บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การเจริญเติบโตของราชาวดีที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียม สังกะสี และตะกั่ว

ราชาวดีที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการเจริญเติบโต (น้ำหนักสด) ไม่แตกต่างจากพืชที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งไม่เติมแคดเมียม ($p > 0.05$) และพืชไม่แสดงอาการพิษใดๆ

ในส่วนของการศึกษาโลหะหนักสังกะสีใช้สารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมสังกะสีที่ระดับความเข้มข้น 2.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการศึกษาต่อไป เนื่องจากพืชมีการเจริญเติบโตได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับการเพาะเลี้ยงพืชในสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 5.00 และ 7.50 มิลลิกรัมต่อลิตร

สุดท้ายการศึกษาโลหะหนักตะกั่วจะใช้สารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมตะกั่วที่ระดับความเข้มข้น 5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการศึกษาต่อไป เนื่องจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ามีการเจริญเติบโตไม่ต่างกับพืชที่ระดับตะกั่ว 2.50 มิลลิกรัมต่อลิตร และตัวเลขก็ใกล้เคียงกันมากๆ

5.1.2 ผลของฮอร์โมนพืช [กรดอินโดล-3-อะซีติก (Indole-3-acetic acid) หรือ IAA, Naphthalene acetic acid หรือ NAA, และ Gibberellic acid (GA_3)] ต่อการเจริญเติบโตและการสะสมโลหะหนักของราชาวดีบ้าน (*Buddleja paniculata*) ที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีโลหะหนัก (แคดเมียม, สังกะสี, และตะกั่ว)

5.1.2.1 กรดอินโดล-3-อะซีติก (Indole-3-acetic acid) หรือ IAA

ในส่วนของการเจริญเติบโตพบว่า พืชที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียม (0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร), สังกะสี (2.50 มิลลิกรัมต่อลิตร), และตะกั่ว (5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร) ร่วมกับ ฮอร์โมน IAA ที่ระดับความเข้มข้น 10^{-9} M มีการเจริญเติบโตได้ดี

การสะสมโลหะหนักของพืชพบในรากเป็นส่วนใหญ่ เมื่อความเข้มข้นของระดับฮอร์โมนลดลง การสะสมโลหะหนักในพืชก็มีแนวโน้มลดลงด้วย ทั้งนี้พบว่าพืชสามารถสะสมตะกั่วได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสังกะสีและแคดเมียมตามลำดับ

5.1.2.2 Naphthalene acetic acid หรือ NAA

ในส่วนของการเจริญเติบโตพบว่า พืชที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียม (0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร), สังกะสี (2.50 มิลลิกรัมต่อลิตร), และตะกั่ว (5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร) ร่วมกับ ฮอร์โมน NAA ที่ระดับความเข้มข้น 10^{-9} M มีการเจริญเติบโตได้ดี

การสะสมโลหะหนักของพืชพบในรากเป็นส่วนใหญ่ พืชที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมสังกะสี (2.50 มิลลิกรัมต่อลิตร) และตะกั่ว (5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร) ร่วมกับ

ฮอร์โมน NAA ที่ระดับความเข้มข้น 10^{-9} M มีการสะสมโลหะในส่วนยอด (ลำต้นและใบ) และส่วนราก ได้ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับพืชที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมโลหะเดียวกันร่วมกับฮอร์โมน NAA ที่ระดับความเข้มข้นอื่น ทั้งนี้พบว่าพืชสามารถสะสมตะกั่วได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสังกะสีและแคดเมียมตามลำดับ

5.1.2.3 Gibberellic acid (GA_3)

ในส่วนของการเจริญเติบโตพบว่า พืชที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียม (0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร), สังกะสี (2.50 มิลลิกรัมต่อลิตร), และตะกั่ว (5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร) ร่วมกับ ฮอร์โมน GA_3 ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ พืชมีการเจริญเติบโตไม่แตกต่างจากพืชที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมโลหะต่างๆ โดยไม่เติมฮอร์โมนพืช GA_3

การสะสมโลหะหนักของพืชพบในรากเป็นส่วนใหญ่ เมื่อความเข้มข้นของระดับฮอร์โมนลดลง การสะสมโลหะหนักในพืชก็มีแนวโน้มลดลงด้วย ทั้งนี้พบว่าพืชสามารถสะสมตะกั่วได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสังกะสีและแคดเมียมตามลำดับ

5.1.3 ผลของสารคีเลต (EDTA, EDDS และ Citric acid) ต่อการเจริญเติบโตและการสะสมโลหะหนักของราชาวดีบ้าน (*Buddleja paniculata*) ที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีโลหะหนัก (แคดเมียม, สังกะสี, และตะกั่ว)

5.1.3.1 EDTA

ในส่วนของการเจริญเติบโตพบว่า พืชที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียม (0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร), สังกะสี (2.50 มิลลิกรัมต่อลิตร), และตะกั่ว (5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร) ร่วมกับ EDTA ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ นั้น ไม่มีผลกับการเจริญเติบโตของพืช โดยพืชสามารถเจริญเติบโตได้ไม่แตกต่างจากพืชที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมโลหะต่างๆ โดยไม่เติม EDTA

การสะสมโลหะหนักของพืชที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียม (0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร) และตะกั่ว (5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร) ร่วมกับ EDTA พบว่ามีการสะสมเพิ่มขึ้นในส่วนยอด (ลำต้นและใบ) เมื่อเทียบกับพืชที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมโลหะชนิดเดียวกันโดยไม่เติม EDTA สำหรับการสะสมของโลหะหนักในส่วนรากพบว่า พืชที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียม (0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร), สังกะสี (2.50 มิลลิกรัมต่อลิตร), และตะกั่ว (5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร) ร่วมกับ EDTA จะมีการสะสมโลหะหนักในรากลดลงเมื่อเทียบกับพืชที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมโลหะต่างๆ โดยไม่เติม EDTA ทั้งนี้เมื่อความเข้มข้นของ EDTA เพิ่มขึ้นการสะสมในรากก็จะยิ่งลดลง และยังพบว่าพืชสามารถสะสมตะกั่วได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสังกะสีและแคดเมียมตามลำดับ

5.1.3.2 EDDS

ในส่วนของการเจริญเติบโตพบว่า พืชที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียม (0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร), สังกะสี (2.50 มิลลิกรัมต่อลิตร), และตะกั่ว (5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร) ร่วมกับ EDDS ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ นั้น ไม่มีผลกับการเจริญเติบโตของพืช โดยพืชสามารถเจริญเติบโตได้ไม่แตกต่างจากพืชที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมโลหะต่างๆ โดยไม่เติม EDDS

การสะสมโลหะหนักของพืชที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียม (0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร), สังกะสี (2.50 มิลลิกรัมต่อลิตร), และตะกั่ว (5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร) ร่วมกับ EDDS ที่ระดับความเข้มข้น 0.001 กรัมต่อลิตร พบว่ามีการสะสมเพิ่มขึ้นในส่วนยอด (ลำต้นและใบ) เมื่อเทียบกับพืชที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมโลหะชนิดเดียวกันโดยไม่เติม EDDS สำหรับการสะสมของโลหะหนักในส่วนรากพบว่า พืชที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียม (0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร), สังกะสี (2.50 มิลลิกรัมต่อลิตร), และตะกั่ว (5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร) ร่วมกับ EDDS จะมีการสะสมโลหะหนักในรากลดลงเมื่อเทียบกับพืชที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมโลหะต่างๆ โดยไม่เติม EDDS ทั้งนี้มีแนวโน้มว่าเมื่อความเข้มข้นของ EDDS เพิ่มขึ้นการสะสมในรากก็จะยิ่งลดลง และยังพบว่าพืชสามารถสะสมตะกั่วได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสังกะสีและแคดเมียมตามลำดับ

5.1.3.3 Citric acid

ในส่วนของการเจริญเติบโตพบว่า พืชที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียม (0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร), สังกะสี (2.50 มิลลิกรัมต่อลิตร), และตะกั่ว (5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร) ร่วมกับ Citric acid ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ นั้น ไม่มีผลกับการเจริญเติบโตของพืช โดยพืชสามารถเจริญเติบโตได้ไม่แตกต่างจากพืชที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมโลหะต่างๆ โดยไม่เติม Citric acid

การสะสมโลหะหนักของพืชที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียม (0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร), สังกะสี (2.50 มิลลิกรัมต่อลิตร), และตะกั่ว (5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร) ร่วมกับ Citric acid ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ พบว่ามีการสะสมโลหะหนักลดลงทั้งในส่วนยอด (ลำต้นและใบ) และส่วนราก เมื่อเทียบกับพืชที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมโลหะต่างๆ โดยไม่เติม Citric acid และยังพบว่าพืชสามารถสะสมตะกั่วได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสังกะสีและแคดเมียมตามลำดับ

5.1.4 ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างฮอร์โมนพืชและสารคีเลต ต่อการเจริญเติบโตและการสะสมโลหะหนักของราชาวดีบ้าน (*Buddleja paniculata*) ที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีโลหะหนัก (แคดเมียม, สังกะสี, และตะกั่ว)

ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างฮอร์โมนพืชและสารคีเลต ต่อการเจริญเติบโตและการสะสมโลหะหนักของราชาวดีบ้าน (*Buddleja paniculata*) ที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีโลหะหนัก (แคดเมียม, สังกะสี, และตะกั่ว) และสารคีเลตชนิดต่างๆ ร่วมกับฮอร์โมนพืชหลายชนิด ในภาพรวมพบว่าการใช้ฮอร์โมนพืช GA_3 ร่วมกับสารคีเลต Citric acid พืชมีการเจริญเติบโตได้ดี

และมีการสะสมโลหะหนักดีกว่าการจับคู่ฮอร์โมนและสารคีเลตอื่นๆ ภาพรวมพบว่าพืชสามารถสะสมตะกั่วได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสังกะสีและแคดเมียมตามลำดับ

5.1.4.1 ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างฮอร์โมนพืชและสารคีเลต ต่อการเจริญเติบโตและการสะสมโลหะหนักของราชาวดีบ้าน (*Buddleja paniculata*) ที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีโลหะหนักแคดเมียม

ในภาพรวมพบว่าราชาวดีที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยด้วยสารละลายแร่ธาตุ ซึ่งเติมแคดเมียม 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารคีเลต Citric acid ร่วมกับฮอร์โมนพืชชนิดต่างๆ นั้นมีการเจริญเติบโตได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพืชกลุ่มที่เพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสารคีเลตชนิดอื่นร่วมกับฮอร์พืชชนิดต่างๆ

ภาพรวมการสะสมของแคดเมียมในส่วนยอด (ลำต้นและใบ) และส่วนรากมีการสะสมดีที่สุดในพืชกลุ่มที่เพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสารคีเลต Citric acid ร่วมกับฮอร์โมนพืชชนิดต่างๆ ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับพืชกลุ่มที่เพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสารคีเลตต่างชนิดกันในขณะที่ฮอร์โมนพืชที่ใช้เป็นชนิดเดียวกัน

5.1.4.2 ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างฮอร์โมนพืชและสารคีเลต ต่อการเจริญเติบโตและการสะสมโลหะหนักของราชาวดีบ้าน (*Buddleja paniculata*) ที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีโลหะหนักสังกะสี

ในภาพรวมพบว่าราชาวดีที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมสังกะสี 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารคีเลตชนิดต่างๆ ร่วมกับฮอร์โมนพืชชนิดต่างๆ นั้นมีการเจริญเติบโตไม่ต่างกัน เมื่อพิจารณาสารคีเลตต่างชนิดกันในขณะที่ฮอร์โมนพืชที่ใช้เป็นชนิดเดียวกัน

ภาพรวมการสะสมของสังกะสีในส่วนรากมีการสะสมดีที่สุดในพืชกลุ่มที่เพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมสังกะสีและสารคีเลต Citric acid ร่วมกับฮอร์โมนพืชชนิดต่างๆ ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับพืชกลุ่มที่เพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมสังกะสีและสารคีเลตชนิดอื่นร่วมกับฮอร์พืชชนิดต่างๆ ส่วนการสะสมของสังกะสีในส่วนยอดในพืชนั้น พืชที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมสังกะสีและสารคีเลต EDDS ร่วมกับฮอร์โมนพืช IAA และ สารคีเลต EDDS ร่วมกับฮอร์โมนพืช GA_3 มีการสะสมสังกะสีได้ดีที่สุด ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับพืชกลุ่มที่เพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมสังกะสีและสารคีเลตต่างชนิดกันในขณะที่ฮอร์โมนพืชที่ใช้เป็นชนิดเดียวกัน

5.1.4.3 ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างฮอร์โมนพืชและสารคีเลต ต่อการเจริญเติบโตและการสะสมโลหะหนักของราชาวดีบ้าน (*Buddleja paniculata*) ที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีโลหะหนักตะกั่ว

ภาพรวมพบว่าราชาวดีที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมตะกั่ว 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารคีเลต Citric acid ร่วมกับฮอร์โมนพืชชนิดต่างๆ นั้นมีการเจริญเติบโตได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพืชกลุ่มที่เพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมตะกั่วและสารคีเลตชนิดอื่นร่วมกับฮอร์พืชชนิดต่างๆ

การสะสมของตะกั่วในส่วนยอดในพืชนั้น พืชที่ถูกเพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมตะกั่วและสารคีเลต EDTA ร่วมกับฮอร์โมนพืชชนิดต่างๆ มีการสะสมตะกั่วได้ดีที่สุด ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับพืชกลุ่มที่เพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมตะกั่วและสารคีเลตต่างชนิดกันในขณะที่ฮอร์โมนพืชที่ใช้เป็นชนิดเดียวกัน ในส่วนการสะสมของตะกั่วในส่วนรากพบว่า พืชกลุ่มที่เพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมตะกั่วและสารคีเลต Citric acid ร่วมกับฮอร์โมนพืชชนิดต่างๆ มีการสะสมตะกั่วในรากได้ดีที่สุด ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับพืชกลุ่มที่เพาะเลี้ยงด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมตะกั่วและสารคีเลตต่างชนิดกันในขณะที่ฮอร์โมนพืชที่ใช้เป็นชนิดเดียวกัน

5.2 อภิปรายผล

ไฟโตเรมิดิเอชั่น (Phytoremediation) คือการใช้พืชดูดซับสารปนเปื้อน (โลหะหนัก) จากดิน น้ำ หรืออากาศ สารปนเปื้อนจะถูกสะสมไว้ในพืช การใช้พืชเพื่อบำบัดหรือฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักเป็นวิธีการที่ประหยัดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม พืชจะสามารถดูดซับโลหะหนักได้ในปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการ (Saxena et al., 1999)

(1) ความสามารถของพืชในการดูดซึมและสะสมโลหะหนัก พืชจะสะสมโลหะหนักในปริมาณสูงได้ต้องมีกลไกเพื่อลดความเป็นพิษของโลหะหนัก พืชบางชนิดมีกลไกลดความเป็นพิษที่ดีก็จะเจริญเติบโตดีและสะสมโลหะได้ปริมาณมาก

(2) ปริมาณโลหะหนักที่ละลายได้ในดิน หรือปริมาณโลหะหนักที่พืชสามารถดูดซับได้ (Bioavailability) ซึ่งถูกควบคุมด้วยปัจจัยต่างๆ เช่น ความเป็นกรดด่างของดิน (pH) ค่าการแลกเปลี่ยนไอออนของดิน (Cation exchange capacity: CEC) ลักษณะเนื้อดิน (Soil texture) ศักย์รีดอกซ์ (Redox potential) เป็นต้น ถ้าโลหะหนักในดินไม่อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดซับได้ ไฟโตเรมิดิเอชั่นก็จะไม่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากพืชไม่สามารถดูดซับโลหะหนักจากดินได้ แม้ว่าพืชจะมีความสามารถทนทานต่อโลหะหนักได้มากก็ตาม

แนวคิดของ Saxena (1999) ตรงกับงานวิจัยในครั้งนี้ ในการใช้ฮอร์โมนพืชร่วมกับสารคีเลตซึ่งฮอร์โมนพืชมีส่วนช่วยในการเจริญเติบโต ขณะเดียวกันสารคีเลตช่วยในเรื่องการเพิ่มการละลายของโลหะหนัก แคดเมียมและตะกั่วไม่ใช่ธาตุอาหารที่พืชต้องการ พืชที่ได้รับแคดเมียมจะเจริญเติบโตช้าเนื่องจากแคดเมียมก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสรีรวิทยาต่างๆ ของพืช และส่งผลต่อปฏิกริยาชีวเคมีต่างๆ ในเซลล์พืช นอกจากนั้นแคดเมียมยังทำให้โครงสร้างระดับเซลล์ของพืชเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง การหายใจ การสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ และการดูดซึมแร่ธาตุของพืช (Mendelssohn et al., 2001) ยับยั้งการเจริญเติบโตของรากและการแบ่งเซลล์ (Jiang et al., 2001: Liu et al, 2003) อาการทั่วไปของพืชที่ได้รับแคดเมียมปริมาณสูง ได้แก่ การเติบโตช้า แคระแกร็น ใบเล็กม้วน ใบเหลือง และมีจุดแดงหรือน้ำตาลบนขอบใบและเส้นใบ แคดเมียมอาจส่งผลต่อการงอกและพัฒนาการของเมล็ดอีกด้วย (Påhlsson, 1989; Shah&Dubey, 1997a; Shah et al., 2001; Fediuc & Erdei, 2002) ตะกั่วส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช เป็นพิษต่อการสังเคราะห์แสง (Skórzyñska-Polit และ Baszyñski, 1997), ทำลายคลอโรฟิลล์ (Stobart et al., 1985) และทำลายเอนไซม์ Antioxidase (Somashekaraiah et al., 1992) Pb^{2+} จะไปจับกับกรดนิวคลีอิคเป็นสาเหตุให้เส้นใยโครมาตินมารวมตัวกันและเกิดการหดตัว ไม่สามารถเกิดการจำลองตัว

และการถอดรหัสดีเอ็นเอ ในที่สุดเซลล์ไม่สามารถแบ่งตัวได้และจะมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช (Johnson, 1998) ส่วนสังกะสีแม้ว่าจะเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืช แต่พืชต้องได้รับในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อการเจริญเติบโต หากพืชได้รับสังกะสีมากเกินไปอาจจะยับยั้งการเจริญเติบโตของพืชได้ และพืชอาจแสดงอาการความเป็นพิษได้เช่นกัน พืชที่เจริญเติบโตบนดินที่มีสังกะสีปนเปื้อนปริมาณสูงมากอาจแสดงอาการความเป็นพิษได้ โดยทั่วไปอาการความเป็นพิษมักจะเหมือนกับอาการขาดธาตุ เช่น การเจริญเติบโตลดลง ใบเหลืองซีด การลดลงของคลอโรฟิลล์และอัตราการสังเคราะห์แสง ปริมาณสังกะสีที่มากเกินไปอาจไปจำกัดการขนส่งคาร์โบไฮเดรตผ่านโฟลเอมไปยังเนื้อเยื่อบริเวณที่มีการเจริญเติบโต และทำให้เกิดการสะสมแป้งและน้ำตาลที่ใบ (Hagemeyer, 1999; Påhlsson, 1989)

ในทางกลับกันฮอร์โมนพืชช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช โดยมีส่วนช่วยให้เกิดการแบ่งเซลล์, การยืดยาวของส่วนรากและส่วนยอด, และการสร้างส่วนของเนื้อเยื่อลำเลียง (Pasternat et al., 2002; Magidin et al., 2003: Overvoorde et al., 2005) ตรงกับงานวิจัยนี้ซึ่งพบว่าพืชมีการเจริญเติบโตได้ดีขึ้นในสภาวะที่มีโลหะหนักร่วมกับฮอร์โมนพืช เมื่อเปรียบเทียบกับพืชในสภาวะเดียวกันซึ่งไม่มีการใช้ฮอร์โมนพืชร่วมด้วย

ฮอร์โมนพืชเป็นสารอินทรีย์ปริมาณน้อยที่มีผลควบคุมภายในเซลล์พืชที่เกี่ยวข้องกับการเจริญของพืชไม่เพียงแต่การเจริญของพืชทั้งต้นเท่านั้น หากแต่ยังเกี่ยวข้องกับการเจริญของพืชแต่ละส่วนด้วย ในสภาวะความเครียดจากสิ่งไม่มีชีวิต เช่น สภาวะที่มีโลหะหนัก ในสภาวะที่มีโลหะหนักนี้การได้รับฮอร์โมนพืชเสริมเข้าไปจะไปกระตุ้นกิจกรรมของเอนไซม์ต่อต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant enzymes) เช่น Superoxide dismutase, Ascorbate peroxidase, และ Catalase ภายในเซลล์ให้สูงขึ้น เพื่อที่จะไปลดสภาวะที่เกิดความไม่สมดุลเช่นนี้ นอกจากนี้ฮอร์โมนพืชที่เสริมเข้าไปจะไปลดสภาวะเครียดออกซิเดชัน (Oxidative stress) ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์และเนื้อเยื่อ โดยดูได้จากระดับ Lipid peroxidation และ Hydrogen peroxdiation ที่ลดลง (Piotrowska-Niczyporuk et al., 2012)

Fässler และคณะ (2010) รายงานว่าการเติม 10^{-10} M IAA ลงไปในสารละลายธาตุอาหารพืช (10% Hoagland nutrient solution) ที่มีตะกั่วและสังกะสี ช่วยให้ทานตะวัน (*Helianthus annuus* L.) มีน้ำหนักแห้ง (Dry weitht) เพิ่มขึ้นในสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีสังกะสีเมื่อเทียบกับทานตะวัน (*H. annuus*) ในสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีสังกะสีแต่ไม่มีการเติม 10^{-10} M IAA และยังพบว่า การเติม 10^{-10} M IAA ช่วยให้ทานตะวัน (*H. annuus*) ในสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีตะกั่วมีความยาวรากและน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับทานตะวันในสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีตะกั่วแต่ไม่มีการเติม 10^{-10} M

Israr และ Sahi (2008) ศึกษาการใช้ฮอร์โมนพืช (IAA และ NAA) ในการช่วยเปลี่ยนตำแหน่งตะกั่วไปยังส่วนยอด (ลำต้นและใบ) ของโสน (*Sesbania drummondii*) พบว่า ส่วนยอด (ลำต้นและใบ) ของโสนในสารละลายธาตุอาหารพืช (Half strength Hoagland's solution) ที่มีตะกั่วและฮอร์โมนพืช (IAA และ NAA) มีตะกั่วสะสมมากกว่าส่วนยอด (ลำต้นและใบ) ของโสนที่ไม่ได้รับฮอร์โมนพืชในสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีตะกั่ว โดยที่ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านแสดงให้เห็นว่าการสะสมตะกั่วในส่วนยอด (ลำต้นและใบ) ของโสนส่วนใหญ่จะขึ้นที่บริเวณ

เนื้อเยื่อลำเลียง ส่วนรากพบว่าตะกั่วส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณที่เรียกว่า Stele ซึ่งเป็นบริเวณที่อยู่ถัดจากชั้น Endodermisเข้าไป (ประกอบด้วย Pericycle, Vascular bundle, Pith)

Zhu และคณะ (2012) พบว่า กรดจิบเบอเรลลิกไม่เพียงมีส่วนช่วยในการเจริญเติบโตของพืชยังช่วยให้พืชสามารถตอบรับต่อสภาวะความเครียดจากสิ่งไม่มีชีวิต (Abiotic stress) ได้ด้วย โดย Zhu และคณะศึกษาการใช้ Gibberellic acid (GA_3) ในการลดความเป็นพิษของแคดเมียมต่อ *Arabidopsis thaliana* (เป็นพืชตระกูลมัสตาร์ด) แล้วพบว่า GA_3 ที่ความเข้มข้น 5 μM ในอาหารเลี้ยงพืช (Agar-solidified nutrient medium) ที่มีแคดเมียม สามารถเพิ่มความยาวรากของพืชและมีส่วนช่วยลดความเป็นพิษของแคดเมียมต่อพืชด้วยเมื่อเทียบกับกลุ่มที่มีแคดเมียมในอาหารเลี้ยงพืชแต่ไม่ได้รับ GA_3 นอกจากนั้นยังมีรายงานผลการวิจัยโดย Graziano และ Lamattina (2007) และ Chen และคณะ (2010) ยืนยันว่า Gibberellic acid (GA_3) สามารถบรรเทาผลกระทบจากแคดเมียม (Cd^{2+}) และตะกั่ว (Pb^{2+}) ที่จะเกิดกับพืชได้

Krantev และคณะ (2008) ยืนยันว่าฮอร์โมนพืช สามารถป้องกันเซลล์พืชจากการทำลายของอนุมูลอิสระที่เกิดจากสภาวะเครียดที่มีโลหะหนักได้ และยังช่วยให้พืชสามารถมีการเจริญเติบโตต่อไปได้ ซึ่งตรงกับงานวิจัยชิ้นนี้ด้วย

นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังศึกษาการใช้คีเลตร่วมกับฮอร์โมนพืชด้วย และพบว่ามีการสะสมโลหะหนักในส่วนยอดได้เพิ่มขึ้น สารคีเลตเป็นสารเคมีที่ได้จากธรรมชาติหรือการสังเคราะห์สารคีเลตสามารถรวมตัวกับโลหะหนักและเพิ่มการละลายของโลหะหนักได้ สารคีเลตจึงถูกนำมาใช้ในการเพิ่มการละลายของโลหะธาตุอาหารพืช และอาจนำมาใช้เพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักของพืชได้นอกจากสารคีเลตจะช่วยเพิ่มการการละลายของโลหะหนักในดินได้แล้ว ยังอาจช่วยเพิ่มการลำเลียงโลหะหนักที่ถูกดูดซับผ่านรากไปสะสมในส่วนยอดของพืชได้เพิ่มขึ้น ปัจจุบันมีการศึกษาการใช้สารคีเลตหลายชนิดเพื่อเพิ่มการดูดซับโลหะหนักของพืช (Ok & Kim, 2007; Cao et al., 2007; Najeeb et al., 2009)

โดยปกติแล้วโลหะหนักในสารละลายจะอยู่ในรูปไอออนบวก ไอออนบวกของโลหะหนัก (โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะหนักที่ไม่ใช่ธาตุอาหารพืช เช่น แคดเมียม) ที่ถูกดูดซับผ่านรากมักจะถูกตรึงและเก็บสะสมไว้นอกเซลล์มากกว่าจะถูกนำเข้าภายในเซลล์ โดยไอออนบวกของโลหะจะสร้างพันธะกับบริเวณที่มีประจุลบในผนังเซลล์ (Marschner, 1986) ซึ่งผนังเซลล์พืชประกอบไปด้วยโครงข่ายของเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ซึ่งรวมเพ็คทิน (Pectins) และไกลโคโปรตีน (Glycoproteins) ซึ่งโครงข่ายเหล่านี้จะก่อให้เกิดรูหรือช่องว่างขนาดต่างๆ ซึ่งมีประจุลบกระจายตามไปตามโครงข่าย โดยไอออนบวกของโลหะหนักสามารถเคลื่อนที่ผ่านรูหรือช่องว่างได้และอาจสร้างพันธะกับประจุลบที่อยู่ในโครงสร้างของผนังเซลล์ได้ (Greger, 1999) ไอออนบวกของโลหะหนักบางส่วนที่ถูกดูดซับเข้าสู่รากจะถูกลำเลียงไปตามเส้นทางการลำเลียงน้ำโดยอาศัยแรงดึงจากการคายน้ำเป็นหลัก (Blaylock *et al*., 1997; Salt *et al*., 1995; Vassil *et al*., 1998)

การเติมสารคีเลตซึ่งสามารถรวมตัวกับไอออนบวกของโลหะหนักเป็นสารประกอบโลหะหนักกับสารคีเลต (Metal-Chelate complexes) ส่งผลให้ลดการสร้างพันธะระหว่างไอออนบวกของโลหะหนักกับบริเวณที่มีประจุลบในโครงสร้างผนังเซลล์พืช ดังนั้น การเติมสารคีเลตจึงทำให้โลหะหนักอยู่ในสภาวะที่ถูกลำเลียงหรือเคลื่อนที่ได้ง่าย โลหะหนักจึงอาจถูกลำเลียงไปยังส่วนยอดของพืชได้มาก

ขึ้น (Collins, *et al*., 2001; Vassil, *et al*., 1998; Wenzel *et al*., 2003) หรือในทางกลับกันโลหะหนักที่ถูกสะสมตามโครงสร้างผนังเซลล์อาจถูกชะล้างรั่วไหลออกจากเนื้อเยื่อรากได้ (Turgut *et al*., 2004) และทำให้การดูดซับหรือการสะสมโลหะหนักในส่วนรากของพืชลดลง อย่างไรก็ตามถ้าสารคีเลตรวมตัวกับโลหะหนักด้วยเสถียรภาพที่ไม่ดีโลหะหนักอาจหลุดออกจากสารประกอบและอยู่ในรูปไอออนบวกอิสระซึ่งสามารถสร้างพันธะกับประจุลบที่อยู่ในผนังเซลล์ในรากพืชได้

การศึกษาของ Lai and Chen (2005) แสดงให้เห็นว่าสารคีเลต EDTA สามารถเพิ่มการละลายโลหะหนักสังกะสี แคดเมียม และตะกั่วในดินได้ ซึ่งส่งผลให้พืช *Dianthus chinensis* สามารถดูดซับและสะสมโลหะหนักไว้ในส่วนยอดได้เพิ่มมากขึ้นด้วย Tandy *et al*. (2006) ที่ศึกษาผลกระทบของสารคีเลต EDDS ต่อการดูดซับโลหะหนักที่เป็นธาตุอาหารพืช (ทองแดงและสังกะสี) และโลหะหนักที่ไม่เป็นธาตุอาหารของพืช (ตะกั่ว) ในทานตะวันที่ถูกปลูกด้วยระบบปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponic) ผู้วิจัยพบว่าการเติมสารคีเลต EDDS ส่งผลให้ปริมาณธาตุอาหารพืช (ทองแดงและสังกะสี) ที่ถูกสะสมในส่วนยอดของทานตะวันลดลงในขณะที่ปริมาณตะกั่วที่ถูกสะสมในส่วนยอดเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพืชที่ไม่ได้รับสารคีเลต นอกจากนั้นสารคีเลต EDDS ยังทำให้ปริมาณโลหะหนัก (ทองแดง สังกะสี และตะกั่ว) ที่ถูกสะสมในส่วนรากลดลง ผู้วิจัยสรุปว่าสารคีเลต EDDS ไม่ช่วยเพิ่มการดูดซับและสะสมโลหะหนักที่เป็นธาตุอาหารพืชแต่ช่วยเพิ่มการดูดซับและสะสมของโลหะหนักที่ไม่ใช่ธาตุอาหารพืช

ปัจจุบันการพัฒนาศักยภาพ เทคนิค Phytoremediation ไม่ควรมองด้านใดด้านหนึ่งแต่ควรประยุกต์วิธีต่างๆ เข้าด้วยกัน ดังที่ Gupta และ คณะ (2013) ได้เสนอกลวิธีที่จะพัฒนาศักยภาพเทคนิค Phytoremediation ของตะกั่วโดยพืชว่า ควรศึกษาในเรื่องดังต่อไปนี้

1) ศึกษาการเลือกพืชที่ทนโลหะตะกั่วและสะสมโลหะตะกั่วได้ในปริมาณสูง (Hyperaccumulator plant species)
2) ศึกษาการใช้แบคทีเรียพวก Rhizoshpere bacteria เช่น Diozotrophs และ *Arbuscular mycorrhiza* ช่วยในเรื่องของการดูดซับตะกั่ว
3) ศึกษาการสะสมของที่ตะกั่วที่ผนังเซลล์ (Cell wall) และ แวคคิวโอล (Vacuole)
4) ศึกษายีนในพืชที่ทำให้พืชแสดงออกโดยการทนต่อการได้รับตะกั่ว (Genes and leads tolerance)
5) ศึกษาการใช้สารพวก EDTA, EDDS, และ NT และฮอร์โมนพืช (IAA และ/หรือ NAA) และ Nitric oxide
6) ศึกษาการจับของไอออนบวกของตะกั่วกับไฟโตเคเลทิน (Phytochelatins)

จากนั้นการนำความรู้ความเข้าใจจากเรื่องเหล่านี้มาประยุกต์เชื่อมโยงเข้าด้วยกันแล้วนำไปใช้จะทำให้เกิดประสิทธิภาพและประโยชน์ต่อไป ซึ่งเช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ที่ประยุกต์การใช้ฮอร์โมนพืชกับสารคีเลตเข้าด้วยกันแล้วพบว่าพืชมีการสะสมโลหะหนักได้ดีขึ้น

งานวิจัยหลายชิ้นนำเสนอการประยุกต์ใช้ฮอร์โมนพืชร่วมกับสารคีเลตและให้ผลการวิจัยตรงกันกับงานวิจัยในครั้งนี้ López และคณะ (2007) ศึกษา การใช้ฮอร์โมนพืช (GA_3, Kinetin (KN), และ IAA กับ Kinetin) รวมกับ EDTA ในการศึกษาการดูดซับตะกั่วโดยใช้ Alfalfa (*Medicago*

sativa) พบว่า Alfalfa ในสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีตะกั่วร่วมกับ EDTA และ ฮอร์โมน Kinetin ที่ความเข้มข้น 1, 10, และ 100 μM จะมีค่าการสะสมของตะกั่วเป็น Factor of 17, 43, และ 67 ตามลำดับ (แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของฮอร์โมน Kinetin ในสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีตะกั่วร่วมกับ EDTA เพิ่มขึ้น ค่า Factor การสะสมของตะกั่วก็จะสูงขึ้นด้วย) ซึ่งสูงกว่า Alfalfa (*M. sativa*) ในสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีตะกั่วร่วมกับ EDTA โดยที่ไม่มีฮอร์โมน Kinetin ซึ่งมีค่าการสะสมของตะกั่วเป็น Factor of 2, 5, และ 8 ตามลำดับ

Hadi และ คณะ (2010) ในการศึกษาไฟโตเอ็กแทรกชั่น (Phytoextraction) ของตะกั่วและการเจริญเติบโตของข้าวโพด (*Zea mays* L.) โดยใช้ฮอร์โมนพืช (GA_3 และ IAA) และ EDTA ทั้งแบบเดี่ยวและแบบรวม พบว่า การสะสมตะกั่วโดยภาพรวมทั่วไปของข้าวโพด (*Z. mays*) ที่ได้รับฮอร์โมน GA_3 ดีกว่า การสะสมตะกั่วโดยภาพรวมทั่วไปของข้าวโพด (*Z. mays*) ที่ได้รับฮอร์โมน IAA ดังนั้นจึงสนับสนุนการใช้ ฮอร์โมน GA_3 ร่วมกับการใช้ EDTA ในระดับความเข้มข้นต่ำๆ ในการไฟโตเอ็กแทรกชั่น (Phytoextraction) ตะกั่วจากดินและน้ำที่มีการปนเปื้อนโลหะชนิดนี้

5.3 ข้อเสนอแนะ

1) การใช้ฮอร์โมนพืชร่วมกับการปลูกพืชทนโลหะหนักในพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนัก อาจมีข้อจำกัดในเรื่องอื่นๆ เพิ่มขึ้นมา เช่น ในเรื่องของความเข้มข้นของฮอร์โมนพืชที่จะใช้กับพืชในสภาวะที่ปลูกด้วยดิน เป็นที่ทราบกันว่าช่วงความเข้มข้นของฮอร์โมนพืชที่จะนำมาใช้ประโยชน์หรือจะทำให้เกิดโทษนั้นค่อนข้างแคบ (Salisbury และ Ross, 1992)

2) การจะนำสารคีเลตไปใช้เพื่อช่วยเพิ่มศักยภาพของการใช้พืชบำบัดการปนเปื้อนโลหะหนัก (Phytoremediation) ต้องทำการศึกษาอย่างรอบคอบถึงชนิดและความเข้มข้นของสารคีเลตที่ใช้ เนื่องจากสารคีเลตแตกต่างกันมีประสิทธิภาพในการเพิ่มการละลายโลหะหนักได้แตกต่างกัน รวมถึงความเข้มข้นของสารคีเลตที่ใช้ต้องเหมาะสมเพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างการละลายของโลหะหนักกับการดูดซับและการลำเลียงจากรากไปสู่ยอดของพืช นอกจากนั้นอาจต้องพิจารณาถึงความเข้ากันได้ของสารคีเลตกับชนิดของโลหะ ความเข้ากันได้ของสารคีเลตกับชนิดของพืช การใช้สารคีเลตและความเข้มข้นของสารคีเลตที่ไม่เหมาะสมนอกจากจะไม่ช่วยเพิ่มศักยภาพของ การใช้พืชบำบัดการปนเปื้อนโลหะหนักแล้วยังอาจก่อให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักกระจายตัวในสิ่งแวดล้อมเป็นบริเวณกว้างยิ่งขึ้น

3) การนำความรู้ความเข้าใจจากงานวิจัยนี้มาประยุกต์ต่อไปคือการนำไปทดลองในโรงเรือนเพาะชำก่อน จากนั้นจึงจะนำไปทดลองในบริเวณเล็กๆ ในพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนัก (Field trial experiment) เพื่อดูผลการวิจัยและปรับปัจจัยต่างๆ ให้เหมาะสมก่อนจะนำไปใช้จริงๆ อีกครั้งจะทำให้เกิดประสิทธิภาพและประโยชน์ต่อไป