จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ทุนวิจัย
กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพการสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิลของวัชพืชในประเทศไทย

โดย

นัยนันทน์ อริยกานนท์

กันยายน 2550

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ทุนวิจัย
กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพการสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิลของวัชพืชในประเทศไทย

โดย

นัยนันทน์ อริยกานนท์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กันยายน 2550

ชื่อโครงการวิจัย การศึกษาประสิทธิภาพการสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิลของวัชพืชในประเทศไทย

ชื่อผู้วิจัย อ.ดร.นัยนันทน์ อริยกานนท์

เดือนและปีที่ทำวิจัยเสร็จ กันยายน พ.ศ. 2550

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและคัดเลือกวัชพืชในประเทศไทย ที่มีความสามารถในการสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิล จากนั้นศึกษาผลของตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีต่อการสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิลของวัชพืช วัชพืชที่นำมาศึกษาครั้งนี้มี 5 ชนิดคือ ต้อยติ่ง (*Ruellia tuberosa* (Burm.f.) Hochr.) ผักปลาบใบกว้าง (*Commelina benghalensis* L.) ผักปั้งรั้ว (*Ipomoea digitata* L.) ผักปั้งพุ่ม (*Ipomoea fistulosa* Mart. ex Choisy) และบานไม่รู้โรยป่า (*Gomphrena celosioides* Mart. (G. decumbens)) ผลการศึกษาพบว่าต้อยติ่งเป็นวัชพืชที่สามารถสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิลทั้งต้นได้มากที่สุดเท่ากับ 1,522 4,111 และ 7,332 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มี 5 ชนิดคือ diethylenetriamine pentaacetic acid (DTPA) ethylenediaminedisuccinic acid (EDDS) กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก เมื่อปลูกต้อยติ่งเป็นเวลา 35 วันแล้ว จะเติมตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่ความเข้มข้น 15 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม จากนั้นจะเก็บเกี่ยวต้นพืชในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากเติมตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ ผลการศึกษาพบว่า EDDS ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมทองแดงและนิกเกิลของต้อยติ่งได้มากที่สุด ส่วน DTPA จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมสังกะสีของต้อยติ่งได้ดีที่สุด เมื่อเก็บเกี่ยวต้อยติ่งในวันที่ 15 พบว่า EDDS จะทำให้ต้อยติ่งสะสมทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นมากที่สุดเท่ากับ 3,854 5,827 และ 9,450 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ สำหรับ DTPA จะทำให้ต้อยติ่งสะสมสังกะสีในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นมากที่สุดเท่ากับ 6,272 5,253 และ 6,190 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ส่วน EDDS จะช่วยให้ต้อยติ่งสะสมนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นมากที่สุดเท่ากับ 3,480 4,039 และ 6,515 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ การศึกษาความเป็นพิษของตัวคีเลตและกรดอินทรีย์มีต่อจุลินทรีย์ดินพบว่า DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิกไม่มีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ดิน

เลขหมู่
เลขทะเบียน 013988
วัน, เดือน, ปี 14 ม.ค. 52

Project Title	Studies on phytoextraction efficiency of copper, zinc and nickel by weed plants in Thailand
Name of the Investigator	Dr. Naiyanan Ariyakanon
Year	2007

Abstract

The objective of this research was to study and select weed plants in Thailand which can accumulate copper, zinc and nickel. The effects of chelating agents and organic acids on the accumulation of copper, zinc and nickel in weed plants was also studied. Five kinds of weed plants were used in this study, namely popping pod (*Ruellia tuberosa* (Burm.f.) Hochr.), tropical spiderwort (*Commelina benghalensis* L.), railway creeper (*Ipomoea digitata* L.), morning glory (*Ipomoea fistulosa* Mart. ex Choisy) and wild globe everlasting (*Gomphrena celosioides* Mart. (G. decumbens)). The results showed that popping pod had the highest capability to accumulate the copper, zinc and nickel where the maximum amounts of copper, zinc and nickel accumulated in plant were 1,522, 4,111 and 7,332 mg/kg, respectively. Five kinds of chelating agents and organic acids were used in this study consisting of diethylenetriamine pentaacetic acid (DTPA), ethylenediaminedisuccinic acid (EDDS), oxalic acid, citric acid and gallic acid. After 35 days of planting, 15 mmol/kg of chelating agents and organic acids were added into soil. Plants were harvested on 3, 6, 9, 12 and 15 days after applying chelating agents and organic acids. The results indicated that EDDS greatly helped enhance the copper and nickel accumulation of popping pod while DTPA increased the zinc accumulation in plants. When popping pod was harvested on day 15, the maximum copper accumulation in shoots, roots, and total plant were 3,854, 5,827 and 9,450 mg/kg dry weight, respectively, due to the effects of EDDS. The maximum zinc accumulation in shoots, root, and total plant were 6,272, 5,253 and 6,190 mg/kg dry weight, respectively, as a result of adding DTPA. EDDS amendment had the effects on nickel accumulation in shoots, root, and total plant at the maximum of 3,480, 4,039 and 6,515 mg/kg dry weight, respectively. The studies of the toxicity of chelating agents and organic acids found that DTPA, EDDS, oxalic acid, citric acid and gallic acid had no toxic effects on soil microorganisms.

สารบัญ

	หน้า
บทนำ	1
การสำรวจแนวความคิดและการวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
วิธีการวิจัย	16
ผลการวิจัย	21
การอภิปรายผล	49
ข้อสรุป	66
ข้อเสนอแนะ	69
ส่วนอ้างอิง	70

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการตารางประกอบ

หน้า

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์สมบัติของดิน 17

ตารางที่ 2 การทดสอบความเป็นพิษของตัวดีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีต่อจุลินทรีย์ดิน 19

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของดินที่ใช้ในการทดลอง 21

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการภาพประกอบ

หน้า

ภาพที่ 1 สูตรโครงสร้างของ DTPA 10
ภาพที่ 2 สูตรโครงสร้างของ S,S'-EDDS ที่อยู่ในรูปของ tri-sodium salt 11
ภาพที่ 3 การเปรียบเทียบความสามารถในการย่อยสลายระหว่าง EDTA และ EDDS 11
ภาพที่ 4 สูตรโครงสร้างของกรดออกซาลิก 12
ภาพที่ 5 สูตรโครงสร้างของกรดซิตริก 13
ภาพที่ 6 สูตรโครงสร้างของกรดกัลลิก 13
ภาพที่ 7 การสะสมทองแดง สังกะสีและนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของต้อยติ่ง 24
ภาพที่ 8 การสะสมทองแดง สังกะสีและนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของผักปลาบใบกว้าง 25
ภาพที่ 9 การสะสมทองแดง สังกะสีและนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของผักบุ้งรั้ว 26
ภาพที่ 10 การสะสมทองแดง สังกะสีและนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของผักบุ้งพุ่ม 27
ภาพที่ 11 การสะสมทองแดง สังกะสีและนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของบานไม่รู้โรยป่า 28
ภาพที่ 12 ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินหลังจากที่ปลูกต้อยติ่ง ทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และปริมาณทั้งหมดในดิน 29
ภาพที่ 13 ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินหลังจากที่ปลูกผักปลาบ ใบกว้างทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และปริมาณทั้งหมดในดิน 30
ภาพที่ 14 ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินหลังจากที่ปลูกผักบุ้งรั้ว ทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และปริมาณทั้งหมดในดิน 31
ภาพที่ 15 ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินหลังจากที่ปลูกผักบุ้งพุ่ม ทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และปริมาณทั้งหมดในดิน 32
ภาพที่ 16 ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินหลังจากที่ปลูกบานไม่รู้โรย ป่าทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และปริมาณทั้งหมดในดิน 33

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 17 ปริมาณทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินของต้อยติ่งเมื่อเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก 34

ภาพที่ 18 ปริมาณทองแดงในส่วนรากของต้อยติ่งเมื่อเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก 35

ภาพที่ 19 ปริมาณทองแดงในต้อยติ่งทั้งต้นเมื่อเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก 35

ภาพที่ 20 ปริมาณสังกะสีในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินของต้อยติ่งเมื่อเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก 37

ภาพที่ 21 ปริมาณสังกะสีในส่วนรากของต้อยติ่งเมื่อเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก 38

ภาพที่ 22 ปริมาณสังกะสีในต้อยติ่งทั้งต้นเมื่อเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก 38

ภาพที่ 23 ปริมาณนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินของต้อยติ่งเมื่อเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก 39

ภาพที่ 24 ปริมาณนิกเกิลในส่วนรากของต้อยติ่งเมื่อเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก 40

ภาพที่ 25 ปริมาณนิกเกิลในต้อยติ่งทั้งต้นเมื่อเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก 40

ภาพที่ 26 ปริมาณทองแดงที่เหลืออยู่ในดินในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ เมื่อเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก 42

ภาพที่ 27 ปริมาณทองแดงที่เหลืออยู่ในดินทั้งหมด เมื่อเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก 42

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 28 ปริมาณสังกะสีที่เหลืออยู่ในดินในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ เมื่อเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก 44

ภาพที่ 29 ปริมาณสังกะสีที่เหลืออยู่ในดินทั้งหมด เมื่อเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก 44

ภาพที่ 30 ปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ เมื่อเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก 45

ภาพที่ 31 ปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินทั้งหมด เมื่อเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก 46

ภาพที่ 32 ปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ดินใช้ไปในวันที่ 0 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริกและกรดกัลลิก 47

ภาพที่ 33 ปริมาณออกซิเจนสะสมที่จุลินทรีย์ดินใช้ไป (cumulative soil respiration) ในวันที่ 0 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก 48

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทนำ

การพัฒนาเทคโนโลยีอย่างรวดเร็วในปัจจุบัน เพื่อให้ได้ผลผลิตเพียงพอต่อจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม ทั้งในดิน น้ำ อากาศ รวมทั้งมีการสะสมของโลหะหนักในสิ่งมีชีวิตด้วย

ปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินยังเป็นเรื่องที่มีผู้คนให้ความสนใจไม่มากนักเมื่อเทียบกับการปนเปื้อนของโลหะหนักในอากาศและในน้ำ เนื่องจากคนส่วนใหญ่มักจะเห็นว่าปัญหามลพิษทางดินเป็นเรื่องไกลตัวและไม่เกี่ยวข้องกับการดำรงชีวิตโดยตรง ซึ่งในความเป็นจริงแล้วหากดินมีการปนเปื้อนโลหะหนัก จะทำให้เกิดการแพร่กระจายจากดินไปสู่อากาศจากการระเหยของโลหะหนักบางชนิด เมื่อฝนตกลงมาบนดินน้ำฝนจะชะโลหะหนักลงสู่แหล่งน้ำผิวดินและสะสมในแหล่งน้ำใต้ดิน ในกรณีที่เกษตรกรปลูกพืชบนดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก พืชก็จะสะสมโลหะหนักไว้ในต้น เมื่อมนุษย์หรือสัตว์นำพืชนั้นมาบริโภค ก็ย่อมต้องได้รับโลหะหนักเข้าไปสะสมในร่างกาย ดังเช่น ในกรณีของโรคอิไต-อิไต ซึ่งเกิดจากการที่มนุษย์บริโภคข้าวที่มีแคดเมียมสะสมอยู่ ทำให้ผู้ที่ได้รับแคดเมียมมีอาการไตล้มเหลว ปวดกระดูก จนถึงกระดูกผิดรูป เป็นต้น

แหล่งกำเนิดของโลหะหนักในดินมีหลายแหล่ง เช่น การปนเปื้อนของทองแดงในดินเกิดจากฝุ่นในโรงงานอุตสาหกรรม น้ำทิ้งจากโรงงานถลุงแร่ มูลสุกรและสารฆ่ารา ส่วนการปนเปื้อนของสังกะสีเกิดจากน้ำโสโครก ขยะอุตสาหกรรม และสารกำจัดศัตรูพืช ส่วนการปนเปื้อนของนิกเกิลมาจากไอเสียของน้ำมันและปุ๋ย เป็นต้น โลหะหนักเหล่านี้มีความคงทนในดิน ไม่สลายตัวเมื่อเวลาผ่านไป จึงก่อให้เกิดการสะสมในดิน สามารถส่งผ่านพืชและสัตว์ มาสู่มนุษย์ได้โดยการสะสมในห่วงโซ่อาหารในปริมาณที่ทบทวี

การบำบัดโลหะหนักในดินมีหลายวิธีทั้งวิธีทางกายภาพ เคมีและชีวภาพ วิธีทางกายภาพ เช่น การทำ soil washing และ soil flushing เป็นการล้างดินโดยใช้ตัวทำละลาย ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถบำบัดโลหะหนักในดินได้อย่างรวดเร็ว แต่เป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูง จำเป็นต้องใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์พิเศษในการดำเนินการ และเป็นวิธีที่ไม่เหมาะกับดินที่มีองค์ประกอบของดินเหนียว (clay) และทรายแป้ง (silt) ในปริมาณที่สูง ส่วนวิธีทางเคมี เช่น solidification และ stabilization เป็นการเติมสารเคมีบางชนิดลงไปในดินเพื่อลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก แต่ไม่ได้เป็นการนำโลหะหนักออกจากพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน ซึ่งวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายไม่สูงมากนัก แต่ข้อเสียคือถ้าสภาพสิ่งแวดล้อมในดินมีการเปลี่ยนแปลง โลหะหนักก็อาจถูกชะละลายออกไปจากพื้นที่ และเกิดการแพร่กระจายไปยังบริเวณใกล้เคียงหรือลงไปยังน้ำใต้ดินได้

การใช้พืชเพื่อบำบัดโลหะหนักในดิน (phytoremediation) จัดว่าเป็นวิธีทางชีวภาพและเป็นทางเลือกหนึ่งที่เป็นที่นิยม เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีราคาถูก มีประสิทธิภาพดี เป็นเทคนิคที่สามารถทำได้ในพื้นที่ จึงไม่จำเป็นต้องมีการเปิดหน้าดินหรือขุดดินออกไป ทำให้สารพิษไม่แพร่กระจายและเป็นการรักษาหน้าดิน กลไกการทำงานที่สำคัญของพืชเพื่อบำบัดโลหะหนักในดินคือ การดูดดึงและสะสมโลหะหนัก (phytoextraction หรือ phytoaccumulation) โดยที่พืชจะดูดสารพิษผ่านทางราก และเคลื่อนย้ายไปสะสมไว้ในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ซึ่งพืชชนิดพิเศษที่สามารถสะสมโลหะหนักไว้ในต้นได้ในปริมาณที่สูงเมื่อเทียบกับพืชชนิดอื่น เรียกว่า hyperaccumulator ในการคัดเลือกพืชที่จะนำมาใช้ในการทำ phytoextraction ต้องพิจารณาถึงปัจจัยหลายประการ เช่น ต้องเป็นพืชที่มีมวลชีวภาพมาก สามารถเจริญเติบโตได้ในดินที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักสูง มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักไว้ในต้นได้ในปริมาณที่สูง เป็นต้น

การเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมโลหะหนักของพืชสามารถทำได้ โดยการเติมสารเคมีบางชนิด เช่น ตัวคีเลตสังเคราะห์ (synthesis chelating agents) กรดอินทรีย์ (organic acids) สารอนินทรีย์ (inorganic agents) หรืออินทรียวัตถุเชิงซ้อน (complex organic matter) ลงไปในดิน สารเหล่านี้จะทำให้ความสามารถในการละลายของโลหะหนักเพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาณโลหะหนักในสารละลายดินมากขึ้น และโลหะหนักจะอยู่ในรูปที่พืชสามารถดึงดูดไปใช้ได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้พืชสะสมโลหะหนักในปริมาณสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

การศึกษาเรื่องการใช้พืชเพื่อบำบัดโลหะหนักในต่างประเทศเริ่มการวิจัยตั้งแต่ประมาณ ปี พ. ศ. 2519 ซึ่งพืชที่ทำการศึกษาส่วนใหญ่เป็นพืชในต่างประเทศทั้งสิ้น ในประเทศไทยยังมีข้อมูลเกี่ยวกับพืชที่สามารถสะสมโลหะหนักได้อยู่น้อยมาก โดยเฉพาะในกลุ่มของวัชพืช การศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงแบ่งการศึกษาเป็น 2 ส่วน กล่าวคือ ส่วนแรกจะทำการคัดเลือกวัชพืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณมาก ซึ่งวัชพืชที่ใช้เป็นพืชที่พบได้ทั่วไปในประเทศไทย และยังไม่มีรายงานว่ามีผู้เคยศึกษาความสามารถในการสะสมโลหะหนักของพืชเหล่านี้ ในส่วนที่สองจะนำวัชพืชที่สะสมโลหะหนักแต่ละชนิดได้มากที่สุดมาศึกษา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมโลหะหนักของพืชชนิดนั้น โดยการเติมสารเคมี เช่น ตัวคีเลต และกรดอินทรีย์บางชนิดลงไปในดิน และศึกษาถึงผลกระทบของสารเคมีเหล่านั้นที่มีต่อจุลินทรีย์ดิน เนื่องจากงานวิจัยส่วนใหญ่ในต่างประเทศมักจะนิยมใช้ตัวคีเลตสังเคราะห์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมโลหะหนักของพืช แม้ว่าการใช้ตัวคีเลตสังเคราะห์จะทำให้การสะสมโลหะหนักของพืชมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่สารเหล่านั้นมักจะมีความเป็นพิษสูงทั้งต่อสิ่งมีชีวิตและจุลินทรีย์ในดิน และสารบางชนิดก็จัดเป็นสารก่อมะเร็งในสัตว์ด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาและเลือกใช้สารเคมีเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของพืช โดยที่สารนั้นควรจะเป็นสารที่ปลอดภัยต่อสิ่งมีชีวิต และไม่ส่งผล

กระทบในเชิงลบต่อจุลินทรีย์ในดิน เพื่อลดการเกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม เมื่อนำวิธีนี้มาใช้บำบัดโลหะหนักในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนจริง นอกจากนั้นการนำวัชพืชที่สามารถสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณสูงมาปลูกในดินที่มีโลหะหนัก พืชจะดูดและสะสมโลหะหนักไว้ในต้น เมื่อทำการเก็บเกี่ยวพืช และใช้กรดสกัดเอาโลหะหนักออกจากพืช จะสามารถนำโลหะหนักที่สกัดได้กลับมาหมุนเวียนใช้ประโยชน์ได้อีกครั้งหนึ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การสำรวจแนวความคิดและการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แหล่งกำเนิดและความเป็นพิษของทองแดง สังกะสีและนิกเกิล

แหล่งกำเนิดของทองแดงและสังกะสีที่ปนเปื้อนในดินในประเทศไทย ส่วนหนึ่งเกิดจากสภาพการเลี้ยงสุกรในปัจจุบันที่ผู้เลี้ยงได้เติมทองแดงในรูปของคอปเปอร์ซัลเฟต (copper sulfate) 150-250 ppm Cu ผสมในอาหารสุกร เพื่อเพิ่มน้ำหนักตัวของสุกรและเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้อาหาร ซึ่งการผสมทองแดงในอาหารในระดับความเข้มข้นที่สูงเช่นนี้ อาจทำให้สุกรได้รับพิษของทองแดงถึงตายได้ ดังนั้นเพื่อลดความเป็นพิษของทองแดง จึงจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณสังกะสีในตัวสุกรด้วย เกษตรกรจึงเติมทั้งทองแดงและสังกะสีในอาหารสุกร ทำให้มูลสุกรมีธาตุทั้งสองในระดับที่สูงมาก กล่าวคือในมูลสุกรแห้งจะมีปริมาณของทองแดงและสังกะสีประมาณ 800 ppm Cu และ 400 ppm Zn ในบางกรณีอาจพบทองแดงได้สูงถึง 1,000 ppm (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540)

เมื่อเกษตรกรนำมูลสุกรที่มีทองแดงและสังกะสีในปริมาณสูงมาใช้เป็นปุ๋ยในการปลูกพืช หรือบางครั้งเกษตรกรอาจพ่นมูลสุกรเหลวทางใบโดยตรง หากมนุษย์หรือสัตว์นำพืชเหล่านั้นมาบริโภคจะได้รับทองแดงและสังกะสีที่พืชสะสมอยู่ในต้นรวมกับส่วนที่จับอยู่บนผิวใบโดยตรง สำหรับพื้นที่ที่มีปัญหาดังกล่าวนี้ ได้แก่ จังหวัดนครปฐม ที่มีการเลี้ยงสุกรกันมากและเกษตรกรนิยมนำมูลสุกรมาใช้เป็นปุ๋ย

แหล่งกำเนิดของนิกเกิลในดินส่วนใหญ่เกิดจากการใช้ปุ๋ยซุปเปอร์ฟอสเฟต ที่มีนิกเกิลปนเปื้อนอยู่ แต่ความเป็นพิษจะรุนแรงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดด่างในดิน ทั้งนี้เนื่องจากนิกเกิลจะละลายได้น้อยลงเมื่อค่าความเป็นกรดด่างของดินสูงขึ้น

ความเป็นพิษของโลหะหนักทั้งสามชนิด ได้แก่ ทองแดงเป็นพิษต่อพืชตระกูลถั่วได้ง่ายกว่าธัญพืช พืชพวกธัญพืชบางชนิดอาจสะสมทองแดงมากกว่าระดับปกติเป็น 10 เท่า โดยที่ผลผลิตไม่ลดและพืชไม่แสดงอาการเป็นพิษ จึงส่งผลเสียต่อสัตว์และมนุษย์ที่มาบริโภคพืชเหล่านี้โดยไม่มีสิ่งบอกเหตุให้ระวัง ส่วนสัตว์ที่ไวต่อพิษของทองแดงได้แก่ แกะและปลา ส่วนอาการของมนุษย์เมื่อได้รับทองแดงในปริมาณสูงจากการกิน จะทำให้คลื่นไส้อาเจียน เลือดออกในกระเพาะอาหาร ปัสสาวะเป็นสีเขียวเข้ม และอาจเสียชีวิตภายใน 4 ชั่วโมง สำหรับสังกะสีในปริมาณที่สูงจะเป็นสารก่อมะเร็งและทำลายเม็ดเลือดแดงของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ส่วนนิกเกิลค่อนข้างเป็นพิษต่อพืช นิกเกิลในปริมาณสูงจะมีความเป็นพิษสูงมากและจัดเป็นสารก่อมะเร็งในสัตว์ แต่ถือว่าเป็นสารที่เป็นอันตรายไม่รุนแรงมากในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เนื่องจากระบบทางเดินอาหารดูดซึมนิกเกิลได้น้อย

สำหรับค่าสูงสุดของทองแดง สังกะสีและนิกเกิลที่ถือเป็นค่าที่ยอมรับให้มีอยู่ในดินได้โดยไม่เกิดพิษคือ 23 110 และ 35 ppm ตามลำดับ ส่วนปริมาณทองแดง สังกะสีและนิกเกิลในดินที่พืชเริ่มแสดงอาการเป็นพิษคือ 60-100 250-400 และ 100 ppm ตามลำดับ

รูปของโลหะหนักในดิน

ลักษณะนิสัยของโลหะหนักคือเปลี่ยนแปลงวาเลนซีอยู่เสมอ ถ้าอยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์จะมีการละลายได้ต่ำ มีความสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้สูง โลหะหนักในดินจะอยู่ในรูป 5 รูป ได้แก่ (1) รูปที่ละลายในสารละลายดิน (2) รูปที่ถูกดูดซับบนผิวของอนุภาคดินเหนียวและฮิวมัส (3) รูปที่ถูกตรึงและจับกับสารแขวนลอยอื่นหรือแร่ในดิน เช่น การเกิดคีเลต (chelation) กับฮิวมัส (4) รูปที่ตกตะกอน หรือตกตะกอนกับสารอื่น เช่น การตกตะกอนกับคาร์บอเนต ฟอสเฟต และไฮดรอกซิล เป็นต้น (5) รูปที่ถูกคลุกเคล้าเข้าสู่ระบบชีวภาพเป็นสารอินทรีย์ โลหะหนักในรูปที่หนึ่งและสองเป็นรูปที่เคลื่อนที่ (mobile) ในดิน และพืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ส่วนรูปอื่นเป็นรูปที่ไม่เคลื่อนที่ (immobile) อย่างไรก็ตามกระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในดินมีลักษณะที่เป็นพลวัต (dynamic) จึงอาจมีการเปลี่ยนแปลงรูปต่าง ๆ ได้ตลอดเวลา

การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยใช้พืช

การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยใช้พืช (phytoremediation) หมายถึงการใช้พืชสีเขียวหรือพืชที่มีระบบท่อลำเลียง (vascular plant) ในการบำบัดสารพิษทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนในดิน น้ำ น้ำใต้ดิน และอากาศ เป็นเทคนิคที่สามารถทำได้ทั้งในพื้นที่และนอกพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน (Ensley, 2000)

กลไกการทำงานของพืชในการบำบัดโลหะหนักในดินคือ การที่พืชดูดดึงโลหะหนักที่อยู่ในดินผ่านเข้ามาทางราก และเคลื่อนย้ายโลหะหนักนั้นไปสู่ส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (ส่วนยอดและใบ) ที่เรียกว่า phytoextraction หรือ phytoaccumulation ซึ่งมีพืชชนิดพิเศษที่สามารถสะสมโลหะหนักไว้ในต้นได้ในปริมาณที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับพืชชนิดอื่น ที่เรียกว่า hyperaccumulator (Rockwood et al, 2001) การตัดสินว่าพืชชนิดใดเป็น hyperaccumulator นั้นจะต้องพิจารณาถึงความเข้มข้นของสารพิษที่สะสมในพืช เช่น ในกรณีของแคดเมียมจะต้องมีความเข้มข้นของสารต่อน้ำหนักแห้งของใบประมาณ 100 ไมโครกรัมต่อกรัม (0.01%) ส่วนอัตราการสะสมของโคบอลต์ ทองแดง ตะกั่ว และนิกเกิลต่อน้ำหนักแห้งของใบคือ 1,000 ไมโครกรัมต่อกรัม (0.1%) ส่วนอัตราการสะสมของแมงกานีสและสังกะสีคือ 10,000 ไมโครกรัมต่อกรัม (1.0%) ในกรณีของโลหะหนักชนิดอื่นอาจจะใช้เกณฑ์ว่า hyperaccumulator คือพืชที่สามารถสะสมโลหะหนักได้มากกว่าพืชชนิดอื่นที่ปลูกอยู่ในดินชนิดเดียวกันประมาณ 100 เท่า (Reeves and Baker, 2000)

ประสิทธิภาพของการทำ phytoextraction ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดของพืชที่เลือกใช้ รูปของโลหะหนักที่พืชสามารถดูดผ่านเข้ามาทางรากได้ ความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักของราก ความสามารถของพืชในการเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากส่วนรากไปสะสมในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน และความสามารถของพืชที่จะทนต่อความเป็นพิษของโลหะหนัก เป็นต้น (Blaylock and Huang, 2000)

กลไกการทนต่อโลหะหนักของพืชมีหลายกระบวนการ ได้แก่ Amelioration คือการที่พืชจะลดความเป็นพิษของโลหะหนักโดยวิธีการต่างๆ เช่น การสร้างคีเลต การระเหย การนำโลหะหนักไปเก็บไว้ในเนื้อเยื่อบริเวณอื่น (เช่น ใน vacuole) เป็นต้น ส่วน Avoidance คือการที่พืชสร้างสารเคมีบางอย่างออกมา เพื่อป้องกันไม่ให้พืชได้รับผลกระทบจากสภาวะของความเป็นพิษของโลหะหนัก จากการศึกษาของ Wang และคณะ (2004) พบว่า *Brassica juncea* ซึ่งเป็นพืช hyperaccumulator มีกลไกการทนต่อโลหะหนัก โดยในส่วนรากจะมีการสร้างเอนไซม์เพื่อต่อต้านความเป็นพิษของโลหะหนัก เนื่องจากในสภาพที่ดินมีการปนเปื้อนโลหะหนัก จะกระตุ้นให้เกิดการสร้างอนุมูลอิสระภายในเซลล์ของพืชมากขึ้น ซึ่งอนุมูลอิสระนี้จะทำลายเซลล์ของพืช ดังนั้นเอนไซม์ต่อต้านอนุมูลอิสระของ *Brassica juncea* จะทำหน้าที่กำจัดอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นเหล่านี้

ในปัจจุบันมีพืชที่จัดว่าเป็น hyperaccumulator ทั้งสิ้นกว่า 400 ชนิด ในจำนวนนี้มีพืชที่สามารถสะสมนิกเกิลได้ประมาณ 290 ชนิด โคบอลต์ 26 ชนิด ทองแดง 24 ชนิด ซีลีเนียม 19 ชนิด และสังกะสี 16 ชนิด (Brooks, 1998) พืชที่เป็น hyperaccumulator นอกจากจะสามารถสะสมโลหะหนักทั่วไปแล้วยังอาจสะสมสารพิษชนิดอื่น ๆ เช่น โครเมียม ปรอท ซีลีเนียม สารหนู โบรอน สตรอนเทียม (^{90}Sr) ซีเซียม (^{137}Cs) พลูตาเนียม (^{239}Pu) และยูเรเนียม ($^{238,234}U$) (เอกลักษณ์ คาน, 2544)

พืชที่จัดว่าเป็น hyperaccumulator มีหลายชนิด พืชชนิดที่สำคัญที่ค้นพบในระยะแรก ๆ ได้แก่ *Thlaspi caerulescens Alyssum murale A. lesbiacum* และ *A. tenium* ซึ่งเป็นพืชที่สะสมสังกะสีและแคดเมียมไว้ในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้ในปริมาณที่สูง แต่พืชเหล่านี้มีข้อจำกัดคือเจริญเติบโตช้าและมีมวลชีวภาพน้อย ส่วน *Ipomoea alpina* สามารถสะสมทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้ 12,300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ในขณะที่ *Psychotria douarrei* สามารถสะสมนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้ 47,500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง (Cunningham and Ow, 1996) พืชที่จัดว่าเป็น hyperaccumulator ของนิกเกิลส่วนใหญ่มักจะอยู่ในวงศ์ Euphorbiaceae (83) Brassicaceae (82) Asteraceae (27) Flacourtiaceae (19) Buxaceae (17) และ Rubiaceae (12) ส่วนที่เหลือนั้นอยู่ในวงศ์อื่นๆ อีก 31 วงศ์ (Reeves and Baker, 2000)

ในประเทศไทยมีงานวิจัยที่ศึกษาถึงความสามารถในการสะสมโลหะหนักของพืชพันธุ์พื้นเมือง เช่น Wongkongkatep และคณะ (2003) พบว่าเฟริ์นสองชนิดในธรรมชาติคือ *Pityrogramma calomelanos* และ *Pteris vittata* สามารถสะสมสารหนูในใบได้ 108-1,156 และ 79 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และเมื่อนำ *Pityrogramma calomelanos* มาปลูกโดยวิธีที่ไม่ใช้ดิน (hydroponic culture) จะสะสมสารหนูในใบได้มากถึง 4,616 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ส่วนการศึกษาในต้นธูปฤาษี (*Typha angustifolia*) พบว่าพืชชนิดนี้จะสามารถสะสมตะกั่วในรากได้ 7,492.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และสะสมตะกั่วในใบได้ 167 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง โดยที่ต้นธูปฤาษีไม่แสดงอาการของพิษตะกั่ว (Panich-Pat *et al*, 2004) ส่วนผักกาดเขียวปลี (*Brassica juncea* Coss.) และผักกาดเขียวกวางตุ้ง (*Brassica chinensis* Linn.) สามารถสะสมสังกะสีในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้ 2,815 และ 4,178 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (Ariyakanon *et al.*, 2003) ส่วนการศึกษาความสามารถในการสะสมทองแดงของผักกาดเขียวปลี (*Brassica juncea* (L.) Czern) และก้นจ้ำขาว (*Bidens alba* (L.) DC. var. *radiata*) พบว่าผักกาดเขียวปลีและก้นจ้ำขาวที่ปลูกในกระถางที่เติมทองแดงความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมทองแดงได้มากที่สุดเท่ากับ 3,771 และ 879 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (Aiyakanon and Winaipanich, 2006)

การเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมโลหะหนักของพืช

การละลายของโลหะหนัก และรูปของโลหะหนักที่พืชสามารถดึงดูดได้เป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำ phytoextraction การละลายของโลหะหนักที่อยู่ในดินขึ้นอยู่กับลักษณะของดิน ความเป็นกรดด่างของดิน และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับส่วนที่ละลายได้ โลหะหนักที่อยู่ในรูปที่พืชสามารถดึงดูดได้ทันทีคือโลหะหนักที่อยู่ในรูปไอออนที่เป็นอิสระ และสารประกอบของโลหะที่ละลายได้ในสารละลายดิน (soil solution) ซึ่งมีจำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในดิน ดังนั้นเพื่อให้การทำ phytoextraction มีประสิทธิภาพมากที่สุด จึงต้องพยายามปรับสภาพของดินเพื่อเพิ่มการละลายของโลหะหนัก และรูปของโลหะหนักที่พืชสามารถดึงดูดได้ ซึ่งอาจทำได้โดยการเติมตัวคีเลต หรือสารเคมีบางชนิดลงไปในดินที่ช่วยให้การละลายของโลหะหนักเพิ่มขึ้น และเพิ่มการดึงดูดโลหะหนักเข้ามาในต้นพืช

ตัวคีเลต (chelating agent) คือสารเคมีที่สามารถรวม และคุ้มกันไม่ให้เกิดการตกตะกอนของแคตไอออนบางชนิด รวมทั้งจุลธาตุ เช่น เหล็ก แมงกานีส ทองแดง และสังกะสี โดยตัวคีเลตจะเข้าล้อมรอบแคตไอออนที่เป็นโลหะ (metallic cation) และไม่ยอมให้สารอื่นมาสร้างพันธะกับแคตไอออนเหล่านั้น แคตไอออนที่มีตัวคีเลตล้อมรอบจะคงอยู่ในสภาพสารละลายได้นาน และมีความ

คงทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าแคตไอออนของโลหะธรรมดา ทำให้พืชสามารถดูดเอาไปใช้ได้ง่ายขึ้น

งานวิจัยของ Huang และคณะ (1997) พบว่า ethylenediamine tetraacetate (EDTA) เป็นตัวคีเลตที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มปริมาณตะกั่วที่อยู่ในสารละลายดิน และมีผลต่อการสะสมของตะกั่วในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินของต้นถั่ว การศึกษาของ Chen และ Cutright (2001) พบว่าการเติม EDTA ในอัตราส่วน 0.5 กรัมต่อกิโลกรัม จะทำให้ความสามารถในการสะสมแคดเมียมและนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินของทานตะวัน (*Helianthus annuus*) เพิ่มจาก 34 และ 15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เป็น 115 และ 117 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ การศึกษาของ Nasciomento (2006) พบว่า การเติม EDTA จำนวน 383 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมลงไปในดิน จะทำให้ตะกั่วละลายออกมาได้ 77% ของปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่มีอยู่ในดิน ซึ่งปริมาณตะกั่วที่อยู่ในสารละลายดินจะมีอยู่มากเกินกว่าความสามารถที่พืชจะดูดดึงไปได้ ทำให้เกิดความเสี่ยงที่ตะกั่วจะถูกชะละลาย (leaching) ออกจากหน้าตัดดิน (soil profile) อย่างไรก็ตามแม้ว่า EDTA จะเป็นตัวคีเลตที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมโลหะหนักในพืชได้อย่างดี แต่ EDTA เป็นสารที่ย่อยสลายตามธรรมชาติได้ยาก มีความคงทนในสิ่งแวดล้อม นอกจากนั้น EDTA ยังมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในดินอีกด้วย ดังนั้นนักวิจัยจึงได้ศึกษาและสังเคราะห์ตัวคีเลตชนิดใหม่เพื่อใช้ทดแทน EDTA ได้แก่ ethylenediamine-disuccinate (EDDS) ซึ่งเป็นสารที่เป็นไอโซเมอร์กับ EDTA แต่ EDDS สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ในระยะเวลาอันสั้น ครึ่งชีวิต (half life) ของ EDDS ในดินอยู่ในช่วงเวลา 2-3 วัน ดังนั้นการใช้ EDDS จึงช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้ตัวคีเลต

การศึกษาของ Kos และ Lestan (2004) พบว่าการเติม EDDS ลงไปในดิน จะทำให้ความเข้มข้นของทองแดงที่สะสมใน *Brassica rapa* var. *pekinensis* เพิ่มขึ้น 3.3 เท่าเมื่อเทียบกับชุดควบคุม ส่วนการศึกษาของ Luo และคณะ (2005) พบว่าการเติม EDDS ลงไปในดินจะทำให้สังกะสีและทองแดงอยู่ในรูปที่ละลายได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับการเติม EDTA นอกจากนั้นการเติม EDDS จะทำให้การสะสมทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินของข้าวโพด (*Zea mays* L. cv. Nongda 108) และถั่ว (*Phaseolus vulgaris* L. white bean) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 2,060 และ 5,130 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และการเติม EDDS จะทำให้ปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินของข้าวโพดและถั่วมีค่าสูงกว่าการเติม EDTA

งานวิจัยของ Qin และคณะ (2004) ศึกษาเปรียบเทียบผลของกรดอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (low molecular weight organic compound, LMWOC) 3 ชนิด คือ กรดซิตริก (citric acid) กรดมาลิก (malic acid) และกรดอาซิติก (acetic acid) และเกลือของสารอนินทรีย์ 2 ชนิด คือ แคลเซียม

คลอไรด์ ($CaCl_2$) และโซเดียมไนเตรต ($NaNO_3$) ที่มีต่อการปลดปล่อยทองแดง แคดเมียม และตะกั่วออกจากดิน ผลการทดลองพบว่าสารที่มีผลต่อการปลดปล่อยโลหะหนักทั้งสามชนิดออกจากดินเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อย ได้แก่ กรดซิตริก > กรดมาลิก > กรดอาซิติก > แคลเซียมคลอไรด์ > โซเดียมไนเตรต ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเสถียรของสารเชิงซ้อนระหว่างโลหะหนักทั้งสามชนิดกับกรดอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และขึ้นอยู่กับความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของแคลเซียมและโซเดียม

การศึกษาในเรื่องการเติมกรดอินทรีย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำ phytoextration เริ่มมาประมาณ 10 ปีแล้ว ได้แก่ งานวิจัยของ Blaylock และคณะ (1997) ที่พบว่าการปรับค่า pH ของดินให้ลดลงโดยการเติมกรดอาซิติก (acetic acid) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมล จะช่วยให้ Indian mustard สะสมตะกั่วได้มากถึง 1,471 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนการศึกษาของ Ebbs และคณะ (1998) พบว่าการเติมกรดซิตริก 10.5 มิลลิกรัมต่อดินดิน 1 กิโลกรัม จะทำให้การสะสมยูเรเนียม (uranium) ของ swiss chard (*Beta vulgaris* L. subsp. *vulgaris*) เพิ่มขึ้น 14 เท่า จากเดิมที่มีความเข้มข้นของยูเรเนียม 15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เพิ่มขึ้นเป็น 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทั้งนี้น่าจะเนื่องมาจากการสร้างสารเชิงซ้อนที่ชื่อ citrate-uranyl complex ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของยูเรเนียมในดินเพิ่มขึ้น และทำให้พืชดูดดึงยูเรเนียมได้มากขึ้นด้วย ในการศึกษาวิจัยของ Nigam และคณะ (2001) พบว่าการเติมกรดซิตริกและกรดมาลิก (malic acid) จะทำให้ข้าวโพดสะสมแคดเมียมได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับการเติมกรดแอสพาติก (aspartic acid) และไกลซีน (glycine) โดยการเติมกรดซิตริกและกรดมาลิก (malic acid) จะทำให้ข้าวโพดสะสมแคดเมียมในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้มากถึง 19 และ 15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนงานวิจัยของ Nasciomento และคณะ (2006) ศึกษาเปรียบเทียบการเติมตัวคีเลตสังเคราะห์ และกรดอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีผลต่อการทำ phytoextration ใน Indian mustard (*Brassica juncea*) จากผลการวิจัยพบว่ากรดกัลลิก (gallic acid) และ กรดซิตริกจะช่วยเพิ่มความสามารถในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะผสม 4 ชนิดคือ แคดเมียม สังกะสี ทองแดง และนิกเกิลได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการชะละลาย นอกจากนั้นการใช้กรดอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะช่วยลดความเป็นพิษต่อพืชด้วย

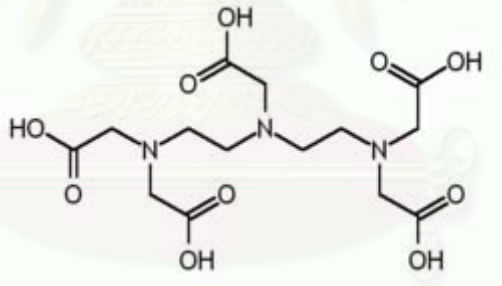
คุณสมบัติของตัวคีเลตที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ 5 ชนิดคือ diethylenetriaminepentaacetic acid (DTPA) [S,S] Ethylenediamine-N,N-disuccinic acid (S,S'-EDDS) กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก ซึ่งมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

(1) Diethylenetriaminepentaacetic acid (DTPA) มีสูตรเคมีคือ $C_{14}H_{23}N_3O_{10}$ และมีน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) เท่ากับ 393.3498 กรัมต่อโมล ที่อุณหภูมิห้อง DTPA จะเป็นของแข็งมีลักษณะเป็นผงสีขาว ตั้งแต่ประมาณปี ค.ศ. 1960 แพทย์ได้นำ DTPA มาใช้เป็นตัวคีเลตเพื่อรักษาผู้ป่วยที่ได้รับสารกัมมันภาพรังสี เช่น อเมอร์ริเซียม (americium) พลูโตเนียม (plutonium) คาลิฟลอเนียม (californium) คูเลียม (curium) เบอเคลเลียม (berkelium) หรือโลหะหนัก เนื่องจาก DTPA สามารถจับกับไอออนของสารพิษเหล่านี้ได้ดี ทำให้สารพิษไม่ถูกดูดซึมเมื่อผ่านเข้าไปในระบบย่อยอาหารของมนุษย์ และจะช่วยเร่งการปลดปล่อยสารพิษเหล่านี้ออกมาทางปัสสาวะ โดยทั่วไปการใช้ DTPA เพื่อการรักษาจะใช้ในรูปเกลือของแคลเซียมหรือสังกะสี

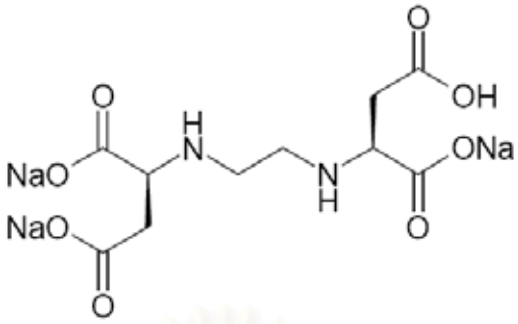
นอกจากนั้นยังมีการนำ DTPA มาใช้เป็นสารสกัดจุลธาตุที่มีอยู่ในดินในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช เช่น สังกะสี เหล็ก ทองแดง และแมงกานีส ที่ระดับความเป็นกรดด่างประมาณ 7.3 โดยใช้ DTPA ร่วมกับแคลเซียมคลอไรด์และไตรเอทาโนลามีน (TEA) (Wikipedia, 2007)

DTPA เป็นสารที่ไม่มีผลกระทบในระยะยาวต่อสุขภาพของมนุษย์ ผู้ที่ได้รับ Ca-DTPA ในระยะสั้นอาจจะมีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ท้องเสีย หนาวสั่น มีไข้ รู้สึกคัน และเป็นตะคริวที่กล้ามเนื้อ ส่วนผลกระทบข้างเคียงได้แก่ ปวดศีรษะ เจ็บหน้าอก และรู้สึกขมในปาก



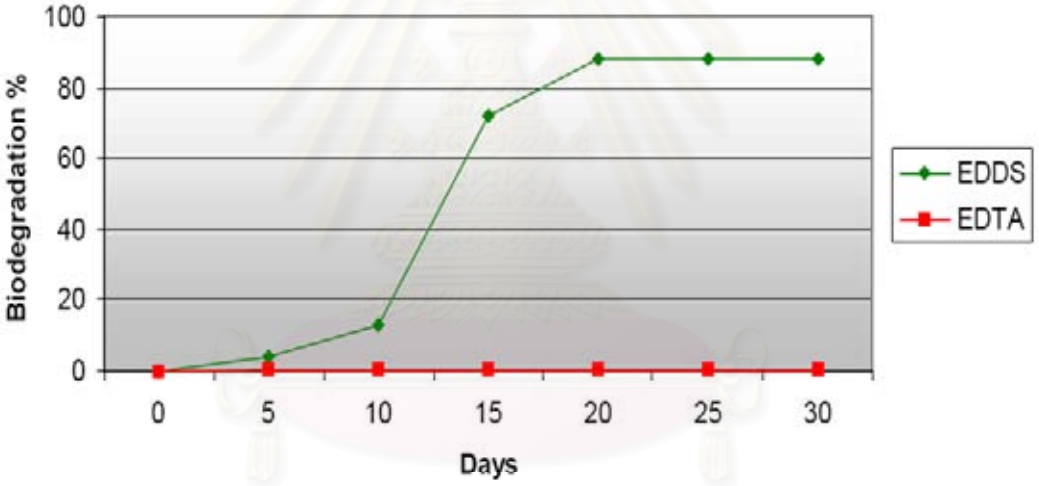
ภาพที่ 1 สูตรโครงสร้างของ DTPA

(2) [S,S] Ethylenediamine-N,N-disuccinic acid (S,S'-EDDS) มีสูตรเคมีคือ $C_{10}H_{13}N_2O_8$ S,S'-EDDS ที่อยู่ในรูปของ tri-sodium salt มีน้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 358.19 กรัมต่อโมล ในช่วงต้นทศวรรษ 1990 นักเคมีได้พัฒนาและผลิต S,S' - EDDS เนื่องจากพบปัญหาจากการใช้ EDTA และได้มีการทดสอบความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมของ S,S'- EDDS ผลการศึกษาพบว่า S,S'- EDDS จัดว่าเป็นสารที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ดังนั้น S,S'- EDDS จึงมีประโยชน์อย่างมากในการนำมาใช้แทน EDTA และสารที่มีฟอสฟอเนส (phosphonates) เป็นส่วนประกอบ S,S'- EDDS จัดเป็นสารที่สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ในสิ่งแวดล้อมและไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ ดังนั้นการใช้ S,S'- EDDS จึงช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้คีเลต (Dixon, 2003)



ภาพที่ 2 สูตรโครงสร้างของ S,S'-EDDS ที่อยู่ในรูปของ tri-sodium salt

การศึกษาความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพในดินพบว่า S, S'- EDDS มีครึ่งชีวิตในการเปลี่ยนสภาพในดินประมาณ 2-3 วัน (ในการสลายตัวครั้งที่ 1 จะมีค่า K value = 0.277 วัน$^{-1}$) (Jaworskal *et al*., 1999)

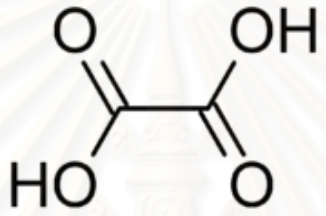


ภาพที่ 3 การเปรียบเทียบความสามารถในการย่อยสลายระหว่าง EDTA และ EDDS

(3) กรดออกซาลิก (oxalic acid) มีสูตรเคมีคือ HO_2CCO_2H จัดว่าเป็น dicarboxylic acid กรดออกซาลิกที่อยู่ในรูป anhydrous มีน้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 90.03 กรัมต่อโมล แต่ถ้าอยู่ในรูปของ dihydrate ($C_2H_2O_4 .2H_2O$) จะมีน้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 126.07 กรัมต่อโมล กรดออกซาลิกจัดว่าเป็นกรดอินทรีย์ที่ค่อนข้างแรง กล่าวคือจะมีความแรงมากกว่ากรดอาซิติก (acetic acid) ประมาณ 10,000 เท่า ออกซาเลท (oxalate) ซึ่งอยู่ในรูป di anion จะสามารถจับไอออนของโลหะได้ดี ไอออนของโลหะบางชนิดเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซาเลทแล้วจะตกตะกอน และอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ เช่น แคลเซียมออกซาเลท

การเตรียมกรดออกซาลิกในห้องปฏิบัติการจะใช้วิธีการออกซิไดส์น้ำตาลซูโครส (sucrose) ด้วยกรดไนตริก (nitric acid) โดยมีวานาเดียม เพนโตไซด์ (vanadium pentoxide) เป็นตัวเร่ง

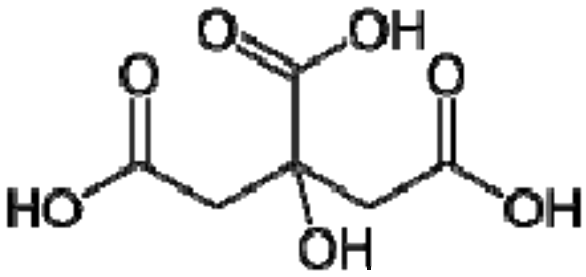
ปฏิกิริยา ในธรรมชาติสามารถพบกรดออกซาลิกและออกซาเลตได้ในพืชหลายชนิด เช่น พริกไทยดำ ผักชีฝรั่ง ผักโขม โกโก้ พืชตระกูลเบอร์รี่ และถั่ว ใบของชาชนิดหนึ่งคือ *Camellia sinensis* จะมีกรดออกซาลิกเป็นองค์ประกอบในความเข้มข้นที่สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับพืชชนิดอื่น อย่างไรก็ตามเมื่อกรดออกซาลิกเข้าสู่ร่างกาย จะสามารถจับกับไอออนของโลหะหลายชนิดได้ดี เช่น แคลเซียม เหล็ก และแมกนีเซียม ทำให้เกิดการตกตะกอนเป็นผลึกที่ไม่ละลายน้ำ จึงทำให้เกิดการระคายเคืองที่ลำไส้และไต ดังนั้นจึงไม่ควรบริโภคอาหารที่มีกรดออกซาลิกเป็นองค์ประกอบมากเกินไป



ภาพที่ 4 สูตรโครงสร้างของกรดออกซาลิก

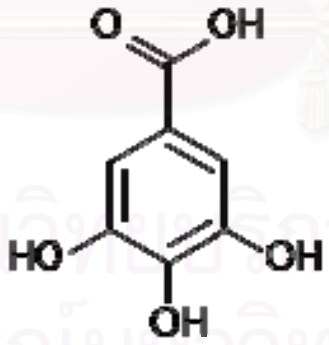
(4) กรดซิตริก (citric acid) มีสูตรเคมีคือ $C_6H_8O_7$ มีน้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 192.027 กรัมต่อโมล เกลือของกรดซิตริก (citrate) มีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ ในสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่จะมีเกลือของกรดซิตริกเป็นองค์ประกอบโดยธรรมชาติและยังเป็นผลิตผลที่เกิดจากการสันดาปด้วย เกลือของกรดซิตริกจะถูกย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วในธรรมชาติ ทั้งภายใต้สภาวะที่มีอากาศ (aerobic conditions) หรือไม่มีอากาศ (anaerobic conditions) จากผลการศึกษาของ Hoyt และ Gewanter (1992) พบว่ากรดซิตริกจะถูกย่อยสลายอย่างรวดเร็วโดยจุลินทรีย์ที่มีการหายใจแบบใช้ออกซิเจน ที่ควบคุมการทำงานของเอนไซม์ในวัฏจักรเครป (Krebs cycle) นอกจากนั้นกรดซิตริกสามารถถูก metabolite ได้อย่างสมบูรณ์และถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ สิ่งมีชีวิต เช่น แบคทีเรีย รา พืช และสัตว์สามารถผลิตกรดซิตริกได้

ค่า LC_{50} ของกรดซิตริกและ เกลือของกรดซิตริกมีค่าระหว่าง 200-10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่าสารนี้ไม่มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำ และเมื่อนำเกลือของกรดซิตริกใส่ลงไปในดิน พบว่าไม่มีผลต่อการงอกของเมล็ดพืชหรือการเจริญเติบโตของพืช



ภาพที่ 5 สูตรโครงสร้างของกรดซิตริก

(5) กรดกัลลิก (gallic acid) มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า 3,4,5-trihydroxybenzoic zcid มีสูตรเคมี คือ $C_6H_2(OH)_3COOH$ มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 170.12 กรัมต่อโมล มีลักษณะเป็นผงสีขาว หรือสีขาวปนเหลือง กรดกัลลิกจัดว่าเป็นกรดอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ แหล่งที่มาของกรดกัลลิกมี 2 ทางคือได้จากพืช (เช่น พืชไม้ดอกที่ชื่อ witch hazel ใบชา และเปลือกของต้นโอ๊ค เป็นต้น) หรือจากปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยน้ำ (hydrolysis) ของกรดแทนนิก (tannic acid) โดยใช้กรดซัลฟุริก (sulfuric acid) กรดกัลลิกประกอบด้วยกลุ่มของกรดคาร์บอซิลิก (carboxy1ic acid group) 1 กลุ่ม และกลุ่มไฮดรอกซิล (hydroxyl group) 3 กลุ่ม กรดกัลลิกและอนุพันธ์ของกรดจะใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตสีและหมึก นอกจากนั้นกรดกัลลิกยังเป็นสารเคมีที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมยา เช่น ใช้ในการสังเคราะห์ยาหลอนประสาทที่มีชื่อว่า 3,4,5-trimethoxyphenethylamine



ภาพที่ 6 สูตรโครงสร้างของกรดกัลลิก

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของวัชพืชที่ใช้ในงานวิจัยนี้

1. ต้อยติ่ง (*Ruellia tuberosa* (Burm.f.) Hochr.)

มีชื่อสามัญว่า popping pod เป็นพืชในวงศ์ Acanthaceae ต้อยติ่งเป็นพืชที่มีเมล็ดมาก และขึ้นได้ในดินทั่วๆไป จึงทำให้แพร่พันธุ์ได้รวดเร็วจนกลายเป็นวัชพืช ต้อยติ่งเป็นวัชพืชใบกว้าง ต้นสูง

ประมาณ 25-50 เซนติเมตร ใบเดี่ยวออกตามข้อเป็นคู่ๆ ใบเรียบไม่เป็นขน ออกดอกตามซอกระหว่างก้านใบกับลำต้น ช่อหนึ่งประมาณ 2-3 ดอก ดอกสีม่วงน้ำเงินขนาดใหญ่เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 4-5 เซนติเมตร กลีบดอกมี 5 กลีบ ตอนโคนติดกันเป็นกระบอก ฝักสีน้ำตาลเข้มยาว 2-3 เซนติเมตร แตกเป็น 2 กลีบ เมล็ดแบน รากพองๆคล้ายรากกระชายแต่เล็กกว่า ออกดอกตลอดปี

2. ผักปลาบใบกว้าง (*Commelina benghalensis* L.)

มีชื่อสามัญว่า tropical spiderwort เป็นพืชในวงศ์ Commelinaceae ผักปลาบใบกว้างเป็นพืชอายุปีเดียว ลำต้นอวบน้ำทอดเลื้อยไปตามพื้นดิน ปลายยอดชูตั้งขึ้น สูง 65-85 เซนติเมตร ลำต้นมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.1 – 3.5 มิลลิเมตร ใบเดี่ยวเรียงสลับรูปไข่ (ovate) หรือรูปรี (elliptic) กว้าง 1.0-3.5 เซนติเมตร ยาว 1.7 – 8.0 เซนติเมตร โคนใบแผ่เป็นกาบหุ้มลำต้นยาว 0.8 – 1.6 เซนติเมตร ขอบใบมีขนครุย (ciliate) มีใบประดับสีเขียวหุ้มช่อดอก ตามลำต้น แผ่นใบทั้งสองด้าน และหลังใบประดับ (bract) จะมีขนละเอียดสั้นๆ ปกคลุมหนาแน่น ดอกแบบช่อกระจุก (cymose) ออกดอกตามปลายกิ่งหรือตามซอกใบ กลีบเลี้ยง 3 กลีบ สีเขียวอ่อนใส กลีบดอกสีม่วงแกมน้ำเงิน อับเกสรเพศผู้มี 6 อัน ซึ่ง 4 อัน เป็นหมันจะมีสีเหลืองสด อีก 2 อันไม่เป็นหมันจะมีสีม่วงเข้ม ยอดและก้านเกสรเพศเมีย และก้านชูอับเรณูสีม่วงอ่อน พบออกดอกช่วงเดือนเมษายนถึงเดือนมิถุนายน

3. ผักบุ้งรั้ว (*Ipomoea digitata* L.)

มีชื่อสามัญว่า railway creeper เป็นพืชในวงศ์ Convolvulaceae ผักบุ้งรั้วเป็นไม้เลื้อยเนื้ออ่อน เลื้อยได้ไกลถึง 2 เมตร เป็นพรรณไม้ที่มีหัวอยู่ใต้ดิน น้ำยางสีขาว ผิวสัมผัสปานกลาง ใบเดี่ยว รูปรีขอบใบหยักเว้าแบบนิ้วมือมี 5 แฉก ออกดอกเป็นช่อตามซอกใบ ช่อละ 1 - 3 ดอก ลักษณะรูปแตร โคนเป็นหลอด กลีบดอกเชื่อมติดกันมีสีม่วง ออกดอกตลอดปี การขยายพันธุ์ใช้วิธีการเพาะเมล็ด เจริญเติบโตได้ดีในดินทั่วไป เป็นพรรณไม้ที่ชอบแสงแดดจัด

4. ผักบุ้งพุ่ม (*Ipomoea fistulosa* Mart. ex Choisy)

มีชื่อสามัญว่า morning glory เป็นพืชในวงศ์ Convolvulaceae ผักบุ้งพุ่มเป็นไม้พุ่มรอเลื้อย สูง 1-4 เมตร ใบเดี่ยว ออกสลับ รูปหัวใจ กว้าง 8-10 เซนติเมตร ปลายแหลม ก้านใบยาว ดอกสีม่วงอ่อน หรือสีชมพูจางๆ ออกเป็นช่อตามซอกใบและปลายกิ่ง ทยอยบานครั้งละ 2-4 ดอก กลีบดอกโคนเป็นหลอด ปลายแผ่ออกเป็นรูปปากแตร เมื่อบานเส้นผ่าศูนย์กลาง 6-7 เซนติเมตร เกสรตัวผู้ 5 อัน ผลค่อนข้างกลมมี 4-6 พู เมื่อแก่แตกได้ มีเมล็ด 4 เมล็ด พืชชนิดนี้มีถิ่นกำเนิดในเม็กซิโกและเปรู มักพบขึ้นตามป่าละเมาะและชายป่าดิบทั่วไป

5. บานไม่รู้โรยป่า (*Gomphrena celosioides* Mart. (G. decumbens))

มีชื่อสามัญว่า wild globe everlasting เป็นพืชในวงศ์ Amaranthaceae บานไม่รู้โรยป่าเป็นไม้ล้มลุกขนาดเล็ก ต้นนอนราบไปกับพื้นชูดอกขึ้นข้างบน ตามลำต้นและผิวใบด้านล่างมีขนสีขาว เป็นไม้ที่มาจากอเมริกาใต้เข้ามาในเมืองไทยนานแล้วระหว่างสงครามโลกครั้งที่สอง ใบมีรูปรี โคนใบทั้งสองข้างสอบเข้าหาเส้นกลางใบ ดอกสีขาวออกเป็นกระจุกคล้ายดอกบานไม่รู้โรยแต่มีขนาดเล็กเป็นกลีบแห้งๆ มีเมล็ดสีน้ำตาลอ่อน ออกดอกตลอดปี พบทั่วไปตามสนามหญ้า ข้างทางและที่รกร้างว่างเปล่า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ได้แบ่งวิธีการวิจัยเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่

1. การคัดเลือกวัชพืชในประเทศไทยที่สามารถสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิลได้ในปริมาณที่สูง

(1) การก่อสร้างเรือนทดลองขนาด กว้าง 5 เมตร x ยาว 5 เมตร x สูง 3 เมตร ในเขตพื้นที่ของภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (บริเวณข้างวิทยนิเวศน์) เพื่อใช้เป็นสถานที่ปลูกพืชที่ใช้ในการทดลอง

(2) คัดเลือกวัชพืชในประเทศไทยจำนวน 5 ชนิดที่มีแนวโน้มว่าจะสามารถสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณสูง ได้แก่ ผักงวงช้าง (*Heliotropium indicum* L.) ขยุ้มตีนหมา (*Ipomoea pes-tigridis* L.) ต้อยติ่ง (*Ruellia tuberosa* (Burm.f.) Hochr.) ผักปลาบใบกว้าง (*Commelina benghalensis* L.) และผักปุ้งรั้ว (*Ipomoea digitata* L.)

(3) สำรวจพื้นที่ที่เก็บตัวอย่างดินในจังหวัดนครปฐม และเลือกพื้นที่เก็บตัวอย่างในบริเวณสวนผัก บ้านท่าแฉลบ หมู่ที่ 5 ตำบลศีรษะทอง อำเภอนครชัยศรี จังหวัดนครปฐม จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างดินประมาณ 800 กิโลกรัม แล้วนำดินกลับมาที่ห้องปฏิบัติการชั้น 4 ตึกภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หลังจากนั้นนำตัวอย่างดินทั้งหมดมาผสมคลุกเคล้ากันให้ทั่วถึง ทำการแยกหิน เศษซากพืช ใบไม้ ออกจากดิน แล้วแบ่งดินเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งเตรียมดินเพื่อใช้ในการปลูกพืช ดินอีกส่วนหนึ่งนำเอาไปผึ่งลมให้ดินแห้งเป็นเวลา 6-8 วัน จากนั้นบดดินและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 และ 2 มิลลิเมตร เพื่อเตรียมนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของดิน ตลอดจนวิเคราะห์ปริมาณทองแดง สังกะสีและนิกเกิลในดินก่อนทำการทดลอง (ดังตารางที่ 1) การวิเคราะห์ดินจะทำจำนวน 5 ซ้ำ แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

(4) เตรียมดินที่ใช้ในการปลูกพืช โดยเตรียมสารละลาย $CuCl_2.2H_2O$ ที่มีความเข้มข้นของ Cu เท่ากับ 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ สารละลาย $ZnCl_2$ ที่มีความเข้มข้นของ Zn เท่ากับ 200 400 และ 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ และสารละลาย $NiCl_2.6H_2O$ ที่มีความเข้มข้นของ Ni เท่ากับ 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ จากนั้นชั่งดิน 2 กิโลกรัมต่อ 1 กระถาง และเติมสารละลายทั้งสามชนิดลงไปในดิน จะได้ตำรับการทดลองทั้งสิ้น 27 กระถาง รวมชุดควบคุมอีก 9 กระถาง รวมเป็น 36 กระถางต่อพืชหนึ่งชนิด (แต่ต้องทดสอบกับวัชพืช 5 ชนิด จึงต้องเตรียมดินทั้งสิ้น 180 กระถาง)

(5) ทำการปลูกพืช โดยการเพาะเมล็ดของวัชพืชทั้ง 5 ชนิดลงในกระถางที่จัดเตรียมไว้ กระถางละ 25 เมล็ด เป็นเวลา 14 วัน จากนั้นจึงย้ายต้นพืชที่แข็งแรงไปปลูกในกระถางเติมทองแดง สังกะสีและนิกเกิล ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กระถางละ 5 ต้น

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์สมบัติของดิน

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
เนื้อดิน (soil texture)	Hydrometer method
ปริมาณน้ำในดิน (water content)	Gravimetric method
ความเป็นกรดด่างของดิน (pH)	Potentiometric method (ดิน:น้ำกลั่น = 1:1)
ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน (cation exchange capacity)	NH_4OAc method
ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (organic matter)	Walkley Black method
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen)	Kjeldahl method
ปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (available phosphorus)	Mehlich's No.1 method
ปริมาณโพแทสเซียมที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (available potassium)	AAS
ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลในดินส่วนที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (available copper, zinc and nickel)	AAS
ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลทั้งหมดในดิน (total copper, zinc and nickel)	AAS

(6) ดูแลรดน้ำต้นพืชทั้ง 5 ชนิด ตลอดระยะเวลา 60 วัน จากนั้นทำการเก็บเกี่ยวพืช และเก็บตัวอย่างดินเพื่อวิเคราะห์โลหะหนัก

(7) วิเคราะห์ปริมาณทองแดง สังกะสีและนิกเกิลในพืช โดยแบ่งส่วนของพืชเป็นส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (ใบและลำต้น) และส่วนที่อยู่ใต้ดิน (ราก) จากนั้นนำแต่ละส่วนไปชั่งน้ำหนักสด นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนักแห้งของแต่ละส่วนของพืช จากนั้นนำแต่ละตัวอย่างไปสกัดโลหะหนักด้วยกรดผสมของ HNO_3: $HClO_4$ (3:1 v/v) วิเคราะห์ปริมาณทองแดง สังกะสีและนิกเกิลในพืชด้วยเครื่อง AAS

(8) วิเคราะห์ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลในดิน โดยการนำดินไปผึ่งให้แห้ง และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำดินในแต่ละกระถางมาแบ่งเป็น 2 ส่วน ดินส่วนหนึ่งนำมาสกัดด้วย DTPA เพื่อหาปริมาณทองแดง สังกะสีและนิกเกิลที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์

ได้ และดินอีกส่วนหนึ่งนำมาสกัดด้วยกรดผสมของ HNO_3: $HClO_4$ (3:1 v/v) เพื่อหาปริมาณทองแดง สังกะสีและนิกเกิลทั้งหมดในดิน วิเคราะห์ปริมาณทองแดง สังกะสีและนิกเกิลในดินด้วยเครื่อง AAS

2. การเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิลของวัชพืชโดยการเติมตัวคีเลตและกรดอินทรีย์

(1) จากผลการทดลองในขั้นที่ 1 พบว่าต้อยติ่งเป็นวัชพืชที่สามารถสะสมทองแดง สังกะสีและนิกเกิลได้มากที่สุด ดังนั้นการทดลองในขั้นที่ 2 นี้จึงเลือกที่จะศึกษาต้อยติ่ง

(2) เตรียมดินที่มีทองแดง สังกะสีและนิกเกิล ความเข้มข้น 100 200 และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยการชั่งดิน 2 กิโลกรัมต่อ 1 กระถาง และเติมโลหะหนักทั้งสามชนิด

(3) เตรียมตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่จะใช้ทดลองคือ diethylenetriamine pentaacetic acid (DTPA) ethylenediaminedisuccinic acid (EDDS) กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก รวม 5 ชนิด ความเข้มข้น 15 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมของดิน เนื่องจากต้องทำการทดลอง 3 ซ้ำ และทำการเก็บเกี่ยวต้นพืชในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 วัน หลังจากเติมตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ จึงต้องเตรียมดินจำนวน 75 กระถาง รวมกับดินในชุดควบคุม 1 (เป็นชุดที่ไม่เติมโลหะหนักและไม่เติมตัวคีเลต) อีก 15 กระถาง และดินในชุดควบคุม 2 (เป็นชุดที่เติมโลหะหนัก แต่ไม่เติมตัวคีเลต) อีก 15 กระถาง รวมเป็น 105 กระถาง ต่อโลหะหนัก 1 ชนิด (แต่ใช้โลหะหนักสามชนิดคือทองแดง สังกะสีและนิกเกิล ดังนั้นทั้งหมดจึงรวมเป็น 315 กระถาง)

(4) ทำการปลูกพืช โดยการเพาะเมล็ดของต้อยติ่งลงในกระถางที่จัดเตรียมไว้ กระถางละ 25 เมล็ด เป็นเวลา 14 วัน จากนั้นจึงย้ายต้นพืชที่แข็งแรงไปปลูกในดินกระถางที่เติมทองแดง สังกะสีและนิกเกิล กระถางละ 5 ต้น

(5) เติมตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ทั้ง 5 ชนิดลงไปในดินแต่ละกระถางในวันที่ 35 หลังจากการงอกของเมล็ด จากนั้นทำการเก็บเกี่ยวพืช ในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 วัน หลังจากเติมตัวคีเลตและกรดอินทรีย์

(6) วิเคราะห์ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลในต้อยติ่ง โดยแบ่งส่วนของพืชเป็นส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (ใบและลำต้น) และส่วนที่อยู่ใต้ดิน (ราก) จากนั้นนำแต่ละส่วนไปชั่งน้ำหนักสด นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนักแห้งของแต่ละส่วนของพืช จากนั้นนำแต่ละตัวอย่างไปสกัดโลหะหนักด้วยกรดผสมของ HNO_3: $HClO_4$ (3:1 v/v) วิเคราะห์ปริมาณทองแดง สังกะสีและนิกเกิลในพืชด้วยเครื่อง AAS

(7) วิเคราะห์ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลในดิน โดยการนำดินไปผึ่งให้แห้ง และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำดินในแต่ละกระถางมาแบ่งเป็น 2 ส่วน ดินส่วนหนึ่ง

นำมาสกัดด้วย DTPA เพื่อหาปริมาณทองแดง สังกะสีและนิกเกิลที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ และดินอีกส่วนหนึ่งนำมาสกัดด้วยกรดผสมของ HNO_3: $HClO_4$ (3:1 v/v) เพื่อหาปริมาณทองแดง สังกะสีและนิกเกิลทั้งหมดในดิน วิเคราะห์ปริมาณทองแดง สังกะสีและนิกเกิลในดินด้วยเครื่อง AAS

(8) นำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ one-way ANOVA (โปรแกรม SPSS for windows)

(9) การทดสอบความเป็นพิษของตัวคีเลตและกรดอินทรีย์มีต่อจุลินทรีย์ดิน ใช้วิธีวิเคราะห์การหายใจของจุลินทรีย์ดินโดยการใช้กลูโคสเป็นตัวชักนำ (glucose-induced respiration of soil microorganisms) จะดำเนินการทดลองโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

9.1 นำดินประมาณ 3 กิโลกรัมไป incubate ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน

9.2 ชั่งดิน 50 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ จำนวน 24 ใบ จากนั้นแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 8 ชุด ทำชุดละ 3 ซ้ำ (ดังตารางที่ 2) ชุดการทดลองที่ 3-8 จะเติมสารละลายกลูโคสที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วลงไปให้มีความเข้มข้นของกลูโคสเท่ากับ 10 ไมโครโมลต่อกรัม

ตารางที่ 2 การทดสอบความเป็นพิษของตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีต่อจุลินทรีย์ดิน

ชุดที่	ตำรับการทดลอง
1	ไม่เติมดิน + ไม่เติมกลูโคส + ไม่เติมตัวคีเลต
2	ดิน + ไม่เติมกลูโคส + ไม่เติมตัวคีเลต
3	ดิน + กลูโคส + ไม่เติมตัวคีเลต
4	ดิน + กลูโคส + DTPA
5	ดิน + กลูโคส + EDDS
6	ดิน + กลูโคส + oxalic acid
7	ดิน + กลูโคส + citric acid
8	ดิน + กลูโคส + gallic acid

9.3 ชุดการทดลองที่ 4-8 จะเติมตัวคีเลตทั้ง 5 ชนิด คือ DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก ความเข้มข้น 15 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมลงไปในดิน

9.4 ปิเปต 0.3 M NaOH 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ จำนวน 24 ใบ จากนั้นนำบีกเกอร์ที่ใส่ดิน และบีกเกอร์ที่มี NaOH ใส่ไว้คู่กันในขวดพลาสติกใหญ่ ปิดฝาให้แน่น และปิดทับด้วยพาราฟิลม์ จากนั้นนำขวดพลาสติกนั้นไป incubate ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส

9.5 ในวันที่ 0 3 6 9 12 และ 15 ที่เวลาเดิม ให้นำบีกเกอร์ที่มี NaOH อันเก่าออกมา และใส่บีกเกอร์ที่มี NaOH อันใหม่เข้าไปแทน วางไว้ในขวดพลาสติกใหญ่ ปิดฝาให้แน่น และปิดทับด้วยพาราฟิลม์ จากนั้นนำขวดพลาสติกนั้นไป incubate ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส

9.6 สำหรับบีกเกอร์ที่มี NaOH อันเก่า ให้เติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร และ $BaCl_2$ 10 มิลลิลิตร จากนั้นให้หยดสารละลาย Phenolphthalein indicator 6 หยด แล้วนำมาไตเตรตกับ 0.1 M HCl จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนสีจากสีแดงเป็นไม่มีสี จดปริมาตรของกรด HCl ที่ใช้ไตเตรตลงในตารางบันทึกผลการทดลอง

9.7 คำนวณหาปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน จากนั้นนำไปคิดเป็นปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ดินใช้ไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการวิจัย

1. การคัดเลือกวัชพืชในประเทศไทยที่สามารถสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิลได้ในปริมาณที่สูง

1.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของดินที่ใช้ในการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของดินที่ใช้ในการทดลองพบว่า ลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนปนทราย (sandy loam) ที่มีอัตราส่วนของ sand: silt: clay เท่ากับ 69.22: 14.14: 16.64 (ดังตารางที่ 3) ปริมาณน้ำในดินมีค่าเท่ากับ 20.8% ความเป็นกรดด่างของดินเมื่อวัดโดยใช้อัตราส่วนของดิน:น้ำกลั่น เท่ากับ 1:1 มีค่า 6.91 ซึ่งจัดว่าอยู่ในช่วงที่เป็นกลาง ส่วนค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน ซึ่งเป็นค่าที่แสดงปริมาณแคตไอออนที่ดินสามารถดูดยึดไว้ได้มีค่าเท่ากับ 14.51 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ปริมาณอินทรียวัตถุในดินมีค่าเท่ากับ 3.2% ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของดินที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 0.155% ปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มีค่าเท่ากับ 786 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณโพแทสเซียมที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มีค่าเท่ากับ 705 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลในดินที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มีค่าเท่ากับ 2 10 และ 0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลทั้งหมดในดินมีค่าเท่ากับ 20 262 และ 7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของดินที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์
เนื้อดิน (soil texture)	ดินร่วนปนทราย (sandy loam)
ปริมาณอนุภาคทราย (sand)	69.22%
ปริมาณอนุภาคทรายแป้ง (silt)	14.14%
ปริมาณอนุภาคดินเหนียว (clay)	16.64%
ปริมาณน้ำในดิน (water content)	20.8%
ความเป็นกรดด่างของดิน (pH) (ดิน:น้ำกลั่น เท่ากับ 1:1)	6.91
ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน (cation exchange capacity)	14.51 เซนติโมลต่อกิโลกรัม
ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (organic matter)	3.2%

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen)	0.155%
ปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (available phosphorus)	786 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ปริมาณโพแทสเซียมที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (available potassium)	705 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ปริมาณทองแดงในดินที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (available copper)	2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ปริมาณสังกะสีในดินที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (available zinc)	10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ปริมาณนิกเกิลในดินที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (available nickel)	0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ปริมาณทองแดงทั้งหมดในดิน (total copper)	20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดิน (total zinc)	262 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ปริมาณนิกเกิลทั้งหมดในดิน (total nickel)	7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

1.2 การสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิลของวัชพืช 5 ชนิด ได้แก่ ผักงวงช้าง (*Heliotropium indicum* L.) ขยุ้มตีนหมา (*Ipomoea pes-tigridis* L.) ต้อยติ่ง (*Ruellia tuberosa* (Burm.f.) Hochr.) ผักปลาบใบกว้าง (*Commelina benghalensis* L.) และผักบุ้งรั้ว (*Ipomoea digitata* L.)

ผลการทดลองพบว่าเมื่อปลูกพืชทั้ง 5 ชนิดลงในดินที่มีการเติมโลหะหนัก ผักงวงช้างและขยุ้มตีนหมาในทุกกระถางจะแสดงอาการใบเหลือง ซีด และตายในวันที่ 10 และ 15 นับจากวันที่ย้ายต้นอ่อนลงในกระถางที่มีโลหะหนัก ดังนั้นจึงได้นำพืชทั้งสองชนิดมาดำเนินการทดลองซ้ำอีกครั้ง แต่ผลการทดลองก็เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับในครั้งแรก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความเข้มข้นของทองแดง สังกะสีและนิกเกิลที่เติมลงไปมีค่าสูงเกินกว่าที่ผักงวงช้างและขยุ้มตีนหมาจะสามารถเจริญเติบโตได้ พืชทั้งสองชนิดจึงแสดงอาการเป็นพิษจากโลหะหนักและตายในที่สุด อย่างไรก็ตามมีรายงานว่าพืชใน genus เดียวกับผักงวงช้างคือ *Heliotropium sp.* ที่ปลูกในประเทศบราซิลสามารถสะสมนิกเกิลได้ 2,020 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง (Reeves and Baker, 2000)

เมื่อผักงวงช้างและขยุ้มตีนหมาตายหมด จึงได้ทดลองนำวัชพืชชนิดใหม่อีก 2 ชนิดคือ ผักบุ้งพุ่ม (*Ipomoea fistulosa* Mart. ex Choisy) และบานไม่รู้โรยป่า (*Gomphrena celosioides* Mart.

(G. decumbens)) มาทดลองแทน ซึ่งพบว่าพืชทั้งสองชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ในดินที่มีการเติมทองแดง สังกะสีและนิกเกิลโดยต้นพืชไม่แสดงอาการผิดปกติ

การเลือกผักบุ้งพุ่ม (*Ipomoea fistulosa* Mart. ex Choisy) มาใช้ในการทดลองครั้งนี้ เนื่องจากผักบุ้งพุ่มเป็นวัชพืชที่มนุษย์ไม่นำมาบริโภค และอยู่ใน genus เดียวกับ *Ipomoea alpina* ซึ่งเป็นพืชที่สามารถสะสมทองแดงไว้ในต้นได้สูงถึง 12,300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง (Reeves and Baker, 2000) การศึกษาของ Goethberg และคณะ (2004) พบว่าผักบุ้ง (*Ipomoea aquatica* Forsk.) สามารถสะสมปรอท แคดเมียมและตะกั่วไว้ในต้น ส่วนการศึกษาของ Kashem และ Singh (2002) พบว่าผักบุ้ง (*Ipomoea aquatica* cv. Kangkon) จะสะสมแคดเมียม นิกเกิล และสังกะสีได้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากผักบุ้ง (*Ipomoea aquatica*) เป็นพืชที่ประชาชนทั่วไปนิยมนำมาบริโภค ถึงแม้ว่าจะมีความสามารถในการสะสมโลหะหนักได้หลายชนิด แต่หากนำผักบุ้งไปปลูกในพื้นที่จริงที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก และมีมนุษย์หรือสัตว์มาบริโภคผักบุ้งนั้นโดยมิได้ตั้งใจก็จะก่อให้เกิดอันตรายอย่างยิ่ง ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกใช้ผักบุ้งพุ่ม เนื่องจากอยู่ใน genus Ipomoea แต่เป็นวัชพืชที่มนุษย์ไม่นำมาบริโภค และยังไม่เคยมีรายงานการศึกษาถึงความสามารถในการสะสมโลหะหนักของผักบุ้งพุ่ม

การเลือกใช้บานไม่รู้โรยป่า (*Gomphrena celosioides* Mart. (G. decumbens)) เนื่องจากเป็นวัชพืชร้ายแรง แพร่กระจายอย่างรวดเร็ว และเป็นวัชพืชที่ยังไม่เคยมีรายงานการศึกษาความสามารถในการสะสมโลหะหนัก แต่มีรายงานว่าพืชชนิดอื่นที่อยู่ในวงศ์เดียวกับบานไม่รู้โรยป่า (วงศ์ Amaranthaceae) เช่น *Pandiaka metallorum* และ *Celosia trigyna* จะสามารถสะสมทองแดงไว้ในต้นได้ 6,270 และ 2,051 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (Reeves and Baker, 2000) ดังนั้นบานไม่รู้โรยป่าจึงเป็นวัชพืชที่น่าสนใจที่จะนำมาศึกษาทดลองครั้งนี้

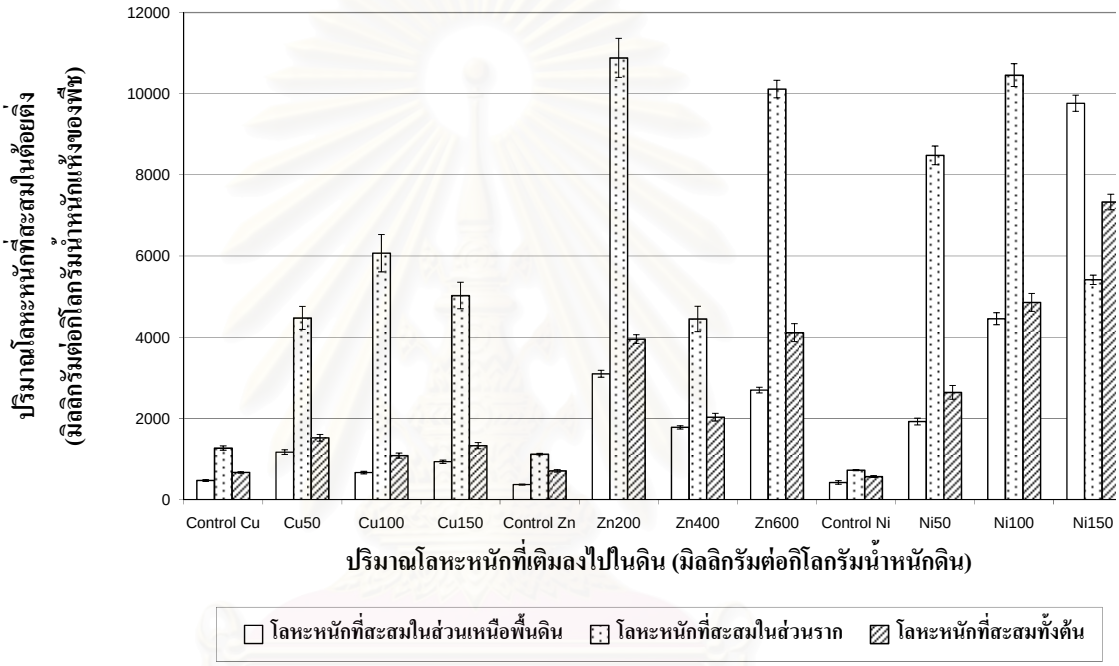
ผลการศึกษาความสามารถในการสะสมทองแดง สังกะสีและนิกเกิลของวัชพืชทั้ง 5 ชนิด เป็นไปดังต่อไปนี้คือ

(ก) การสะสมทองแดง สังกะสีและนิกเกิลของต้อยติ่ง

ต้อยติ่งมีความสามารถในการสะสมทองแดงในรากได้มากกว่าในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินที่ทุกความเข้มข้นของทองแดง ต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมทองแดงความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมทองแดงไว้ในรากมากที่สุดเท่ากับ 6,071 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ส่วนต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมทองแดงความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมทองแดงไว้ในส่วนเหนือพื้นดินและทั้งต้นมากที่สุดเท่ากับ 1,170 และ 1,522 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (ภาพที่ 7)

ผลการศึกษาความสามารถในการสะสมสังกะสีของต้อยติ่งพบว่า ต้อยติ่งจะสะสม

สังกะสีไว้ในรากได้มากกว่าส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินที่ทุกความเข้มข้นของสังกะสี ต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสีความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมสังกะสีไว้ในรากและส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้มากที่สุดเท่ากับ 10,882 และ 3,101 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ส่วนต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสีความเข้มข้น 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมสังกะสีไว้ในทั้งต้นได้มากที่สุดเท่ากับ 4,111 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง



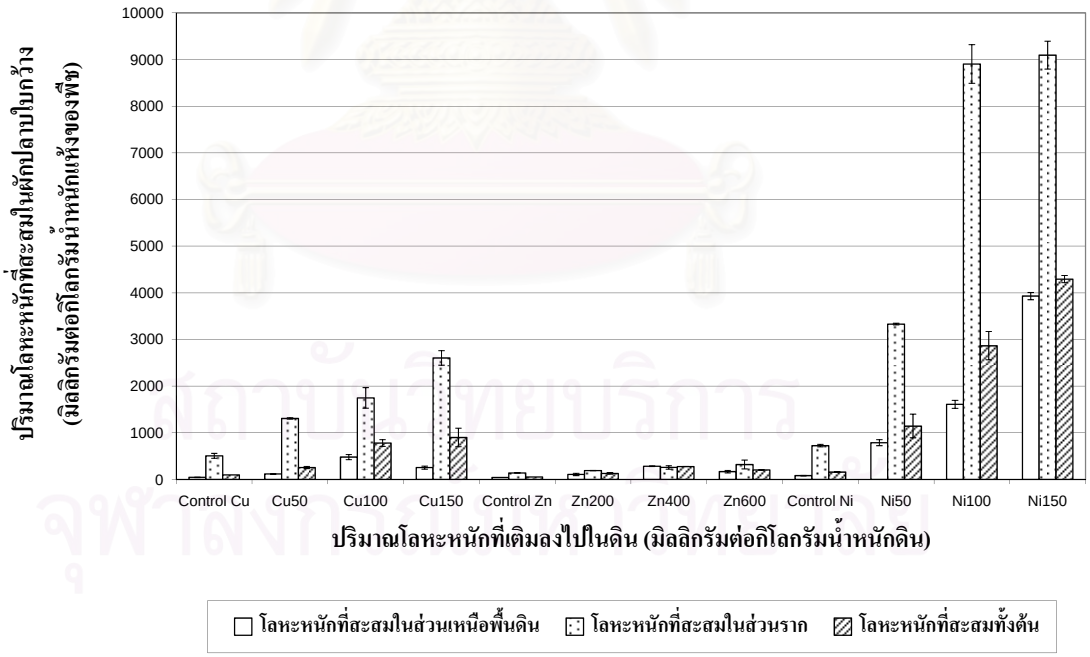
ภาพที่ 7 การสะสมทองแดง สังกะสีและนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของต้อยติ่ง

ต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่มีการเติมนิกเกิล 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมจะสะสมนิกเกิลในส่วนรากได้มากกว่าในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ยกเว้นต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่มีการเติมนิกเกิล 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้มากกว่าส่วนราก และมีการสะสมนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินและทั้งต้นได้มากที่สุดเท่ากับ 9,765 และ 7,332 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ส่วนต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่มีการเติมนิกเกิล 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมจะสะสมนิกเกิลในส่วนรากได้มากที่สุดเท่ากับ 10,456 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง

(ข) การสะสมทองแดง สังกะสีและนิกเกิลของผักปลาบใบกว้าง

ผลการศึกษาพบว่า ผักปลาบใบกว้างมีความสามารถในการสะสมทองแดงในรากได้มากกว่าในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินที่ทุกความเข้มข้นของทองแดง ผักปลาบใบกว้างที่ปลูกในดินที่เติมทองแดงความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมทองแดงไว้ในรากและทั้งต้นมากที่สุดเท่ากับ 2,605 และ 901 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ส่วนผักปลาบใบกว้างที่ปลูกในดินที่เติมทองแดงความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมทองแดงไว้ในส่วนเหนือพื้นดินมากที่สุดเท่ากับ 479 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง (ภาพที่ 8)

ผักปลาบใบกว้างที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสี 200 และ 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมสังกะสีในส่วนรากได้มากกว่าในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ยกเว้นผักปลาบใบกว้างที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสี 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมสังกะสีในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้มากกว่าส่วนราก และมีการสะสมสังกะสีในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินและทั้งต้นได้มากที่สุดเท่ากับ 284 และ 279 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ส่วนผักปลาบใบกว้างที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสีความเข้มข้น 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมสังกะสีไว้ในรากได้มากที่สุดเท่ากับ 322 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง

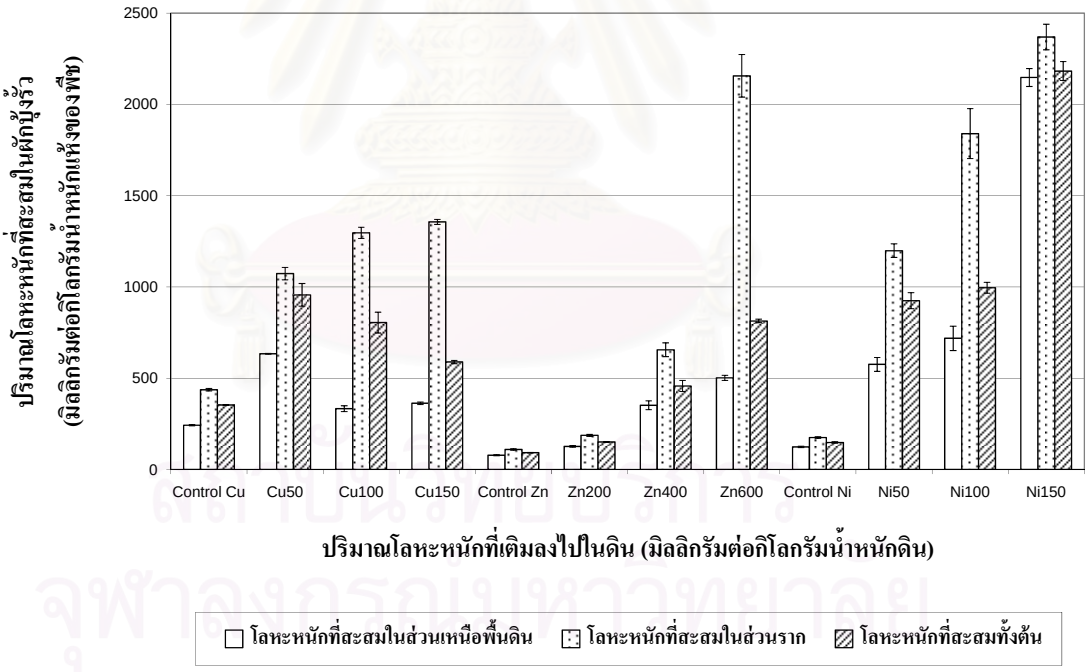


ภาพที่ 8 การสะสมทองแดง สังกะสีและนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของผักปลาบใบกว้าง

ผักปลาบใบกว้างจะสะสมนิกเกิลในส่วนรากได้มากกว่าในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ที่ทุกความเข้มข้นของนิกเกิล ผักปลาบใบกว้างที่ปลูกในดินที่มีการเติมนิกเกิล 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นได้มากที่สุดเท่ากับ 3,930 9,095 และ 4,295 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

(ค) การสะสมทองแดง สังกะสีและนิกเกิลของผักบุ้งรั้ว

ผักบุ้งรั้วมีความสามารถในการสะสมทองแดงในรากได้มากกว่าส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ที่ทุกความเข้มข้นของทองแดง ผักบุ้งรั้วที่ปลูกในดินที่เติมทองแดงความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมทองแดงไว้ในรากมากที่สุดเท่ากับ 1,356 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ส่วนผักบุ้งรั้วที่ปลูกในดินที่เติมทองแดงความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมทองแดงไว้ในส่วนเหนือพื้นดินและทั้งต้นได้มากที่สุดเท่ากับ 633 และ 956 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (ภาพที่ 9)



ภาพที่ 9 การสะสมทองแดง สังกะสีและนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของผักบุ้งรั้ว

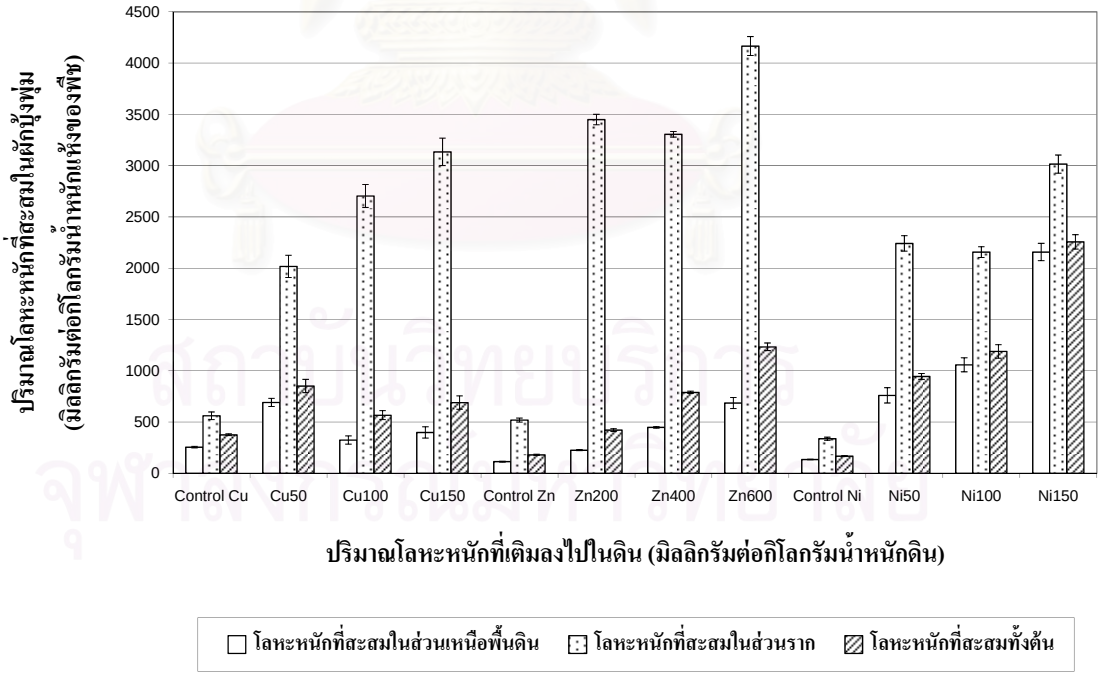
ผลการศึกษาพบว่า ผักบุ้งรั้วจะสะสมสังกะสีในส่วนรากได้มากกว่าส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ที่ทุกระดับความเข้มข้นของสังกะสี ผักบุ้งรั้วที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสี 600 มิลลิกรัม

ต่อกิโลกรัม จะสะสมสังกะสีในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นได้มากที่สุดเท่ากับ 501 2,156 และ 813 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

ผักบุ้งรั้วจะสะสมนิกเกิลในส่วนรากได้มากกว่าในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ที่ทุกความเข้มข้นของนิกเกิล ผักบุ้งรั้วที่ปลูกในดินที่มีการเติมนิกเกิล 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นได้มากที่สุดเท่ากับ 2,147 2,369 และ 2,182 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

(ค) การสะสมทองแดง สังกะสีและนิกเกิลของผักบุ้งพุ่ม

ผักบุ้งพุ่มมีความสามารถในการสะสมทองแดงในรากได้มากกว่าในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ที่ทุกความเข้มข้นของทองแดง ผักบุ้งพุ่มที่ปลูกในดินที่เติมทองแดงความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมทองแดงไว้ในรากมากที่สุดเท่ากับ 3,134 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ส่วนผักบุ้งพุ่มที่ปลูกในดินที่เติมทองแดงความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมทองแดงไว้ในส่วนเหนือพื้นดินและทั้งต้นได้มากที่สุดเท่ากับ 690 และ 850 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (ภาพที่ 10)



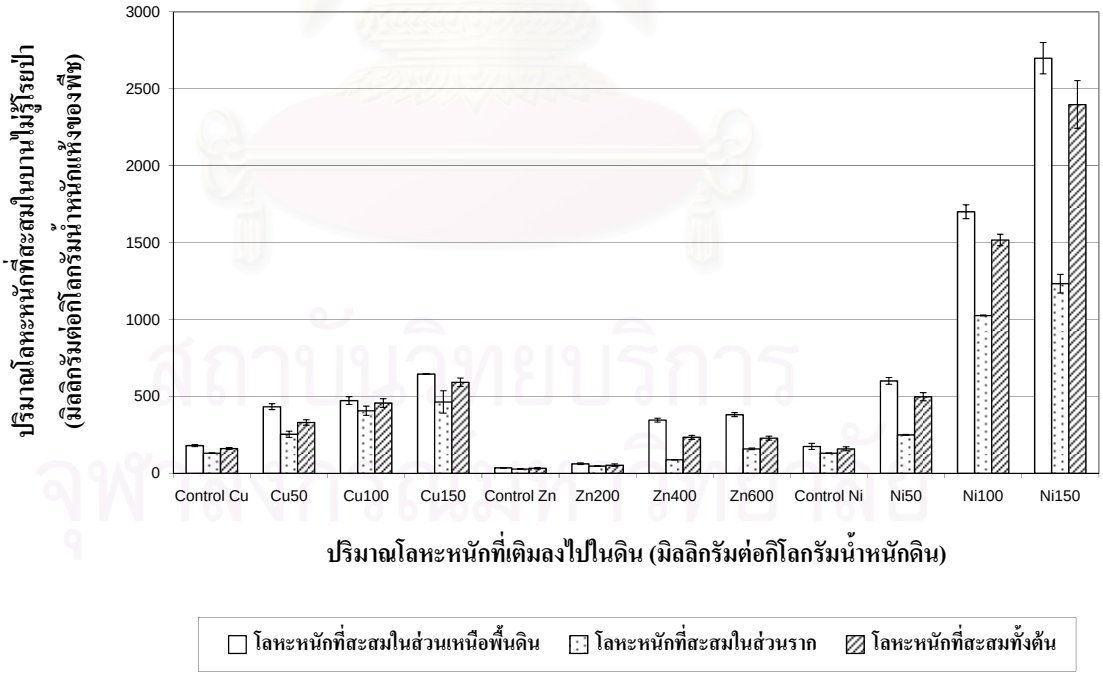
ภาพที่ 10 การสะสมทองแดง สังกะสีและนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของผักบุ้งพุ่ม

ผลการศึกษาพบว่า ผักบุ้งพุ่มจะสะสมสังกะสีในส่วนรากได้มากกว่าส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ที่ทุกระดับความเข้มข้นของสังกะสี ผักบุ้งพุ่มที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสี 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมสังกะสีในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นได้มากที่สุด เท่ากับ 684 4,166 และ 1,232 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

ผักบุ้งพุ่มจะสะสมนิกเกิลในส่วนรากได้มากกว่าในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ที่ทุกความเข้มข้นของนิกเกิล ผักบุ้งพุ่มที่ปลูกในดินที่มีการเติมนิกเกิล 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นได้มากที่สุดเท่ากับ 2,157 3,015 และ 2,256 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

(ง) การสะสมทองแดง สังกะสีและนิกเกิลของบานไม่รู้โรยป่า

บานไม่รู้โรยป่าจะสะสมทองแดงไว้ในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินมากกว่าส่วนราก ที่ทุกความเข้มข้นของทองแดง สำหรับบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมทองแดงความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมทองแดงไว้ในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นได้มากที่สุด เท่ากับ 645 463 และ 591 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (ภาพที่ 11)



ภาพที่ 11 การสะสมทองแดง สังกะสีและนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของบานไม่รู้โรยป่า

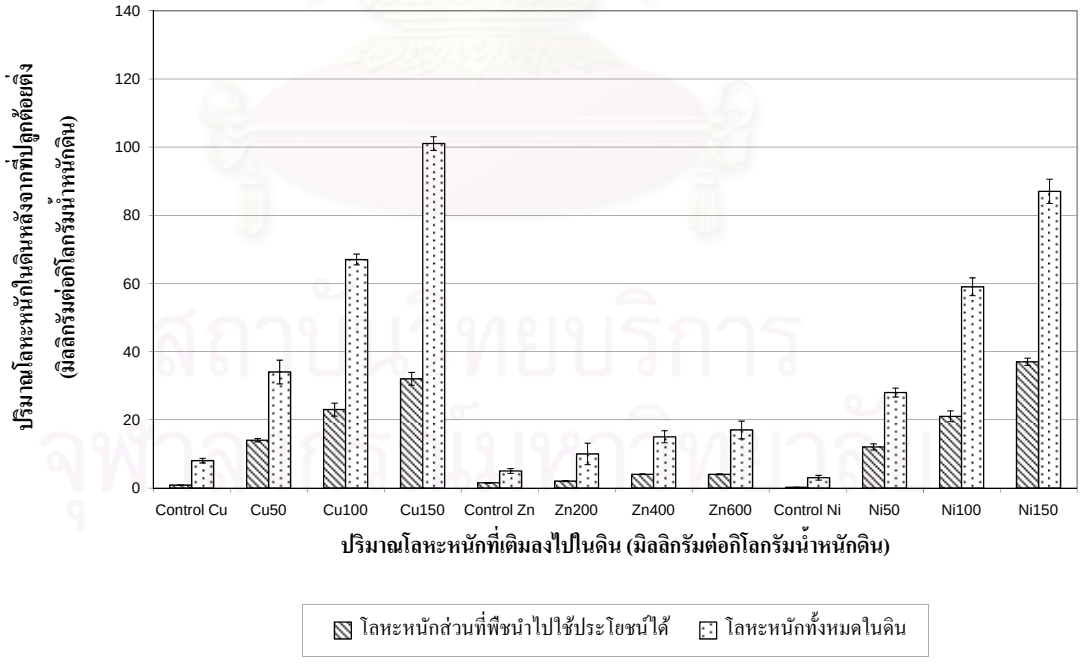
ผลการศึกษาพบว่า บานไม่รู้โรยป่าจะสะสมสังกะสีในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้มากกว่าในส่วนราก ที่ทุกระดับความเข้มข้นของสังกะสี บานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสี 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมสังกะสีในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นได้มากที่สุดเท่ากับ 380 158 และ 228 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

บานไม่รู้โรยป่าจะสะสมนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้มากกว่าส่วนราก ที่ทุกความเข้มข้นของนิกเกิล บานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่มีการเติมนิกเกิล 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นได้มากที่สุดเท่ากับ 2,698 1,232 และ 2,397 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

1.3 ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินที่ปลูกพืช ทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลทั้งหมดในดิน

(ก) ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินหลังจากที่ปลูกต้อยติ่ง

หลังจากการเก็บเกี่ยวต้อยติ่ง และนำดินที่ปลูกพืชมาวิเคราะห์พบว่า ในดินที่เติมทองแดงความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะมีปริมาณทองแดงในรูปที่พืชนำมาใช้ประโยชน์ได้

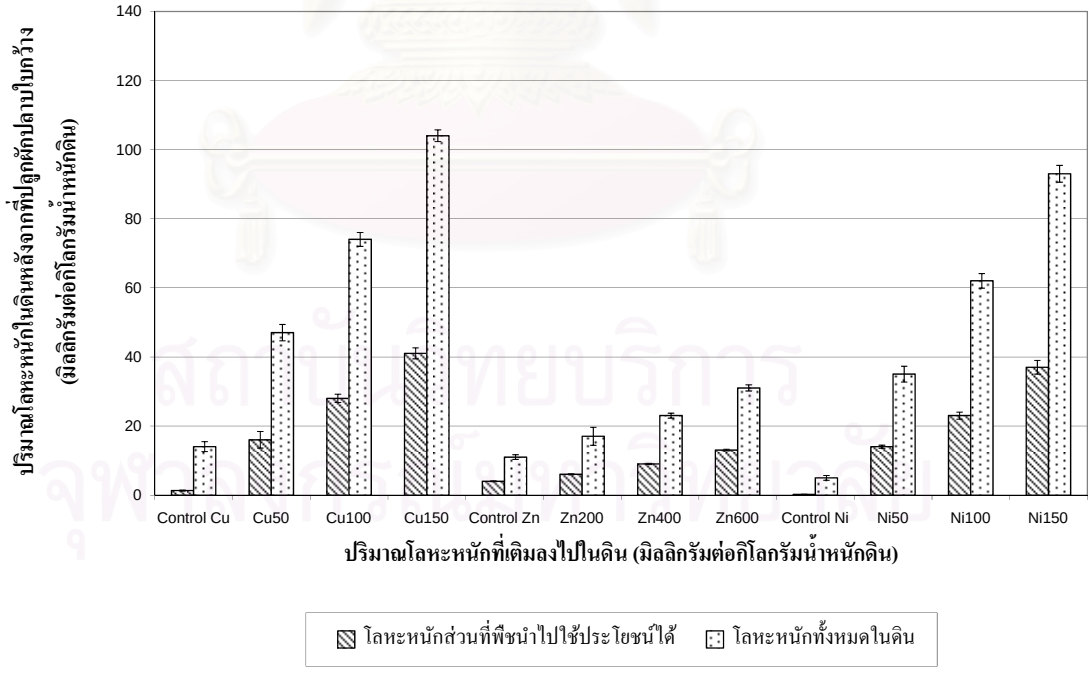


ภาพที่ 12 ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินหลังจากที่ปลูกต้อยติ่งทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และปริมาณทั้งหมดในดิน

และปริมาณทองแดงทั้งหมดเหลืออยู่ในดินมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 32 และ 101 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักดิน (ภาพที่ 12) ส่วนในดินที่เติมสังกะสีความเข้มข้น 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะมีปริมาณสังกะสีในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณสังกะสีทั้งหมดเหลืออยู่ในดินมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 4 และ 17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักดิน ส่วนในดินที่เติมนิกเกิลความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะมีปริมาณนิกเกิลในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณนิกเกิลทั้งหมดเหลืออยู่ในดินมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 37 และ 87 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักดิน

(ข) ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินหลังจากที่ปลูกผักปลาบใบกว้าง

หลังจากการเก็บเกี่ยวผักปลาบใบกว้าง และนำดินที่ปลูกพืชมาวิเคราะห์พบว่า ในดินที่เติมทองแดงความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะมีปริมาณทองแดงในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และปริมาณทองแดงทั้งหมดเหลืออยู่ในดินมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 41 และ 104 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักดิน (ภาพที่ 13) ส่วนในดินที่เติมสังกะสีความเข้มข้น 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะมีปริมาณสังกะสีในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณสังกะสีทั้งหมด

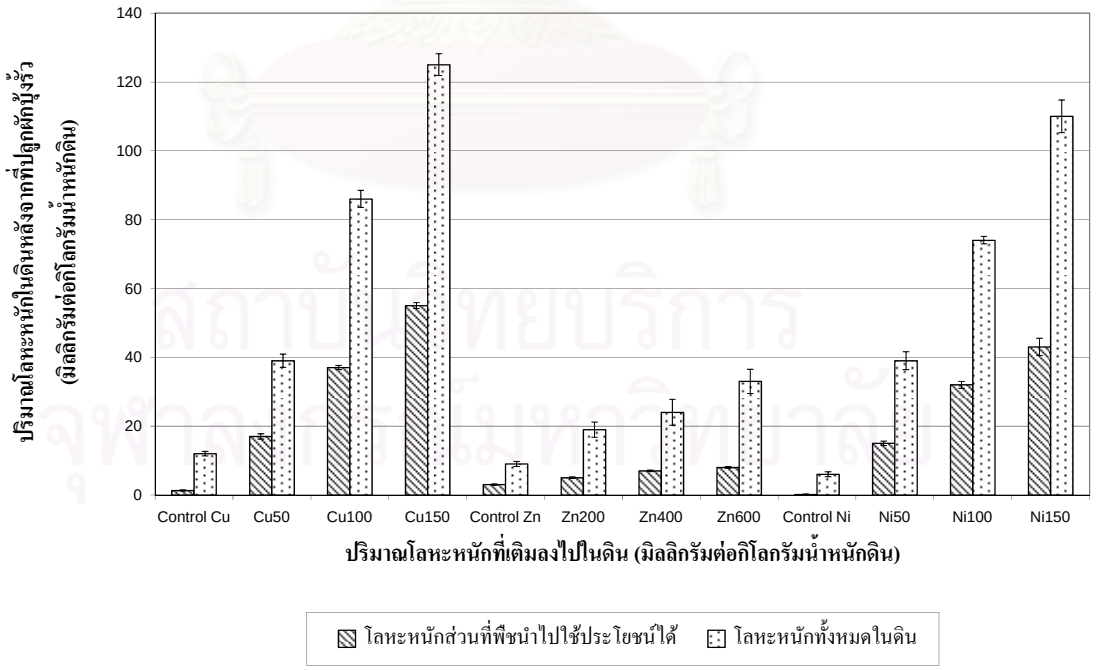


ภาพที่ 13 ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินหลังจากที่ปลูกผักปลาบใบกว้าง ทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และปริมาณทั้งหมดในดิน

เหลืออยู่ในดินมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 13 และ 31 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักดิน ส่วนในดินที่เติมนิกเกิลความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะมีปริมาณนิกเกิลในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณนิกเกิลทั้งหมดเหลืออยู่ในดินมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 37 และ 93 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักดิน

(ค) ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินหลังจากที่ปลูกผักบุ้งรั้ว

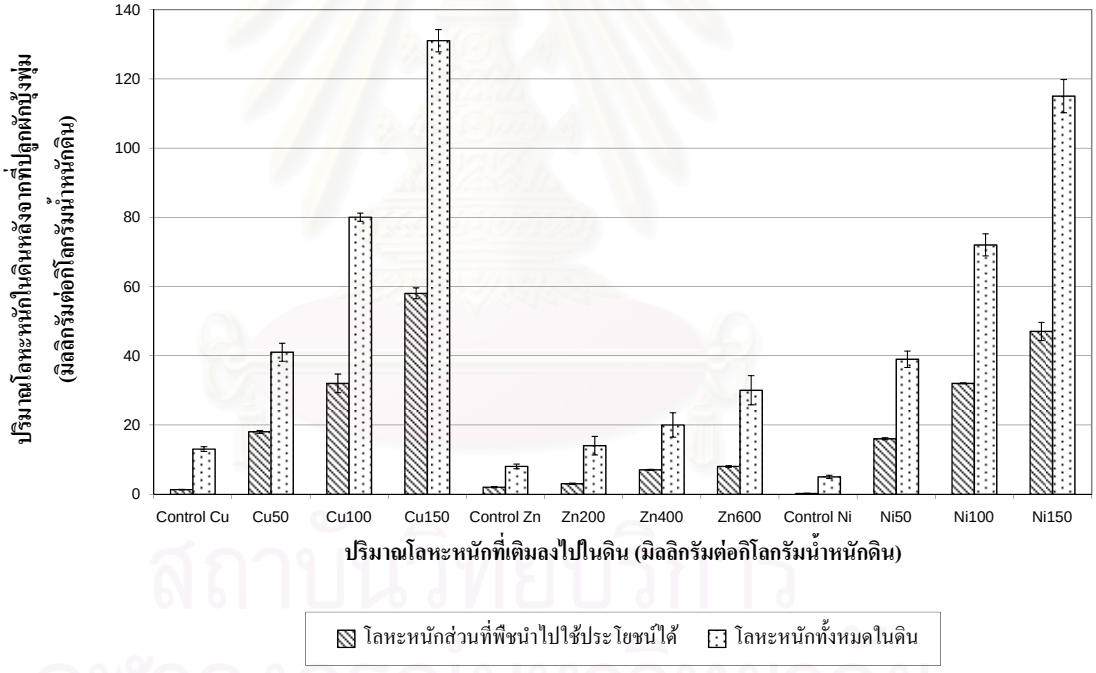
หลังจากการเก็บเกี่ยวผักบุ้งรั้ว และนำดินที่ปลูกพืชมาวิเคราะห์พบว่า ในดินที่เติมทองแดงความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะมีปริมาณทองแดงในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และปริมาณทองแดงทั้งหมดเหลืออยู่ในดินมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 55 และ 125 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักดิน (ภาพที่ 14) ส่วนในดินที่เติมสังกะสีความเข้มข้น 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะมีปริมาณสังกะสีในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณสังกะสีทั้งหมดเหลืออยู่ในดินมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 8 และ 33 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักดิน ส่วนในดินที่เติมนิกเกิลความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะมีปริมาณนิกเกิลในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณนิกเกิลทั้งหมดเหลืออยู่ในดินมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 43 และ 110 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักดิน



ภาพที่ 14 ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินหลังจากที่ปลูกผักบุ้งรั้วทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และปริมาณทั้งหมดในดิน

(ง) ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินหลังจากที่ปลูกผักบุ้งพุ่ม

หลังจากการเก็บเกี่ยวผักบุ้งพุ่ม และนำดินที่ปลูกพืชมาวิเคราะห์จะพบว่า ในดินที่เติมทองแดงความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะมีปริมาณทองแดงในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และปริมาณทองแดงทั้งหมดเหลืออยู่ในดินมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 58 และ 131 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักดิน (ภาพที่ 15) ส่วนในดินที่เติมสังกะสีความเข้มข้น 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะมีปริมาณสังกะสีในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณสังกะสีทั้งหมดเหลืออยู่ในดินมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 8 และ 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักดิน ส่วนในดินที่เติมนิกเกิลความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะมีปริมาณนิกเกิลในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณนิกเกิลทั้งหมดเหลืออยู่ในดินมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 47 และ 115 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักดิน

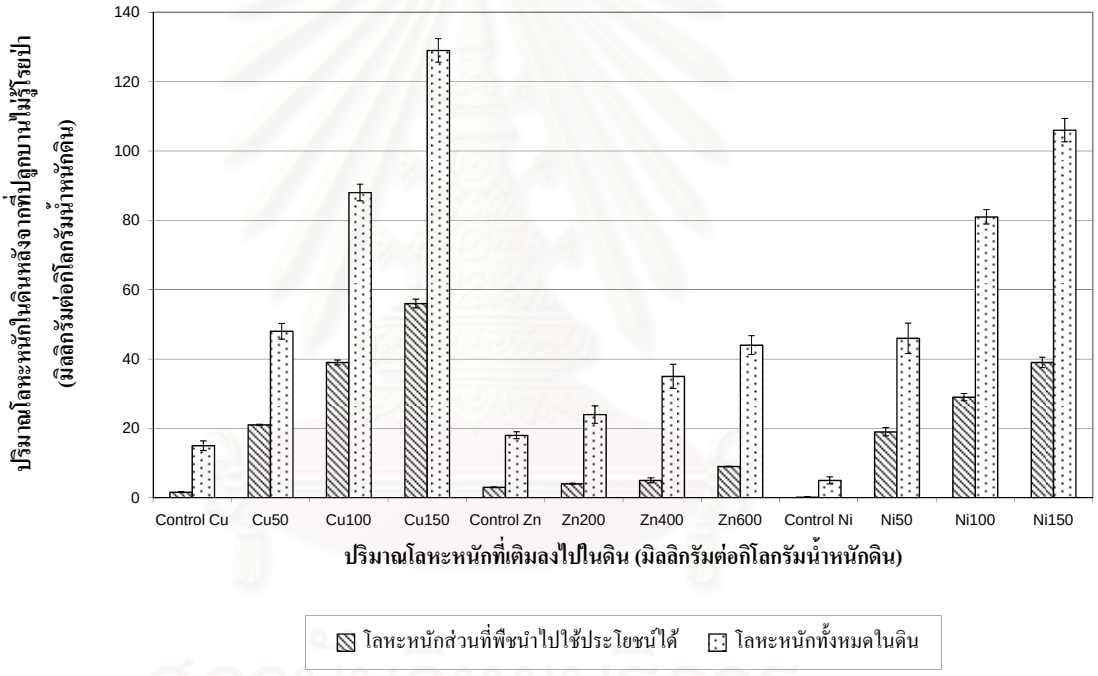


ภาพที่ 15 ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินหลังจากที่ปลูกผักบุ้งพุ่มทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และปริมาณทั้งหมดในดิน

(จ) ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินหลังจากที่ปลูกบานไม่รู้โรยป่า

หลังจากการเก็บเกี่ยวบานไม่รู้โรยป่า และนำดินที่ปลูกพืชมาวิเคราะห์พบว่า ในดินที่

เติมทองแดงความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะมีปริมาณทองแดงในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และปริมาณทองแดงทั้งหมดเหลืออยู่ในดินมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 56 และ 129 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักดิน (ภาพที่ 16) ส่วนในดินที่เติมสังกะสีความเข้มข้น 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะมีปริมาณสังกะสีในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณสังกะสีทั้งหมดเหลืออยู่ในดินมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 9 และ 44 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักดิน ส่วนในดินที่เติมนิกเกิลความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะมีปริมาณนิกเกิลในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณนิกเกิลทั้งหมดเหลืออยู่ในดินมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 39 และ 106 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักดิน



ภาพที่ 16 ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินหลังจากที่ปลูกบานไม่รู้โรยป่า ทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และปริมาณทั้งหมดในดิน

2. การเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิลของวัชพืชโดยการเติมตัวคีเลตและกรดอินทรีย์

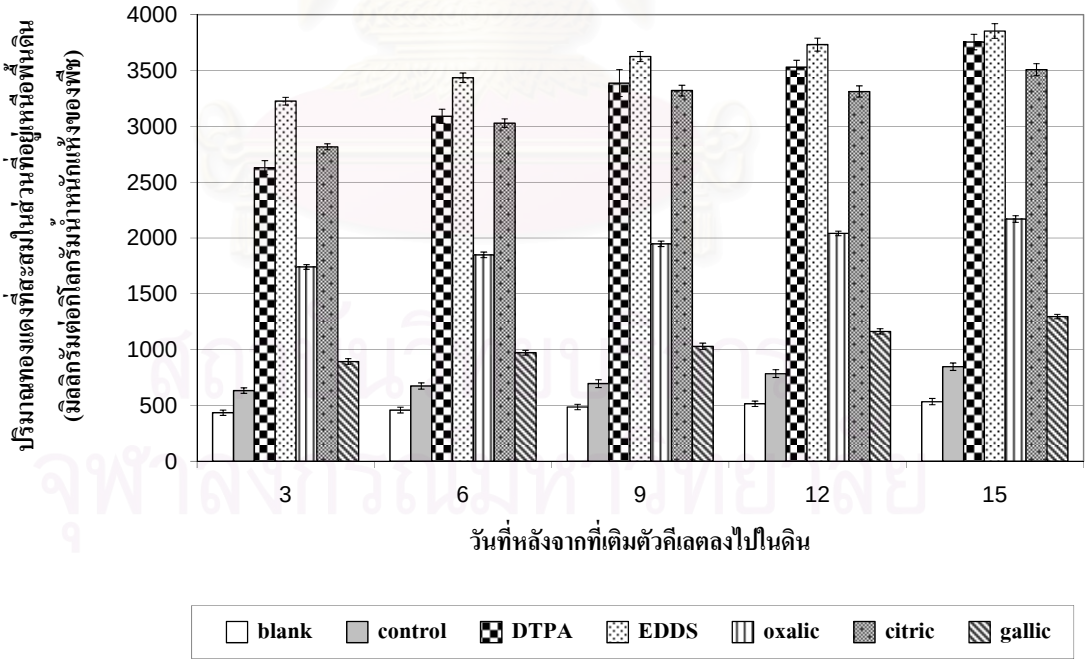
จากผลการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิล ของวัชพืชทั้ง 5 ชนิด คือ ต้อยติ่ง ผักปลาบใบกว้าง ผักปั่งรั้ว ผักปั่งพุ่ม และบานไม่รู้โรยป่า พบว่าต้อยติ่งมีความสามารถในการสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิลได้มากที่สุด ดังนั้นในการศึกษา

ขั้นที่ 2 จึงเลือกที่จะใช้ต้อยติ่ง และศึกษาผลของการเติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิลของต้อยติ่ง รวมทั้งผลของการเติมตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ทั้ง 5 ชนิดที่มีต่อจุลินทรีย์ดิน

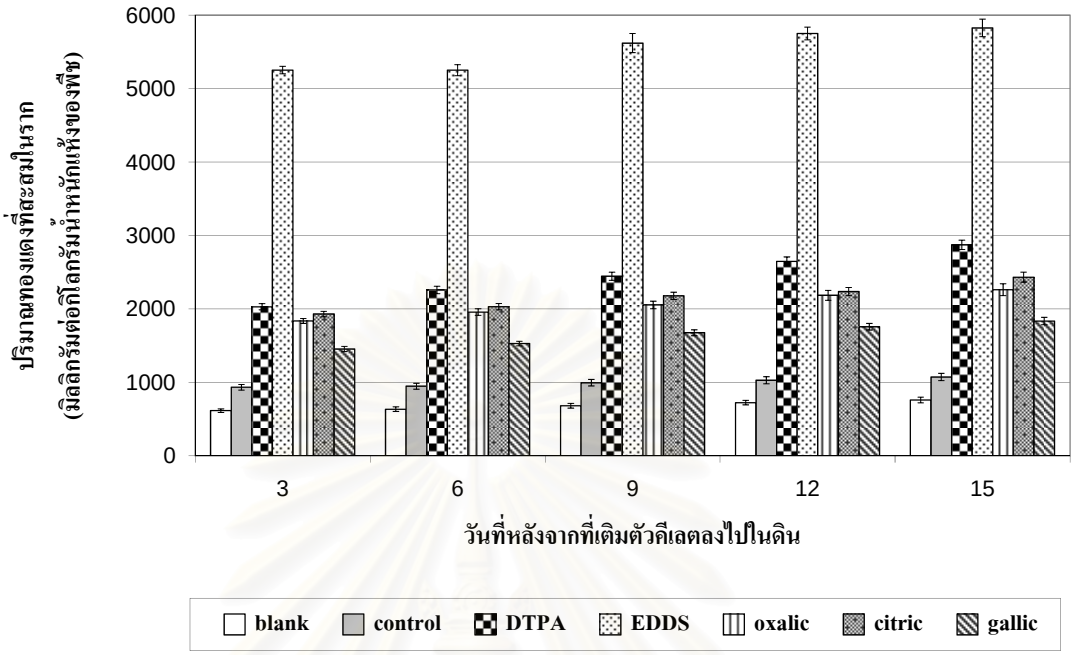
2.1 ผลของการเติมตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ทั้ง 5 ชนิดต่อการสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิลของต้อยติ่ง

2.1.1 การสะสมทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของต้อยติ่ง เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก

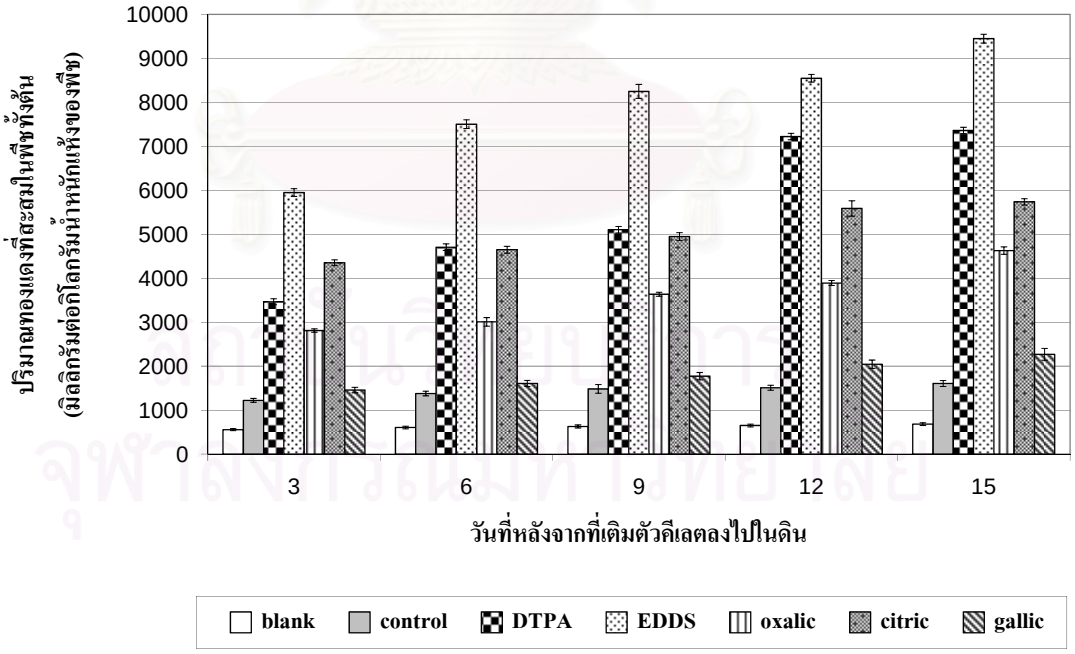
การสะสมทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของต้อยติ่งในชุด blank (ไม่เติมทองแดงและไม่เติมตัวคีเลต) ชุด control (เติมทองแดง แต่ไม่เติมตัวคีเลต) ชุดที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิกจะมีค่าน้อยที่สุดในวันที่ 3 และมีค่ามากที่สุดในวันที่ 15 ลำดับของการสะสมทองแดงในที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของต้อยติ่งในทุกชุดการทดลองเป็นดังนี้ วันที่ 15 > 12 > 9 > 6 > 3 (ดังแสดงในภาพที่ 17 18 และ 19)



ภาพที่ 17 ปริมาณทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินของต้อยติ่งเมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก



ภาพที่ 18 ปริมาณทองแดงในส่วนรากของต้อยติ่งเมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก



ภาพที่ 19 ปริมาณทองแดงในต้อยติ่งทั้งต้นเมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก

ตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อการสะสมทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน และทั้งต้นของต้อยติ่ง เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 เรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ EDDS > กรดซิตริก > DTPA > กรดออกซาลิก > กรดกัลลิก แต่เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 6 9 12 และ 15 พบว่าตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อการสะสมทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน และทั้งต้นของต้อยติ่งจะเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ EDDS > DTPA > กรดซิตริก > กรดออกซาลิก > กรดกัลลิก

ตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อการสะสมทองแดงในส่วนรากของต้อยติ่ง เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 เรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ EDDS > DTPA > กรดซิตริก > กรดออกซาลิก > กรดกัลลิก

จากผลการทดลองพบว่า EDDS มีผลต่อปริมาณทองแดงที่สะสมในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของต้อยติ่งมากที่สุดและมีค่าเท่ากับ 3,854 5,827 และ 9,450 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 15

เมื่อเปรียบเทียบผลของตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ ต่อการสะสมทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน และส่วนรากของต้อยติ่งพบว่า ชุด blank ชุด control ชุดที่เติม EDDS กรดออกซาลิก และกรดกัลลิกจะทำให้ต้อยติ่งสะสมทองแดงในรากมากกว่าในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนชุดการทดลองที่เติม DTPA และกรดซิตริก จะทำให้ต้อยติ่งสะสมทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินมากกว่าส่วนราก

2.1.2 การสะสมสังกะสีในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของต้อยติ่งเมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก

การสะสมสังกะสีในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของต้อยติ่งในชุด blank (ไม่เติมสังกะสีและไม่เติมตัวคีเลต) ชุด control (เติมสังกะสี แต่ไม่เติมตัวคีเลต) ชุดที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิกจะมีค่าน้อยที่สุดในวันที่ 3 และมีค่ามากที่สุดในวันที่ 15 ลำดับของการสะสมสังกะสีในที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของต้อยติ่งในทุกชุดการทดลองเป็นดังนี้ วันที่ 15 > 12 > 9 > 6 > 3 (ดังแสดงในภาพที่ 20 21 และ 22)

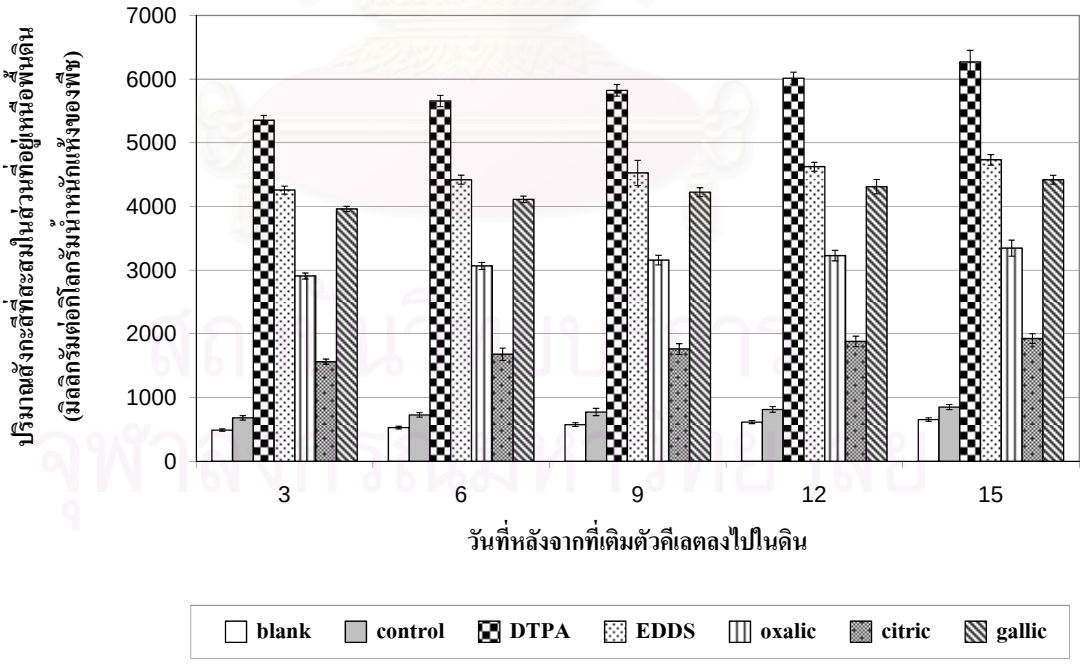
ตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อการสะสมสังกะสีในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน และทั้งต้นของต้อยติ่ง เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 เรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ DTPA > EDDS > กรดกัลลิก > กรดออกซาลิก > กรดซิตริก

ตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อการสะสมสังกะสีในส่วนรากของต้อยติ่ง เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 เรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ กรดกัลลิก > EDDS > DTPA > กรด

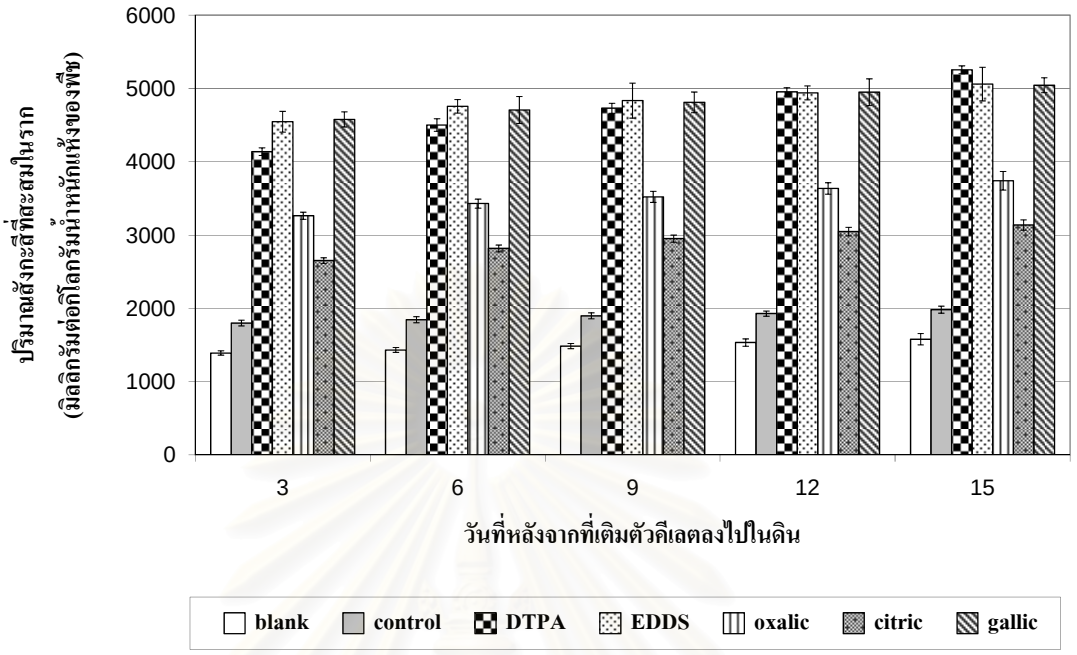
ออกซาลิก > กรดซิตริก แต่เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 6 และ 9 ตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อการสะสมสังกะสีในรากของต้อยติ่งจะเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ EDDS > กรดกัลลิก > DTPA > กรดออกซาลิก > กรดซิตริก เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 12 การสะสมสังกะสีจะเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ DTPA > กรดกัลลิก > EDDS > กรดออกซาลิก > กรดซิตริก และเมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 15 การสะสมสังกะสีจะเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ DTPA > EDDS > กรดกัลลิก > กรดออกซาลิก > กรดซิตริก

จากผลการทดลองพบว่า DTPA มีผลต่อปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของต้อยติ่งมากที่สุดและมีค่าเท่ากับ 6,272 5,253 และ 6,190 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 15

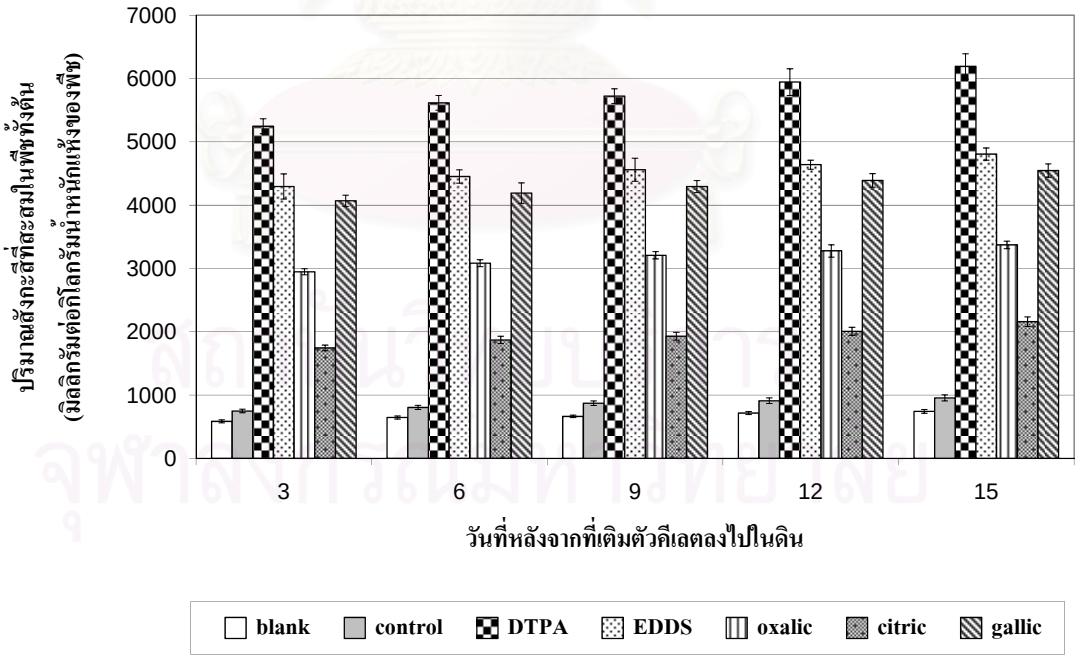
เมื่อเปรียบเทียบผลของตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ต่อการสะสมสังกะสี ในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน และส่วนรากของต้อยติ่งพบว่า ชุด blank ชุด control ชุดที่เติม EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิกจะทำให้ต้อยติ่งสะสมสังกะสีในรากมากกว่าในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนชุดการทดลองที่เติม DTPA จะมีผลให้ต้อยติ่งสะสมสังกะสีในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินมากกว่าส่วนราก



ภาพที่ 20 ปริมาณสังกะสีในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินของต้อยติ่งเมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก



ภาพที่ 21 ปริมาณสังกะสีในส่วนรากของต้อยติ่งเมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก

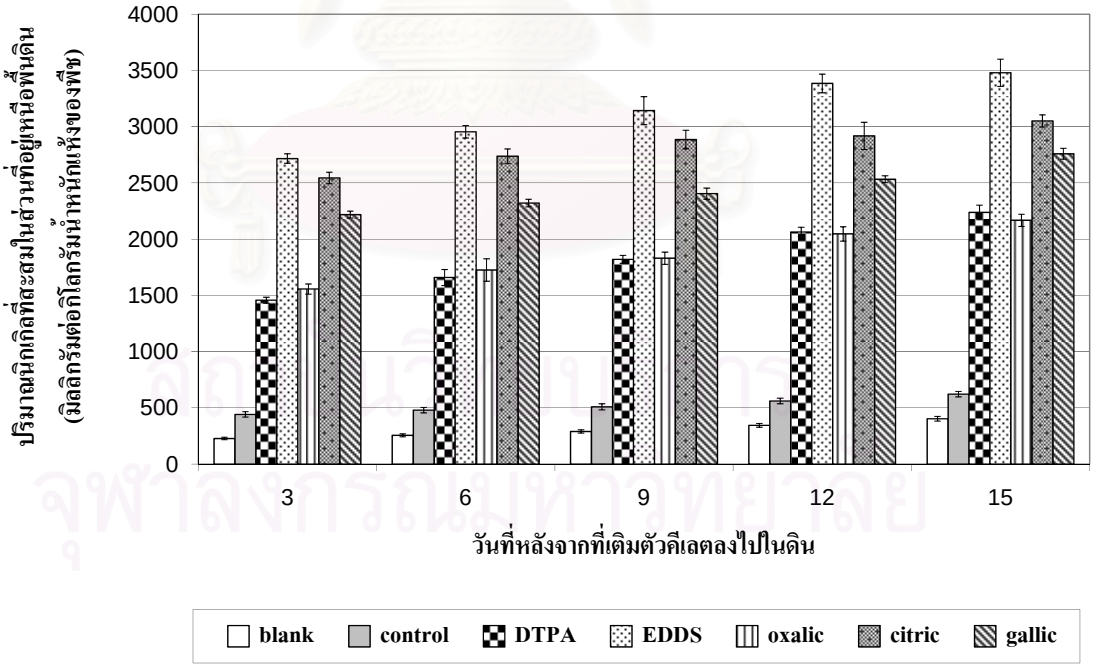


ภาพที่ 22 ปริมาณสังกะสีในต้อยติ่งทั้งต้นเมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก

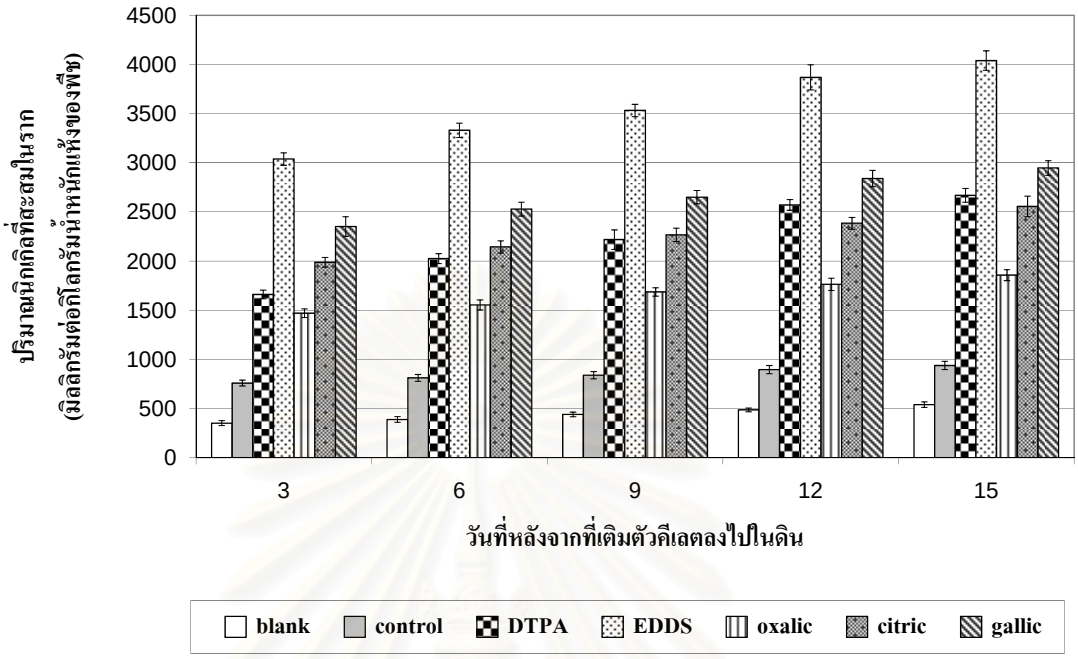
2.1.3 การสะสมนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของต้อยติ่งเมื่อเมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก

การสะสมนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของต้อยติ่งในชุด blank (ไม่เติมนิกเกิลและไม่เติมตัวคีเลต) ชุด control (เติมนิกเกิล แต่ไม่เติมตัวคีเลต) ชุดที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิกจะมีค่าน้อยที่สุดในวันที่ 3 และมีค่ามากที่สุดในวันที่ 15 ลำดับของการสะสมนิกเกิลในที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของต้อยติ่งในทุกชุดการทดลองเป็นดังนี้ วันที่ 15 > 12 > 9 > 6 > 3 (ดังแสดงในภาพที่ 23 24 และ 25)

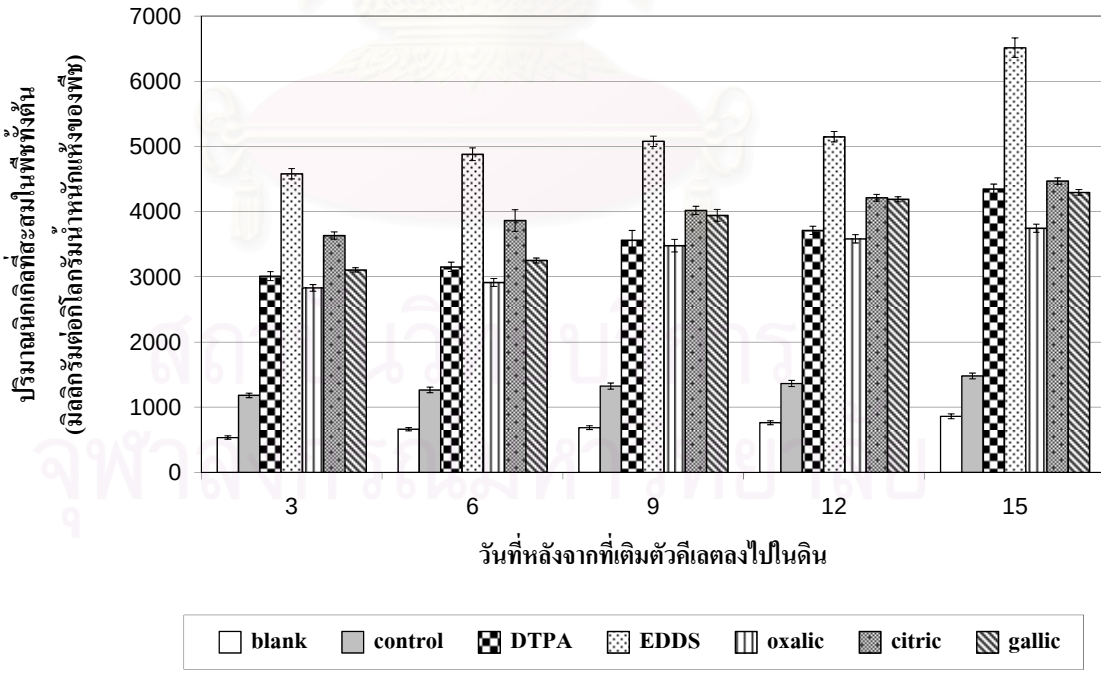
ตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อการสะสมนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินของต้อยติ่ง เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 และ 9 เรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ EDDS > กรดซิตริก > กรดกัลลิก > กรดออกซาลิก > DTPA แต่เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 12 และ 15 ตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อการสะสมนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินของต้อยติ่ง จะเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ EDDS > กรดซิตริก > กรดกัลลิก > DTPA > กรดออกซาลิก



ภาพที่ 23 ปริมาณนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินของต้อยติ่งเมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก



ภาพที่ 24 ปริมาณนิกเกิลในส่วนรากของต้อยติ่งเมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก



ภาพที่ 25 ปริมาณนิกเกิลในต้อยติ่งทั้งต้นเมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก

ตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อการสะสมนิกเกิลในส่วนรากของต้อยติ่ง เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 และ 9 เรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ EDDS > กรดกัลลิก > กรดซิตริก > DTPA > กรดออกซาลิก แต่เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 12 และ 15 ตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อการสะสมนิกเกิลในส่วนรากของต้อยติ่ง จะเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ EDDS > กรดกัลลิก > DTPA > กรดซิตริก > กรดออกซาลิก

ตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อการสะสมนิกเกิลในต้อยติ่งทั้งต้น เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 และ 12 เรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ EDDS > กรดซิตริก > กรดกัลลิก > DTPA > กรดออกซาลิก แต่เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 15 ตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อการสะสมนิกเกิลในต้อยติ่งทั้งต้น จะเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ EDDS > กรดซิตริก > DTPA > กรดกัลลิก > กรดออกซาลิก

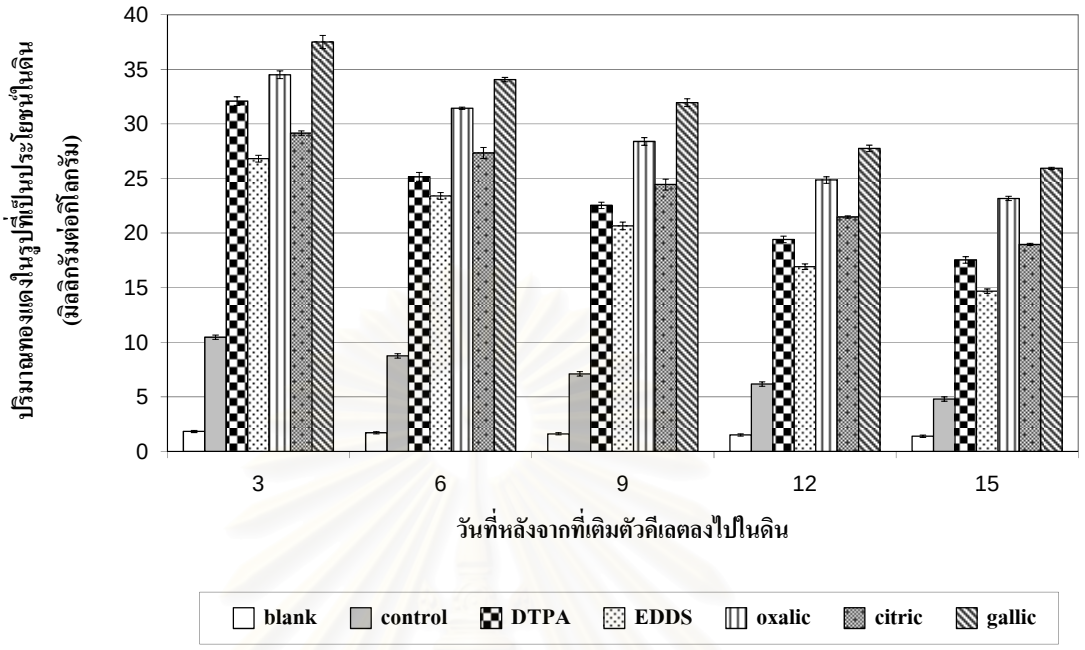
จากผลการทดลองพบว่า EDDS มีผลต่อปริมาณนิกเกิลที่สะสมในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของต้อยติ่งมากที่สุดและมีค่าเท่ากับ 3,480 4,039 และ 6,515 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 15

เมื่อเปรียบเทียบผลของตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ต่อการสะสมนิกเกิล ในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน และส่วนรากของต้อยติ่งพบว่า ชุด blank ชุด control ชุดที่เติม DTPA EDDS และกรดกัลลิกจะทำให้ต้อยติ่งสะสมสังกะสีในรากมากกว่าในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนชุดการทดลองที่เติมกรดออกซาลิก และ กรดซิตริก จะมีผลให้ต้อยติ่งสะสมนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินมากกว่าส่วนราก

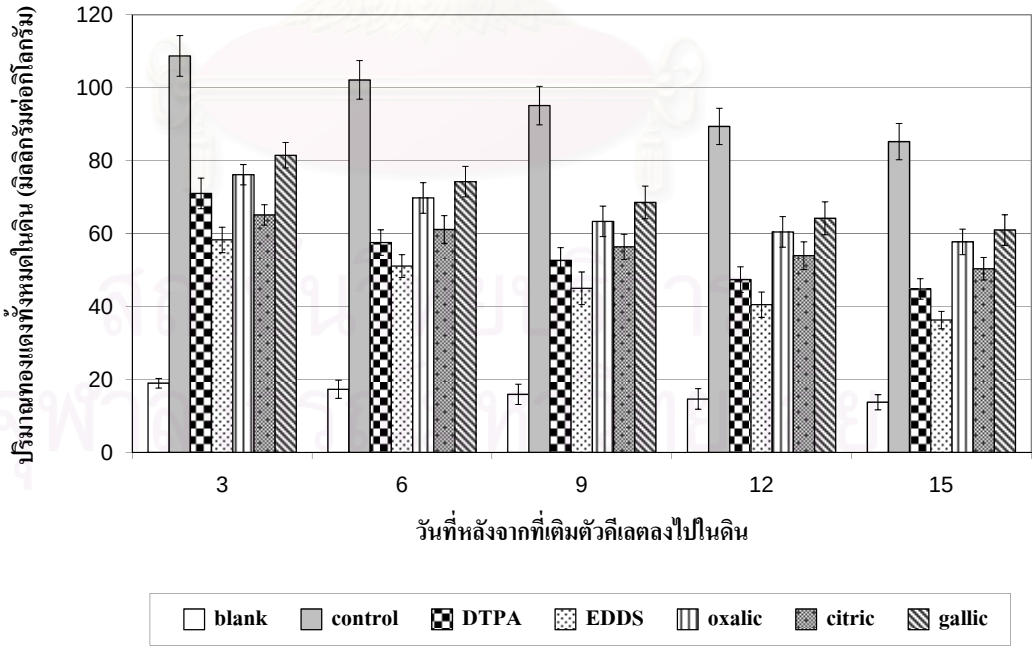
2.1.4 ปริมาณทองแดงที่เหลืออยู่ในดินที่ปลูกต้อยติ่ง ทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณทองแดงทั้งหมด เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก

ปริมาณทองแดงที่เหลืออยู่ในดินที่ปลูกต้อยติ่ง ทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณทองแดงทั้งหมดในชุด blank (ไม่เติมทองแดงและไม่เติมตัวคีเลต) ชุด control (เติมทองแดง แต่ไม่เติมตัวคีเลต) ชุดที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิกมีค่ามากที่สุดในวันที่ 3 และมีค่าน้อยที่สุดในวันที่ 15 ลำดับของปริมาณทองแดงที่เหลืออยู่ในดินในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณทองแดงทั้งหมดในทุกชุดการทดลองเป็นดังนี้ วันที่ 3 > 6 > 9 > 12 > 15 (ดังแสดงในภาพที่ 26 และ 27)

ตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อปริมาณทองแดงที่เหลืออยู่ในดิน ในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณทองแดงทั้งหมด เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 เรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ กรดกัลลิก > กรดออกซาลิก > DTPA > กรดซิตริก > EDDS



ภาพที่ 26 ปริมาณทองแดงที่เหลืออยู่ในดินในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก



ภาพที่ 27 ปริมาณทองแดงที่เหลืออยู่ในดินทั้งหมด เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก

แต่เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 6 9 12 และ 15 จะเรียงตามลำดับดังนี้คือ กรดกัลลิก > กรดออกซาลิก > กรดซิตริก > DTPA > EDDS

ปริมาณทองแดงในดินในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณทองแดงทั้งหมดในชุด blank จะมีค่าน้อยที่สุด ส่วนปริมาณทองแดงทั้งหมดในชุด control จะมีค่ามากที่สุด

เมื่อเปรียบเทียบผลของตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ทั้ง 5 ชนิด พบว่าเมื่อเก็บเกี่ยวต้อยติ่งในวันที่ 15 ปริมาณทองแดงที่เหลืออยู่ในดินในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณทองแดงทั้งหมดมีค่าน้อยที่สุดในชุดการทดลองที่เติม EDDS ซึ่งมีค่าเท่ากับ 14.7 และ 36.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

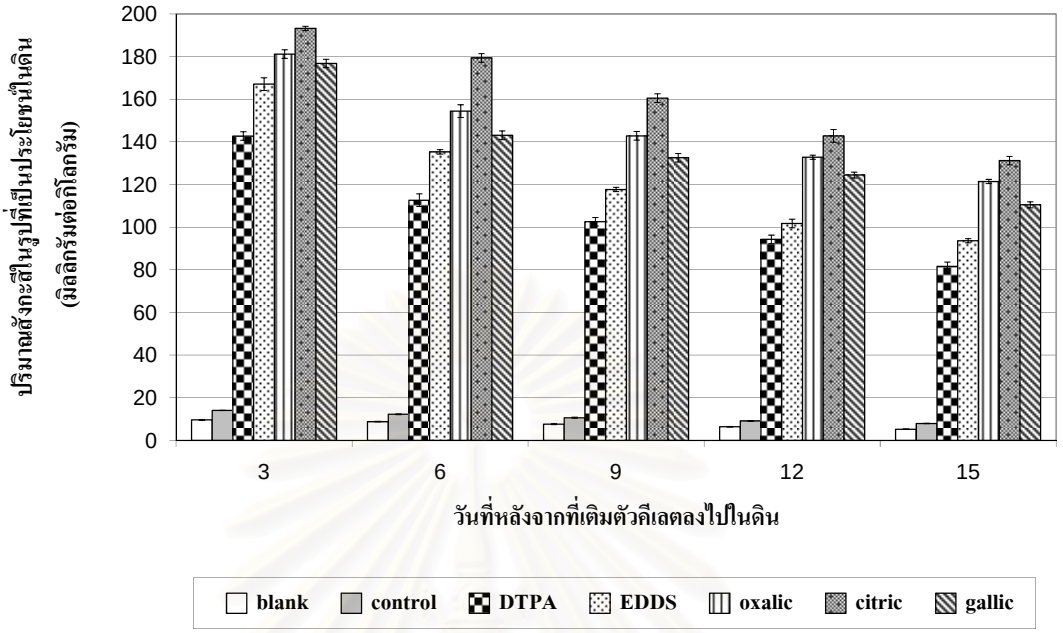
2.1.5 ปริมาณสังกะสีที่เหลืออยู่ในดินที่ปลูกต้อยติ่ง ทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณสังกะสีทั้งหมด เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก

ปริมาณสังกะสีที่เหลืออยู่ในดินที่ปลูกต้อยติ่งทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณสังกะสีทั้งหมดในชุด blank (ไม่เติมสังกะสีและไม่เติมตัวคีเลต) ชุด control (เติมสังกะสี แต่ไม่เติมตัวคีเลต) ชุดที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิกมีค่ามากที่สุดในวันที่ 3 และมีค่าน้อยที่สุดในวันที่ 15 ลำดับของปริมาณสังกะสีที่เหลืออยู่ในดินในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณสังกะสีทั้งหมดในทุกชุดการทดลองเป็นดังนี้ วันที่ 3 > 6 > 9 > 12 > 15 (ดังแสดงในภาพที่ 28 และ 29)

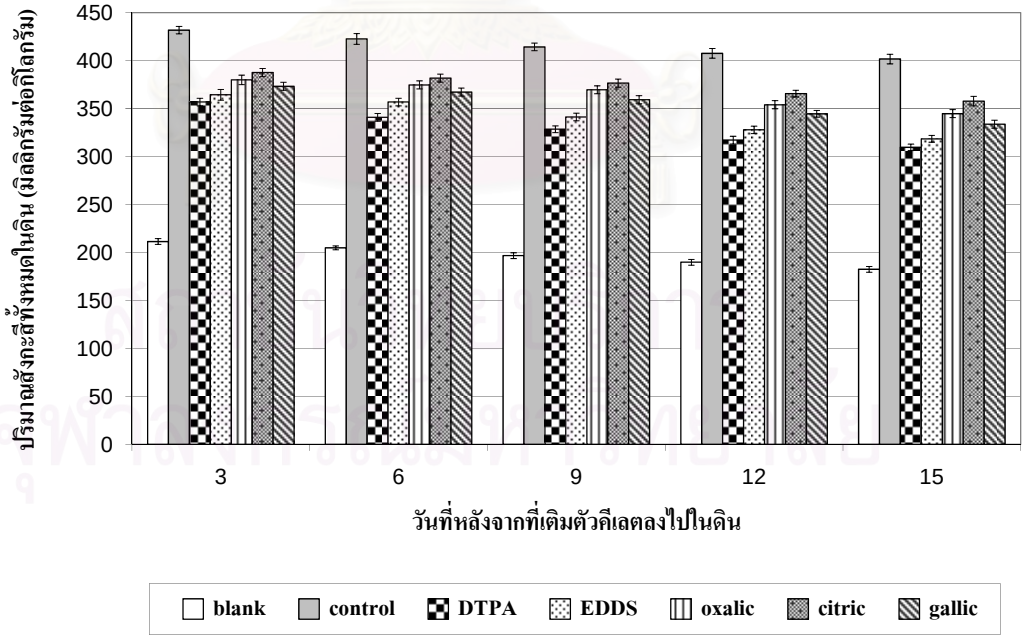
ตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อปริมาณสังกะสีที่เหลืออยู่ในดิน ในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณสังกะสีทั้งหมด เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 เรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้คือ กรดซิตริก > กรดออกซาลิก > กรดกัลลิก > EDDS > DTPA

ปริมาณสังกะสีในดินในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณสังกะสีทั้งหมดในชุด blank จะมีค่าน้อยที่สุด ส่วนปริมาณสังกะสีทั้งหมดในชุด control จะมีค่ามากที่สุด

เมื่อเปรียบเทียบผลของตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ทั้ง 5 ชนิด พบว่าเมื่อเก็บเกี่ยวต้อยติ่งในวันที่ 15 ปริมาณสังกะสีที่เหลืออยู่ในดินในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณสังกะสีทั้งหมดมีค่าน้อยที่สุดในชุดการทดลองที่เติม DTPA ซึ่งมีค่าเท่ากับ 81.6 และ 309 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ



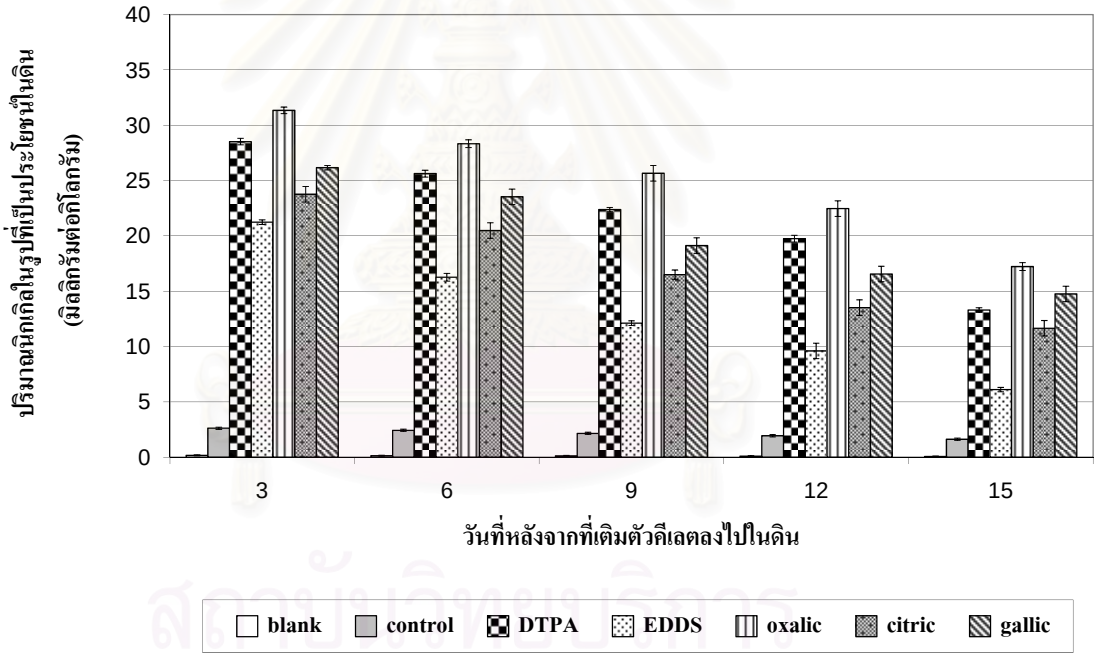
ภาพที่ 28 ปริมาณสังกะสีที่เหลืออยู่ในดินในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก



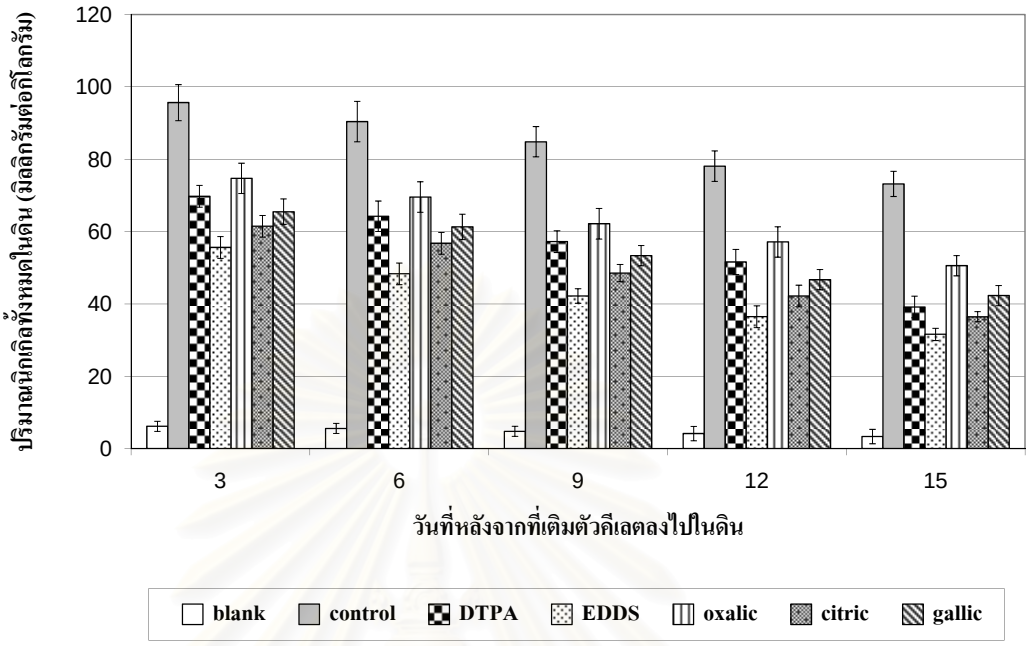
ภาพที่ 29 ปริมาณสังกะสีที่เหลืออยู่ในดินทั้งหมด เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก

2.1.6 ปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินที่ปลูกต้อยติ่ง ทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณนิกเกิลทั้งหมด เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก

ปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินที่ปลูกต้อยติ่ง ทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณนิกเกิลทั้งหมดในชุด blank (ไม่เติมนิกเกิลและไม่เติมตัวคีเลต) ชุด control (เติมนิกเกิลแต่ไม่เติมตัวคีเลต) ชุดที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิกมีค่ามากที่สุดในวันที่ 3 และมีค่าน้อยที่สุดในวันที่ 15 ลำดับของปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณนิกเกิลทั้งหมดในทุกชุดการทดลองเป็นดังนี้ วันที่ 3 > 6 > 9 > 12 > 15 (ดังแสดงในภาพที่ 30 และ 31)



ภาพที่ 30 ปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก



ภาพที่ 31 ปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินทั้งหมด เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก

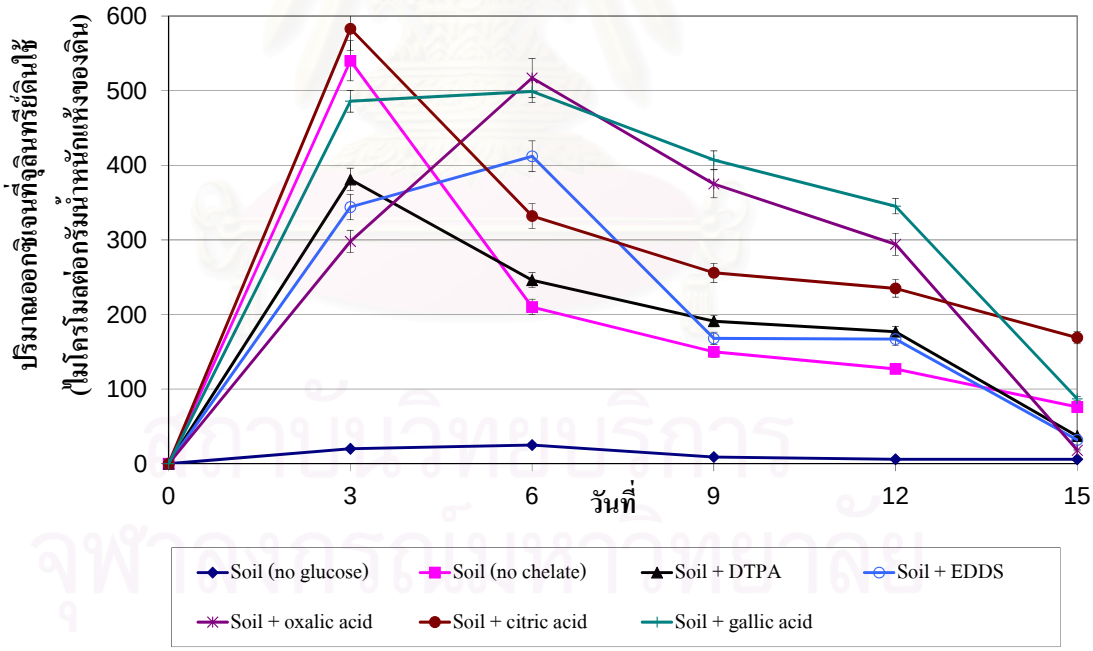
ตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดิน ในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณนิกเกิลทั้งหมด เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 และ 12 เรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ กรดออกซาลิก > DTPA > กรดกัลลิก > กรดซิตริก > EDDS แต่เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 15 ตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินจะเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ กรดออกซาลิก > กรดกัลลิก > DTPA > กรดซิตริก > EDDS

ปริมาณนิกเกิลในดินในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณนิกเกิลทั้งหมดในชุด blank จะมีค่าน้อยที่สุด ส่วนปริมาณนิกเกิลทั้งหมดในชุด control จะมีค่ามากที่สุด

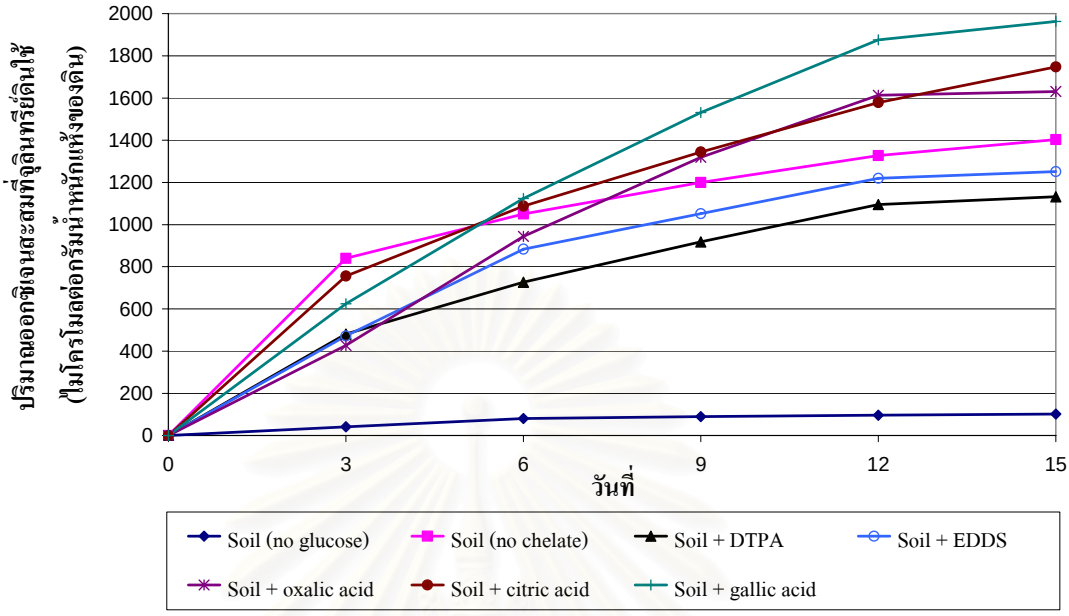
เมื่อเปรียบเทียบผลของตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ทั้ง 5 ชนิด พบว่าเมื่อเก็บเกี่ยวต้อยติ่งในวันที่ 15 ปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณนิกเกิลทั้งหมดมีค่าน้อยที่สุดในชุดการทดลองที่เติม EDDS ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.1 และ 31.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

2.2 ผลการทดสอบความเป็นพิษของตัวคีเลตและกรดอินทรีย์มีต่อจุลินทรีย์ดิน

การทดสอบความเป็นพิษของตัวคีเลตและกรดอินทรีย์มีต่อจุลินทรีย์ดิน ใช้วิธีวิเคราะห์การหายใจของจุลินทรีย์ดินโดยการใช้กลูโคสเป็นตัวชักนำ (glucose-induced respiration of soil microorganisms) เป็นการวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในวันที่ 0 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติมตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ทั้ง 5 ชนิด จากนั้นนำผลการทดลองมาคำนวณเป็นปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ไป จากผลการทดลองพบว่าชุดการทดลองที่ใส่ดิน แต่ไม่เติมกลูโคสและไม่เติมตัวคีเลตพบว่า ปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ไปจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับชุดอื่นๆ (ภาพที่ 32) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ไปในวันที่ 3 จะสามารถแบ่งตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ได้เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มแรก ได้แก่ ชุดที่เติมกรดซิตริก ชุดที่เติมกลูโคสอย่างเดียว และชุดที่เติมกรดกัลลิก ซึ่งจะมีปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ดินใช้ไปมาก ส่วนกลุ่มที่ 2 ได้แก่ ชุดที่เติม DTPA ชุดที่เติม EDDS และชุดที่เติมกรดออกซาลิก ซึ่งจะมีปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ดินใช้ไปน้อยกว่ากลุ่มแรก



ภาพที่ 32 ปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ดินใช้ไปในวันที่ 0 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริกและกรดกัลลิก



ภาพที่ 33 ปริมาณออกซิเจนสะสมที่จุลินทรีย์ดินใช้ไป (cumulative soil respiration) ในวันที่ 0 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก

จากผลการศึกษาปริมาณออกซิเจนสะสมที่จุลินทรีย์ดินใช้ไป พบว่า ชุดการทดลองที่ไม่เติมกลูโคส และไม่เติมตัวคีเลตจะมีปริมาณออกซิเจนสะสมที่จุลินทรีย์ดินใช้ไปไม่แตกต่างกันมากทั้งในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 (ภาพที่ 33) ส่วนชุดการทดลองอื่นพบว่า เมื่อถึงวันที่ 15 ปริมาณออกซิเจนสะสมที่จุลินทรีย์ดินใช้ไป จะเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ ชุดที่เติมกรดกัลลิก > กรดซิตริก > กรดออกซาลิก > ดินที่เติมกลูโคสอย่างเดียว > EDDS > DTPA

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การอภิปรายผล

1. การคัดเลือกวัชพืชในประเทศไทยที่สามารถสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิลได้ในปริมาณที่สูง

1.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของดิน

ลักษณะเนื้อดินของดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้จัดว่าเป็นดินร่วนปนทราย ซึ่งเป็นกลุ่มดินเนื้อหยาบ ที่มีช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่างอนุภาค ดินจึงมีการแทรกซึมน้ำและการกระจายน้ำได้ดี ดินเนื้อหยาบมักไม่เกาะตัวกันเป็นก้อนทึบ ทำให้รากพืชไชชอนได้ดี

ปริมาณน้ำในดินคือ สัดส่วนระหว่างปริมาณน้ำที่บรรจุอยู่ในช่องว่างของดินต่อน้ำหนักดินแห้ง ปริมาณน้ำในดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 20.8% ซึ่งจัดว่าอยู่ในระดับความชื้นปานกลาง

ความเป็นกรดด่างของดินเมื่อวัดโดยใช้อัตราส่วนของดิน:น้ำกลั่น เท่ากับ 1:1 มีค่า 6.91 ซึ่งจัดว่าอยู่ในช่วงที่เป็นกลาง การที่ดินมีค่าความเป็นกรดด่างอยู่ในช่วง 6-7 จะมีผลให้ธาตุอาหารต่างๆ อยู่ในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และจะมีอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชทั่วไป

ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน จะแสดงถึงปริมาณของแคตไอออนที่ถูกดูดยึดอยู่ที่ผิวของ clay micelle ซึ่งแคตไอออนในที่นี้หมายถึงธาตุที่มีประจุบวกทั้งหมด ทั้งธาตุอาหารต่างๆ เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม รวมทั้งโลหะหนัก เช่น ทองแดง สังกะสี และนิกเกิลที่อยู่ในรูปประจุบวก สำหรับดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกเท่ากับ 14.51 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกที่ได้จากการคำนวณซึ่งมีค่าประมาณ 14.72 เซนติโมลต่อกิโลกรัม (โดยทั่วไปค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดินสามารถประเมินได้อย่างคร่าวๆ โดยคิดจากปริมาณอนุภาคดินเหนียวคูณกับ 0.5 รวมกับปริมาณอินทรียวัตถุในดินคูณด้วย 2.0) ดินปกติทั่วไปจะมีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดินอยู่ระหว่าง 0.5-50 เซนติโมลต่อกิโลกรัม

อินทรียวัตถุในดินหมายถึง อินทรียสารทุกชนิดที่มีอยู่ในดินที่มาจากการสลายตัวของซากสิ่งมีชีวิตทับถมกันในดิน รวมทั้งอินทรียสารที่รากพืชปลดปล่อยออกมา และที่จุลินทรีย์ดินสังเคราะห์ขึ้นมา ดินทั่วไปมักจะมีปริมาณอินทรียวัตถุไม่เกิน 5% ส่วนดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีปริมาณอินทรียวัตถุ 3.2% ซึ่งจัดว่าอยู่ในระดับปานกลาง แสดงว่าดินมีความอุดมสมบูรณ์ นอกจากนั้นการที่ดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีปริมาณอินทรียวัตถุในระดับปานกลาง จะมีผลดีในแง่ที่จะทำให้มีโลหะหนักที่ถูกดูดยึดไว้ไม่มาก จึงมีปริมาณโลหะหนักในสารละลายดินมากกว่าดินที่มีปริมาณอินทรียวัตถุสูง เนื่องจากอินทรียวัตถุประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือ กลุ่ม -COOH

และ -OH ซึ่งจะสามารถจับกับแคตไอออนของโลหะหนักได้อย่างรวดเร็ว เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน จึงมีผลให้โลหะหนักละลายออกมาอยู่ในสารละลายดินได้ยาก ดังนั้นดินที่มีปริมาณอินทรียวัตถุต่ำถึงปานกลาง จะทำให้โลหะหนักถูกปลดปล่อยออกจากดินได้ดีกว่าดินที่มีปริมาณอินทรียวัตถุสูง

ปริมาณไนโตรเจนในดินมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชอย่างมาก เนื่องจากไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบของโปรตีนในโพรโตพลาสซึม (protoplasm) เป็นส่วนประกอบสำคัญของนิวคลีโอโปรตีน (nucleoprotein) ที่อยู่ในโครโมโซม และเป็นส่วนประกอบของเอนไซม์ต่างๆในพืช ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินที่ใช้ในการเกษตรตามปกติจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.06% – 0.5% สำหรับดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดเท่ากับ 0.155% ซึ่งเป็นปริมาณที่น่าจะเพียงพอต่อการเจริญ เติบโตของพืช

ฟอสฟอรัสที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เป็นฟอสฟอรัสที่อยู่ในสารละลายดินที่เป็นแอนไอออนของฟอสฟอริก (H_3PO_4) ซึ่งเมื่ออยู่ในสภาพของแอนไอออนจะมีทั้งหมด 3 รูปแบบ และเปลี่ยนรูปไปตามค่าความเป็นกรดด่างในดิน กล่าวคือ เมื่อค่าความเป็นกรดด่างของดินต่ำกว่า 6.8 จะอยู่ในรูป $H_2PO_4^-$ ซึ่งเป็นรูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ง่ายที่สุด เมื่อค่าความเป็นกรดด่างอยู่ระหว่าง 6.8 – 7.2 จะอยู่ในรูป $H_2PO_4^{2-}$ ซึ่งเป็นรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้ยากกว่ารูปแรก และเมื่อค่าความเป็นกรดด่างสูงกว่า 7.2 จะอยู่ในรูป PO_4^{3-} ซึ่งเป็นรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้ยากที่สุด ดินชั้นบนโดยทั่วไปจะมีปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ประมาณ 500-800 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เท่ากับ 786 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จัดว่าเป็นปริมาณที่สูง

โพแทสเซียมที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที ได้แก่ โพแทสเซียมที่อยู่ในสารละลายดิน และโพแทสเซียมที่ถูกดูดซับอยู่ที่ผิวของคอลลอยด์ดินในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะอยู่ในสภาพที่สมดุลกันตลอดเวลา และมีการทดแทนกันอย่างรวดเร็ว ปริมาณโพแทสเซียมที่อยู่ในสารละลายดินจะมีค่าระหว่าง 1-10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนปริมาณโพแทสเซียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้มีค่าระหว่าง 40-600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับงานวิจัยนี้มีปริมาณโพแทสเซียมที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เท่ากับ 705 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งจัดว่ามีปริมาณสูง

ในดินปกติทั่วไปจะมีปริมาณทองแดงเฉลี่ยประมาณ 9-29 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนในงานวิจัยนี้พบว่า ปริมาณทองแดงในดินที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มีค่าเท่ากับ 2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนปริมาณทองแดงทั้งหมดในดินมีค่าเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จึงจัดว่าดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีทองแดงอยู่ในระดับปกติ

ปริมาณสังกะสีในดินที่จัดว่าอยู่ในช่วงปกติคือ 3-50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนปริมาณสังกะสีในดินที่จัดว่าอยู่ในช่วงวิกฤติคือ 250-500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในงานวิจัยนี้พบว่าปริมาณสังกะสีในดินที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มีค่าเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินมีค่าเท่ากับ 262 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จึงจัดว่าดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีการปนเปื้อนสังกะสี

ปริมาณนิกเกิลในดินที่จัดว่าอยู่ในช่วงปกติคือ 2-50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนปริมาณนิกเกิลในดินที่จัดว่าอยู่ในช่วงวิกฤติคือ 50-100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในงานวิจัยนี้พบว่า ปริมาณนิกเกิลในดินที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มีค่าเท่ากับ 0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนปริมาณนิกเกิลทั้งหมดในดินมีค่าเท่ากับ 7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จึงจัดว่าดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีนิกเกิลอยู่ในระดับปกติ

1.2 การสะสมทองแดง สังกะสีและนิกเกิลของวัชพืช 5 ชนิด

1.2.1 ความสามารถในการสะสมทองแดงของต้อยติ่ง ผักปลาบใบกว้าง ผักบุ้งรั้ว ผักบุ้งพุ่มและบานไม่รู้โรยป่า

(ก) การสะสมทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน

ต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่มีการเติมทองแดง 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมทองแดงไว้ในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้มากกว่าต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่มีการเติมทองแดง 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99% นอกจากนั้นผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธี Turkey's HSD test และ Duncan's new multiple range test ยังพบว่าต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมทองแดง 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สามารถสะสมทองแดงไว้ในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้มากกว่าผักปลาบใบกว้าง ผักบุ้งรั้ว ผักบุ้งพุ่ม และบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมทองแดง 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่มีการเติมทองแดง 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะมีความสามารถในการสะสมทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้น้อยกว่า ต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมทองแดง 50 และ 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99% แต่เมื่อเปรียบเทียบกับวัชพืชชนิดอื่น ผลทางสถิติพบว่า ต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่มีการเติมทองแดง 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมทองแดงได้มากกว่าผักปลาบใบกว้างที่ปลูกในดินที่เติมทองแดงทุกความเข้มข้น และมากกว่าผักบุ้งรั้วและผักบุ้งพุ่มที่ปลูกในดินที่มีการเติมทองแดง 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่อเปรียบเทียบกับบานไม่รู้โรยป่าพบว่าต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมทองแดง 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมทองแดงได้มากกว่าบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมทองแดง 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99% อย่างไรก็

ตามความสามารถในการสะสมทองแดงของต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมทองแดง 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับผักบุ้งรั้วและผักบุ้งพุ่มที่ปลูกในดินที่เติมทองแดง 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม รวมทั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมทองแดง 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ส่วนต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่มีการเติมทองแดง 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสามารถสะสมทองแดงไว้ในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้มากกว่าผักปลาบใบกว้าง ผักบุ้งรั้ว ผักบุ้งพุ่ม และบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมทองแดง 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

การศึกษา Song และคณะ (2004) พบว่า *Silene vulgaris* และ *Elsholtzia splendens* มีความสามารถในการสะสมทองแดงไว้ในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินในช่วง 3-262 และ 4-215 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งความเข้มข้นของทองแดงที่พืชทั้งสองชนิดสะสมไว้ในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินมีค่ามากที่สุดไม่เกิน 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (พืชที่จัดว่าเป็น hyperaccumulator ของทองแดงต้องมีความสามารถในการสะสมทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินมากกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาครั้งนี้พบว่าต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมทองแดงความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมทองแดงไว้ในส่วนเหนือพื้นดินมากที่สุดเท่ากับ 1,170 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง นับว่าเป็นค่าที่มากกว่าความสามารถในการสะสมทองแดงของ *Silene vulgaris* และ *Elsholtzia splendens*

(ข) การสะสมทองแดงในส่วนราก

ต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมทองแดง 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมทองแดงไว้ในรากได้มากโดยที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับวัชพืชชนิดอื่นพบว่าต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมทองแดง 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมทองแดงไว้ในรากได้มากกว่าผักปลาบใบกว้าง ผักบุ้งรั้ว ผักบุ้งพุ่ม และบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมทองแดงความเข้มข้นเท่ากันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

การศึกษา Song และคณะ (2004) พบว่า *Silene vulgaris* และ *Elsholtzia splendens* จะสะสมทองแดงไว้ในส่วนรากมากกว่าในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน 11 และ 30 เท่า ตามลำดับ ซึ่งอาจเนื่องมาจากทองแดงถูกจับไว้ที่ผนังเซลล์ในรากพืช (เช่น ในรูป apoplastic Cu) จึงไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาครั้งนี้พบว่า ผลการทดลองมีส่วนที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคือ ต้อยติ่ง ผักปลาบใบกว้าง ผักบุ้งรั้ว และผักบุ้งพุ่มจะสะสมทองแดงในส่วนรากมากกว่าส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน เช่นเดียวกับ *Silene vulgaris* และ *Elsholtzia splendens*

(ค) การสะสมทองแดงในพืชทั้งต้น

การสะสมทองแดงในต้อยติ่งทั้งต้นที่ปลูกในดินที่เติมทองแดง 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมมีค่าไม่แตกต่างจากต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมทองแดง 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมทองแดง 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมทองแดงในพืชทั้งต้นมากกว่าต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมทองแดง 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมากกว่าผักปลาบใบกว้าง ผักบุ้งรั้ว ผักบุ้งพุ่ม และบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมทองแดงทุกความเข้มข้น อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมทองแดง 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมทองแดงมากกว่าผักปลาบใบกว้างที่ปลูกในดินที่เติมทองแดง 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมากกว่าผักบุ้งรั้วที่ปลูกในดินที่เติมทองแดง 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมากกว่าผักบุ้งพุ่ม และบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมทองแดงทุกความเข้มข้น อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% อย่างไรก็ตามต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมทองแดง 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมทองแดงในพืชทั้งต้นไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับผักปลาบใบกว้างที่ปลูกในดินที่เติมทองแดง 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับผักบุ้งรั้วที่ปลูกในดินที่เติมทองแดง 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ส่วนต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมทองแดง 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมทองแดงในพืชทั้งต้นได้มากกว่าผักปลาบใบกว้าง ผักบุ้งรั้ว ผักบุ้งพุ่ม และบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมทองแดงทุกความเข้มข้น อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

1.2.2 ความสามารถในการสะสมสังกะสีของต้อยติ่ง ผักปลาบใบกว้าง ผักบุ้งรั้ว ผักบุ้งพุ่ม และบานไม่รู้โรยป่า

(ก) การสะสมสังกะสีในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน

ต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมสังกะสีไว้ในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินโดยมีค่าไม่แตกต่างกับต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมจะสะสมสังกะสีไว้ในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้มากกว่าต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมากกว่าผักปลาบใบกว้าง ผักบุ้งรั้ว ผักบุ้งพุ่ม และบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสีทุกความเข้มข้น อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีความสามารถในการสะสมสังกะสีในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินมากกว่าผักปลาบใบกว้าง ผักบุ้งรั้ว ผักบุ้งพุ่ม และ

บานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสีทุกความเข้มข้น อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสามารถสะสมสังกะสีในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินมากกว่าต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมากกว่าผักปลาบใบกว้าง ผักบุ้งรั้ว ผักบุ้งพุ่ม และบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสีทุกความเข้มข้น อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

การศึกษาของ An และคณะ (2006) พบว่าเฟริ์น (*Pteris vittata* L.) ที่เจริญเติบโตในภาคสนาม จะสามารถสะสมสังกะสีในใบได้มากที่สุดเท่ากับ 737 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่อทำการทดลองโดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสังกะสีให้อยู่ในช่วง 0-2000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่าเฟริ์นชนิดนี้จะสะสมสังกะสีได้มากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยจะสะสมสังกะสีได้มากที่สุดเท่ากับ 0.22 มิลลิกรัมต่อกระถาง

Yanqun และคณะ (2005) ทำการศึกษาต้นไม้ที่มีลำต้นอ่อนที่เจริญเติบโตในบริเวณที่มีการทำเหมืองแร่ตะกั่วและสังกะสี พบว่า มีพืช 4 ชนิดที่สามารถสะสมสังกะสีได้ในปริมาณสูง ได้แก่ 1. *Incarvillea sp*. 2. *Corydalis pterygopetala* Franch 3. *Arabis alpinal* var. *parviflora* Franch และ 4. *Sonchus asper* (L.) Hill ซึ่งจะสามารถสะสมสังกะสีไว้ในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้เท่ากับ 7,004.3 5,959.9 5,632.8 และ 5,048.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยครั้งนี้พบว่าต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสีความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมสังกะสีไว้ในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้มากที่สุดเท่ากับ 3,101 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีค่าน้อยกว่าผลการศึกษาของ Yanqun และคณะ

การศึกษาของ Tanhan และคณะ (2007) โดยการปลูกพืชในสารละลาย พบว่าในสารละลายที่มีความเข้มข้นของสังกะสี 20 มิลลิกรัมต่อลิตร *Chromolaena odorata* (L.) King & Robinson จะสามารถสะสมสังกะสีไว้ในส่วนใบ ลำต้น ส่วนยอด และรากได้มากที่สุดเท่ากับ 1,009.7 866.3 1,876.0 และ 7,011.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

(ข) การสะสมสังกะสีในส่วนราก

ปริมาณสังกะสีที่สะสมในรากของต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมมีค่าไม่แตกต่างกับต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมสังกะสีไว้ในรากมากกว่าต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมากกว่าผักปลาบใบกว้าง ผักบุ้งรั้ว ผักบุ้งพุ่ม และบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสีทุกความเข้มข้น อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ปริมาณสังกะสีที่สะสมในรากของต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับผักบุ้งรั้วที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และไม่แตกต่างกับผักบุ้งพุ่มที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 200 400 และ 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างไรก็ตามต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมจะสามารถสะสมสังกะสีไว้ในรากได้มากกว่าผักปลาบใบกว้าง และบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดิน ที่ทุกความเข้มข้นของสังกะสี และมีค่ามากกว่าผักบุ้งรั้วที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมจะสะสมสังกะสีไว้ในรากได้มากกว่าผักปลาบใบกว้าง ผักบุ้งรั้ว ผักบุ้งพุ่ม และบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสีทุกความเข้มข้น อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

Yanqun และคณะ (2005) ทำการศึกษาต้นไม้ที่มีลำต้นอ่อนที่เจริญเติบโตในบริเวณที่มีการทำเหมืองแร่ตะกั่วและสังกะสี พบว่า มีพืช 4 ชนิดที่สามารถสะสมสังกะสีได้ในปริมาณสูง ได้แก่ 1. *Incarvillea sp*. 2. *Corydalis pterygopetala* Franch 3. *Arabis alpinal* var. *parviflora* Franch และ 4. *Sonchus asper* (L.) Hill ซึ่งจะสะสมสังกะสีไว้ในส่วนรากได้เท่ากับ 6,050.1 5,402.3 4,508.7 และ 7,893.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยครั้งนี้พบว่าต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสีความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมสังกะสีไว้ในรากได้มากที่สุดเท่ากับ 10,882 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีค่ามากกว่าพืชทั้ง 4 ชนิดที่ Yanqun และคณะนำมาศึกษา

(ค) การสะสมสังกะสีในพืชทั้งต้น

ต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมมีความสามารถในการสะสมสังกะสีไว้ในพืชทั้งต้นได้ไม่แตกต่างกับต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมสังกะสีไว้ในต้นได้มากกว่าต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมากกว่าผักปลาบใบกว้าง ผักบุ้งรั้ว ผักบุ้งพุ่ม และบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสีทุกความเข้มข้น อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมสังกะสีในต้นได้ โดยมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับผักบุ้งพุ่มที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างไรก็ตามต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมจะสามารถสะสมสังกะสีไว้ในต้นได้มากกว่าผักปลาบใบกว้าง ผักบุ้งรั้ว และบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูก

ในดิน ที่ทุกความเข้มข้นของสังกะสี และมีค่ามากกว่าผักบุ้งพุ่มที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมจะสะสมสังกะสีไว้ในพืชทั้งต้นได้มากกว่าผักปลาบใบกว้าง ผักบุ้งรั้ว ผักบุ้งพุ่ม และบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสีทุกความเข้มข้น อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

อย่างไรก็ตามพบว่าต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมจะสะสมสังกะสีไว้ในส่วนเหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นได้น้อยกว่าต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 200 และ 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทั้งนี้เนื่องจากใบของต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสี 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมได้รับความเสียหายเนื่องจากเพลี้ยลง ต้นพืชมีขนาดเล็กกว่ากระถางอื่น จึงมีมวลชีวภาพน้อย และมีผลทำให้สะสมสังกะสีได้น้อยลงด้วย

1.2.3 ความสามารถในการสะสมนิกเกิลของต้อยติ่ง ผักปลาบใบกว้าง ผักบุ้งรั้ว ผักบุ้งพุ่ม และบานไม่รู้โรยป่า

(ก) การสะสมนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน

ต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมนิกเกิลไว้ในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้น้อยกว่าต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99% แต่เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทางสถิติกับวัชพืชชนิดอื่น พบว่าต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมนิกเกิลไว้ในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้โดยมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับผักปลาบใบกว้างที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับผักบุ้งรั้ว ผักบุ้งพุ่ม และบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิลทุกความเข้มข้น

ส่วนต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมนิกเกิลไว้ในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้โดยมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับผักปลาบใบกว้าง และบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างไรก็ตามต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมนิกเกิลไว้ในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้มากกว่าผักบุ้งรั้ว และผักบุ้งพุ่มที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิลทุกความเข้มข้น และมีค่ามากกว่าผักปลาบใบกว้าง และบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมนิกเกิลไว้ในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้มากกว่าผักปลาบใบกว้าง ผักบุ้งรั้ว ผักบุ้งพุ่ม และบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิลทุกความเข้มข้น อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

งานวิจัยของ Robinson และคณะ (1997) พบว่า *Berkheya coddi* ที่ปลูกในดินที่ไม่เติมไนโตรเจน จะสะสมนิกเกิลไว้ในส่วนใบได้เท่ากับ 2,300 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ส่วนพืชที่ปลูกในดินที่เติมไนโตรเจน 100 และ 200 ไมโครกรัมต่อกรัม จะสะสมนิกเกิลไว้ในส่วนใบได้เท่ากับ 3,250 และ 4,200 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ นอกจากนั้นยังพบว่าในใบอ่อนจะมีการสะสมนิกเกิลได้มากกว่าในใบแก่

Robinson และคณะ (2003) พบว่า พืชโตเร็วที่จัดว่าเป็น hyperaccumulator สำหรับนิกเกิล คือ *Berkheya coddi* ที่ปลูกแบบไม่ใช้ดิน จะสามารถสะสมนิกเกิลในใบได้ประมาณ 48% ซึ่งความเข้มข้นของนิกเกิลในใบจะเพิ่มขึ้นตามอายุ จากการศึกษาโดยใช้ X-ray microanalyses (EDXA) พบว่าบริเวณเปลือกนอก (cuticle) ของ upper epidermis จะมีความเข้มข้นของนิกเกิลมากกว่าส่วนอื่นของใบอย่างมีนัยสำคัญ

(ข) การสะสมนิกเกิลในส่วนราก

ต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมนิกเกิลไว้ในส่วนรากได้มากกว่าต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่ต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมนิกเกิลไว้ในส่วนรากโดยมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับผักปลาบใบกว้างที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมนิกเกิลไว้ในส่วนรากได้มากกว่าผักบุ้งรั้ว ผักบุ้งพุ่ม และบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิลทุกความเข้มข้น รวมทั้งผักปลาบใบกว้างที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมนิกเกิลไว้ในส่วนรากได้โดยมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับผักปลาบใบกว้างที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมนิกเกิลไว้ในส่วนรากได้มากกว่าผักบุ้งรั้ว ผักบุ้งพุ่ม และบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิลทุกความเข้มข้น รวมทั้งผักปลาบใบกว้างที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมนิกเกิลไว้ในส่วนรากโดยมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับผักปลาบใบกว้างที่ปลูกในดินที่

เติมนิกเกิล 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และไม่แตกต่างกับผักบุ้งพุ่มที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างไรก็ตามต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมนิกเกิลไว้ในส่วนรากได้มากกว่าผักบุ้งรั้ว และบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิลทุกความเข้มข้น และมากกว่าผักปลาบใบกว้างที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมากกว่าผักบุ้งพุ่มที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

(ค) การสะสมนิกเกิลในพืชทั้งต้น

ต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมนิกเกิลไว้ในพืชทั้งต้นได้น้อยกว่าต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99% อย่างไรก็ตามต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมนิกเกิลไว้ในพืชทั้งต้นได้ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับผักปลาบใบกว้างที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับผักบุ้งรั้ว ผักบุ้งพุ่ม และบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมนิกเกิลไว้ในพืชทั้งต้นได้โดยมีค่ามากกว่าผักปลาบใบกว้างที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มากกว่าผักบุ้งรั้ว ผักบุ้งพุ่ม และบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมนิกเกิลไว้ในพืชทั้งต้นได้ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับผักปลาบใบกว้างที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างไรก็ตามต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมนิกเกิลไว้ในพืชทั้งต้นได้มากกว่าผักบุ้งรั้ว ผักบุ้งพุ่ม และบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิลทุกความเข้มข้น และมากกว่าผักปลาบใบกว้างที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะสะสมนิกเกิลไว้ในพืชทั้งต้นได้มากกว่าต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมากกว่าผักปลาบใบกว้าง ผักบุ้งรั้ว ผักบุ้งพุ่ม และบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิลทุกความเข้มข้น อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

งานวิจัยของ Molas และ Baran (2004) ทำการศึกษาการสะสมของนิกเกิลในบาเลย์ (*Hordeum vulgare* L.) โดยการเติมนิกเกิลในรูปอนินทรีย์ ($NiSO_4.7H_2O$) และนิกเกิลในรูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ (Ni(II)-citrate Ni(II)-Glu และ Ni(II)-EDTA) โดยให้มีความเข้มข้นของ

นิกเกิลในดินเท่ากับ 75 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ผลการศึกษาพบว่าดินที่มีปริมาณดินเหนียวปานกลาง (medium clay soil) การเติมนิกเกิลในรูป $NiSO_4.7H_2O$ Ni(II)-citrate Ni(II)-Glu และ Ni(II)-EDTA) จะทำให้บาเลย์ในระยะที่มีการงอกสะสมนิกเกิลในต้นได้เท่ากับ 278.15 224.25 232.10 และ 139.45 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ส่วนดินที่มีปริมาณดินเหนียวมาก (heavy clay soil) การเติมนิกเกิลในรูป $NiSO_4.7H_2O$ Ni(II)-citrate Ni(II)-Glu และ Ni(II)-EDTA) จะทำให้บาเลย์ในระยะที่มีการงอกสะสมนิกเกิลในต้นได้เท่ากับ 229.80 205.95 211.10 และ 75.70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

1.3 ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินที่ปลูกพืช ทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลทั้งหมดในดิน

ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้จะมีค่าน้อยกว่าปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลทั้งหมดในดินในทุกตำรับการทดลอง

ในตำรับการปลูกพืชทั้ง 5 ชนิด ที่มีการเติมทองแดงในดินที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน พบว่า ดินที่มีการเติมทองแดงความเข้มข้นสูงสุดคือ 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะมีปริมาณทองแดงเหลืออยู่ในดินมากที่สุด เช่นเดียวกับดินที่มีการเติมสังกะสีความเข้มข้นสูงสุดคือ 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะมีปริมาณสังกะสีเหลืออยู่ในดินมากที่สุด เช่นเดียวกับดินที่มีการเติมนิกเกิลความเข้มข้นสูงสุดคือ 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะมีปริมาณนิกเกิลเหลืออยู่ในดินมากที่สุด

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของโลหะหนัก 3 ชนิดพบว่า ปริมาณทองแดงที่เหลืออยู่ในดินจะมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือนิกเกิล และสังกะสี

ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้ DTPA เป็นสารเคมีที่สกัดทองแดง สังกะสี และนิกเกิลในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ เนื่องจากดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 6.91 ซึ่งจัดว่าอยู่ในช่วงที่เป็นกลาง เนื่องจากวิธีการใช้ DTPA เป็นสารเคมีที่สกัดทองแดงและสังกะสีในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ เป็นวิธีที่เหมาะกับดินที่มีค่าความเป็นกรดด่างอยู่ในช่วงที่เป็นกลาง หรือเป็นด่างเล็กน้อยเท่านั้น (Feng *et al*., 2005)

2. การเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิลของวัชพืชโดยการเติมตัวคีเลตและกรดอินทรีย์

จากผลการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิล ของวัชพืชทั้ง 5 ชนิด คือ ต้อยติ่ง ผักปลาบใบกว้าง ผักปั่งรั้ว ผักปั่งพุ่ม และบานไม่รู้โรยป่า พบว่าต้อยติ่งมีความสามารถในการสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิลได้มากที่สุด ดังนั้นในการศึกษา

ขั้นที่ 2 จึงเลือกที่จะใช้ต้อยติ่ง และศึกษาผลของการเติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิลของต้อยติ่ง รวมทั้งผลของการเติมตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ทั้ง 5 ชนิดที่มีต่อจุลินทรีย์ดิน

2.1 ผลของการเติมตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ทั้ง 5 ชนิดต่อการสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิลของต้อยติ่ง

2.1.1 การสะสมทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของต้อยติ่งเมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก

ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธี Turkey's HSD test และ Duncan's new multiple range test พบว่าตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อการสะสมทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินของต้อยติ่งเมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 เรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ EDDS > กรด ซิตริก > DTPA > กรดออกซาลิก > กรดกัลลิก ซึ่งผลของคีเลตและกรดอินทรีย์แต่ละชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99% และเมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 6 9 12 และ 15 พบว่าตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อการสะสมทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินของต้อยติ่ง จะเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ EDDS > DTPA > กรดซิตริก > กรดออกซาลิก > กรดกัลลิก ซึ่งผลของคีเลตและกรดอินทรีย์แต่ละชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ผลการศึกษาครั้งนี้ที่พบว่า EDDS มีผลต่อการสะสมทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินของต้อยติ่งมากที่สุดนั้นสอดคล้องกับการศึกษาของ Luo และคณะ (2005) ที่พบว่าการเติม EDDS จะช่วยให้ประสิทธิภาพการสะสมทองแดงของข้าวโพดและถั่วมีค่ามากกว่าการเติม EDTA กล่าวคือการเติม EDDS ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม จะทำให้การสะสมทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินของข้าวโพดและถั่วมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 2,060 และ 5,130 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

การศึกษาของ Nascimento และคณะ (2006) พบว่าการเติม EDTA DTPA และกรดซิตริกจะทำให้ Indian mustard (*Brassica juncea*) สะสมทองแดงและตะกั่วในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่เติมตัวคีเลต

ตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อการสะสมทองแดงในส่วนรากของต้อยติ่ง เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 เรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ EDDS > DTPA > กรดซิตริก > กรดออกซาลิก > กรดกัลลิก ซึ่งผลของคีเลตและกรดอินทรีย์แต่ละชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อการสะสมทองแดงในต้อยติ่งทั้งต้น เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 เรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ EDDS > กรดซิตริก > DTPA > กรดออกซาลิก > กรดกัลลิก ซึ่งผลของคีเลตและกรดอินทรีย์แต่ละชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99% อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 6 พบว่า DTPA และกรดซิตริกมีผลต่อการสะสมทองแดงในต้อยติ่งทั้งต้นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ หรืออาจกล่าวได้ว่า ผลของตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ต่อการสะสมทองแดงทั้งต้นมีค่าจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ EDDS > (DTPA = กรดซิตริก) > กรดออกซาลิก > กรดกัลลิก ส่วนในวันที่ 9 12 และ 15 พบว่าตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อการสะสมทองแดงในต้อยติ่งทั้งต้น จะเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ EDDS > DTPA > กรดซิตริก > กรดออกซาลิก > กรดกัลลิก ซึ่งผลของคีเลตและกรดอินทรีย์แต่ละชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

2.1.2 การสะสมสังกะสีในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของต้อยติ่งเมื่อเมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก

ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธี Turkey's HSD test และ Duncan's new multiple range test พบว่าตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อการสะสมสังกะสีในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน และทั้งต้นของต้อยติ่ง เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 เรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ DTPA > EDDS > กรดกัลลิก > กรดออกซาลิก > กรดซิตริก ซึ่งผลของตัวคีเลตและกรดอินทรีย์แต่ละชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อการสะสมสังกะสีในส่วนรากของต้อยติ่ง เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 เรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ กรดกัลลิก > EDDS > DTPA > กรดออกซาลิก > กรดซิตริก ซึ่งผลของตัวคีเลตและกรดอินทรีย์แต่ละชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99% เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 6 และ 9 ตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อการสะสมสังกะสีในรากของต้อยติ่ง จะเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ EDDS > กรดกัลลิก > DTPA > กรดออกซาลิก > กรดซิตริก ซึ่งผลของตัวคีเลตและกรดอินทรีย์แต่ละชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99% อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 12 ผลของ DTPA กรดกัลลิก และ EDDS ต่อการสะสมสังกะสีในรากไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ หรืออาจกล่าวได้ว่าการสะสมสังกะสีจะเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ (DTPA = กรดกัลลิก = EDDS) > กรดออกซาลิก > กรดซิตริก ส่วนในวันที่ 15 การสะสมสังกะสีจะเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ DTPA > EDDS > กรดกัลลิก > กรด

ออกซาลิก > กรดซิตริก ซึ่งผลของตัวคีเลตและกรดอินทรีย์แต่ละชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

2.1.3 การสะสมนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของต้อยติ่งเมื่อเมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก

ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธี Turkey's HSD test และ Duncan's new multiple range test พบว่าตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อการสะสมนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินของต้อยติ่ง เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 และ 6 เรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ EDDS > กรดซิตริก > กรดกัลลิก > กรดออกซาลิก > DTPA ซึ่งผลของตัวคีเลตและกรดอินทรีย์แต่ละชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99% อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 9 และ 12 พบว่าผลของกรดออกซาลิก และ DTPA ต่อการสะสมนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ หรืออาจกล่าวได้ว่าการสะสมนิกเกิลจะเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ EDDS > กรดซิตริก > กรดกัลลิก > (กรดออกซาลิก = DTPA) ส่วนในวันที่ 15 ตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อการสะสมนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินของต้อยติ่ง จะเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ EDDS > กรดซิตริก > กรดกัลลิก > DTPA > กรดออกซาลิก ซึ่งผลของตัวคีเลตและกรดอินทรีย์แต่ละชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ผลการศึกษาครั้งนี้พบว่า EDDS และกรดซิตริกทำให้ต้อยติ่งสะสมนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kramer และคณะ (2000) ที่พบว่ากรดซิตริกมีผลต่อการสะสมนิกเกิลของ *Thlaspi goesingense* ที่จัดว่าเป็นพืชพวก Ni hyperaccumulator ทำให้มีการสะสมนิกเกิลในรูป Ni-organic complex ใน vacuole ของพืช ส่วนงานวิจัยของ Turgut และคณะ (2004) พบว่าการเติมกรดซิตริกความเข้มข้น 3 กรัมต่อกิโลกรัมจะทำให้ทานตะวัน (*Helianthus annuus*) สายพันธุ์ dwarf sunspot สะสมนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อการสะสมนิกเกิลในส่วนรากของต้อยติ่ง เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 และ 9 เรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ EDDS > กรดกัลลิก > กรดซิตริก > DTPA > กรดออกซาลิก ซึ่งผลของตัวคีเลตและกรดอินทรีย์แต่ละชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99% เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 12 และ 15 ตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อการสะสมนิกเกิลในส่วนรากของต้อยติ่ง จะเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อย

ได้ดังนี้คือ EDDS > กรดกัลลิก > DTPA > กรดซิตริก > กรดออกซาลิก ซึ่งผลของตัวคีเลตและกรดอินทรีย์แต่ละชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีผลต่อการสะสมนิกเกิลในต้อยติ่งทั้งต้น เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 และ 12 เรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ EDDS > กรดซิตริก > กรดกัลลิก > DTPA > กรดออกซาลิก ซึ่งผลของตัวคีเลตและกรดอินทรีย์แต่ละชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99% อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 15 พบว่าผลของ DTPA และกรดกัลลิกต่อการสะสมนิกเกิลในต้อยติ่งทั้งต้นมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ หรืออาจกล่าวได้ว่า การสะสมนิกเกิลในต้อยติ่งทั้งต้นจะเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ EDDS > กรดซิตริก > (DTPA = กรดกัลลิก) > กรดออกซาลิก

2.1.4 ปริมาณทองแดงที่เหลืออยู่ในดินที่ปลูกต้อยติ่ง ทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณทองแดงทั้งหมด เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก

ปริมาณทองแดงที่เหลืออยู่ในดินที่ปลูกต้อยติ่ง ทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และปริมาณทองแดงทั้งหมดในทุกชุดการทดลองจะมีค่ามากที่สุดในวันที่ 3 และมีค่าน้อยที่สุดในวันที่ 15 ซึ่งสอดคล้องกับผลการสะสมทองแดงในต้อยติ่งทั้งต้น โดยต้อยติ่งจะสะสมทองแดงในต้นได้น้อยที่สุดในวันที่ 3 ทำให้เหลือปริมาณทองแดงในดินมาก เมื่อต้อยติ่งสะสมทองแดงในต้นได้มากที่สุดในวันที่ 15 จึงมีปริมาณทองแดงในดินเหลืออยู่น้อย

จากผลการทดลองพบว่าในชุด control จะมีปริมาณทองแดงทั้งหมดที่เหลือในดินมากที่สุด เนื่องจากเป็นชุดการทดลองที่เติมทองแดง แต่ไม่เติมตัวคีเลต จึงทำให้มีปริมาณทองแดงในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้น้อย พืชจึงสะสมทองแดงไว้ในต้นน้อย ทำให้มีปริมาณทองแดงทั้งหมดในดินเหลืออยู่มากกว่าชุดการทดลองอื่น นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมตัวคีเลตและกรดอินทรีย์จะทำให้มีปริมาณทองแดงในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น พืชจึงสามารถสะสมทองแดงได้มากขึ้นด้วย

จากผลการศึกษาของ Nascimento (2006) พบว่า การเติมกรดซิตริก และกรดออกซาลิกที่ความเข้มข้น 20 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม จะทำให้ทองแดง สังกะสี และนิกเกิลละลายออกมาอยู่ในดินได้มากขึ้น นอกจากนั้นการเติมกรดกัลลิกความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมสามารถดึงแคดเมียม สังกะสี ทองแดง และนิกเกิลออกจากดินได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกับการเติม EDTA แต่การเติมกรดกัลลิกจะมีข้อดีกว่าในแง่ที่จะช่วยลดความเสี่ยงต่อการชะละลายของโลหะหนัก

2.1.5 ปริมาณสังกะสีที่เหลืออยู่ในดินที่ปลูกต้อยติ่ง ทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณสังกะสีทั้งหมด เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก

ปริมาณสังกะสีที่เหลืออยู่ในดินที่ปลูกต้อยติ่ง ทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และปริมาณสังกะสีทั้งหมดในทุกชุดการทดลองจะมีค่ามากที่สุดในวันที่ 3 และมีค่าน้อยที่สุดในวันที่ 15 ซึ่งสอดคล้องกับผลการสะสมสังกะสีในต้อยติ่งทั้งต้น โดยต้อยติ่งจะสะสมสังกะสีในต้นได้น้อยที่สุดในวันที่ 3 ทำให้เหลือปริมาณสังกะสีในดินมาก เมื่อต้อยติ่งสะสมสังกะสีในต้นได้มากที่สุดในวันที่ 15 จึงมีปริมาณสังกะสีในดินเหลืออยู่น้อย

จากผลการทดลองพบว่าในชุด control จะมีปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่เหลือในดินมากที่สุด เนื่องจากเป็นชุดการทดลองที่เติมสังกะสี แต่ไม่เติมตัวคีเลต จึงทำให้มีปริมาณสังกะสีในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้น้อย พืชจึงสะสมสังกะสีไว้ในต้นน้อย ทำให้มีปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินเหลืออยู่มากกว่าชุดการทดลองอื่น ส่วนชุดการทดลองที่เติมตัวคีเลตและกรดอินทรีย์จะมีปริมาณสังกะสีในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น พืชจึงสามารถสะสมสังกะสีได้มากขึ้นด้วย

จากผลการศึกษาพบว่า กรดซิตริกจะทำให้มีปริมาณสังกะสีในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nascimento และคณะ (2006) ที่พบว่า การเติมกรดซิตริกจะช่วยให้สังกะสีละลายออกมาในสารละลายดินได้ดีขึ้น

2.1.6 ปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินที่ปลูกต้อยติ่ง ทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณนิกเกิลทั้งหมด เมื่อทำการเก็บเกี่ยวในวันที่ 3 6 9 12 และ 15 หลังจากที่เติม DTPA EDDS กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดกัลลิก

ปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินที่ปลูกต้อยติ่ง ทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และปริมาณนิกเกิลทั้งหมดในทุกชุดการทดลองจะมีค่ามากที่สุดในวันที่ 3 และมีค่าน้อยที่สุดในวันที่ 15 ซึ่งสอดคล้องกับผลการสะสมนิกเกิลในต้อยติ่งทั้งต้น โดยต้อยติ่งจะสะสมนิกเกิลในต้นได้น้อยที่สุดในวันที่ 3 ทำให้เหลือปริมาณนิกเกิลในดินมาก เมื่อต้อยติ่งสะสมนิกเกิลในต้นได้มากที่สุดในวันที่ 15 จึงมีปริมาณนิกเกิลในดินเหลืออยู่น้อย

จากผลการทดลองพบว่าในชุด control จะมีปริมาณนิกเกิลทั้งหมดที่เหลือในดินมากที่สุด เนื่องจากเป็นชุดการทดลองที่เติมนิกเกิล แต่ไม่เติมตัวคีเลต จึงทำให้มีปริมาณนิกเกิลในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้น้อย พืชจึงสะสมนิกเกิลไว้ในต้นน้อย ทำให้มีปริมาณนิกเกิลทั้งหมดในดินเหลืออยู่มากกว่าชุดการทดลองอื่น ส่วนชุดการทดลองที่เติมตัวคีเลตและกรดอินทรีย์

จะมีปริมาณนิกเกิลในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น พืชจึงสามารถสะสมนิกเกิลได้มากขึ้นด้วย

2.2 การทดสอบความเป็นพิษของตัวคีเลตและกรดอินทรีย์มีต่อจุลินทรีย์ดิน

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ไปในวันที่ 3 จะสามารถแบ่งตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ได้เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มแรก ได้แก่ ชุดที่เติมกรดซิตริก ชุดที่เติมกลูโคสอย่างเดียว และชุดที่เติมกรดกัลลิก ซึ่งจะมีปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ดินใช้ไปมาก ทั้งนี้เนื่องจากทั้งกรดซิตริกและกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ได้ง่ายและรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Kos และ Lestan (2004) ที่พบว่าการเติมกรดซิตริกจะทำให้ปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ดินใช้ไปมีค่ามากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการเติม EDTA DTPA และ EDDS และการเติมกรดซิตริกความเข้มข้น 15 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมจะทำให้มีปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ดินใช้ไปมากกว่าการเติมกรดซิตริกที่ความเข้มข้น 10 และ 5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม ส่วนกรดกัลลิกนั้นมีหมู่ –OH 4 หมู่ใน 1 โมเลกุล ซึ่งเป็นบริเวณที่จุลินทรีย์สามารถเข้าโจมตีได้ง่าย ซึ่งสอดคล้องกับที่ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา (2540) กล่าวว่าจุลินทรีย์ดินจะสามารถย่อยสลายสารเคมีที่มีขั้ว ได้แก่ กลุ่มที่มีโครงสร้าง –OH $-COO^-$ และ NH_2 เพราะมีจุดอ่อนให้เข้าโจมตีได้ง่าย ส่วนกลุ่มที่ 2 ได้แก่ ชุดที่เติม DTPA ชุดที่เติม EDDS และชุดที่เติมกรดออกซาลิก ซึ่งจะมีปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ดินใช้ไปน้อยกว่ากลุ่มแรกอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโครงสร้างของสารทั้งสามชนิดอยู่ในรูปที่จุลินทรีย์นำมาใช้ประโยชน์ได้ยากกว่าในกลุ่มแรก

อย่างไรก็ตามการเติมตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ทั้ง 5 ชนิด จะทำให้ปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ดินใช้ไปมีค่ามากกว่ากลุ่มควบคุม แสดงว่าตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองนี้ไม่มีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ดิน เนื่องจากจุลินทรีย์ดินสามารถนำตัวคีเลตและกรดอินทรีย์มาใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Kos และ Lestan (2004) ที่พบว่าการเติมกรดซิตริก EDTA DTPA และ EDDS ความเข้มข้น 5 10 และ 15 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม ไม่มีผลต่อการหายใจของจุลินทรีย์ในดิน และไม่เกิดความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ดิน นอกจากนี้งานวิจัยของ Chen และคณะ (2006) ยังพบว่าการเติมกรดซิตริกและกลูโคสไม่มีผลกระทบต่อชุมชนของแบคทีเรียในดิน (soil bacterial community) เมื่อศึกษาโดยการใช้ Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (DGGE) ดังนั้นจึงสามารถใช้ตัวคีเลตทั้งสองชนิดนี้เป็นแหล่งคาร์บอนให้แก่แบคทีเรียในดิน

ข้อสรุป

1. การคัดเลือกวัชพืชในประเทศไทยที่สามารถสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิลได้ในปริมาณที่สูง

1.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของดิน

ดินที่นำมาใช้ในงานวิจัยมีลักษณะดังต่อไปนี้ คือ เป็นดินร่วนปนทราย ที่มีปริมาณน้ำในดินในระดับปานกลาง ความเป็นกรดด่างของดินมีค่าเป็นกลาง ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดินเท่ากับ 14.51 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ปริมาณอินทรียวัตถุในดินมีค่าเท่ากับ 3.2% จัดว่าเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของดินมีค่าเท่ากับ 0.155% ปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มีค่าเท่ากับ 786 และ 705 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งจัดว่าเป็นปริมาณที่สูง ส่วนปริมาณทองแดง และนิกเกิลในดินอยู่ในระดับปกติ ในขณะที่ปริมาณสังกะสีในดินมีค่ามากและจัดว่าอยู่ในช่วงที่มีการปนเปื้อน

1.2 การสะสมทองแดง สังกะสีและนิกเกิลของวัชพืช 5 ชนิด

1.2.1 ความสามารถในการสะสมทองแดงของวัชพืช 5 ชนิด

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการสะสมทองแดงของวัชพืช 5 ชนิด ที่ปลูกในดินที่เติมทองแดงความเข้มข้น 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมพบว่า ความสามารถในการสะสมทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินของวัชพืชที่ศึกษา จะเรียงตามลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้คือ ต้อยติ่ง ผักบุ้งพุ่ม ผักบุ้งรั้ว บานไม่รู้โรยป่า และผักปลาบใบกว้าง เมื่อพิจารณาความสามารถในการสะสมทองแดงในส่วนรากของวัชพืช จะเรียงตามลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้คือต้อยติ่ง ผักบุ้งพุ่ม ผักปลาบใบกว้าง ผักบุ้งรั้ว และบานไม่รู้โรยป่า ส่วนความสามารถในการสะสมทองแดงในพืชทั้งต้น จะเรียงตามลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้คือต้อยติ่ง ผักบุ้งพุ่ม ผักบุ้งรั้ว ผักปลาบใบกว้าง และบานไม่รู้โรยป่า

อย่างไรก็ตามต้อยติ่ง ผักปลาบใบกว้าง ผักบุ้งรั้ว และผักบุ้งพุ่มจะสะสมทองแดงในส่วนรากมากกว่าส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ในขณะที่บานไม่รู้โรยป่าจะสะสมทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินมากกว่าในราก

1.2.2 ความสามารถในการสะสมสังกะสีของวัชพืช 5 ชนิด

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการสะสมสังกะสีของวัชพืช 5 ชนิด ที่ปลูกในดินที่เติมสังกะสีความเข้มข้น 200 400 และ 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่า ความสามารถในการสะสมสังกะสีในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินของวัชพืชที่ศึกษา จะเรียงตามลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้คือ ต้อยติ่ง ผักบุ้งพุ่ม ผักบุ้งรั้ว บานไม่รู้โรยป่า และผักปลาบใบกว้าง ส่วนความสามารถใน

การสะสมสังกะสีในราก และทั้งต้น จะเรียงตามลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้คือต้อยติ่ง ผักบุ้งพุ่ม ผักบุ้งรั้ว ผักปลาบใบกว้าง และบานไม่รู้โรยป่า

อย่างไรก็ตามต้อยติ่ง ผักปลาบใบกว้าง ผักบุ้งรั้ว และผักบุ้งพุ่มจะสะสมสังกะสีในส่วนรากมากกว่าส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ในขณะที่บานไม่รู้โรยป่าจะสะสมสังกะสีในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินมากกว่าในราก

1.2.3 ความสามารถในการสะสมนิกเกิลของวัชพืช 5 ชนิด

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการสะสมนิกเกิลของวัชพืช 5 ชนิด ที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิลความเข้มข้น 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมพบว่า ความสามารถในการสะสมนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินและในพืชทั้งต้น จะเรียงตามลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้คือ ต้อยติ่ง ผักปลาบใบกว้าง บานไม่รู้โรยป่า ผักบุ้งพุ่ม และผักบุ้งรั้ว เมื่อพิจารณาความสามารถในการสะสมนิกเกิลในส่วนรากของวัชพืช จะเรียงตามลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้คือ ต้อยติ่ง ผักปลาบใบกว้าง ผักบุ้งพุ่ม ผักบุ้งรั้ว และบานไม่รู้โรยป่า

อย่างไรก็ตามต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ผักปลาบใบกว้าง ผักบุ้งรั้ว และผักบุ้งพุ่มที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิลทุกความเข้มข้น จะสะสมนิกเกิลในส่วนรากมากกว่าส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ในขณะที่ต้อยติ่งที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิล 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมและบานไม่รู้โรยป่าที่ปลูกในดินที่เติมนิกเกิลทุกความเข้มข้น จะสะสมนิกเกิลในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินมากกว่าส่วนราก

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ต้อยติ่งเป็นพืชที่มีความสามารถในการสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิลได้มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวัชพืชชนิดอื่นที่นำมาศึกษาในครั้งนี้

1.3 ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินที่ปลูกพืช ทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลทั้งหมดในดิน

ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้จะมีค่าน้อยกว่าปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลทั้งหมดในดินในทุกตำรับการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างโลหะหนัก 3 ชนิดพบว่า ปริมาณทองแดงที่เหลืออยู่ในดินจะมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ นิกเกิล และสังกะสี

2. การเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิลของวัชพืชโดยการเติมตัวคีเลตและกรดอินทรีย์

2.1 การเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิลของต้อยติ่งโดยการเติมตัวคีเลตและกรดอินทรีย์

ตัวคีเลตที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมทองแดงของต้อยติ่งมากที่สุดคือ EDDS ซึ่งทำให้มีปริมาณทองแดงที่สะสมในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของต้อยติ่งเท่ากับ 3,854 5,827 และ 9,450 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ เมื่อเก็บเกี่ยวในวันที่ 15

สำหรับสังกะสีพบว่า DTPA จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมสังกะสีของต้อยติ่งมากที่สุด โดยทำให้มีปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของต้อยติ่งเท่ากับ 6,272 5,253 และ 6,190 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ เมื่อเก็บเกี่ยวในวันที่ 15

ส่วนนิกเกิลนั้นพบว่า EDDS จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมนิกเกิลของต้อยติ่งมากที่สุด ซึ่งทำให้มีปริมาณนิกเกิลที่สะสมในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และทั้งต้นของต้อยติ่งเท่ากับ 3,480 4,039 และ 6,515 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ เมื่อเก็บเกี่ยวในวันที่ 15

2.2 ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินที่ปลูกต้อยติ่งทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลทั้งหมดในดิน

การเติมตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ทั้ง 5 ชนิดจะทำให้ปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินทั้งในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มีค่ามากกว่าในชุด blank และ control ส่วนปริมาณทองแดง สังกะสี และนิกเกิลทั้งหมดที่เหลืออยู่ในดิน มีค่ามากที่สุดในชุด control

เมื่อเปรียบเทียบผลของตัวคีเลตทั้ง 5 ชนิด พบว่าเมื่อเก็บเกี่ยวต้อยติ่งในวันที่ 15 ปริมาณทองแดงที่เหลืออยู่ในดินในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณทองแดงทั้งหมดมีค่าน้อยที่สุดในชุดการทดลองที่เติม EDDS ซึ่งมีค่าเท่ากับ 14.7 และ 36.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนปริมาณสังกะสีที่เหลืออยู่ในดินในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณสังกะสีทั้งหมดมีค่าน้อยที่สุดในชุดการทดลองที่เติม DTPA ซึ่งมีค่าเท่ากับ 81.6 และ 309 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สำหรับปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ในดินในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณนิกเกิลทั้งหมดมีค่าน้อยที่สุดในชุดการทดลองที่เติม EDDS ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.1 และ 31.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

2.3 ความเป็นพิษของตัวคีเลตและกรดอินทรีย์มีต่อจุลินทรีย์ดิน

ตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่มีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ดิน เมื่อเปรียบเทียบปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ไปในวันที่ 3 จะสามารถแบ่งตัวคีเลตและกรดอินทรีย์ได้เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่จุลินทรีย์ดินสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ง่าย ได้แก่ กรดซิตริก กลูโคส และกรดกัลลิก ส่วนกลุ่มที่ 2 คือกลุ่มที่จุลินทรีย์ดินสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ช้ากว่าในกลุ่มแรก ได้แก่ DTPA EDDS และกรดออกซาลิก

ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยที่น่าจะดำเนินการต่อจากการศึกษาครั้งนี้คือ การศึกษากลไกของพืชในระดับเซลล์ว่าพืชที่สามารถสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณสูงนั้น จะนำโลหะหนักไปสะสมไว้ในส่วนใดของเซลล์มากที่สุด และสะสมโลหะหนักในรูปใดบ้าง เนื่องจากพืชแต่ละชนิดมีกลไกในการต่อต้านความเป็นพิษของโลหะหนักต่างกัน นอกจากนั้นยังควรศึกษาและติดตามกลไกการเคลื่อนย้ายโลหะหนักของพืชตั้งแต่โลหะหนักอยู่ในสารละลายดิน แพร่เข้าสู่เซลล์บริเวณปลายราก และการเคลื่อนย้ายโลหะหนักผ่านรากขึ้นมายังบริเวณเหนือพื้นดิน

2. การเพิ่มประสิทธิภาพในการสะสมโลหะหนักของพืชนอกจากการเติมตัวคีเลตแล้ว ยังมีอีกหลายวิธีที่น่าสนใจ เช่น การปรับสภาพของดินให้มีความเหมาะสมต่อการละลายของโลหะหนักแต่ละชนิด หรือการนำยีน (gene) ของพืชที่เป็น hyperaccumulator มาใส่ในวัชพืชที่มีมวลชีวภาพมาก ซึ่งจะทำให้วัชพืชนั้นสามารถสะสมโลหะหนักได้มากขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ส่วนอ้างอิง

ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. 2540. *ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี.* พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 327 หน้า.

เอกลักษณ์ คาน. 2544. "Bioremediation: Design and Application" , เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง Bioremediation จัดโดยภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ร่วมกับภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 26 หน้า.

An, Z. Z., Huang, Z. C., Lei, M., Liao, X. Y., Zheng, Y. M. And Chen, T. B. 2006. "Zinc tolerance and accumulation in *Pteris vittata* L. and its potential for phytoremediation of Zn- and As-contaminated soil", *Chemosphere*. 62: 796-802.

Ariyakanon, N., Soratana, K. and Chunkru, T. 2003. "Comparison of Zinc Accumulating Efficiency between *Brassica juncea* Coss. and *Brassica chinensis* Linn." , *Journal of Scientific Research Chulalongkorn University*, Special Issue I. 28: 51-60.

Ariyakanon, N. and Winaipanich, B. 2006. Phytoremediation of Copper Contaminated Soil by *Brassica juncea* (L.) Czern and *Bidens alba* (L.) DC. var. *radiata. Journal of Scientific Research.* 31 : 49-56.

Blaylock, M., Salt, D.E., Dushenkov, S., Zakharova, O., Gussman, C., Kapulnik, Y., Ensley, B.D. and Raskin, I. 1997. "Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents", *Environ. Sci. Technol.* 31:860-865.

Blaylock, M. J. and Huang, J. W. 2000. "Phytoextraction of metals". *In:* Phytoremediation of Toxic Metals:Using Plants to Clean Up the Environment. Raskin, I. and Ensley, B. D. (ed.) New York: John Wiley & Sons, Inc., p 53-70.

Brooks, R.R. 1998. "Plant that hyperaccumulate heavy metals: their role in phytoremediation, microbiology, archeology, mineral exploration and phytomining", *cited in*: Phytoremediation of Contaminated sites using woody biomass. D.L. Rockwood, L.Q. Ma, G.R. Alker, C. Tu and R.W. Cardellino. Available:http//www.floridacenter.org/publications/01_03 Rockwood.pdf (accessed July 18th , 2005) p 92.

Chen, H and Cutright, T. 2001. "EDTA and HEDTA Effects on Cd, Cr and Ni Uptake by *Helianthus annuus*", *Chemosphere*. 45: 21-28.

Chen, Y.X., Wang, Y.P., Wu, W.X., Lin, W. and Xue, S.G. 2006. "Impacts of chelate-assisted phytoremediation on microbial community composition in the rhizosphere of a copper accumulator and non-accumulator", *Science of the Total Environment*. 356:247-255.

Cunningham, S.D. and Ow, D.W. 1996. "Promises of Phytoremediation", *Plant Physiology*. 110: 715-719.

Dixon, N. 2003. "Octaquest® Biodegradable Chelants", UK Awards for Green Chemical Technology to Octel Performance Chemicals. Available: http://www.chemsoc.org/pdf/gcn/Octel_Award.pdf (accessed January 16th , 2006) p 1-31.

Ebbs, S.E., Norvell, W.A., and Kochain, L.V. 1998. "The effect of acidification and chelating agents on the solubilisation of uranium from contaminated soil", *J. Environ. Qual.* 27:1486-1494.

Ensley, B. D. 2000. "Rationale For Use of Phytoremediation", *In:* Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean Up the Environment. Raskin, I. and Ensley, B. D. (ed.) New York: John Wiley & Sons, Inc., p 3-11.

Feng, M.H., Shan, X.Q., Zhang, S. and Wen, B. 2005. "A comparison of the rhizosphere-based method with DTPA, EDTA, $CaCl_2$, and $NaNO_3$ extraction methods for prediction of bioavailability of metals in soil to barley", *Environmental Pollution*. 137: 231-240.

Geothberg, A., Greger, M., Holm, K. and Bengtsson, B. E. 2004. "Influence of nutrient levels on uptake and effects of mercury, cadmium, and lead in water spinach", *J. Environ. Qual.* 33: 1247-1255.

Hoyt, H. L., Gewanter, H. L. 1992. Citrate. in de Oude NT (ed). The handbook of environmental chemistry. Volume 3 Part F, Detergents. Springer Verlag: Heidelberg . 229-242.

Huang, J.W., Chen, J.J., Berti, W.R. and Cunningham, S.D. 1997. "Phytoremediation of lead-contaminated soils: Role of synthetic chelates in lead phytoextraction", *Environ. Sci. Technol.* 31: 800-805.

Jaworskal, J.S., Schowanek, D., Feijtel, T.C.J. 1999. "Environmental risk assessment for trisodium [S,S]-Ethylene Diamine Disuccinate, A biodegradable chelator used in detergent applications", *Chemosphere*. 38: 3591-3625.

Kashem, M.A. and Singh, B.R. 2002. "The effect of fertilizer additions on the solubility and plant-availability of Cd, Ni and Zn in soil", *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 62:

287-296.

Kos, B. and Lestan, D. 2004. "Chelator induced phytoextraction and in situ soil washing of Cu", *Environmental Pollution*. 132: 333-339.

Kramer, U., Pickering, I.J., Prince, R.C., Raskin, I.L. and Salt, D.E. 2000. "Subcellular localization and speciation of nickel in hyperaccumulator and non-accumulator *Thlaspi* species.", *Plant Physiology*. 122: 1343-1353.

Luo, C., Shen, Z. and Li., X. 2005 "Enhanced phytoextraction of Cu, Pb, Zn and Cd with EDTA and EDDS", *Chemosphere*. 59: 1-11.

Molas, J. and Baran, S. 2004. "Relationship between the chemical form of nickel applied to the soil and its uptake and toxicity to barley plants (*Hordeum vulgare* L.)", *Geoderma.* 122: 247-255.

Nasciomento**,** C.W.A. do. 2006. "Organic acids effects on desorption of heavy metals from a contaminated soil", *Sci. Agric*. 63: 276-280.

Nasciomento, C.W.A. do, Amarasiriwardena, D. and Xing, B. 2006. "Comparison of natural organic acids and synthetic chelates at enhancing phytoextraction of metals from a multi-metal contaminated soil", *Environmental Pollution*. 140: 114-123.

Nigram, R., Srivastava, S., Prakash, S. and Srivastava, M.M. 2001. "Cadmium mobilization and plant availability-The impact of organic acids commonly exuded from roots", *Plant Soil.* 230: 107-113.

Panich-Pat, T., Pokethitiyook, P., Kruatrachue, M., Upatham, E.S. and Srinives, P. 2004. "Removal of lead from contaminated soils by *Typha angustifolia*", *Water, Air, and Soil Pollution*. 155 (1-4): 159-171. Available: http//www.sc.mahidol.ac.th/tha/research/ phd46.htm (accessed October 18th, 2004)

Qin, F., Shan, X. and Wei, B. 2004. "Effects of low-molecular-weight organic acids and residence time on desorption of Cu, Cd, and Pb from soils", *Chemosphere*. 57: 253-263.

Reeves, R.D. and Baker, A.J. 2000. "Metal-Accumulating Plants", *In:* Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment. Raskin, I. and Ensley, B. D. (ed.) New York: John Wiley & Sons, Inc., p 193-229.

Robinson, B. H., Brooks, R. R., Howes, A. W., Kirkman, J. H. and Gregg, P. E. H. 1997. "The potential of the high-biomass nickel hyperaccumulator *Berkheya codddi* for

phytoremediation and phytomining", *Journal of Geochemical Exploration*, 60: 115-126.

Robinson, B. H., Lombi, E., Zhao, F. J. and McGrath, S. P. 2003. "Uptake and distribution of nickel and other metals in the hyperaccumulator *Berkheya codddi*", *New Phytologist*, 158: 279-285.

Rockwood, D.L., Ma L.Q., Alker G.R., Tu C. and R.W. Cardellino, R.W. 2001. "Phytoremediation of contaminated sites using woody biomass", University of Florida. Available: http//www.floridacenter.org/publications/01_03Rockwood.pdf (accessed July 18th, 2005) p 92.

Song, J., Zhao, F.J., Luo, Y.M., McGrath, S.P. and Zhang,H. 2004. "Copper uptake by *Elsholtzia splendens* and *Silene vulgaris* and assessment of copper phytoavailability in contaminated soils", *Environmental Pollution.* 128: 307-315.

Tanhan, P, Kruatrachue, M., Pokethitiyook, P. and Chaiyarat, R. 2007. "Uptake and accumulation of cadmium, lead and zinc by Siam weed [*Chromolaena odorata* (L.) King & Robinson]", *Chemosphere*. 68: 323-329.

Turgut, C., Pepe, M.K. and Cutright, T.J. 2004. "The effect of EDTA and citric acid on phytoremediation of Cd, Cr, and Ni from soil using *Helianthus annuus*", *Environmental Pollution*. 131: 147-154.

Wang, S. H., Yang, Z. M., Yang, H., Lu, B., Li, S. Q. And Lu, Y. P. 2004. "Copper-induced stress and antioxidative responses in roots of *Brassica juncea* L.", *Bot. Bull. Acad. Sin.* 45: 203-212.

Wikipedia, 2007. "DTPA". Available: http//en.wikipwdia.org/wiki/DTPA. (accessed May 24th, 2007) p 1-4.

Wongkongkatep, J., Fukushi, K., Parkpian, P., DeLaune, R.D. and Jugsujinda, A. 2003. "Arsenic uptake by native fern species in Thailand: Effect of chelating agents on hyperaccumulation of arsenic by *Pityrogramma calomelanos*", *Journal of Environmental Science and Health*, 38: 2773-2784.

Yanqun , Z., Yuan, L., Jianjun, C., Haiyan, C., Li, Q. And Schvartz, C. 2005. "Hyperaccumulation of Pb, Zn and Cd in herbaceous grown on lead-zinc mining area in Yunna, China", *Environmental International*. 31: 755-762.