนำผลไปสู่การประยุกต์ใช้ในภาคสนามในปีต่อไป ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

**การทดลองที่ 1 การคัดเลือกและขยายพันธุ์พืชในเรือนเพาะชำ**

คณะผู้วิจัยได้คัดเลือกพืชกลุ่มต่อไปนี้

1. กลุ่มพืชเศรษฐกิจขนาดเล็ก ได้แก่ พืชในวงศ์ Lamiaceae คือ โหระพา (Ocimum basilicum) และยี่หร่า (Ocimum gratissimum) พืชทั้งสองชนิดนี้มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ โดยเป็นแหล่งผลิตน้ำมันระเหย (essential oil) ที่นำไปใช้ในอุตสาหกรรม เครื่องสำอางได้
2. กลุ่มพืชเศรษฐกิจขนาดใหญ่ ได้แก่ อ้อย ข้าวโพด ที่สามารถนำไปผลิตเอทานอลได้
3. พืชตระกูลถั่ว ได้แก่ ถั่วเหลือง ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่ปลูกในบริเวณนี้อยู่แล้ว สามารถสกัดน้ำมันจากเมล็ดได้ และยังช่วยในการฟื้นฟูสภาพดินด้วย
4. กลุ่มพืชตระกูลหญ้า ได้แก่ หญ้าแฝก และหญ้าเลี้ยงสัตว์ สามารถใช้ปลูกในพื้นที่ เพื่อช่วยตรึงแคดเมียมและป้องกันการชะล้างแคดเมียมออกจากดิน
5. กลุ่มพืชประเภทไม้ยืนต้น ได้แก่ กระถินเทพา และยูคาลิปตัส สามารถใช้ปลูกเป็นพืชเศรษฐกิจ โดยนำเปลือกไม้มาทำเยื่อกระดาษ และยังใช้ในการฟื้นฟูบริเวณที่ปนเปื้อนแคดเมียมได้ (revegetation)

โดยได้นำพืชทั้ง 5 กลุ่มมาทำการขยายพันธุ์ในเรือนเพาะชำ จนมีขนาดเหมาะสมก่อนนำไปทำการทดลอง

**การทดลองที่ 2 การทดสอบประสิทธิภาพของพืชชนิดต่างๆ ในการลดการสะสมแคดเมียมโดยใช้สารตรึงโลหะหนัก (soil amendment)**

**การทดลองที่ 2.1 ประสิทธิภาพการตรึงแคดเมียมโดยใช้ปุ๋ยโซเดียมซิลิเคต (sodium silicate) และปุ๋ยขี้วัว (cow manure) ในต้นโหระพา**

ผลของการทดลอง แสดงว่าปุ๋ยซิลิเคตสามารถตรึงแคดเมียมไว้ในดินและในรากได้ ดังนั้น ต้นโหระพาจึงมีการสะสมแคดเมียมลดลง โดยเฉพาะในส่วนใบและลำต้น แม้ว่าปุ๋ยขี้วัวจะมีผลทำให้ต้นโหระพามีอัตราการเติบโตเพิ่มขึ้น แต่ก็ทำให้พืชมีการสะสมแคดเมียมในส่วนต้นมากขึ้น การวิจัยที่ควรจะต้องทำต่อไปคือ การปลูกต้นโหระพาในแปลงดินที่มีการปนเปื้อนแคดเมียม และวิเคราะห์อัตราการเติบโตและการกระจายของแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของพืช การเติมปุ๋ยซิลิเคตในดิน อาจทำให้ปริมาณแคดเมียมในส่วนที่กินได้ (เช่นใบ) ลดลง ซึ่งจะช่วยในการลดอัตราเสี่ยงของประชากรที่อาศัยอยู่ในบริเวณพื้นที่นั้น

**การทดลองที่ 2.2 การทดสอบประสิทธิภาพของสารตรึงโลหะหนักไฮดรอกซีอะพาไทต์และปุ๋ยขี้วัวในต้นยี่หร่า**

ผลการวิจัยนี้แสดงประสิทธิภาพของปุ๋ยขี้วัว และ HA ในการลดปริมาณ Cd และ Zn ที่สะสมอยู่ในส่วนใบของต้นยี่หร่าที่ทดลองปลูกในดินที่ปนเปื้อน Cd และ Zn การวิจัยขั้นต่อไป คือ การทดลองปลูกพืชในแปลงดินที่ปนเปื้อน Cd และ Zn โดยเติม HA หรือปุ๋ยขี้วัว เนื่องจากต้นยี่หร่าเป็นพืชที่ใช้เมล็ดเป็นเครื่องเทศ และผลิตน้ำมันระเหย จึงควรมีการวิเคราะห์ปริมาณ Cd และ Zn ในเมล็ดและในน้ำมันจากใบด้วย

**การทดลองที่ 2.3 การทดสอบประสิทธิภาพของสารตรึงโลหะหนัก (ไดแคลเซียมฟอสเฟต และซีโอไลต์) ในการลดการสะสม Cd ในกลุ่มพืชเศรษฐกิจ**

ผลการวิจัยนี้ แสดงประสิทธิภาพของสารตรึงโลหะหนัก ไดแคลเซียมฟอสเฟตและซีโอไลต์ในการลดพิษของ Cd หรือเพิ่มธาตุอาหารในดิน ทำให้พืชมีการเติบโตดีขึ้น ภายใน 1 เดือน

**การทดลองที่ 3 การทดลองบำบัดแคดเมียมในน้ำและตะกอนดิน โดยใช้พืชน้ำและพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำที่ไม่ใช่พืชท้องถิ่นในระดับห้องปฏิบัติการและเรือนทดลอง**

1. สาหร่ายหางกระรอก สามารถลดปริมาณแคดเมียมในน้ำได้มากที่สุดถึง 71.43% เมื่อเปรียบเทียบกับพืชอีก 2 ชนิด ขณะที่ผักตบชวาและจอกหูหนูสามารถลดปริมาณแคดเมียมในน้ำได้ 33.77% และ 19.48% ตามลำดับ และเมื่อวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของพืชแต่ละชนิด พบว่าส่วนรากของจอกหูหนูและผักตบชวา จะสะสมแคดเมียมได้มากกว่าส่วนต้นและใบ แต่ในสาหร่ายหาง

กระรอกจะพบที่ส่วนใบกับลำต้นเท่านั้น โดยจากการวิเคราะห์ ไม่พบแคดเมียมสะสมในส่วนรากของสาหร่ายหางกระรอกในทุกชุดการทดลอง

2. ปริมาณการสะสมแคดเมียมของพืชทั้ง 3 ชนิดต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ป๊อปปี้น้ำ สามารถสะสมแคดเมียมได้มากที่สุด รองลงมาได้แก่ อะเมซอนน้ำและต้นคล้าน้ำ โดยส่วนรากของป๊อปปี้น้ำสามารถสะสมแคดเมียมได้สูงสุด รองลงมาคือส่วนลำต้นและใบ ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกับ อะเมซอนน้ำที่แคดเมียมส่วนใหญ่จะสะสมอยู่ที่รากของอะเมซอน ส่วนต้นคล้าน้ำ ซึ่งมีความสามารถสะสมแคดเมียมได้น้อยที่สุด พบว่าแคดเมียมจะอยู่ที่รากเป็นส่วนใหญ่ ส่วนปริมาณแคดเมียมในลำต้นและใบไม่แตกต่างกัน

3. จากผลการศึกษาการบำบัดแคดเมียมในตะกอนดิน โดยใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบริเวณผิวหน้า พบว่าป๊อปปี้น้ำสามารถบำบัดแคดเมียมในตะกอนดินได้ โดยประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงเมื่อความเข้มข้นของปริมาณแคดเมียมในตะกอนดินสูงขึ้น กล่าวคือประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 85.67%, 63.51%, และ 25.40% เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมเท่ากับ 6.1, 15.35, และ 44.65 mg/kg ตามลำดับ

**การทดลองที่ 4 การศึกษาประสิทธิภาพของการใช้จุลินทรีย์ร่วมกับพืช ในกระบวนการบำบัดแคดเมียม**

1. แบคทีเรียต้านทานแคดเมียมที่สร้าง Exopolymers ได้สูงที่คัดเลือกมาใช้ในการส่งเสริมประสิทธิภาพกระบวนการ Phytoextraction ดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมคือ *Ralstonia* sp. TAK1 และ *Arthrobacter* sp. TM6

2. *Ralstonia* sp. TAK1 และ *Arthrobacter* sp. TM6 สร้างสาร IAA ได้ในปริมาณ 71.84 และ 12.96 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ *Ralstonia* sp. TAK1 และ *Arthrobacter* sp. TM6 ยังสามารถส่งเสริมการเคลื่อนที่หรือการละลายของแคดเมียมออกมาจากดินได้ และเซลล์ของแบคทีเรียทั้งสองชนิดนี้ยังจับกับแคดเมียมได้

3. ต้นยี่หร่าและหญ้าแฝกสามารถเจริญได้ดีในดินที่มีการเติมแคดเมียมในความเข้มข้น 26.8 ± 0.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยพืชทั้งสองชนิดมีอัตราการรอดชีวิต 100% และยี่หร่ามีน้ำหนักแห้งไม่แตกต่างจากต้นที่ปลูกในดินที่ไม่มีแคดเมียม แต่น้ำหนักแห้งของหญ้าแฝกที่ปลูกในดินที่มีแคดเมียม 26.8 ± 0.7 น้อยกว่าหญ้าแฝกที่ปลูกในดินที่ไม่เติมแคดเมียม แสดงว่าแคดเมียมในดินมีผลต่อการเจริญของหญ้าแฝกมากกว่ายี่หร่า ส่วนน้ำหนักแห้งของยี่หร่าที่ปลูกในดินที่มีแคดเมียม 102.5 ± 3.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้อยกว่ายี่หร่าที่ปลูกในดินที่ไม่มีแคดเมียม

4. ต้นยี่หร่าและหญ้าแฝกสามารถสะสมแคดเมียมในส่วนรากได้มากกว่าส่วนเหนือดิน (ต้นและใบ) และ *Arthrobacter* sp. TM6 สามารถช่วยส่งเสริมให้ยี่หร่ามีการสะสมแคดเมียมได้ดีกว่าชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมแบคทีเรีย ส่วนการสะสมแคดเมียมของหญ้าแฝกในชุดการทดลองที่เติม *Ralstonia* sp. TAK1 มีค่าใกล้เคียงกับชุดที่ไม่มีการเติมแบคทีเรีย

5. การเติม EDTA ไม่มีผลทำให้หญ้าแฝกสะสมแคดเมียมได้ดีขึ้น แต่การเติม EDTA หรือการเติม *Arthrobacter* sp. TM6 ช่วยส่งเสริมการเคลื่อนที่ของแคดเมียมจากรากไปส่วนเหนือดินของต้นยี่หร่า และยี่หร่ามีความสามารถในการเคลื่อนย้ายแคดเมียมจากรากไปสู่ส่วนเหนือดินได้ดีกว่าหญ้าแฝก

6. หญ้าแฝกสามารถเจริญได้ดีในดินปนเปื้อนแคดเมียมที่เก็บจากบริเวณริมห้วยแม่ตาวได้ดีกว่ายี่หร่า และหญ้าแฝกมีการเจริญได้ดีในชุดการทดลองที่มีการเติม *Arthrobacter* sp. TM6 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมแบคทีเรีย

**การทดลองที่ 5 การบำบัดแคดเมียมโดยการใช้ชีวมวลเป็นวัสดุในการดูดซับ (Biosobents)**

1. จากผลการศึกษาการดูดซับแคดเมียมในน้ำ โดยใช้วัสดุชีวมวลชนิดต่างๆ พบว่า เซลแห้งของลำต้นสาหร่ายหางกระรอกมีประสิทธิภาพการดูดซับดีที่สุด (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

2. จากผลการศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์สาหร่ายในการดูดซับแคดเมียมในตะกอนดิน พบว่าเซลล์แห้งของสาหร่ายมีประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียม ให้อยู่กับอนุภาคตะกอนดินได้ค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม

## 4.2 ข้อเสนอแนะโครงการย่อยที่ 1

**การทดลองที่ 1**

ควรศึกษากลุ่มพืชเศรษฐกิจที่มิได้นำไปบริโภคเพิ่มเติม ได้แก่ พืชที่ผลิตน้ำมัน หรือผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น ทานตะวัน ปาล์มน้ำมัน ยางพารา เป็นต้น

**การทดลองที่ 2**

1. ควรศึกษาการปลูกพืชเศรษฐกิจกลุ่มต่างๆ ในแปลงทดลองที่ดินมีการปนเปื้อน Cd เพื่อศึกษาอัตราการรอด การเติบโต และการสะสม Cd

2. ควรปลูกพืชในแปลงจนครบวงจร เพื่อวิเคราะห์ส่วนของพืชที่นำไปใช้ด้วย เช่น เมล็ดน้ำมัน น้ำตาล เป็นต้น

3. ควรปรับสภาพดินในพื้นที่ เพื่อให้เหมาะกับเทคโนโลยีการบำบัดที่นำมาใช้ เช่น ถ้าต้องการให้พืชดูดซับ Cd น้อยลง ก็ปรับดินให้เป็นด่างมากขึ้น หรือเติมสารตรึงโลหะหนัก เป็นต้น

**การทดลองที่ 3**

1. ควรมีการศึกษาพืชน้ำชนิดอื่นๆเพิ่มเติม โดยไม่ใช่พืชที่เป็นพืชในห่วงโซ่อาหารและสามารถเป็นประโยชน์ในทางเศรษฐกิจให้กับชุมชนได้ เช่น พืชน้ำที่เป็นพืชไม้ประดับ หรือพืชที่สามารถนำมาผลิตพลังงานได้

2. ควรมีการศึกษาการใช้พืชน้ำในแปลงสาธิตในพื้นที่จริงเพื่อดูความเป็นไปได้ในการกำจัดแคดเมียม

3. ควรศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของพืชในการบำบัดแคดเมียมในน้ำและตะกอนดิน

**การทดลองที่ 4**

1. ควรศึกษาอัตราการรอดชีวิตของแบคทีเรียต้านทานแคดเมียมที่สร้าง Exopolymers ที่นำมาใช้ในการส่งเสริมประสิทธิภาพกระบวนการ Phytoextraction ในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม

2. ควรศึกษาปริมาณและสัดส่วนของแบคทีเรียต้านทานแคดเมียมที่เติมลงไปในดินที่เหมาะสม เนื่องจากถ้าปริมาณแบคทีเรียน้อยเกินไปหรือแบคทีเรียรอดชีวิตอยู่ได้น้อย จะทำให้ไม่เห็นผลการส่งเสริมการดูดซับและการสะสมแคดเมียมของพืช รวมทั้งการส่งเสริมเจริญของพืชด้วย

3. ควรปลูกยี่หร่าในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม จนกระทั่งสามารถเก็บเกี่ยวเมล็ดยี่หร่ามาสกัดน้ำมันหอมระเหยและนำน้ำมันหอมระเหยมาตรวจวัดปริมาณของแคดเมียมที่อาจปนเปื้อนในน้ำมันหอมระเหย

4. ควรนำยี่หร่าและหญ้าแฝกไปปลูกในแปลงทดลองในพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียม และศึกษาอัตราการสะสมแคดเมียมของพืชทั้งสองชนิดร่วมกับการใช้ แบคทีเรียต้านทานแคดเมียมที่สร้าง Exopolymers เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินของพืช

**การทดลองที่ 5**

1. ควรมีการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของวัสดุชีวมวลอื่นๆ ที่เป็นผลผลิตหรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีในพื้นที่

2. ควรพัฒนารูปแบบของวัสดุชีวมวลให้สามารถประยุกต์ใช้งานในพื้นที่ได้จริง