

การนำบัณฑิตที่ป็นเพื่อนทองแดงโดยใช้ผักกาดเขียวปลี ต้อยติ่ง และไมยราบ



นาย บัญชากร วินัยพานิช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-4964-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**PHYTOREMEDIATION OF COPPER CONTAMINATED SOIL USING
INDIAN MUSTARD, MINNIERROOT AND SENSITIVE PLANT**

Mr. Banchakarn Winaipanich

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science**

(Inter-Department)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-17-4964-3

บัญชาการ วิทยพานิช : การบำบัดดินที่ปนเปื้อนทองแดง โดยใช้ผักกาดเขียวปลี ด้อยดิ่ง และไมยราบ (PHYTOREMEDIATION OF COPPER CONTAMINATED SOIL USING INDIAN MUSTARD, MINNIEROOT AND SENSITIVE PLANT) อ.ที่ปรึกษา: อ. ดร. นัยนันท์ อริยกานนท์, 153 หน้า. ISBN 974-17-4964-3

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดดินที่ปนเปื้อนทองแดง โดยใช้ผักกาดเขียวปลี (*Brassica juncea*) ด้อยดิ่ง (*Ruellia tuberosa*) และ ไมยราบ (*Mimosa pudica*) โดยศึกษาความเข้มข้นของทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ส่วนราก และพืชทั้งต้นที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วันซึ่งปลูกพืชในดินที่มีการเติมทองแดงความเข้มข้น 0 50 100 150 และ 200 mg/kg และผลของการเติมตัวคีเลต 3 ชนิด ได้แก่ DTPA (diethylenetriaminepentaacetic acid) ammonium sulfate และ citric acid ในดินที่มีการเติมทองแดงความเข้มข้น 100 mg/kg เพื่อหาตัวคีเลตที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการสะสมทองแดงในพืช

พืชทั้ง 3 ชนิดจะสะสมทองแดงได้ในปริมาณสูงสุดเมื่อปลูกในดินที่มีการเติมทองแดงความเข้มข้น 200 mg/kg โดยที่ความเข้มข้นของทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินของผักกาดเขียวปลีและด้อยดิ่งมากที่สุดจะพบที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 วันซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,700 และ 1,220 mg/kg ตามลำดับ แต่ในไมยราบจะพบที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 60 วันซึ่งมีค่าเท่ากับ 243 mg/kg สำหรับความเข้มข้นของทองแดงในส่วนรากของผักกาดเขียวปลี ด้อยดิ่ง และไมยราบจะมีค่ามากที่สุดที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 50 วันโดยมีค่าเท่ากับ 1,120 5,180 และ 1,300 mg/kg ตามลำดับ

สำหรับความสามารถของตัวคีเลตพบว่า DTPA ทำให้ความเข้มข้นของทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินของผักกาดเขียวปลีที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 วันมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 796 mg/kg แต่ในส่วนราก citric acid ทำให้ความเข้มข้นของทองแดงมีค่าถึง 1,340 mg/kg สำหรับด้อยดิ่ง ammonium sulfate ทำให้ความเข้มข้นของทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 วันมากที่สุดมีค่า 597 mg/kg แต่ในส่วนราก citric acid มีผลการสะสมความเข้มข้นของทองแดงที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 50 วันมากที่สุดมีค่า 2,130 mg/kg สำหรับไมยราบ ammonium sulfate ทำให้ความเข้มข้นของทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 50 วันมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 128 mg/kg แต่ในส่วนราก DTPA ทำให้ความเข้มข้นของทองแดงมีค่ามากที่สุด 971 mg/kg ซึ่งความเข้มข้นของทองแดงในไมยราบทั้งที่ใส่และไม่ใส่ตัวคีเลตมีค่าใกล้เคียงกัน ตัวคีเลตทั้ง 3 ชนิดจึงไม่มีผลต่อความเข้มข้นของทองแดงในไมยราบ

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ผักกาดเขียวปลีมีความเข้มข้นของทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินสูงที่สุดแต่ความเข้มข้นของทองแดงจะมีค่ามากในช่วงแรกและจะลดลงเรื่อยๆ ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยวมากขึ้น สำหรับด้อยดิ่งและไมยราบมีความเข้มข้นของทองแดงในส่วนรากมากกว่าส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินและระยะเวลาเก็บเกี่ยวไม่มีผลต่อความเข้มข้นของทองแดงในพืชทั้ง 2 ชนิด

สาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา).....ลายมือชื่อนิติศ.....บัญชาการ วิทยพานิช

ปีการศึกษา.....2548.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....นัยนันท์ อริยกานนท์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4689100520 : MAJOR INTER-DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD : phytoremediation/ copper/ *Brassica juncea*/ *Ruellia tuberosa*/ *Mimosa pudica*



BANCHAKARN WINAIPANICH : PHYTOREMEDIATION OF COPPER CONTAMINATED SOIL USING INDIAN MUSTARD, MINNIEROOT AND SENSITIVE PLANT. THESIS ADVISOR : NAIYANAN ARIYAKANON, Ph.D.Sc., 153 pp. ISBN 974-17-4964-3

The study is aimed to remedy copper contaminated soil by using indian mustard (*Brassica juncea*), minnieroot (*Ruellia tuberosa*), and sensitive plant (*Mimosa pudica*). The copper concentration in shoots, roots, and whole plants was determined after harvesting at 40, 50, and 60 days. Plants were grown in amended soils containing copper at the concentration of 0, 50, 100, 150, and 200 mg/kg, respectively. The three chelating agents namely, DTPA (diethylenetriaminopentaacetic acid), ammonium sulfate, and citric acid, were used to study their effects on soils amended with copper at 100 mg/kg. This was to select the most suitable chelating agent that could increase the efficiency of copper accumulation in plants.

All plants highly accumulated copper when grew in soils containing 200 mg/kg copper. The concentration of copper in shoots of indian mustard and minnieroot harvested on Day 40 were 1,700 and 1,220 mg/kg, respectively, whereas 243 mg/kg of copper was found in sensitive plant harvested on Day 60. The copper concentration in roots of indian mustard, minnieroot, and sensitive plant was highest on Day 50 at 1,120, 5,180, and 1,300 mg/kg, respectively.

When studying the effects of various chelating agents, it was found that the highest copper concentration (796 mg/kg) was in the shoots of indian mustard with added DTPA harvested on Day 40. In root parts of indian mustard, citric acid supported in increasing of copper concentration upto 1,340 mg/kg. In minnieroot, ammonium sulfate increased copper concentration (597 mg/kg) in shoots after harvesting on Day 40, whereas on Day 50, citric acid increased upto 2,130 mg/kg of copper concentration. In sensitive plant, ammonium sulfate highest increased copper concentration in shoots at 128 mg/kg after harvesting on Day 50, whereas DTPA helped in increasing copper concentration at 971 mg/kg. However, the concentration of copper in sensitive plant was insignificantly difference between with and without adding chelating agents. Therefore, all three chelating agents had no effect on copper concentration of sensitive plant.

It can be concluded that indian mustard had capable in accumulation of the highest copper concentration in roots at the beginning of harvesting and decreased gradually thereafter. The copper concentration in roots of minnieroot and sensitive plant was higher when compared to the concentration in shoots and the time duration of harvesting had no effect on copper concentration in both plants.

Field of study....Environmental Science (Inter-Department)...Student's signature.....
 Academic year.....2005.....Advisor's signature.....
 Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยเรื่อง “Copper Accumulating Efficiency of *Brassica juncea* and *Bidens alba*” โดยมีอาจารย์ ดร. นัยนันทน์ อริยกานนท์ เป็นหัวหน้าโครงการ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก โครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ ดร. นัยนันทน์ อริยกานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาอบความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำต่างๆ และให้โอกาสลูกศิษย์ได้ศึกษาในสิ่งที่สนใจ จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี นอกจากนี้ยังได้กรุณาให้ข้อคิดต่างๆ และฝึกทักษะในการทำงานเพื่อนำมาซึ่งความสำเร็จ อันก่อให้เกิดประโยชน์อย่างยิ่งต่อศิษย์

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เป็นประธานกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึง รองศาสตราจารย์ ดร. ปรีดาบุญหลง และ อาจารย์ ดร. เบญจลักษณ์ กาญจนเศรษฐ์ ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้ข้อคิดเห็น ข้อเสนอแนะ ตลอดจนช่วยตรวจรายละเอียดต่างๆ ในวิทยานิพนธ์จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ทุนอุดหนุนวิจัยบางส่วน ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องมือและห้องปฏิบัติการ อาจารย์ ดร. คอศักดิ์ สีลานนท์ และภาควิชาพฤกษศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเพื่อแปลงทดลองพฤกษศาสตร์เพื่อใช้ในการสร้างเรือนทดลอง รองศาสตราจารย์ ดร. อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ ที่ให้ความรู้เกี่ยวกับเรื่องดินและการเติมโลหะหนักลงในดิน อาจารย์ ดร. ศุภวิน วัชรมูล ที่ช่วยให้ความรู้เกี่ยวกับภาษาอังกฤษ คุณเพ็ญศรี ชูบรรจง และคุณจิระประภา เนียมปาน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในห้องปฏิบัติการ คุณจันทิมา สกุลพานิชย์ คุณกมลวรรณ พุ่มไม้ คุณวิสา สอนใจ คุณสาวเดือน ทาวะรัมย์ คุณวิไล พันธุ์งหาญ คุณจุฑามาศ กิจจานุรักษ์ คุณนันทิยา ลาภสาธิต คุณพรพรรณ อุดมั่ง คุณธิดารัตน์ พงษ์คุณ คุณปัญญานิช บริเวชานนท์ คุณเมทินี วรรณวิจิตร คุณสาวตรี พูลมา คุณสกุลรัตน์ พุกะวรรณะ คุณประกายพฤษ์ บุญเกิด คุณชนิดาภา พันธุ์ไชย คุณภัทรวรรณ เลิศสุชาตวนิช คุณศุภกิตต์ เจียรสุวรรณ คุณกิตติภูมิ พุ่มแดง และคุณพิสุทธิ์ อนุรัตน์ รวมทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ชาววิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มีมากมายจนไม่อาจจะกล่าวชื่อถึงได้ครบทุกท่าน ที่ได้มอบแรงกายและแรงใจจนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ท้ายสุดขอกราบขอบพระคุณ ครอบครัว “วินัยพานิช” ที่ให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน และคอยเอาใจใส่เป็นกำลังใจให้ตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูป	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัยนี้	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 การบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation)	5
2.1.1 คำจำกัดความของการบำบัดโดยใช้พืช (Definition of Phytoremediation)	5
2.1.2 ชนิดของการบำบัดโดยใช้พืช (Types of Phytoremediation)	5
2.1.2.1 Phytodecontamination	6
2.1.2.2 Phytostabilization	7
2.1.3 หลักการทำงานของ การบำบัดโดยใช้พืช	8
2.1.3.1 การดูดซับสารปนเปื้อนโดยพืช	9
2.1.3.2 การกระตุ้นการย่อยสลายทางชีวภาพบริเวณรากพืช	9
2.1.3.3 การเปลี่ยนแปลงสภาพทางเคมีของดิน โดยพืช	10
2.2 Phytoextraction	10
2.2.1 คำจำกัดความของ Phytoextraction	10
2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักโดยพืช	10
2.2.3 พืชที่มีลักษณะเหมาะสมในการบำบัดโลหะหนักโดยใช้พืช	12
2.2.4 กลไกการทนต่อโลหะหนักของพืช	13
2.3 ทองแดง	16
2.3.1 ธรรมชาติของทองแดง	16

	หน้า
2.3.1.1 ประวัติการค้นพบทองแดง	16
2.3.1.2 คุณสมบัติของทองแดง	17
2.3.1.3 ทองแดงในดิน	18
2.3.1.4 ทองแดงในพืช	19
2.3.2 อันตรายจากทองแดงที่มีการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม	21
2.4 พืชที่ใช้ในการบำบัดทองแดงในดิน	22
2.4.1 การคัดเลือกพืชที่นำมาใช้ในงานวิจัย	22
2.4.2 ผักกาดเขียวปลี (Indian mustard)	23
2.4.2.1 สภาพแวดล้อมที่ผักกาดเขียวปลีต้องการ	24
2.4.2.2 การปลูกผักกาดเขียวปลี	25
2.4.2.3 การปฏิบัติรักษาผักกาดเขียวปลี	26
2.4.2.4 การเก็บเกี่ยวผักกาดเขียวปลี	27
2.4.3 ค้อยดิ่ง (Minnicroot)	27
2.4.3.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของค้อยดิ่ง	28
2.4.3.2 ประโยชน์ของค้อยดิ่ง	28
2.4.4 ไมยราบ (Sensitive plant)	28
2.4.4.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของไมยราบ	29
2.4.4.2 ประโยชน์ของไมยราบ	30
2.5 การเติมสารเคมีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของพืชในการบำบัดโลหะหนัก	31
2.5.1 ความหมายของตัวคีเลต	31
2.5.2 การคัดเลือกตัวคีเลตที่ใช้ในงานวิจัย	31
2.5.3 คุณสมบัติของตัวคีเลตที่ใช้ในงานวิจัย	32
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	35
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	35
3.2 สถานที่ดำเนินงานวิจัย	36
3.3 ขั้นตอนงานวิจัย	36
3.3.1 เตรียมดิน	36
3.3.2 เตรียมแปลงทดลอง	38
3.3.3 เตรียมเมล็ดพันธุ์	38
3.3.4 เตรียมการทดลอง	38
3.3.5 ดำเนินการเพาะปลูกพืช	39

3.3.6	นำตัวอย่างพืชและดินที่ได้จากงานวิจัยไปวิเคราะห์	39
3.3.7	รวบรวมและประมวลผลของข้อมูลที่ได้จากงานวิจัย	40
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล		41
4.1	คุณสมบัติของดินที่ใช้ในงานวิจัย	41
4.2	น้ำหนักแห้งของฝักกาดเขียวปลี ค้อยดิ่ง และไมยราบ	46
4.3	การเปรียบเทียบความเข้มข้นและปริมาณของทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) และส่วนราก (root) ของฝักกาดเขียวปลี ค้อยดิ่ง และไมยราบ	51
4.3.1	การเปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) และส่วนราก (root) ของฝักกาดเขียวปลี	51
4.3.2	การเปรียบเทียบปริมาณทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) และส่วนราก (root) ของฝักกาดเขียวปลี	53
4.3.3	การเปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) และส่วนราก (root) ของค้อยดิ่ง	55
4.3.4	การเปรียบเทียบปริมาณทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) และส่วนราก (root) ของค้อยดิ่ง	56
4.3.5	การเปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) และส่วนราก (root) ของไมยราบ	57
4.3.6	การเปรียบเทียบปริมาณทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) และส่วนราก (root) ของไมยราบ	59
4.4	การเปรียบเทียบความเข้มข้นและปริมาณทองแดงในฝักกาดเขียวปลี ค้อยดิ่ง และไมยราบที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน	60
4.4.1	การเปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงในฝักกาดเขียวปลี ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน	60
4.4.2	การเปรียบเทียบปริมาณทองแดงในฝักกาดเขียวปลี ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน	63
4.4.3	การเปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงในค้อยดิ่ง ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน	66
4.4.4	การเปรียบเทียบปริมาณทองแดงในค้อยดิ่ง ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน	69
4.4.5	การเปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงในไมยราบ ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน	72

4.4.6 การเปรียบเทียบปริมาณทองแดงในไมยราบ ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน.....	74
4.5 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงในผักกาดเขียวปลี ด้อยดิ่ง และไมยราบ ที่ระดับความเข้มข้นของทองแดงในดินแตกต่างกัน.....	77
4.5.1 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงในพืชทั้ง 3 ชนิดที่มีการเติม ทองแดงในดิน 0 mg/kg.....	78
4.5.2 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงในพืชทั้ง 3 ชนิดที่มีการเติม ทองแดงในดิน 50 mg/kg.....	79
4.5.3 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงในพืชทั้ง 3 ชนิดที่มีการเติม ทองแดงในดิน 100 mg/kg.....	81
4.5.4 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงในพืชทั้ง 3 ชนิดที่มีการเติม ทองแดงในดิน 150 mg/kg.....	82
4.5.5 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงในพืชทั้ง 3 ชนิดที่มีการเติม ทองแดงในดิน 200 mg/kg.....	84
4.6 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงในผักกาดเขียวปลี ด้อยดิ่ง และไมยราบ ที่ได้รับการเติมสารปรับปรุงดินต่างชนิดกัน.....	86
4.6.1 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงในผักกาดเขียวปลีที่มีการเติม ตัวคีเลตและทองแดง 100 mg/kg ในดิน.....	86
4.6.2 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงในด้อยดิ่งที่มีการเติม ตัวคีเลตและทองแดง 100 mg/kg ในดิน.....	90
4.6.3 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงในไมยราบที่มีการเติม ตัวคีเลตและทองแดง 100 mg/kg ในดิน.....	93
4.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสะสมทองแดงในผักกาดเขียวปลี ด้อยดิ่ง และไมยราบ.....	96
4.7.1 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) ของผักกาดเขียวปลี ด้อยดิ่ง และไมยราบ.....	96
4.7.2 การเปรียบเทียบปริมาณทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) ของผักกาดเขียวปลี ด้อยดิ่ง และไมยราบ.....	101
4.7.3 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงในส่วนราก (root) ของผักกาดเขียวปลี ด้อยดิ่ง และไมยราบ.....	105

4.7.4 การเปรียบเทียบปริมาณทองแดงในส่วนราก (root) ของผักกาดเขียวปลี ค้อยติ่ง และไมยราบ	110
4.7.5 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงในผักกาดเขียวปลี ค้อยติ่ง และไมยราบทั้งต้น	114
4.7.6 การเปรียบเทียบปริมาณทองแดงในผักกาดเขียวปลี ค้อยติ่ง และไมยราบทั้งต้น	118
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	123
5.1 สรุปผลการวิจัย	123
5.1.1 ความเข้มข้นและปริมาณของทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) และส่วนราก (root) ของผักกาดเขียวปลี ค้อยติ่ง และไมยราบ	123
5.1.2 ความเข้มข้นและปริมาณของทองแดงในผักกาดเขียวปลี ค้อยติ่ง และไมยราบที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน	124
5.1.3 ความเข้มข้นของทองแดงในผักกาดเขียวปลี ค้อยติ่ง และไมยราบ ที่ปลูกในดินที่มีการเติมทองแดงความเข้มข้น 0 50 100 150 และ 200 mg/kg	125
5.1.4 ความเข้มข้นของทองแดงในผักกาดเขียวปลี ค้อยติ่ง และไมยราบ ที่ปลูกในดินที่มีการเติมทองแดงความเข้มข้น 100 mg/kg ร่วมกับ DTPA ammonium sulfate และ citric acid	126
5.1.5 ประสิทธิภาพของการสะสมทองแดงในผักกาดเขียวปลี ค้อยติ่ง และไมยราบ	127
5.2 ข้อเสนอแนะ	128
รายการอ้างอิง	130
ภาคผนวก	137
ภาคผนวก ก	138
ภาคผนวก ข	151
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	153

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของทองแดง	18
2.2 รูปของทองแดงที่พบได้ในดิน	18
3.1 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์สมบัติของดิน	37
4.1 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในงานวิจัย	42
4.2 สมการเชิงเส้นของปริมาณทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) ส่วนราก (root) และทั้งต้นของผักกาดเขียวปลีที่ปลูกในดินที่มีการเติมทองแดง 0 50 100 150 และ 200 mg/kg	65
4.3 สมการเชิงเส้นของปริมาณทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) ส่วนราก (root) และทั้งต้นของถั่วคั่งที่ปลูกในดินที่มีการเติมทองแดง 0 50 100 150 และ 200 mg/kg	71
4.4 สมการเชิงเส้นของปริมาณทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) ส่วนราก (root) และทั้งต้นของไมยราบที่ปลูกในดินที่มีการเติมทองแดง 0 50 100 150 และ 200 mg/kg	76
4.5 สมการเชิงเส้นของความเข้มข้นของทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) ของ ผักกาดเขียวปลี ถั่วคั่งและไมยราบที่ปลูกในดินที่มีการเติมทองแดง 0 50 100 150 และ 200 mg/kg ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน	98
4.6 สมการเชิงเส้นปริมาณทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) ของ ผักกาดเขียวปลี ถั่วคั่งและไมยราบที่ปลูกในดินที่มีการเติมทองแดง 0 50 100 150 และ 200 mg/kg ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน	103
4.7 สมการเชิงเส้นของความเข้มข้นของทองแดงในส่วนราก (root) ของ ผักกาดเขียวปลี ถั่วคั่งและไมยราบที่ปลูกในดินที่มีการเติมทองแดง 0 50 100 150 และ 200 mg/kg ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน	107
4.8 สมการเชิงเส้นของปริมาณทองแดงในส่วนราก (root) ของ ผักกาดเขียวปลี ถั่วคั่งและไมยราบที่ปลูกในดินที่มีการเติมทองแดง 0 50 100 150 และ 200 mg/kg ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน	112
4.9 สมการเชิงเส้นของความเข้มข้นของทองแดงในผักกาดเขียวปลี ถั่วคั่ง และไมยราบทั้งต้นที่ปลูกในดินที่มีการเติมทองแดง 0 50 100 150 และ 200 mg/kg ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน	116

ตารางที่	หน้า
4.10 สมการเชิงเส้นของปริมาณทองแดงในผักกาดเขียวปลี ด้อยดิ่ง และไมยราบทั้งต้นที่ปลูกในดินที่มีการเติมทองแดง 0 50 100 150 และ 200 mg/kg ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน	120
ก-1 น้ำหนักแห้งของส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) และส่วนราก (root) ของผักกาดเขียวปลี ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน (กรัม).....	139
ก-2 น้ำหนักแห้งของส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) และส่วนราก (root) ของด้อยดิ่ง ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน (กรัม).....	140
ก-3 น้ำหนักแห้งของส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) และส่วนราก (root) ของไมยราบ ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน (กรัม).....	141
ก-4 ความเข้มข้นของทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) และส่วนราก (root) ของผักกาดเขียวปลีที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน (mg/kg).....	142
ก-5 ความเข้มข้นของทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) และส่วนราก (root) ของด้อยดิ่งที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน (mg/kg).....	143
ก-6 ความเข้มข้นของทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) และส่วนราก (root) ของไมยราบที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน (mg/kg).....	144
ก-7 ปริมาณทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) และส่วนราก (root) ของ ผักกาดเขียวปลีที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน ($\mu\text{g}/\text{ต้น}$).....	145
ก-8 ปริมาณทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) และส่วนราก (root) ของ ด้อยดิ่งที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน ($\mu\text{g}/\text{ต้น}$).....	146
ก-9 ปริมาณทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) และส่วนราก (root) ของไมยราบ ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน ($\mu\text{g}/\text{ต้น}$).....	147
ก-10 ความเข้มข้นของทองแดงในผักกาดเขียวปลีทั้งต้น (mg/kg) และปริมาณทองแดง ที่ผักกาดเขียวปลี 1 ต้น สามารถสะสมได้ ($\mu\text{g}/\text{ต้น}$) ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน.....	148
ก-11 ความเข้มข้นของทองแดงในด้อยดิ่งทั้งต้น (mg/kg) และปริมาณทองแดง ที่ด้อยดิ่ง 1 ต้น สามารถสะสมได้ ($\mu\text{g}/\text{ต้น}$) ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน.....	149
ก-12 ความเข้มข้นของทองแดงในไมยราบทั้งต้น (mg/kg) และปริมาณทองแดง ที่ไมยราบ 1 ต้น สามารถสะสมได้ ($\mu\text{g}/\text{ต้น}$) ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน.....	150

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กระบวนการ Phytodecontamination	6
2.2 กระบวนการ Phytostabilization	8
2.3 การดูดดึงโลหะหนัก (ทองแดง) เข้าสู่พืชโดยกระบวนการไฟโตเอ็กส์แทรกชัน (Uptake of Metals (Copper) by Phytoextraction)	9
2.4 Ascorbate-glutathione cycle และปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้อง	15
2.5 ผักกาดเขียวปลี	24
2.6 ด้อยดิ่ง	27
2.7 ไมยราบ	29
2.8 สูตรโครงสร้างของ diethylenetriaminepentaacetic acid	32
2.9 สูตรโครงสร้างของ ammonium sulfate	33
2.10 สูตรโครงสร้างของ citric acid	33
4.1 น้ำหนักแห้งของผักกาดเขียวปลีในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) และส่วนราก (root) ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน (กรัม)	47
4.2 น้ำหนักแห้งของด้อยดิ่งในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) และส่วนราก (root) ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน (กรัม)	48
4.3 น้ำหนักแห้งของไมยราบในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) และส่วนราก (root) ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน (กรัม)	49
4.4 ความเข้มข้นของทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) และส่วนราก (root) ของผักกาดเขียวปลีที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน (mg/kg)	52
4.5 ปริมาณทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) และส่วนราก (root) ของผักกาดเขียวปลีที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน ($\mu\text{g}/\text{ต้น}$)	54
4.6 ความเข้มข้นของทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) และส่วนราก (root) ของด้อยดิ่งที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน (mg/kg)	55
4.7 ปริมาณทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) และส่วนราก (root) ของด้อยดิ่งที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน ($\mu\text{g}/\text{ต้น}$)	56
4.8 ความเข้มข้นของทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) และส่วนราก (root) ของไมยราบที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน (mg/kg)	58
4.9 ปริมาณทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) และส่วนราก (root) ของไมยราบที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน ($\mu\text{g}/\text{ต้น}$)	59

รูปที่	หน้า
4.24 ความเข้มข้นของทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) ของผักกาดเขียวปลี ด้อยดิ่ง และไมยราบที่ปลูกในดินที่มีการเติมทองแดง 0 50 100 150 และ 200 mg/kg ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน	97
4.25 ปริมาณทองแดงในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน (shoot) ของผักกาดเขียวปลี ด้อยดิ่ง และไมยราบที่ปลูกในดินที่มีการเติมทองแดง 0 50 100 150 และ 200 mg/kg ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน	102
4.26 ความเข้มข้นของทองแดงในส่วนราก (root) ของผักกาดเขียวปลี ด้อยดิ่ง และไมยราบที่ปลูกในดินที่มีการเติมทองแดง 0 50 100 150 และ 200 mg/kg ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน	106
4.27 ปริมาณของทองแดงในส่วนราก (root) ของผักกาดเขียวปลี ด้อยดิ่ง และไมยราบที่ปลูกในดินที่มีการเติมทองแดง 0 50 100 150 และ 200 mg/kg ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน	111
4.28 ความเข้มข้นของทองแดงในผักกาดเขียวปลี ด้อยดิ่ง และไมยราบทั้งต้น ที่ปลูกในดินที่มีการเติมทองแดง 0 50 100 150 และ 200 mg/kg ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน	115
4.29 ปริมาณของทองแดงในผักกาดเขียวปลี ด้อยดิ่ง และไมยราบทั้งต้น ที่ปลูกในดินที่มีการเติมทองแดง 0 50 100 150 และ 200 mg/kg ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 40 50 และ 60 วัน	119
ข-1 เรือนทดลอง ณ แปลงทดลองภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	151
ข-2 ผักกาดเขียวปลี ไมยราบ และด้อยดิ่งที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 60 วัน	152