การกำจัดโครเมียมด้วยต้นก้างปลาโดยวิธีการปลูกพืชในดินและไร้ดิน

นางสาวสุธินี วดีศิริศักดิ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHROMIUM REMOVAL BY PHYTOREMEDIATION AND HYDROPONICS WITH *Phyllanthus reticulatus* Poir.

Miss Sutinee Wadeesirisak

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science
(Interdisciplinary Program)
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดโครเมียมด้วยต้นก้างปลาโดยวิธีการปลูกพืชในดินและไร้ดิน
โดย	นางสาวสุธินี วดีศิริศักดิ์
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ม.ร.ว. กัลยา ติงศภัทิย์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. พันธวัศ สัมพันธ์พานิช)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุธินี วดีศิริศักดิ์: การกำจัดโครเมียมด้วยต้นก้างปลาโดยวิธีการปลูกพืชในดินและไร้ดิน. (CHROMIUM REMOVAL BY PHYTOREMEDIATION AND HYDROPONICS WITH *Phyllanthus reticulatus* Poir.) อ. ที่ปรึกษา : ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 165 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการกำจัดโครเมียมด้วยวัชพืชโดยวิธีการปลูกพืชในดินและไร้ดิน ซึ่งเป็นการใช้ความสามารถของวัชพืชที่พบในประเทศไทยที่สามารถดูดซับโครเมียม (Cr) จากดินที่มีการปนเปื้อน วัชพืชที่เลือกศึกษาคือ ต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus* Poir.) เนื่องจากเป็นพืชที่ไม่มีค่าทางเศรษฐกิจและไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และยังเป็นพืชที่สามารถสะสมโครเมียมทั้งหมด (TCr) ได้ โดยทำการศึกษาด้วยการปลูกลงดินในกระถางที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ Cr(VI) 0 และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ราก ลำต้น และใบ ของต้นก้างปลาสามารถสะสมโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 390.57, 61.47 และ 58.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ เป็นเวลา 30 วัน ส่วนโครเมียมไตรวาเลนท์ Cr(III) ที่ดูดซับส่วนมากพบใน ราก ลำต้น และใบ เท่ากับ 291.35, 3.43 และ 3.35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ที่เวลา 30 วัน ในขณะที่มีการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ใน ราก ลำต้น และใบ เท่ากับ 99.21, 58.04 และ 55.32 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังได้ทำการศึกษาโดยการปลูกพืชในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่ระดับความเข้มข้น 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งการศึกษาพบว่า ที่ระดับความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ราก ใบ และลำต้นของต้นก้างปลาสามารถดูดซับและสะสมโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 6,616.12, 14.46 และ 0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ที่เวลา 60 วัน ส่วนโครเมียมไตรวาเลนท์พบในส่วนของราก ใบ และ ลำต้น เท่ากับ 5,790.03, 8.04 และ 0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ที่เวลา 60 วัน และมีการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ ในส่วนของราก ใบ และลำต้น เท่ากับ 826.15, 6.41 และ 0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ที่เวลา 60 วัน เช่นกัน ซึ่งผลจากการสะสมและเคลื่อนย้ายโครเมียมในส่วนต่างๆ ของพืชพบว่า โครเมียมส่วนใหญ่ถูกเคลื่อนย้ายโดย phytoextraction และต้นก้างปลา *(Phyllanthus reticulatus)* เป็นพืชที่มีศักยภาพสำหรับบำบัดดินหรือน้ำที่ปนเปื้อนโครเมียม

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต.....

ปีการศึกษา 2550 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

4889158120: MAJOR INTER-DEPARTMENT OF ENVIRONMENT SCIENCE

KEY WORD: CHROMIUM / PHYTOREMEDIATION / HYDROPONICS / WEED PLANT SPECIES / *Phyllanthus reticulatus* Poir.

SUTINEE WADEESIRISAK: CHROMIUM REMOVAL BY PHYTOREMEDIATION AND HYDROPONICS WITH *Phyllanthus reticulatus* Poir., THESIS ADVISOR: PANTAWAT SAMPANPANISH, Ph.D. 165 pp.

The possibility of using phytoremediation by a weed plant species in Thailand to remove chromium (Cr) from soil and water was studied. A weed plant species was studied because it has no economic value and is a burden on the environment as agricultural waste. *Phyllanthus reticulatus* Poir., which has an ability to accumulate total chromium (TCr) was chosen for the study. This plant species was planted in pots which had a Cr concentration of 0 and 100 mg/kg. TCr accumulation capacity of the roots, stems and leaves on this plant was 390.57, 61.47 and 58.67 mg/kg of plant on a dry weight basis after 30 days, respectively, at a pulse hexavalent chromium [Cr(VI)] concentration. The trivalent chromium [Cr(III)] uptake by *Phyllanthus reticulatus* occurred mainly in roots, stems and leaves and measuring 291.35, 3.43 and 3.35 mg/kg of plant on a dry weight basis, respectively. After 30 days of dosing, *Phyllanthus reticulatus* had Cr(VI) accumulation in roots, stems and leaves of 99.21, 58.04 and 55.32 mg/kg of plant on a dry weight basis of the Cr(VI) input, respectively. Aside from using phytoremediation, Cr removal with *Phyllanthus reticulatus* using hydroponics was also studied. Artificial wastewater was derived by using potassium dichromate, with concentration of 5, 10 and 15 mg/L. *Phyllanthus reticulatus* had TCr accumulation in the roots, leaves and stems of 6,616.12, 14.46 and 0 mg/kg, respectively, of plant on a dry weight basis after 60 days with Cr(VI) concentration at 15 mg/L. The Cr(III) uptake by *Phyllanthus reticulatus* occurred mainly in roots, leaves and stems and registered 5,790.03, 8.04 and 0 mg/kg, respectively, after 60 days of dosing. Cr(VI) accumulation capacity of the roots, stems and leaves in this plant was 826.15, 6.41 and 0 mg/kg, respectively, after 60 days. The results on Cr accumulation and translocation in the plant tissues suggest that Cr was removed mainly via phytoextraction. Thus *Phyllanthus reticulatus* is suitable for the remediation of Cr contaminated soil and water.

Field of study	Environmental Science	Student's signature	Sutinee Wadeesirisak
Academic year	2007	Advisor's signature	Pantawat Sampanpanish

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณา ความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์จากบุคคลผู้มีพระคุณหลายๆ ท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ ความช่วยเหลือ และตรวจทานรายละเอียดต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์ และรองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ายิ่งเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้ข้อเสนอแนะ ข้อคิดเห็นที่มีส่วนสำคัญในการแก้ไขปรับปรุงวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

การทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ได้รับทุนจากหลายฝ่าย ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา บัณฑิตวิทยาลัย สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนบางส่วนในการทำวิทยานิพนธ์และขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี นอกจากนี้ขอขอบพระคุณ คุณอุดร คุณนิตยา คุณพิชญา และคุณสุกฤษฎิ์ ขจรเวหาศน์ คุณอิทธิพล สายดวง คุณกมลวรรณ สุวรรณวิสุทธิ์ คุณวราภรณ์ ศรีตัมภวา คุณกมลวรรณ์ สมอ๊อด และคุณเกริก ปิ่นตระกูล ผู้ซึ่งเป็นผู้ช่วยคนสำคัญ เป็นกำลังใจ ให้คำปรึกษา และคอยอยู่เป็นเพื่อนตลอดระยะเวลาที่ข้าพเจ้าทำวิทยานิพนธ์

ท้ายสุดนี้กราบขอบพระคุณคุณพ่อรักษ์ชัย คุณแม่ปิ่นแก้ว วดีศิริศักดิ์ และบุคคลในครอบครัว ที่ให้ความรัก ความห่วงใย คอยช่วยเหลือ เป็นกำลังใจสำคัญให้ข้าพเจ้าตลอดมา รวมทั้งให้การสนับสนุนเงินทุนเพื่อการศึกษาในครั้งนี้ คุณประโยชน์ที่ปรากฏในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฎ
สารบัญภาพ ..... ฐ
บทที่
1. บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ 2
1.3 ขอบเขตการศึกษา 3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
2.1 โครเมียม (Chromium) 5
2.1.1 ลักษณะทางเคมีของโครเมียม 5
2.1.2 รูปของโครเมียม 6
2.1.3 ค่ามาตรฐานของโครเมียม 7
2.1.4 ความเป็นพิษของโครเมียม 7
2.2 การฟื้นฟูดินโดยพืช (Phytoremediation) 11
2.2.1 ความหมาย 11
2.2.2 ประเภทของ Phytoremediation 11
2.2.3 พืชที่สะสมโลหะหนัก (Hyperaccumulator) 15
2.2.4 กลไกการทำงานของ Phytoremediation 15
2.2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนักโดยพืช 16
2.2.6 ข้อดีและข้อเสียของ Phytoremediation 18

บทที่ **หน้า**

2.3 การปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics) 20
2.3.1 ความหมาย 20
2.3.2 การปลูกพืชในสารละลาย (Water Culture) 21
2.3.3 ข้อดีและข้อเสียของการปลูกพืชแบบไร้ดิน 22
2.4 ต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus* Poir.) 25
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 25
2.5.1 การศึกษาการกำจัดโครเมียมโดยวิธีปลูกพืชในดิน 25
2.5.2 การศึกษาการกำจัดโครเมียมโดยวิธีปลูกพืชแบบไร้ดิน 27
3. วิธีดำเนินการวิจัย 32
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย 32
3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการปลูกต้นก้างปลา 32
3.1.2 วัสดุและอุปกรณ์ในการเก็บตัวอย่างดิน และน้ำ 32
3.1.3 วัสดุและอุปกรณ์ในการเก็บตัวอย่างพืช 33
3.1.4 วัสดุและอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ 33
3.2 สถานที่ทำการศึกษา 34
3.3 ระยะเวลาที่ทำการศึกษา 34
3.4 การเตรียมการทดลอง 37
3.4.1 การใช้พืชในการกำจัดโครเมียมที่ปลูกในดิน (Phytoremediation) 37
3.4.2 การใช้พืชในการกำจัดโครเมียมที่ปลูกแบบไร้ดิน (Hydroponics) 39
3.5 การดำเนินการทดลอง 40
3.5.1 การใช้พืชในการกำจัดโครเมียมที่ปลูกในดิน (Phytoremediation) 40
3.5.2 การใช้พืชในการกำจัดโครเมียมที่ปลูกแบบไร้ดิน (Hydroponics) 41
3.6 การเก็บตัวอย่าง 41
3.6.1 การใช้พืชในการกำจัดโครเมียมที่ปลูกในดิน (Phytoremediation) 41
3.6.2 การใช้พืชในการกำจัดโครเมียมที่ปลูกแบบไร้ดิน (Hydroponics) 42
3.7 การวิเคราะห์ตัวอย่าง 43
3.8 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ 45

บทที่ **หน้า**

4. ผลและวิจารณ์ผลการศึกษา 46
4.1 การกำจัดโครเมียมด้วยต้นก้างปลาโดยวิธีการปลูกพืชในดิน (Phytoremediation) 46
4.1.1 ชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ในดินที่ไม่มีการใส่สารประกอบโครเมียม 46
4.1.2 ชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) ในดินที่ไม่มีการใส่สารประกอบโครเมียม 48
4.1.3 ชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน 50
1) การกำจัดโครเมียมจากดิน 50
2) ปริมาณการสะสมโครเมียมในน้ำชะล้าง 51
4.1.4 ชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) ที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน 52
1) การกำจัดโครเมียมจากดิน 52
2) ปริมาณการสะสมโครเมียมในน้ำชะล้าง 53
3) ปริมาณการสะสมโครเมียมในต้นก้างปลา 55
4.1.5 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในดิน 57
4.2 การกำจัดโครเมียมด้วยต้นก้างปลาโดยวิธีการปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics) 59
4.2.1 คุณภาพของน้ำเสียสังเคราะห์ 59
1) ความต่างศักย์ออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (ORP) 59
2) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 61
3) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) 63
4) ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) 65
4.2.2 ปริมาณการสะสมโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ 67
1) โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดควบคุม (ไม่มีพืช) 67
2) โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) 70

บทที่ **หน้า**

4.2.3 ปริมาณการสะสมโครเมียมในต้นก้างปลา 73
1) ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดของต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) 73
2) ปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ของต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) 79
3) ปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ของต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) 85
4.2.4 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ 91
4.3 สมดุลมวล (Mass Balance) 92
4.3.1 การกำจัดโครเมียมด้วยต้นก้างปลาโดยวิธีการปลูกพืชในดิน (Phytoremediation) 92
4.3.2 การกำจัดโครเมียมด้วยต้นก้างปลาโดยวิธีการปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics) 94
4.4 องค์ประกอบทางเคมีของต้นก้างปลา 96
4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่ปนเปื้อนในดินและในน้ำด้วยต้นก้างปลา 100
5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ 102
5.1 สรุปผลการศึกษา 102
5.1.1 การกำจัดโครเมียมด้วยต้นก้างปลาโดยวิธีการปลูกพืชในดิน (Phytoremediation) 102
5.1.2 การกำจัดโครเมียมด้วยต้นก้างปลาโดยวิธีการปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics) 103
5.2 ข้อเสนอแนะ 103
รายการอ้างอิง 105
ภาคผนวก 111
ภาคผนวก ก 112
ภาคผนวก ข 160
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 165

สารบัญตาราง

ตาราง **หน้า**

3.1 รายละเอียดกิจกรรมในการศึกษาการกำจัดโครเมียมในดิน (Phytoremediation) 35

3.2 รายละเอียดกิจกรรมในการศึกษาการกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย (Hydroponics) 35

3.3 คุณสมบัติของดินเบื้องต้นที่ใช้ในการศึกษา 38

3.4 พารามิเตอร์ วิธีการวิเคราะห์ และเครื่องมือวิเคราะห์ตัวอย่างดิน พืช และน้ำ ที่ปลูกด้วยวิธีปลูกพืชในดิน (Phytoremediation) 44

3.5 พารามิเตอร์ วิธีการวิเคราะห์ และเครื่องมือวิเคราะห์ตัวอย่างพืช และน้ำ ที่ปลูกด้วยวิธีปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics) 45

4.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง ในดินชุดควบคุม (ไม่มีพืช) และชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) ที่ไม่มีการใส่สารประกอบโครเมียม และที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน 47

4.2 ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณการสะสมโครเมียมจากน้ำชะล้างในจานรองกระถางชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน 52

4.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณการสะสมโครเมียมจากน้ำชะล้างในจานรองกระถางชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) ที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน 54

4.4 สมดุลมวล (Mass Balance) ในการกำจัดโครเมียมโดยใช้ต้นก้างปลาด้วยวิธีปลูกพืชในดิน 93

4.5 สมดุลมวล (Mass Balance) ในการกำจัดโครเมียมโดยใช้ต้นก้างปลาด้วยวิธีปลูกพืชไร้ดิน 95

4.6 องค์ประกอบทางเคมีภายในต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) ที่ปลูกด้วยวิธีไร้ดิน [วิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-RF)] 98

4.7 องค์ประกอบทางเคมีภายในต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) ที่ปลูกในดิน [วิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-RF)] 99

4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่ปนเปื้อนทั้งในดินและในน้ำ 101

ผนวกที่ 1 มาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม 113

ผนวกที่ 2 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด (TCr) โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] และโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] ในส่วนต่างๆ ของพืช ที่ปลูกในดิน 114

ตาราง **หน้า**

ผนวกที่ 3 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด (TCr) โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] และโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] ในดินที่ทำการปลูกพืช 117
ผนวกที่ 4 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด (TCr) โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr (VI)] และโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr (III)] ในดินที่ไม่ได้ปลูกพืช 119
ผนวกที่ 5 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด TCr โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] และโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] ในน้ำชะล้างจากจานรองกระถางที่มีการปลูกต้นก้างปลา 122
ผนวกที่6 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด TCr โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr (VI)] และโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr (III)] ในน้ำชะล้างจากจานรองกระถางที่ไม่มีการปลูกต้นก้างปลา 124
ผนวกที่ 7 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด TCr โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] และโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] ในส่วนต่างๆ ของพืชด้วยวิธีปลูกพืชไร้ดิน 127
ผนวกที่ 8 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด TCr โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr (VI)] และโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr (III)] ในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ ด้วยวิธีปลูกพืชไร้ดิน 140
ผนวกที่ 9 คุณภาพน้ำเสียสังเคราะห์ในชุดควบคุม (ไม่มีพืช) 150
ผนวกที่ 10 คุณภาพน้ำเสียสังเคราะห์ในชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) 155

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ **หน้า**

1.1 แผนผังสรุปขอบเขตการวิจัย 4

2.1 แหล่งกำเนิดโครเมียมในอุตสาหกรรม 6

2.2 วงจรของโครเมียมที่มนุษย์ได้รับ 9

2.3 ประเภทของ Phytoremediation 14

2.4 วิธีการปลูกพืชในสารละลาย (Water Culture) 21

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน 36

4.1 ปริมาณการสะสมโครเมียมในดินชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ที่ไม่มีการใส่สารประกอบโครเมียม 48

4.2 ปริมาณการสะสมโครเมียมในดินชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) ที่ไม่มีการเติมสารประกอบโครเมียม 49

4.3 ปริมาณการสะสมโครเมียมในดินชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน 51

4.4 ปริมาณการสะสมโครเมียมในดินชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) ที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน 53

4.5 ปริมาณการสะสมโครเมียมในส่วนต่างๆ ของต้นก้างปลาในชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) ที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน 55

4.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในดินด้วยต้นก้างปลาที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน 58

4.7 ความต่างศักย์ออกซิเดชั่น-รีดักชั่นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดควบคุม (ไม่มีพืช) 60

4.8 ความต่างศักย์ออกซิเดชั่น-รีดักชั่นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) 60

4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดควบคุม (ไม่มีพืช) 62

4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) 62

ภาพประกอบ **หน้า**

4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดควบคุม (ไม่มีพืช) 64
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) 64
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดควบคุม (ไม่มีพืช) 66
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) 66
4.15 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดควบคุม (ไม่มีพืช) 69
4.16 ปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดควบคุม (ไม่มีพืช) 69
4.17 ปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดควบคุม (ไม่มีพืช) 69
4.18 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) 71
4.19 ปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) 71
4.20 ปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) 71
4.21 ปริมาณการสะสมโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) ที่ระดับความเข้มข้น 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร 72
4.22 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด (TCr) ในรากของต้นก้างปลา 77
4.23 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด (TCr) ในลำต้นของต้นก้างปลา 77
4.24 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด (TCr) ในใบของต้นก้างปลา 77
4.25 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในต้นก้างปลาทั้งส่วนราก ลำต้น และใบ 78
4.26 ปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr (VI)] ในรากของต้นก้างปลา 83
4.27 ปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr (VI)] ในลำต้นของต้นก้างปลา 83
4.28 ปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr (VI)] ในใบของต้นก้างปลา 83

ภาพประกอบ **หน้า**

4.29 ปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] ในต้นก้างปลาทั้งส่วน ราก ลำต้น และใบ 84
4.30 ปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] ในรากของต้นก้างปลา 89
4.31 ปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] ในลำต้นของต้นก้างปลา 89
4.32 ปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] ในใบของต้นก้างปลา 89
4.33 ปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] ในต้นก้างปลาทั้งในส่วน ราก ลำต้น และใบ 90
4.34 ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ 92
ผนวกที่ 1 การดำเนินงานวิจัยโดยวิธีปลูกพืชในดิน (Phytoremediation) 161
ผนวกที่ 2 การดำเนินงานวิจัยโดยวิธีปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics) 162
ผนวกที่ 3 เปรียบเทียบสีของตัวอย่างน้ำชุดควบคุม และชุดทดลองที่ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ วิเคราะห์แบบพัฒนาสี (Colorimetric) เพื่อหาปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 163
ผนวกที่ 4 เครื่องมือในการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ 164

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้ปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำเสีย ซึ่งมีการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำและลำธาร ก่อให้เกิดการสะสมของสารพิษและมีแนวโน้มที่จะเข้าสู่ระบบห่วงโซ่อาหาร (Food chain) เช่น แม่น้ำเจ้าพระยาพบว่า มีสารหนู ทองแดง ปรอท แคดเมียม ตะกั่ว นิกเกิล แมงกานีส และสังกะสี ในน้ำและในดินตะกอนเป็นจำนวนมาก (สมชาย สกุลอิสริยาภรณ์, 2539) ซึ่งปัจจุบันปัญหาดังกล่าวมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากการขยายตัวของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีประมาณ 80,000 แห่ง จากโรงงานทั่วประเทศที่ได้จดทะเบียนกับกรมโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งในจำนวนนี้มีประมาณร้อยละ 30 ได้มีการผลิตของเสียอันตรายออกมา แต่มีโรงงานที่มีการผลิตของเสียอันตรายในปริมาณค่อนข้างสูงประมาณ 1,000 โรงงาน เช่น โรงงานชุบโลหะ โรงงานผลิตสารเคมี และโรงงานฟอกหนัง เป็นต้น คาดว่าประมาณร้อยละ 90 ของของเสียอันตรายนี้เกิดจากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมทั้งสิ้น นอกจากนี้อุตสาหกรรมฟอกหนังยังเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการใช้โครเมียมในกระบวนการฟอกย้อม และมีการปลดปล่อยของเสียจากโรงงานออกสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดการปนเปื้อนของเสียอันตรายทั้งในดินลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน และแหล่งน้ำผิวดิน เป็นต้น โดยทั่วไปในธรรมชาติสามารถพบเห็นชนิดของโครเมียมในสิ่งแวดล้อมได้แก่ โครเมียมไตรวาเลนท์ [Trivalent Chromium; Cr(III)] และโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Hexavalent Chromium; Cr(VI)] โดยเฉพาะโครเมียมเฮกซาวาเลนท์จะมีอันตรายมากกว่าโครเมียมไตรวาเลนท์ (Sampanpanish, 2005) อีกทั้งโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดีกว่าโครเมียมไตรวาเลนท์ และสามารถแพร่กระจายได้ในวงกว้าง ซึ่งหากมิได้มีการจัดการโครเมียมที่ดี และถูกต้องหรือปล่อยไว้เช่นนี้ตามธรรมชาติ เมื่อระดับความเข้มข้นของโครเมียมเพิ่มขึ้นในระดับหนึ่งแล้วจะสามารถทำอันตรายต่อสุขอนามัย คุณภาพชีวิตของมนุษย์ สัตว์ และพืชได้ ดังนั้น พื้นที่ที่มีการปนเปื้อนโครเมียมควรได้รับการฟื้นฟูหรือบำบัดให้สะอาด

ซึ่งในปัจจุบัน กระบวนการกำจัดโลหะหนักในน้ำที่ออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้นมีด้วยกันหลายวิธี ได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี ขบวนการแลกเปลี่ยนอิออน หรือการใช้กระบวนการกรองผ่านเมมเบรน เป็นต้น ซึ่งวิธีเหล่านี้สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดี แต่วิธีการเหล่านี้เป็นวิธีการที่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูงทั้งสิ้น (จันทร์นา สงวนรุ่งวงค์, 2540) ดังนั้นหากสามารถนำวิธีการกำจัดโลหะหนักที่มีประสิทธิภาพ โดยไม่ต้องใช้เทคโนโลยีราคา

แพงและยุ่งยากมาใช้ จึงน่าจะเป็นทางเลือกที่ดีอีกทางเลือกหนึ่ง อย่างไรก็ตาม การศึกษาโดยการใช้ต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus* Poir.) ซึ่งเป็นวัชพืชที่สามารถพบเห็นได้ทั่วไป เพื่อการกำจัดโครเมียมในดินและน้ำ จึงเป็นแนวทางเลือกหนึ่งในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ และเป็นเทคโนโลยีที่อาจมีการใช้งบประมาณในการลงทุนต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมหรือที่เรียกว่า Environmental Friendly อีกด้วย

ในภาวะเศรษฐกิจของประเทศในปัจจุบัน การใช้พืชในการกำจัดของเสียในดินหรือที่เรียกว่า Phytoremediation และการใช้เทคโนโลยีการปลูกพืชไร้ดิน หรือเรียกว่า Hydroponics มาใช้ในการกำจัดของเสีย จึงเป็นเทคโนโลยีที่ควรนำมาพิจารณาใช้ในการฟื้นฟูการปนเปื้อนโลหะหนักในดินและน้ำเสีย โดย Phytoremediation เป็นการใช้พืชเป็นตัวกลางในการดูดซับ และสะสมโครเมียมจากดิน ในขณะที่ Hydroponics เป็นการใช้พืชเป็นตัวกลางในการดูดซับโครเมียมในน้ำที่ปนเปื้อน โดยพืชจะทำหน้าที่ในการดูดซับและสะสมของเสียไว้ในส่วนต่างๆ ของพืชอาทิ สะสมไว้ในใบ ลำต้น และราก ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้ได้ใช้พืชกลุ่มวัชพืชคือ ต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus* Poir.) เนื่องจากวัชพืชดังกล่าวมีการเจริญเติบโตเร็ว ดูแลง่าย สามารถพบได้ทั่วไป มีช่วงอายุสั้น (1-2 ปี) มีมวลชีวภาพสูง (Biomass) ขยายพันธุ์ได้ดี และที่สำคัญมีความสามารถในการดูดซับโลหะสูงและรับประทานไม่ได้ (Sampanpanish, 2005) นอกจากนี้ การฟื้นฟูหรือกำจัดของเสียหรือโลหะหนักด้วยวิธีการดังกล่าวนั้น สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้ได้กับการแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนของโครเมียมจากดินและน้ำเสียในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนได้

1.2 วัตถุประสงค์

1) เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับโครเมียมของต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus* Poir.) ที่ปลูกในดินและในน้ำ

2) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการกำจัดโครเมียมด้วยต้นก้างปลา แบบปลูกพืชในดิน (Phytoremediation) และการปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics)

3) เพื่อศึกษาปริมาณการสะสมโครเมียมของต้นก้างปลาในส่วนราก ลำต้น และใบ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1) พืชที่ใช้ในการศึกษาทั้งในดินและในน้ำ คือ ต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus* Poir.) ซึ่งมีอายุประมาณ 1-2 เดือน โดยทำการเพาะด้วยวิธีการปักชำ

2) โลหะหนักที่ทำการศึกษา คือ โครเมียม (Chromium) ซึ่งใช้ในรูปของโครมียมเฮกซาวาเลนท์ [Chromium Hexavalent; Cr(VI)] จากสารประกอบโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$)

3) ทำการศึกษาการสะสมและดูดซับโครเมียม 2 วิธีการด้วยกันคือ วิธีที่ปลูกพืชในดิน (Phytoremediation) และวิธีที่ปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics)

4) ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาโดยวิธีการปลูกพืชในดินได้แก่

   4.1) ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ คือ 0 และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน

   4.2) ทำการเก็บตัวอย่างดิน พืช และน้ำ ในวันที่ 30, 60, 90 และ 120 วัน ของการทดลอง

   4.3) พารามิเตอร์ที่ใช้ในการติดตามผลการศึกษาได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และความเข้มข้นของโครเมียมในรูปโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ Cr(VI) โครเมียมไตรวาเนท์ Cr(III) และโครเมียมทั้งหมด (TCr)

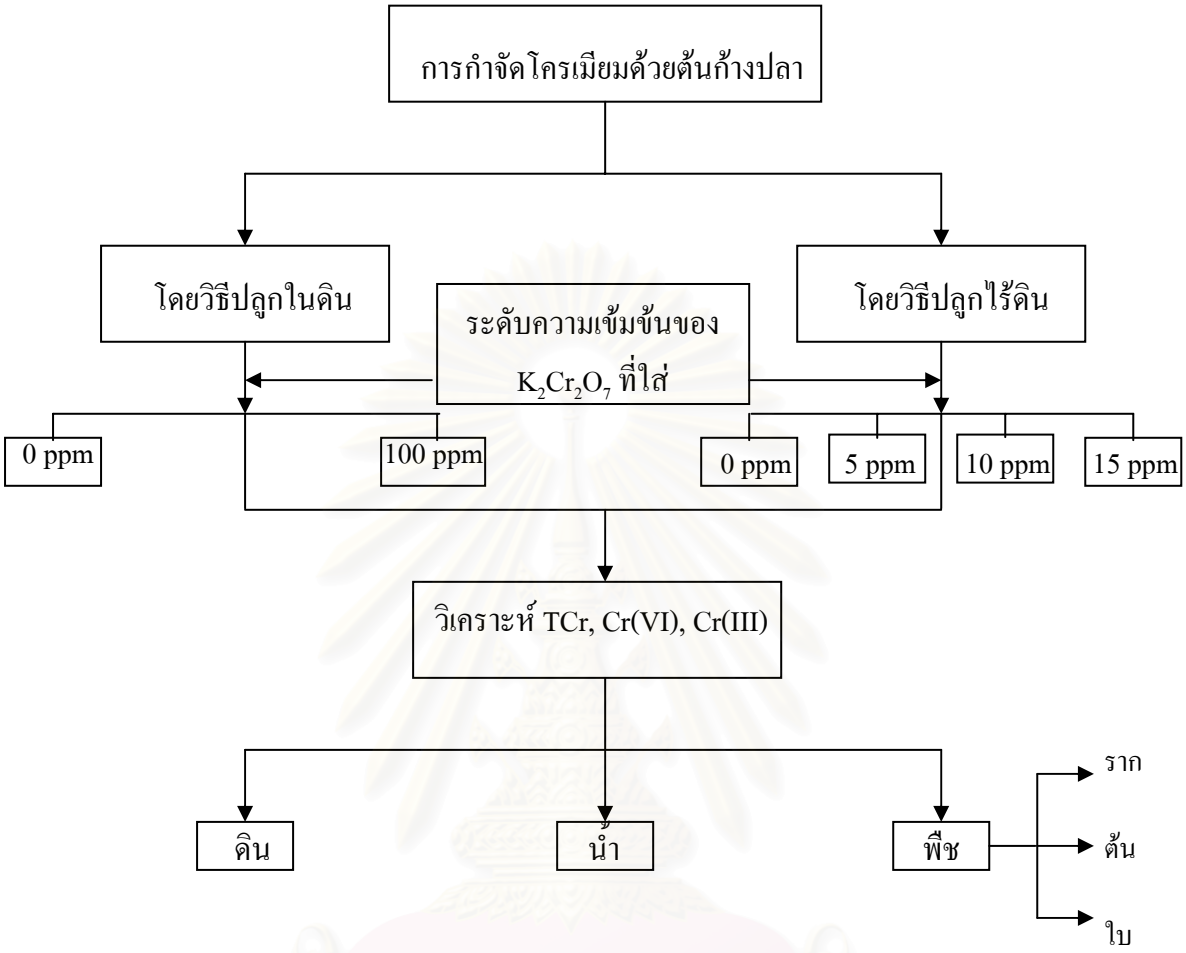
5) ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาโดยวิธีการปลูกพืชไร้ดินได้แก่

   5.1) ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ คือ 0, 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

   5.2) ทำการเก็บตัวอย่างพืช และน้ำ ในวันที่ 1, 15, 30, 45 และ 60 วัน ของการทดลอง

   5.3) พารามิเตอร์ที่ใช้ในการติดตามผลการศึกษาได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (ORP) ค่าความนำไฟฟ้า (EC) ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solid) และความเข้มข้นของโครเมียมในรูปโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ Cr(VI) และโครเมียมไตรวาเลนท์ Cr(III) และโครเมียมทั้งหมด (TCr)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1.1 แผนผังสรุปขอบเขตการวิจัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ทราบถึงประสิทธิภาพและความสามารถของต้นก้างปลาในการดูดซับ และสะสมโครเมียมในดินและในน้ำเสียสังเคราะห์

2) ทราบถึงระดับปริมาณความเข้มข้นของโครเมียมสูงสุดที่ต้นก้างปลาสามารถทนทานได้และระยะเวลาที่ต้นก้างปลาสามารถดูดซับและสะสมโครเมียมได้สูงสุด และไม่เป็นอันตรายต่อต้นพืช

3) ทราบถึงกระบวนการเคลื่อนย้ายโครเมียมจากดินสู่ราก ลำต้น และใบพืช

4) สามารถนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้ ในการฟื้นฟูพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักจากภาคการเกษตร และภาคอุตสาหกรรม ทั้งในดินและในน้ำเสียสังเคราะห์ได้

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

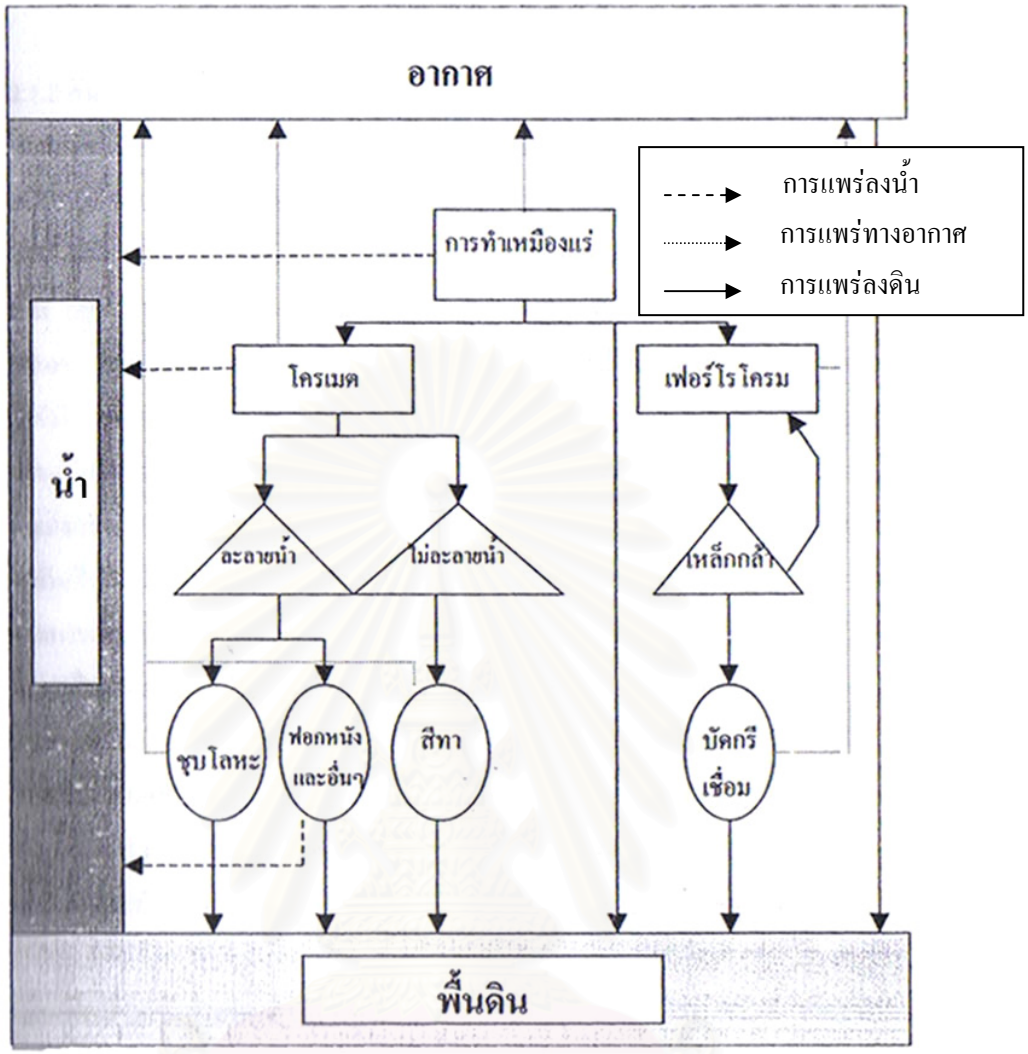
2.1 โครเมียม (Chromium)

2.1.1 ลักษณะทางเคมีของโครเมียม

โครเมียม (Chromium) เป็นโลหะทรานซิชั่น สีขาวเงิน บางครั้งอยู่ในรูปผลึก มีน้ำหนักโมเลกุล 51.9961 จำนวนอะตอมเท่ากับ 24 มีจุดหลอมเหลวที่ 1,890 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น 7.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สัญลักษณ์ Cr ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ ซึ่งมีเลขออกซิเดชั่นหลายค่าตั้งแต่ Cr^{+2} ไปถึง Cr^{+6} มีลักษณะเป็นมันวาวและแข็งมากสามารถต้านทานการผุกร่อนได้ดี คงความเป็นเงาได้นานในอากาศจึงใช้ทำโลหะผสม เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำปฏิกิริยากับอโลหะเช่น ออกซิเจน และคลอรีน ได้สารประกอบของโครเมียมที่มีออกซิเดชั่นสเตท Cr^{+3} ในธรรมชาติแร่ที่สำคัญของโครเมียมคือ โครไมต์ (Cr_2O_3) หรือโครม-ไอรอน ($FeO.Cr_2O_3$) ซึ่งเป็นออกไซด์ผสม หากแร่นี้ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนจะเกิดการรีดิวส์ขึ้นซึ่งจะได้โลหะเจือเหล็ก อย่างไรก็ตามโครเมียมยังเป็นประโยชน์ในการผลิตเหล็กกล้าที่ทำให้ไม่เกิดการเป็นสนิม

สารประกอบโครเมียมชนิดอนินทรีย์ที่ใช้ในทางพาณิชย์เป็นชนิดที่มีสองวาเลนท์ซี ส่วนชนิดที่มีวาเลนท์ซีสาม ได้แก่ โครมิกออกไซด์ (Cr_2O_3) และโครมิกซัลเฟต [$Cr_2(SO_4)_3$] ใช้ในโลหะผสมและอุตสาหกรรมฟอกหนัง และชนิดที่มีวาเลนท์ซีหก นำไปใช้ในการผลิตเม็ดสี ช่วยรักษาเนื้อไม้ ชุบเครื่องประดับ ป้องกันการกัดกร่อน ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตแก้ว ทำให้แก้วมีสีและเป็นเงางาม และใช้ในอุตสาหกรรมพิมพ์ย้อมผ้า ขนสัตว์ และไหม (เพ็ญประภา คำป้อม, 2541)

โครเมียมมีแหล่งกำเนิดมาจากการทำเหมืองแร่ (ดังรูปที่ 2.1) จากนั้นมีการนำแร่ไปแปรรูปเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมชุบโลหะ ฟอกหนัง สีทา และการเชื่อมหรือเคลือบด้วยโครเมียม ซึ่งกิจกรรมจากอุตสาหกรรมเหล่านี้ ส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนและการแพร่กระจายของโครเมียมออกสู่สิ่งแวดล้อมในวงกว้างทั้งในน้ำ ดิน และอากาศ



รูปที่ 2.1 แหล่งกำเนิดโครเมียมในอุตสาหกรรม

ที่มา: Kimbrough and Cohen, 1999

2.1.2 รูปของโครเมียม

Wood and Holliday (1976) กล่าวถึง โครเมียมในธรรมชาติว่าสามารถพบได้ 3 รูปคือ โครเมียม (II) โครเมียม (III) และโครเมียม (VI) โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1.2.1 โครเมียม (II) ออกไซด์ (CrO) เป็นเบสิกออกไซด์ (Oxide Basic) โครเมียม (II) เปลี่ยนรูปเป็นโครเมียม (III) ได้ง่ายแม้ทิ้งไว้ในอากาศ

2.1.2.2 โครเมียม (III) ออกไซด์ (Cr_2O_3) เป็นแอมโฟเทอริกออกไซด์ (Oxide Amphoteric) สารละลายเกลือโครเมียม (III) เก็บไว้ได้นานโดยไม่เกิดออกซิเดชั่นหรือรีดักชั่น

2.1.2.3 โครเมียม (VI) ออกไซด์ (CrO_3) เป็นอะซิดิกออกไซด์ (Oxide Acidic) โครเมียม (VI) ในสารละลายด่างอยู่ในรูปโครเมท (CrO_4^{2-}) มีสีเหลือง และสารละลายกรดจะอยู่ในรูปไดโครเมท ($Cr_2O_7^{2-}$) มีสีส้ม

2.1.3 ค่ามาตรฐานของโครเมียม

จากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 พ.ศ. 2539 เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน ระบุว่าโครเมียมที่ปล่อยออกมาจากโรงงานจะต้องมีโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตรและโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] ไม่มากกว่า 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร

นอกจากนี้ ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 พ.ศ. 2547 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน ได้กำหนดปริมาณโครเมียมที่ปนเปื้อนในดิน โดยแบ่งเป็นมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม กำหนดให้มีโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] ปนเปื้อนในดินไม่เกิน 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมและแบ่งตามมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอื่นนอกเหนือจากที่กล่าวไปแล้ว กำหนดให้มีโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] ปนเปื้อนในดิน ไม่เกิน 640 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อีกทั้ง ปัจจุบันมีการส่งเสริมให้เกษตรกรใช้ปุ๋ยอินทรีย์ในการปรับปรุงดิน ตลอดจนมีการนำเทคโนโลยีชีวภาพเข้ามาใช้ในการปรับปรุงบำรุงดิน เพิ่มคุณค่าของธาตุอาหารพืชทำให้มีการผลิตปุ๋ยอินทรีย์เพิ่มมากขึ้น จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการควบคุมมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ โดยกรมวิชาการเกษตรได้กำหนดมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ให้มีปริมาณโครเมียม ไม่เกิน 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (กรมวิชาการ, 2548)

2.1.4 ความเป็นพิษของโครเมียม

2.1.4.1 ความเป็นพิษต่อมนุษย์ โครเมียมจะไม่ก่อให้เกิดอันตรายเฉียบพลันต่อมนุษย์ เนื่องจากโครเมียมในธรรมชาติมีความคงตัวสูง โครเมียมสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 2 ทาง ทางแรกโดยการหายใจเอาฝุ่นของโครเมียมเข้าไป และเข้าสู่ร่างกายทางผิวหนัง จากการสัมผัสสารประกอบโครเมียมระหว่างการผลิตหรือการนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตาม สารประกอบโครเมียมที่มีวาเลนท์ซีสาม มีอันตรายน้อยเกือบจะกล่าวได้ว่า ไม่เป็นพิษ ไม่ถูกดูดซึมเข้าทางเดินอาหาร ไม่ทำให้

เกิดบาดแผลหรือรอยโรคที่ผิวหนัง ส่วนสารประกอบที่มีวาเลนท์ซีหก เป็นสารก่อให้เกิดการระคายเคืองและมีฤทธิ์กัดกร่อนซึ่งสามารถดูดซึมเข้าสู่ร่างกายโดยทางเดินอาหาร ผิวหนัง และทางเดินหายใจ (ดังรูปที่ 2.2) และมีผลกระทบต่อผู้ประกอบอาชีพเป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้ มักพบอาการที่เกี่ยวข้องกับระบบผิวหนังและระบบทางเดินหายใจ ซึ่งลักษณะอาการเมื่อได้รับโครเมียมเข้าสู่ร่างกาย มักมีอาการต่างๆ ดังต่อไปนี้

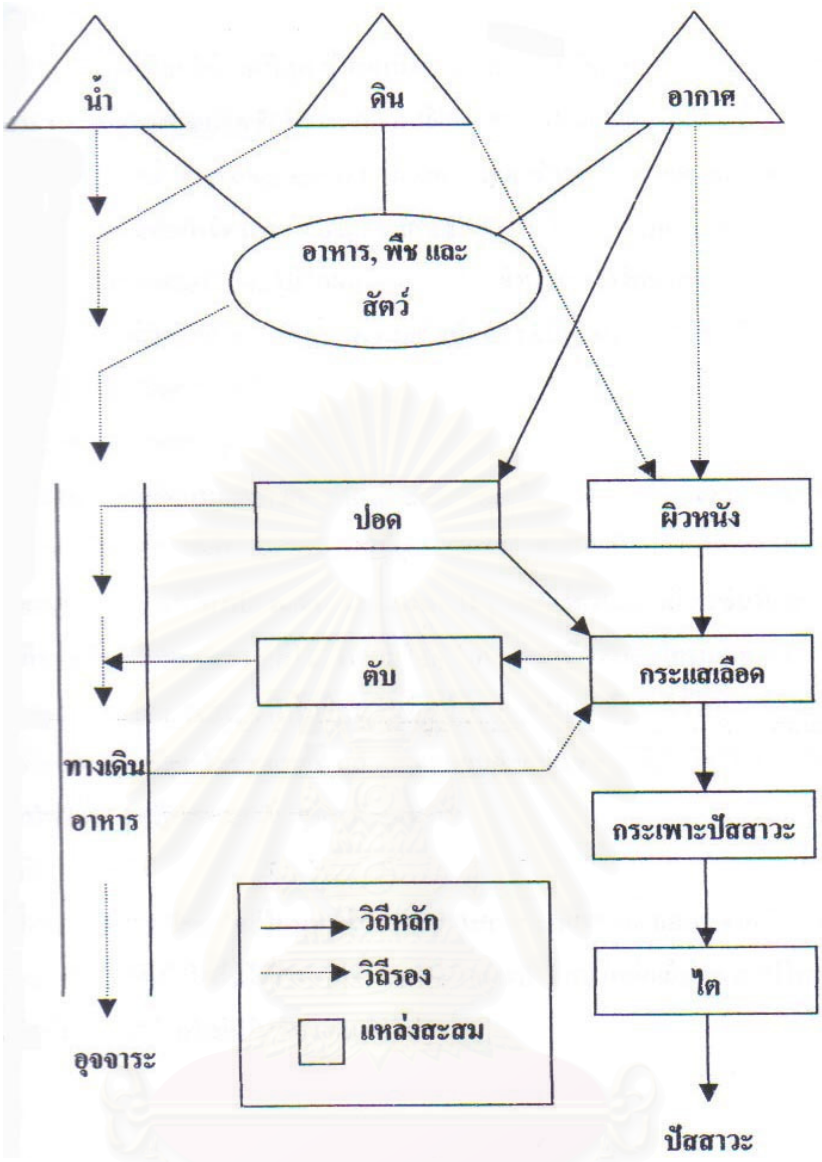
1) โครมอัลเซอร์เรชั่น (Chrome Ulceration) บาดแผลอันเกิดขึ้นจากฤทธิ์กัดกร่อนของโครเมตที่ผ่านทะลุผิวหนังที่มีรอยถลอกหรือมีบาดแผลอยู่ก่อน มักพบบ่อยที่สุดโดยเฉพาะที่มือ นิ้วมือ แขน และเท้า ซึ่งอาการจะแสดงให้เห็นเป็นตุ่มน้ำ ไม่เจ็บ ต่อมากลายเป็นหลุมแผล มีรูปร่างกลม ขอบยกขึ้น ค่อนข้างเรียบ แข็ง แผลมีน้ำเหลือง และสะเก็ด หากไม่ได้รับการดูแลรักษาแผลจะกินลึกลงไปในชั้นเนื้อเยื่อและกระดูก การรักษาหายช้า หรือหายแบบเป็นแผลเป็น อย่างไรก็ตามไม่พบบาดแผลถึงขั้นกลายเป็นมะเร็งได้ และหากมีการติดเชื้อหรือโรคแทรกซ้อนหรือแผลทะลุถึงชั้นกระดูกอาจจำเป็นต้องตัดเนื้อทิ้งในที่สุด

2) ผิวหนังอักเสบ ทำให้เกิดการระคายเคืองผิวหนังโดยเฉพาะบริเวณคอเสื้อข้อมือ ทำให้ผิวหนังอักเสบได้ ซึ่งเกิดจากการสัมผัสโดยตรงหรือจากการระคายเคือง

3) ผลต่อระบบทางเดินหายใจชนิดเฉียบพลัน โดยเฉพาะคนที่ทำงานเกี่ยวกับโครเมียมซึ่งจะได้รับควันจากกรดโครมิก หรือฝุ่นละอองเป็นประจำ ทำให้เกิดผนังกั้นในรูจมูกถูกทำลายจนเป็นรูทะลุได้

4) มะเร็งปอด มักเกิดกับคนงานที่สูดเอาโครเมียมเข้าสู่ร่างกายอยู่เป็นประจำและเป็นเวลานาน ซึ่งอาจเป็นอันตรายอย่างมากแก่ชีวิต (สำนักงานป้องกันควบคุมโรคที่ 9, 2548)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 วงจรของโครเมียมที่มนุษย์ได้รับ
ที่มา: อธิชัย นพแก้ว, 2539

จากการศึกษาของ Lofroth and Ames (1978) อ้างถึงใน เพ็ญประภา คำป้อม (2541) พบว่า โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] มีคุณสมบัติก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม (Mutagenic) ส่วนโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] ถึงแม้ว่าจะไม่มีผลรุนแรงมากนัก แต่ก็เป็นไปได้ที่จะสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม จากการศึกษาทางระบาดวิทยาโดย Sitting (1980) อ้างถึงใน เพ็ญประภา คำป้อม (2541) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ในเชิงบวกระหว่างอาชีพที่มีโอกาสสัมผัสกับโครเมียม และโอกาสเกิดโรคมะเร็ง โดยเฉพาะคนงานในโรงงานโครเมียมมีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดโรคมะเร็งปอด นอกจากนี้ เกลือของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] ที่ละลายน้ำแม้เพียงเล็กน้อยเช่น แคลเซียมโครเมท [$Ca(CrO_3)$] ก็อาจก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้เช่นกัน

2.1.4.2 ความเป็นพิษของโครเมียมต่อสัตว์ในแหล่งน้ำ สัตว์ที่ได้รับโครเมียมจะแสดงอาการความเป็นพิษแบบเฉียบพลันตามระดับความเข้มข้นของโครเมียมที่แตกต่างกัน จากการศึกษาของ Rehwold et al. (1973) พบว่า ในเวลา 90 ชั่วโมง LC 50 ของโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] ในสัตว์ 7 ชนิด มีค่าระหว่าง 3-50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] มีค่าระหว่าง 0.1-20 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนพิษแบบเรื้อรังของโครเมียมสามารถทำให้เกิดอาการมึนงง ยับยั้งการเจริญเติบโต ทำให้ขนาดของร่างกายเล็กลง และอาจทำให้อัตราการเจริญพันธุ์ และการรอดชีวิตของรุ่นลูกหลานลดลง รวมทั้งโครเมียมยังเป็นพิษต่อปลา ซึ่งมีโอกาสรับพิษจากโครเมียมน้อยกว่าสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง

จากการศึกษาของ Pickering and Henderson (1966) อ้างถึงใน เพ็ญประภา คำป้อม (2541) พบว่าในเวลา 90 ชั่วโมง LC 50 ของโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] และโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] ต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำจืดมีค่าระหว่าง 3.5-118 มิลลิกรัมต่อลิตร สาเหตุที่มีความแตกต่างกันมาก อาจเนื่องมาจากการตอบสนองของสัตว์แต่ละชนิด นอกจากนี้ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำและขนาดของตัวปลาก็มีผลต่อความเป็นพิษด้วย โดยจากการศึกษาของ Van Der Putte, Brinkhorst and Koeman (1981) พบว่า LC 50 ของปลา *Rainbow Trout* ลดลงจาก 53 เป็น 16 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงจาก 7.8 เป็น 6.5 และความเป็นพิษจะเพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่า เมื่อน้ำหนักของปลาลดลงจาก 13 เป็น 0.1 กรัม นอกจากนี้ อุณหภูมิก็มีผลต่อการรับพิษของปลาเช่นเดียวกันโดยขึ้นอยู่กับชนิดของปลาด้วย

2.1.4.3 ความเป็นพิษต่อพืช พบว่า ระดับปฏิกิริยาของโครเมียมที่มีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของพืชอยู่ที่ 0.5-5 มิลลิกรัมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] ต่อลิตร แต่โปตัสเซียมไดโครเมท ($K_2Cr_2O_7$) สามารถช่วยในการเจริญเติบโตของพืชบางชนิดได้ ซึ่งความเป็นพิษต่อพืชของโครเมียมขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย อาทิเช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง และโลหะหนักตัวอื่นๆ อย่างไรก็ตาม โครเมียมมีความเป็นพิษต่อพืช โดยส่งผลให้พืชไม่สามารถทำหน้าที่ในกระบวนการเมทตาบอลิซึม (Metabolism) ได้ (Memon et al., 2001) สำหรับการสะสมของโครเมียมในพืชจะลดความสามารถในการเจริญเติบโตของพืช ชักนำให้เกิดใบซีดเหลืองในใบอ่อนของพืช ทำให้การทำงานของเม็ดสี (Pigments) ที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงของพืชเสื่อมลงเพราะโครเมียมมีอันตรายที่รุนแรงต่อเซลล์เมมเบรน (Cell Membrane) โดยโครเมียมจะเข้าไปทำลายเม็ดสี (Pigments) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้การเจริญเติบโตของพืชลดลง และยังทำลายเซลล์ในรากพืช รวมถึงการลดความสามารถในการงอกของเมล็ด และการเจริญเติบโตของรากฝอยในพืช (Atta Aly, Shehata and Kobbia,1991; Corradi, Bianchi and Albasini, 1993; Liu, Jaing and Li, 1993; Nayari et al., 1997) อย่างไรก็ตาม Choudhury and Panda (2005) ได้ทำการศึกษาการสะสมโครเมียมในมอส (Moss) *Taxithelium nepalense* โดยพบว่า

มอสมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเยื่อหุ้มคลอโรพลาสต์ (Chloroplast) โดยมีการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงไทลาคอยด์ (Thylakoid) ที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียม 1 มิลลิโมลและการศึกษาครั้งนี้ได้สังเกตเห็นการผิดรูปของเยื่อหุ้มคลอโรพลาสต์ (Chloroplast Membrane) และไทลาคอยด์ (Thylakoid) นอกจากนี้ยังพบว่า โครเมียม (VI) เป็นรูปที่ทำให้เกิดความเป็นพิษในพืชที่รุนแรง ซึ่งจากปัญหาดังกล่าวจำเป็นต้องเร่งหาวิธีการเพื่อแก้ไขการปนเปื้อนของโครเมียมในดินและน้ำเพื่อลดปริมาณโครเมียม หรือการเปลี่ยนรูปโครเมียมให้มีความเป็นพิษน้อยลง โดยการใช้พืชเป็นตัวบำบัดดินและน้ำ ด้วยการทำ Phytoremediation และ Hydroponics

2.2 การฟื้นฟูดินโดยพืช (Phytoremediation)

2.2.1 ความหมาย

Phytoremediation มาจากคำว่า “Phyton” ในภาษากรีกที่หมายถึง “พืช” รวมกับคำว่า “Remediare” ในภาษาลาตินที่หมายถึง “การบำบัดหรือการรักษา” ซึ่งเมื่อนำทั้งสองคำนี้มารวมกันหมายถึง เทคโนโลยีในการนำพืชมาใช้ในการบำบัดดิน โคลน กากตะกอน หรือน้ำ ที่เกิดการปนเปื้อนโดยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งการบำบัดนี้อาศัยประโยชน์จากกระบวนการดูดน้ำ และแร่ธาตุอาหารผ่านทางรากของพืช และกระบวนการคายน้ำออกทางใบของพืชในการเปลี่ยนสารปนเปื้อนเหล่านั้นให้อยู่ในรูปที่ไม่มีความเป็นพิษหรือมีความเป็นพิษลดลง ซึ่งกลไกเหล่านี้ทำหน้าที่เปลี่ยนรูปสารประกอบอินทรีย์ หรือดูดซับและสะสมจุลธาตุที่เป็นพิษได้แก่ โลหะหนักต่างๆ อาทิ ตะกั่ว (Pb) นิกเกิล (Ni) แคดเมียม (Cd) สังกะสี (Zn) และโครมียม (Cr) ไว้ในลำต้น ซึ่งสารประกอบหรือโลหะหนักเหล่านี้จะถูกกำจัดออกจากพื้นที่เมื่อมีการเก็บเกี่ยวพืชออกไป (Sustainable Strategies, 1997; McCutcheon and Schnoor, 2003)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.2 ประเภทของ Phytoremediation

ประเภทของ Phytoremediation สามารถแบ่งได้เป็น 6 ประเภท ได้แก่ (ITRC, 1999; USEPA, 1998)

2.2.2.1 Phytoextraction

Phytoextraction หรือเรียกอีกอย่างว่า Phytoaccumulation เป็นการใช้พืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนัก โดยสามารถดูดซับและเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากดินนำมารวม

ไว้ในที่เดียวกันโดยรากพืช และเคลื่อนย้ายไปสะสมยังส่วนยอดของพืชได้ โดยพืชชนิดนั้นต้องเป็น hyperaccumulators ที่สามารถสะสมโลหะหนักปริมาณมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับพืชชนิดอื่นๆ ดังนั้น พืชที่จะเลือกใช้จึงต้องเป็นพืชที่สามารถพบได้ทั่วไปในบริเวณที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักมีความทนต่อโลหะหนักในระดับความเข้มข้นสูง ซึ่งพืชที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้จึงจะมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ดูดซับสารพิษต่างๆ ออกจากดิน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 (a)

2.2.2.2 Phytodegradation

Phytodegradation สามารถเรียกอีกอย่างว่า Phytotransformation เป็นการสลายตัวของโลหะหนักที่ปนเปื้อนโดยการดูดซับของพืชด้วย กระบวนการเมตาบอลิค(Metabolic) ภายในพืชหรือจากการสร้างสารประกอบต่างๆ ของพืชอาทิ เช่น เอนไซม์ (Enzymes) สารพิษสามารถสร้างความเสียหายแก่พืชโดยการดูดใช้ธาตุอาหารหรือการสะสมธาตุอาหารภายในเนื้อเยื่อของพืช ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 (b)

2.2.2.3 Phytostabilization

Phytostabilization เป็นการเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการควบคุม หรือลดการเคลื่อนย้ายของสารพิษที่ปนเปื้อนในดิน และน้ำใต้ดินด้วยการตรึงและยึดไว้ที่ราก โดยรากของพืชจะดูดและตรึงสารปนเปื้อนไว้บนรากพืช ทำให้สารปนเปื้อนต่างๆ ภายในดินมีการเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปที่มีความเสถียร เกิดการตกตะกอน โดยกระบวนการดังกล่าวนี้จะสามารถลดการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนที่เป็นพิษต่างๆ ภายในดิน และขัดขวางการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนลงไปสู่น้ำใต้ดินหรือในอากาศให้มีการเคลื่อนย้ายลดลง นอกจากนี้ Phytostabilization ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปลูกพืชคลุมดินในบริเวณที่มีการปนเปื้อน ทำให้สารปนเปื้อนที่มีความเข้มข้นสูงลดระดับความเป็นพิษให้น้อยลง ด้วยการลดความสามารถในการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนโดยกยัยการโดยลม (Wind Erosion) การเคลื่อนย้ายผิวหน้าดิน และการชะล้างสารปนเปื้อนลงไปสู่น้ำใต้ดินดังรูปที่ 2.3 (c)

2.2.2.4 Rhizofiltration

Rhizofiltration เป็นการเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการกรอง ดูดซับ และรับเอาสารปนเปื้อนต่างๆ ที่อยู่ในรูปของสารละลายรอบๆ บริเวณรากให้เข้าไปในรากของพืชได้ ซึ่งพืชที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้ มีความเหมาะสมในการนำไปใช้กำจัดสารปนเปื้อนต่างๆ ในแหล่งน้ำหรือในดินที่มีความชุ่มของน้ำหรือระบบปลูกแบบไฮโดรโพนิคส์ (Hydroponics) ดังรูปที่ 2.3 (d)

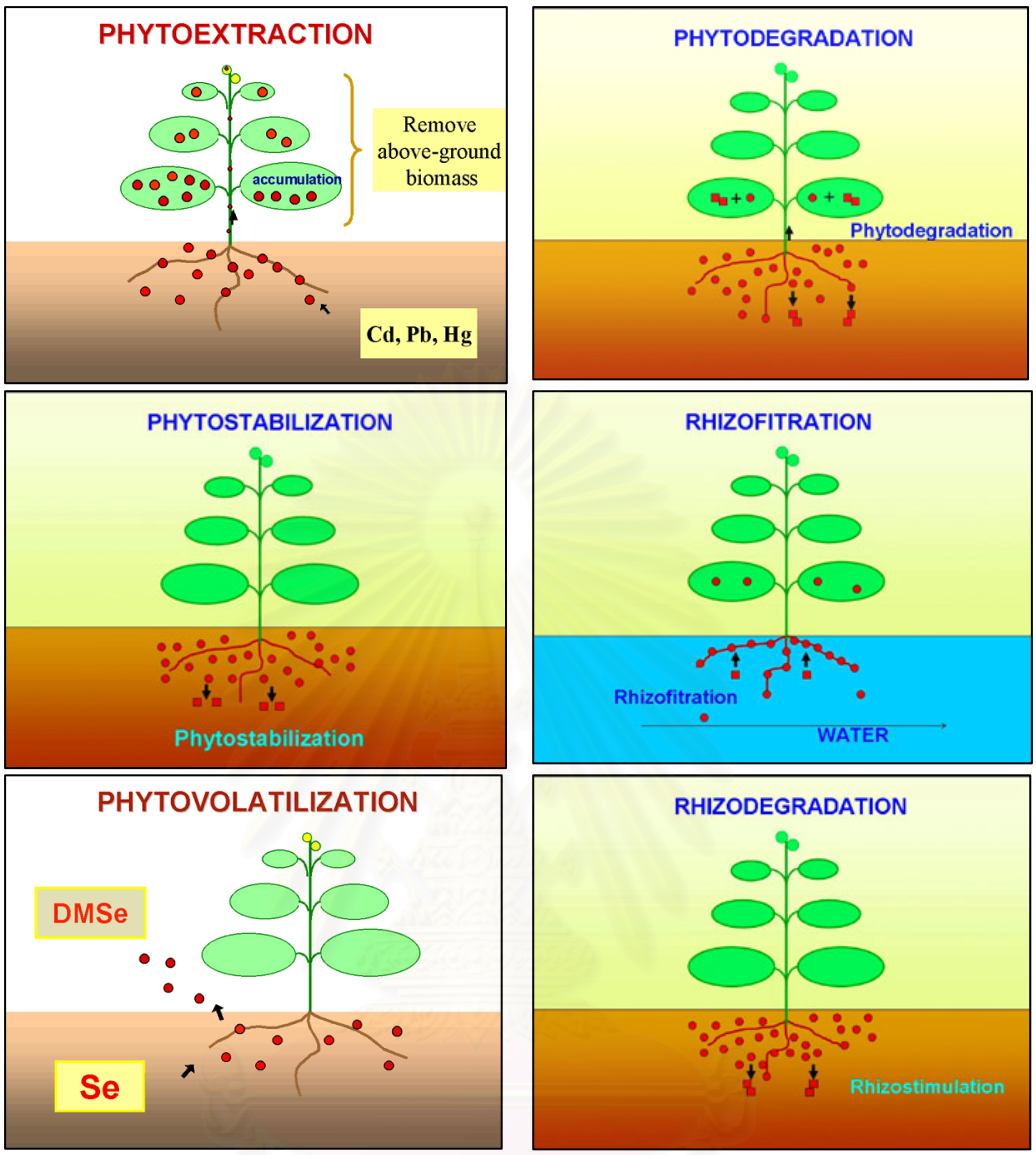
2.2.2.5 Phytovolatilization

Phytovolatilization คือการเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการเป็นสื่อที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนที่มีอยู่ในดินหรือในน้ำออกไปสู่อากาศ Phytovolatilization จะเกิดขึ้นตามการเจริญเติบโตของพืชยืนต้น และพืชชนิดอื่นๆ ที่มีการดูดเอาน้ำที่มีสารอินทรีย์และอนินทรีย์ปนเปื้อนเข้าไป และในบางครั้งการดูดสารปนเปื้อนดังกล่าวด้วยพืชนั้นจะผ่านไปยังใบ และจะมีการระเหยเป็นไอออกไปสู่บรรยากาศที่ความเข้มข้นระดับต่ำ ซึ่งพืชที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้จะมีความเหมาะสมในการนำไปใช้บำบัดสารปนเปื้อนที่เป็นพิษภายในดินและน้ำได้เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (e)

2.2.2.6 Rhizodegradation

Rhizodegradation หรือเรียกอีกว่า Phytostimulation, Rhizosphere Biodegration หรือ Enhanced Rhizosphere Biodegradation เป็นการสลายตัวของสารที่ปนเปื้อนในดินด้วยกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในดิน โดยจุลินทรีย์เช่น ยีสต์ รา และแบคทีเรีย สามารถใช้หรือย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อเป็นอาหารของมันได้ รวมทั้งจุลินทรีย์ยังสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ให้มีความเป็นพิษน้อยลง โดยพืชจะปล่อยน้ำตาล แอลกอฮอล์ และกรด ซึ่งจะไปยับยั้งอินทรีย์คาร์บอน (Organic Carbon) ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ดินและกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์ Biodegradation ซึ่งเป็นตัวช่วยทำให้ดินมีความร่วนซุยเพิ่มมากขึ้น และมีการเคลื่อนย้ายออกซิเจนกับน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังรูปที่ 2.3 (f)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.3 ประเภทของ Phytoremediation

ที่มา: พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2549(ก)

2.2.3 พืชที่สะสมโลหะหนัก (Hyperaccumulator)

Hyperaccumulator หมายถึง พืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักไว้ในปริมาณที่มากจนผิดปกติ เป็นพืชที่สามารถสะสมโลหะหนักไว้ได้มากกว่าปริมาณโลหะหนักในดินที่ปลูกถึง 100-1,000 เท่า หรือเป็นพืชที่สามารถสะสมโลหะหนักได้สูงกว่าพืชทั่วไป 10-500 เท่า (Hasekawa, 2002) ซึ่งพืชที่เป็น Hyperaccumulator จะมีลักษณะทั่วไปดังนี้

1) พืชมีความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักในปริมาณมากเข้าไปภายในรากของพืชได้

2) พืชมีความสามารถในการเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากรากไปยังส่วนเหนือดินได้ในอัตราที่สูง

3) พืชมีการสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณที่สูง โดยเฉพาะที่เซลล์ของรากพืชและส่วนที่อยู่เหนือดินของพืชชนิดนั้น และพืชยังมีความสามารถและทนทานต่อความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในระดับที่สูงกว่าปกติ (Hypertolerance) ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจาก Vacuolar Compartmentalization ซึ่งเป็นกระบวนการลดพิษของโลหะในพืช โดยอาศัยกลไกการขัดขวางของ Vacuole เช่น ความสามารถในการสะสมสังกะสี (Zn) ได้ในปริมาณที่สูงกว่าปกติของต้น *Thlaspi caerulescens* อันเกิดมาจากการที่สังกะสีไม่สามารถเคลื่อนที่ได้และมีการตกผลึกอยู่ในแวคิวโอลและChelation ซึ่งเป็นการจับตัวกับสารประกอบอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (USEPA, 1999)

2.2.4 กลไกการทำงานของ Phytoremediation

การบำบัดสภาพดินที่มีการปนเปื้อนจากสารพิษโดยวิธีการทำ Phytoremediation นั้นขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างไม่ว่าจะเป็นปฏิสัมพันธ์ระหว่างดิน จุลินทรีย์ ชนิดของพืช รูปแบบ และชนิดของสารปนเปื้อน เป็นต้น นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิสัมพันธ์ดังกล่าวคือ สภาพภูมิประเทศ ภูมิอากาศ คุณสมบัติของดิน สภาพทางอุทกธรณีวิทยา กลไกของพืช และผลกระทบที่เกิดจากการเกษตรกรรม แต่อย่างไรก็ตาม การทำ Phytoremediation นั้นจะอาศัยกระบวนการสำคัญๆ ที่นับว่าเป็นหลักการทำงานของ Phytoremediation ดังนี้ (USEPA, 2000)

1) การดูดดึงสารปนเปื้อนโดยพืช

สำหรับการดูดดึงสารปนเปื้อนโดยพืชนั้น วิธีที่อาศัยกระบวนการนี้ ได้แก่ Phytoextraction และ Phytovolatilization ซึ่งใน Phytoextraction นั้นจะอาศัยการดูดดึงสารปนเปื้อนจากดินไปเก็บไว้ในส่วนต่างๆ ของพืช ส่วนวิธีการ Phytovolatilization นั้นจะอาศัยวิธีการดูดดึงสารปนเปื้อนจากดินแล้วปล่อยออกไปสู่บรรยากาศแทน

2) การกระตุ้นการย่อยสลายทางชีวภาพที่เกิดจากจุลินทรีย์ในดินโดยรากพืช

การกระตุ้นการย่อยสลายทางชีวภาพที่เกิดจากจุลินทรีย์ในดินโดยรากพืชนั้น พืชที่ใช้ในกระบวนการนี้จะมีความสามารถในการทำ Rhizofiltration กล่าวคือ จะอาศัยการทำงานของรากพืชช่วยให้จุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการกำจัดพิษของสารปนเปื้อนสามารถทำงานได้ดีขึ้น

3) การเปลี่ยนแปลงสภาพทางเคมีของดินโดยพืช

การเปลี่ยนแปลงสภาพทางเคมีของดินโดยพืช เป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่ใช้ในการปรับสภาพความเป็นพิษของสารปนเปื้อนที่มีอยู่ภายในดินให้มีความเป็นพิษลดลง ซึ่งพืชที่ใช้ในกระบวนการนี้คือ พืชที่มีความสามารถในการ Phytostabilization ได้ กล่าวคือ พืชจะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนรูปของสารปนเปื้อนไม่ให้สามารถเคลื่อนที่ได้ หรือเกิดการย่อยสลายไปในที่สุด

2.2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนักโดยพืช (อรรณพ หอมจันทร์, 2544)

1) ชนิดของโลหะหนัก ชนิดของโลหะหนักนั้นมีส่วนสำคัญมากในการที่พืชจะดูดดึงโลหะหนักเหล่านี้ออกจากดิน เนื่องจากพืชนั้นมีความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักในแต่ละชนิดได้ไม่เท่ากัน กล่าวคือ พืชจะดูดดึงโลหะหนักชนิดที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากกว่าโลหะหนักชนิดที่ส่งผลเป็นพิษต่อพืชเพียงอย่างเดียว

2) รูปทางเคมีของโลหะหนัก การดูดดึงโลหะหนักโดยพืชนั้น ส่วนใหญ่แล้วโลหะหนักในรูป Inorganic Salt ที่ละลายน้ำแล้วนั้น พืชจะสามารถดูดดึงเข้าไปได้มากกว่าโลหะหนักในรูป Organic Compound

3) ชนิดของพืช พืชแต่ละชนิดมีลักษณะทางกายภาพที่ต่างกันเป็นผลทำให้ความสามารถของพืชในการดูดดึงโลหะหนักแต่ละชนิด แต่ละรูปแบบก็แตกต่างกันไปด้วย ตัวอย่างเช่น ผักคะน้ามีความสามารถในการดูดดึงสังกะสี (Zn) ในรูปของซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ได้ดีที่สุด

4) ลักษณะสมบัติและองค์ประกอบบางอย่างของดิน

4.1) เนื้อดิน (Soil Texture) เนื้อดินที่แตกต่างกันสามารถทำให้รากของพืชเข้าถึงและดูดดึงโลหะหนักได้ต่างกัน

4.2) ความสามารถในการอุ้มน้ำ (Drainage Status) การที่ดินสามารถอุ้มน้ำไว้ได้มากก็สามารถทำให้โลหะหนักเหล่านั้นสามารถอยู่ได้ในรูปแบบที่ง่ายขึ้น และพืชก็สามารถดูดดึงไปได้มากขึ้นเช่นกัน

4.3) ความสามารถในการดูดจับโลหะหนัก (Sorptive Capacity) หากดินดูดจับโลหะหนักไว้อย่างแน่นหนาแล้วโอกาสที่พืชจะดูดดึงไปได้ย่อมลดลงไปด้วย ดังนั้นจึงมักพบว่า พืชที่สามารถดูดดึง และเคลื่อนย้ายโลหะหนักในดินทรายได้ดีกว่าในดินเหนียวอยู่เสมอ

5) สิ่งต่างๆ ที่เติมลงในดิน สิ่งที่เติมเข้าไปในดินนั้นจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดดึงโลหะหนักในพืชมาก เนื่องจากสิ่งที่เติมเข้าไปนั้นอาจจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปของโลหะหนัก และสารอาหารของพืชในดิน ทำให้พืชมีความสามารถในการดูดดึงโละหนักที่ปนเปื้อนนี้ลดลง

6) สภาพแวดล้อมอื่นๆ

6.1) อุณหภูมิ (Temperature) มีผลต่อพืชมาก เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะพบว่าพืชจะดูดดึงแคดเมียม (Cd) สังกะสี (Zn) แมงกานีส (Mn) และเหล็ก (Fe) จากดินสู่พืชมากขึ้น

6.2) ช่วงวัน (Day Length) มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนักของพืชเช่นกัน โดยที่ช่วงวันมากขึ้นพืชจะมีโอกาสในการสังเคราะห์แสงมากขึ้น ทำให้โอกาสที่พืชจะดูดดึงเอาโลหะหนักออกมาจากดินนั้นมีสูงขึ้นด้วย

6.3) ปริมาณของแสง (Intensity) มีส่วนในการดูดดึงโลหะหนักของพืชเช่นกัน เนื่องจากแสงที่มีความเข้มที่เหมาะสมกับพืชจะสามารถสังเคราะห์แสงได้ดี ทำให้การดูดดึงโลหะหนักที่อยู่ในดินเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

6.4) ความชื้นของดิน (Moisture) มีส่วนที่พืชจะดูดดึงโลหะหนักไปจากดิน โดยจะพิจารณาจากการออสโมซิส (Osmosis) ซึ่งต้องมีความเหมาะสมของความชื้นในดินและพืชสามารถดูดซับสารต่างๆ ออกจากดินได้ด้วย

6.5) ความชื้นในอากาศ (Air Humidity) มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนักในดินเช่นกัน เนื่องจากความชื้นในอากาศนั้นมีผลต่อการคายน้ำของพืช ถ้าพืชคายน้ำออกมาได้น้อย แรงดึงที่รากก็จะต่ำทำให้พืชดูดดึงสารต่างๆ ในดินได้น้อยลงเช่นกัน

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการดูดดึงโลหะหนักในดินโดยพืชอีกมากมาย ซึ่งยังต้องมีการค้นคว้าต่อไป

2.2.6 ข้อดีและข้อเสียของ Phytoremediation

1) ข้อดีของ Phytoremediation

1.1) Phytoremediation เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสม ในการที่จะนำมาใช้ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักในพื้นที่บริเวณกว้าง เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ค่อนข้างใช้ค่าใช้จ่ายน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการบำบัดดินโดยวิธีการอื่นๆ สาเหตุที่การทำ Phytoremediation มีค่าใช้จ่ายน้อยก็เนื่องมาจากอาศัยพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นหลัก ไม่ต้องทำการเคลื่อนย้ายดินออกจากพื้นที่ ทำให้ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ นอกจากนี้ การบำบัดโดยวิธีนี้ยังมีผลกระทบน้อยหรือไม่มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมเลย มีความปลอดภัยในการใช้มากกว่าการบำบัดโดยวิธีการอื่นๆ อีกด้วย จากการศึกษาของ Sampanpanish (2005) พบว่า ค่าใช้จ่ายในการทำ Phytoremediation นั้น มีค่าใช้จ่ายถูกกว่าการทำ Biosorption โดยในการทำ Phytoremediation มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ $900 ต่อดิน 1 ลูกบาศก์เมตร ส่วนใน Biosorption มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ $1,500 ต่อน้ำ 1 ลูกบาศก์เมตร

1.2) Phytoremediation กับพืชที่เป็น Hyperaccumulator Species นอกจากจะสามารถบำบัดโลหะหนักออกจากดินได้แล้ว ยังสามารถนำโลหะที่สกัดได้จากมวลชีวภาพไปผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ หรือนำเอาโลหะหนักที่ได้ไปขาย ถือเป็นการเพิ่มคุณค่าในการทำ

Phytoextraction เนื่องจากการเผามวลชีวภาพที่ได้จะได้พลังงานมา ซึ่งสามารถนำเอาพลังงานที่ได้นี้มาใช้ในกระบวนการผลิตเพื่อลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้กำไรที่ได้จากการขายโลหะหนักเหล่านี้สามารถนำไปใช้เป็นต้นทุนในการปลูกพืชในครั้งต่อไปได้อีกด้วย

1.3) Phytoremediation นั้นเป็นการปลูกพืชลงในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน ซึ่งพืชที่ปลูกไปนั้นจะช่วยลดการพังทลายของดิน ช่วยป้องกันการแพร่กระจายของโลหะหนัก ช่วยลดการปนเปื้อนของโลหะหนักไปยังพื้นที่อื่นหรือลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งเป็นการช่วยลดความเสี่ยงในการที่โลหะหนักเหล่านี้จะเข้าสู่ตัวคนและสัตว์ได้ นอกจากนี้ พืชที่ปลูกยังสร้างสารอินทรีย์ที่มีส่วนช่วยในการพัฒนาเนื้อดิน และความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน และหากพืชที่นำมาใช้ในการบำบัดมีความเหมาะสมกับพื้นที่ที่ทำการบำบัดก็จะทำให้การแทรกซึมของสารอาหาร น้ำ ออกซิเจน และโลหะหนักในดินสู่พืชเกิดขึ้น ซึ่งส่งผลให้พื้นที่บำบัดมีสภาพดีขึ้น ร่มรื่น ทำให้เกิดความสบายตาสบายใจแก่ผู้พบเห็น

1.4) พืชที่มีการสะสมของโลหะหนักเอาไว้ในปริมาณมากๆ จะช่วยทำให้พืชนั้นรอดพ้นจากการถูกกัดกินของแมลงเช่น หนอนผีเสื้อ ลดการเกิดโรคจากเชื้อรา และแบคทีเรียอีกด้วย

2) ข้อเสียของ Phytoremediation

2.1) Phytoremediation ไม่สามารถบำบัดหรือกำจัดสารปนเปื้อนที่อยู่ลึกลงไปกว่าบริเวณรากพืชได้ นอกจากนี้ หากสารปนเปื้อนเหล่านั้นไม่อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ก็จะไม่สามารถบำบัดหรือกำจัดสารนั้นๆได้เช่นกัน

2.2) Phytoremediation ถูกจำกัดไว้ด้วยสภาพทางธรณีวิทยา สภาพภูมิอากาศ อุณหภูมิ ที่ตั้งของแหล่งบำบัด ความสูงจากระดับน้ำใต้ดิน และความสามารถของเครื่องมือทางเกษตรกรรม เป็นต้น

2.3) ความสามารถในการบำบัดสารปนเปื้อนของพืชแต่ละชนิดนั้น มีความแตกต่างกันไป ดังนั้น จึงต้องมีการศึกษาเพื่อคัดเลือกพืชที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้บำบัดเป็นกรณีไป นอกจากนี้ ในปัจจุบันยังขาดพืชที่มีความสามารถในการบำบัดสารปนเปื้อนอีกมากจึงต้องมีการศึกษาต่อไป

2.4) Phytoremediation เป็นเทคนิคที่ขึ้นอยู่กับความสามารถของพืชและเป็นเทคนิคที่ใช้ระยะเวลานานไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้แก้ปัญหาการปนเปื้อนที่ต้องการแก้ไขในเวลาอันสั้นได้

2.3 การปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics)

2.3.1 ความหมาย

การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินหรืออาจเรียกว่า การปลูกพืชด้วยสารละลาย (Hydroponics) มาจากคำในภาษากรีกสองคำคือคำว่า “hudor” หมายถึง น้ำ และ “ponos” หมายถึง งาน ซึ่งเมื่อรวมคำสองคำเข้าด้วยกันความหมายก็คือ “Water - Working” หรือ “การปฏิบัติงานเกี่ยวกับน้ำ แต่โดยความหมายจริงๆ นั้น ได้มีความเกี่ยวข้องกับการใช้สารละลาย หรือการใช้ปุ๋ยเคมีกับการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน กล่าวคือ การปลูกพืชลงบนสารละลายธาตุอาหารพืชโดยให้รากพืชสัมผัสกับสารละลายอาหารโดยตรง (ดิเรก ทองอร่าม, 2546) ซึ่งเป็นสิ่งตรงกันข้ามกับการปลูกพืชในดินให้เจริญเติบโตดังที่เป็นมาแต่ดั้งเดิม หรือที่เรียกว่า จีโอโพนิคส์ (Geoponics) อย่างไรก็ตาม หลักการพื้นฐานในการปลูกพืชตามแบบวิธีนี้ทั้งในการปฏิบัติ และการดูแลก็จะเป็นไปในลักษณะเหมือนกับพืชที่ปลูกในดินเพียงแต่ปลูกได้โดยไม่ต้องการดิน

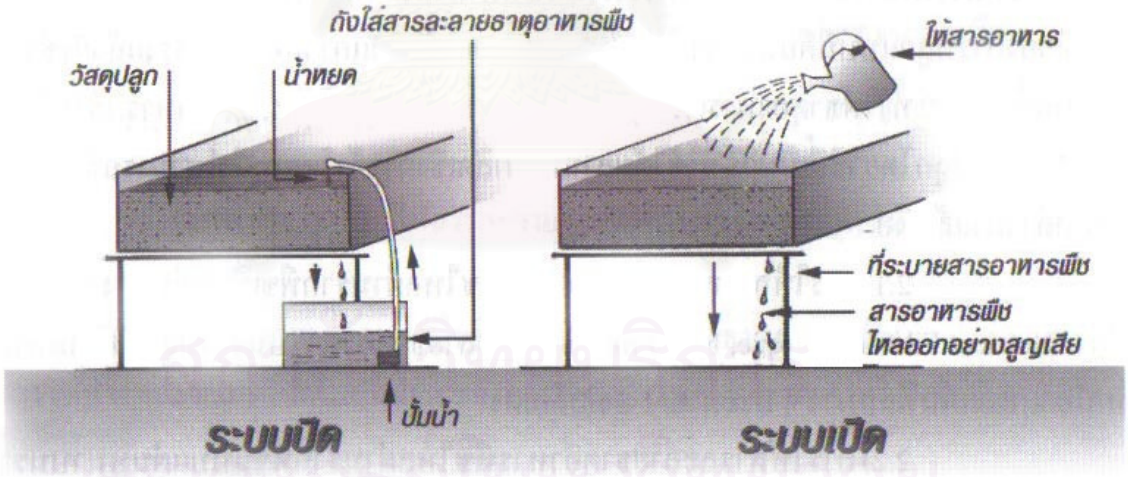
การปลูกพืชไร้ดินที่นิยมแพร่หลายคือ การปลูกพืชแบบไฮโดรโพนิคส์ (Hydroponics) ซึ่งเป็นการปลูกพืชแบบที่มีรากพืชแช่อยู่ในน้ำหรือในน้ำยาที่เป็นสารละลายธาตุอาหารพืช การปลูกพืชแบบไฮโดรโพนิคส์ทั้งหลาย หรือโดยทั่วไปเรียกว่า การปลูกพืชในน้ำ (Water Culture) หรือการปลูกในน้ำยา (Solution Culture)

นอกจากนี้ ยังมีการปลูกพืชที่ใช้วัสดุอื่นๆ ที่ไม่ใช้ดิน เช่น ใช้เฉพาะทรายอย่างเดียว (Sand Culture) หรือถ้าต้องการให้วัสดุปลูกมีน้ำหนักเบามากขึ้นก็ใช้ ร็อควูล (Rockwool) เวอร์มิคูไลท์ (Vermiculite) ขุยมะพร้าว แกลบ หรืออาจจะใช้วัสดุปลูกเหล่านี้ผสมกันเพื่อให้พืชยืนต้นอยู่ได้และเจริญเติบโตดี อย่างไรก็ตาม วัสดุปลูกเหล่านี้ไม่ใช่ดิน จึงต้องให้สารละลายธาตุอาหารแก่พืชอย่างพอเหมาะและต่อเนื่อง การปลูกพืชโดยใช้วัสดุปลูกเหล่านี้จึงถือได้ว่าเป็นการปลูกพืชไร้ดินอีกแบบหนึ่ง (ถวัลย์ พัฒนเสถียรพงศ์, 2534; นพดล เรียบเลิศหิรัญ, 2538)

2.3.2 การปลูกพืชในสารละลาย (Water Culture) ดังรูปที่ 2.4

1) ระบบเอนเอฟที (Nutrient Film Technique, NFT) เป็นระบบที่มีการปลูกพืชโดยให้รากแช่อยู่ในสารละลายโดยตรงซึ่งสารละลายจะไหลผ่านรากพืชเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ (โดยทั่วไปมักกำหนดให้น้ำที่ไหลผ่านมีความลึกประมาณ 1-3 มิลลิเมตร) สารละลายจะไหลหมุนเวียนผ่านรากตลอดเวลาตามความลาดชันของรางปลูกระบบเอนเอฟทีมีวิธีการปลูกที่หลากหลายเช่น การปลูกพืชในราง ปลูกพืชในร่อง และปลูกพืชในท่อ เป็นต้น

2) ระบบดีเอฟที (Deep Floating Technique, DFT) เป็นระบบที่ปลูกพืชโดยให้รากแช่อยู่ในสารละลายลึกประมาณ 15-20 เซนติเมตร ซึ่งจะมีการปลูกพืชบนแผ่นโฟม หรือวัสดุที่ลอยน้ำได้เพื่อยึดลำต้นแต่จะปล่อยให้รากเป็นอิสระในน้ำ ระบบนี้ไม่มีความลาดเอียง เป็นระบบที่มีการหมุนเวียนสารละลายโดยการใช้ปั๊มดูดสารละลายจากถังพักขึ้นมาใช้ใหม่ในระบบเพื่อให้เกิดการหมุนเวียน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้กับระบบน้ำที่ใช้ในการผลิต ซึ่งระบบนี้อาจมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ระบบไฮโดรโพนิคส์ลอยน้ำ (Floating Hydroponic Systems)



รูปที่ 2.4 วิธีการปลูกพืชในสารละลาย (Water Culture)
ที่มา : ดิเรก ทองอร่าม, 2546

3) ระบบดีอาร์เอฟ (Dynamic Root Floating) เป็นระบบการปลูกพืชที่เน้นการปลูกพืชให้รากพืชแช่อยู่ในน้ำส่วนหนึ่ง และอีกส่วนหนึ่งสร้างรากอากาศ เพื่อช่วยในการหายใจ โดยจะทำให้พืชที่ปลูกในระบบนี้สามารถเจริญได้ในอุณหภูมิของสารละลายที่สูงมากกว่าระบบอื่นๆ ได้ดี ซึ่งกำหนดให้ระดับน้ำควรสูงเพียงพอที่จะทำให้รากพืชแช่อยู่ในน้ำได้ ประมาณ 4 เซนติเมตร โดยรากส่วนนี้จะเป็นรากที่ดูดอาหาร (Nutrient Root) และรากส่วนนอกเหนือจากนี้จะเป็นรากที่หายใจ และดูดออกซิเจนเข้าสู่ราก จึงเรียกรากส่วนนี้ว่า รากอากาศ (Aero Root) ดังนั้น ระบบดีอาร์เอฟก็คือ ระบบที่สามารถปรับความสูงต่ำของน้ำในกระบะปลูกได้ตามความต้องการของรากพืชแต่ละชนิด และเพื่อให้รากพืชลอยอยู่ในน้ำในระดับความลึกเพียง 4 เซนติเมตรเท่านั้น ซึ่งระบบดังกล่าวได้ แบ่งออกเป็น 2 ระบบย่อยๆ ได้แก่

3.1) ระบบปรับลดระดับสารละลาย เป็นแบบที่ปล่อยให้รากจมอยู่ในน้ำลึกในระยะแรก แล้วค่อยลดระดับน้ำลงจากระดับแรกที่สูงประมาณ 8 เซนติเมตร เหลือ 4 เซนติเมตร

3.2) ระบบเออาร์-ดีอาร์เอฟ เป็นการปลูกพืชโดยให้รากพืชคร่อมบนสันของถาดปลูกที่ออกแบบมาโดยเฉพาะแล้วปล่อยสารละลายไปตามแนวด้านข้าง(ถวัลย์ พัฒนเสถียรพงศ์, 2534; อาณัติ ตันโช, 2548)

2.3.3 ข้อดีและข้อเสียของการปลูกพืชแบบไร้ดิน

2.3.3.1 ข้อดีของการปลูกพืชแบบไร้ดิน

1) ปลูกได้โดยไม่ต้องใช้ดิน ในกรณีนี้ประชาชนที่อาศัยอยู่ในชุมชนย่านแออัดในเมืองที่ไม่มีดินสำหรับการปลูกพืช ก็สามารถปลูกไม้ดอก ไม้ประดับ ผักสวนครัว ไม้ผล พืชที่เป็นยารักษาโรคได้ สถานที่อาจใช้บนดาดฟ้า ข้างทางเดินบริเวณหลังบ้าน บริเวณใกล้หน้าต่าง หลังคาโรงงาน สำหรับในที่สาธารณะเช่น เกาะกลางถนน ริมถนน สวนสาธารณะ เป็นต้น ฉะนั้น ผู้ที่อยู่ในเมืองก็ย่อมสามารถปลูกพืชให้มีผลผลิตไว้รับประทานได้ด้วยเช่นกันในตลอดทั้งปี ทั้งที่มีพื้นที่เพียงเล็กน้อย ซึ่งก็ไม่เพียงแต่ปลูกอยู่ในเมืองเท่านั้น แม้ในชนบทก็ย่อมสามารถทำได้เช่นกัน โดยไม่ต้องประสบกับปัญหาที่เกิดจากสภาพดินเสื่อมหรือดินมีสภาพไม่เอื้ออำนวยต่อการใช้ประโยชน์เช่น ดินที่แห้งแล้ง ดินขาดธาตุอาหารพืช ดินที่เป็นทรายจัด หรือแม้แต่ในพื้นที่ที่เป็นหินและแหล่งที่เป็นภูเขาเป็นต้น

2) ควบคุมปัญหาโรคพืชและแมลงได้ง่าย จากการที่ไม่ต้องใช้ดินในการปลูกพืช ปกติดินอาจมีเชื้อโรค และยังเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของแมลงชนิดต่างๆ จึงเป็นข้อได้เปรียบอย่างหนึ่ง แต่ก็ยังเหลือปัญหาของแมลงและโรคต่างๆ ที่แพร่กระจายอยู่ในอากาศทั่วไป ซึ่งจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้เท่าเทียมกัน รวมทั้งเสี่ยงต่อการใช้ยาฆ่าแมลงได้ด้วย ดังนั้น ควรใช้ตาข่ายป้องกันแทน หรือในกรณีการปลูกพืชอยู่ในมุ้งตาข่ายพลาสติกนั้น สามารถแก้ไขปัญหาในเรื่องการใช้ยาฆ่าแมลงได้โดยสิ้นเชิง ทำให้พืชที่ปลูกโดยวิธีนี้ ปลอดจากสารเคมีกำจัดโรคและแมลง และไม่ก่อให้เกิดปัญหาสารพิษตกค้างในอาหารสำหรับผู้บริโภค นอกจากนี้ ผลทางอ้อมยังเป็นการรักษาระบบนิเวศและเป็นการป้องกันการทำลายสภาพแวดล้อมด้วย

3) พืชจะเจริญเติบโตได้รวดเร็วและให้ผลผลิตได้มาก เนื่องจากสามารถควบคุมสารอาหารได้ดีกว่าที่ปลูกอยู่ในดิน อีกทั้งพืชได้ใช้ปุ๋ยในรูปอนินทรีย์โดยตรง ดังนั้น พืชจึงเจริญเติบโตได้รวดเร็วกว่าที่ปลูกในดินและแบบไม่ใช้ดินจะให้ผลผลิตได้มากกว่า

4) ไม่มีปุ๋ยชนิดใดที่ดีกว่าปุ๋ยธรรมชาติในดิน แต่ส่วนมากดินมักขาดธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืชมากกว่า 1 ชนิดขึ้นไป ซึ่งก็สามารถที่จะเติมธาตุอาหารส่วนที่ขาดนั้นได้ เช่น การเติมซุปเปอร์ฟอสเฟต (Super Phosphate) โปตัสเซียมซัลเฟต (Potassium Sulphate) หรือการเติมยูเรียเมื่อขาดธาตุไนโตรเจน แต่ปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นก็คือ ไม่ทราบสัดส่วนปริมาณมากน้อยเพียงใดในการเติม เพื่อที่จะให้พอเหมาะกับความต้องการของต้นพืช อีกทั้งยังมีปัญหาอื่นคือ ส่วนใหญ่พบว่า จะถูกน้ำชะล้างทิ้งไปและจมลึกลงในดิน ส่วนการปลูกพืชไม่ใช้ดินส่วนใหญ่พบว่า จะถูกน้ำชะล้างทิ้งไปและสามารถจัดเตรียมธาตุอาหารให้มีสัดส่วนและปริมาณที่พอเหมาะกับที่พืชต้องการ

5) ปริมาณน้ำที่ใช้ลดลงและไม่เกิดกรณีปัญหาของการให้น้ำมากไปเหมือนเช่นที่ปลูกในดิน

6) ลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งนำไปสู่ตลาด หากปลูกในรูปของเชิงการค้าฟาร์มเพาะปลูกจะตั้งให้อยู่ใกล้แหล่งของผู้บริโภค เช่น โรงงานอุตสาหกรรม หอพักอาศัย โรงพยาบาล โรงเรียน สถานพักฟื้น เป็นต้น โดยจะจัดส่งผลผลิตไปสู่ตลาดใกล้ๆ ได้โดยตรง

7) ระบบนี้จะให้ผลผลิตสม่ำเสมอคงที่ เพราะเนื่องจากมีการควบคุมธาตุอาหารได้ดี และการควบคุมปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่างๆ ได้ทั่วถึง ซึ่งผลที่เกิดขึ้นก็คือ ทำให้ได้ผลผลิตของขนาด รูปร่าง น้ำหนัก มีลักษณะอย่างเดียวกัน

8) ลดปัญหาค่าใช้จ่ายด้านแรงงานเช่น การเก็บเกี่ยวทำได้ง่าย ไม่ต้องรดน้ำ ไม่ต้องออกแรงไปขุดดินเพื่อเก็บเกี่ยวผลผลิต และการย้ายกล้าใช้เวลาน้อยกว่า เป็นต้น

9) ใช้พื้นที่เพาะปลูกน้อยกว่า ถ้าหากปลูกในเมืองจะพบว่า แหล่งดินที่มีอยู่อย่างจำกัด ก็สามารถนำพื้นที่อื่นที่ว่างเปล่ามาใช้ให้เป็นประโยชน์ได้เต็มที่

10) ไม่เกิดปัญหาวัชพืชอื่นมาแย่งอาหารจากพืชที่ปลูก

2.3.3.2 ข้อเสียของการปลูกพืชแบบไร้ดิน

1) เสียค่าใช้จ่ายในการลงทุนครั้งแรกค่อนข้างสูง ต้องลงทุนในด้านอุปกรณ์และโรงเรือน ถ้าปลูกเพื่อการค้าในระยะแรกอาจจะไม่คุ้ม แต่ในระยะยาวจะได้ผลคุ้มค่า

2) ผู้ปลูกจะต้องมีความรู้พื้นฐานทางปุ๋ยเคมี น้ำ สรีรวิทยาของพืช และเทคนิคการออกแบบเครื่องมือ อีกทั้งยังควรเป็นผู้ที่สนใจศึกษาค้นคว้าในด้านนี้ จึงจะปลูกพืชได้บรรลุถึงความสำเร็จได้ดี

3) ระบบนี้ต้องการการดูแลอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง จะปล่อยปละละเลยเหมือนเช่นที่ปลูกในดินไม่ได้ เพราะหากเกิดการผิดพลาดขึ้น ผลเสียหายจะมีมากกว่าการปลูกในดิน ดังกรณีต่อไปนี้

3.1) ในบางระบบมีความจำเป็นต้องใช้ปั๊ม ความเสียหายอาจมีขึ้นได้ง่ายจากกรณีของไฟดับหรือปั๊มเกิดขัดข้อง

3.2) ถึงแม้การปรับหรือควบคุมธาตุอาหารเป็นไปได้สะดวก แต่อีกทางหนึ่งของผลเสียหายอันเกิดจากการให้ธาตุอาหารน้อยหรือมากเกินไปอาจเกิดขึ้นได้ง่าย

3.3) จากการให้สารละลายธาตุอาหารจากแหล่งเดียวกัน และมีการใช้ระบบเดียวที่ให้สารละลายเคลื่อนที่จากรากผ่านไปยังอีกรากหนึ่งตลอดทั้งแปลง ดังนั้น ถ้าเกิดกรณีของโรคพืช เช่น โรครากเน่า หากมีการติดเชื้อ โอกาสแพร่กระจายจะเป็นไปโดยทั่วถึงกันทั้งหมด (อานัฐ ตันโช, 2548)

2.4 ต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus* Poir.)

ชื่อวิทยาศาสตร์ *Phyllanthus reticulatus* Poir.

ชื่อวงศ์ EUPHORBIACEAE

ชื่อเรียกอื่นๆ ได้แก่ ก้างปลาขาว ก้างปลาแดง ปู่เจ้าคาคลอง ปู่เจ้าขวางคลอง คาคลอง ขวางคลอง ข่าคลอง คำอ้าย (โคราช)

ลักษณะทางสรีรวิทยาของต้นก้างปลา เป็นไม้พุ่มหนาเล็กต้นสูงประมาณ 6-7 ฟุต ใบกลมเล็กๆ ใบมนคล้ายใบแค แต่โตขนาดเท่าหัวแม่มือ ขอบใบเรียบ ก้านใบยาว 2-3 มิลลิเมตร ดอกมีขนาดเล็ก ทรงกลมช่อละ 1-3 ดอก ออกดอกตามง่ามใบ เป็นพืชที่ไม่สมบูรณ์เพศมีกลีบรองดอก 4-6 กลีบ สีเขียวอมแดง ไม่มีกลีบดอก มีผลสุกสีดำกลมโต ผลมีลักษณะนุ่มโตกว่าเมล็ดพริกไทยเล็กน้อย การขยายพันธุ์จะขยายพันธุ์โดยการใช้เมล็ดหรือกิ่งชำ ชอบขึ้นตามที่ชุ่มชื้นและตามที่รกร้างทั่วๆ ไป (ปรีชา พงศ์ภมร, 2532)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 การศึกษาการกำจัดโครเมียมโดยวิธีปลูกพืชในดิน

Kumar et al. (1995) ได้ทำการศึกษาพืชที่สามารถดูดซับโลหะหนักจากดินโดยใช้พืชกลุ่ม Brassica จำนวน 6 ชนิด ได้แก่ *B. nigra, B. oleracea, B. campestris, B. carinata, B. juncea* และ *B. napus* ซึ่งการทดลองนี้ได้ทำการเปรียบเทียบการดูดซับโลหะหนักที่ต่างกันคือ แคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) คอปเปอร์ (Cu) นิกเกิล (Ni) และสังกะสี (Zn) โดย Brassica ทั้ง 6 ชนิด มีความสามารถในการสะสมโลหะหนัก และพบว่า มีการดูดซับโครเมียม (Cr) ในปริมาณสูงที่สุด ตามด้วยแคดเมียม (Cd) นิกเกิล (Ni) สังกะสี (Zn) และทองแดง (Cu) เท่ากับ 58, 52, 31, 17 และ 7 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งปริมาณการสะสมโลหะหนักใน Brassica นั้นมีปริมาณที่สูงซึ่งอาจมีการนำพืชกลุ่ม Brassica เหล่านี้มาใช้เพื่อบำบัดพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักได้

วงศ์พงา เส็งสาย (2544) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของหญ้าแฝกหอม (*Vetiveria zizaniodes* (Linn.) Nash) และแฝกดอน (*Vetiveria nemoralis* A. Camus) ในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียขั้นสุดท้ายจากโรงฟอกหนัง พบว่า หญ้าแฝกหอม มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการกำจัดโครเมียม เท่ากับ 89.29 % รองลงมาคือ หญ้าแฝกดอน เท่ากับ 86.30% ที่ระดับความลึกของน้ำเสีย 0.10 เมตร และหญ้าแฝกทั้งสองสายพันธุ์นี้มีการสะสมโครเมียมไว้ในรากมากกว่าส่วนใบและลำต้น โดยหญ้าแฝกหอมมีการสะสมโครเมียมมากกว่าหญ้าแฝกดอนทุกระดับน้ำเสีย

สรวิทย์ งามพร้อมพันธุ์ (2544) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของบอน (*Colocasia esculenta* (L.) Schott) ในการกำจัดโครเมียมในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อการบำบัดน้ำเสียขั้นสุดท้ายจากโรงฟอกหนัง ที่ระดับความลึกต่างๆ กัน 3 ระดับ ได้แก่ 0.15, 0.25 และ 0.35 เมตร เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมของบอน 2 ชนิดพันธุ์ คือ บอนเขียวและบอนจีนดำ พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมของบอนเขียวและบอนจีนดำโดยเฉลี่ยจากทุกระดับน้ำอยู่ที่ 67.01 และ 59.95% ตามลำดับ และมีการสะสมโครเมียมที่รากในปริมาณสูงที่สุดในทุกๆ ระดับน้ำเสีย

Sampanpanish et al. (2004) และ Sampanpanish (2005) ได้ศึกษาความสามารถของวัชพืชในประเทศไทยเพื่อดูดซับโครเมียมจากดิน โดยใช้วัชพืช 6 ชนิด ได้แก่ หญ้าแพรก (*Cynodon dactylon*) ขลู่ (*Pluchea indica*) ก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) หญ้าข้าวนก (*Echinochloa colonum*) หญ้าแฝก (*Vetiveria nemoralis*) และผักขม (*Amaranthus viridis)* พบว่า หญ้าแพรก (*Cynodon dactylon*) และขลู่ (*Pluchea indica*) มีความสามารถในการสะสมโครเมียมได้สูงสุดคือ 152.1 และ 151.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยน้ำหนักแห้งตามลำดับ ที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน เป็นเวลา 30 วัน โดยในต้นขลู่ (*Pluchea indica*) มีการสะสมโครเมียม ในราก ลำต้น และใบ คิดเป็น 27%, 38% และ 35% ของน้ำหนักโครเมียมที่ดูดซับทั้งหมด ตามลำดับ ส่วนหญ้าแพรก (*Cynodon dactylon*) มีการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] ในราก ลำต้น และใบ เท่ากับ 51%, 49% และ 0% ของน้ำหนักโครเมียมที่ดูดซับทั้งหมด นอกจากนี้ Sampanpanish et al. (2006) พบว่า การสะสมและเคลื่อนย้ายโครเมียมในเนื้อเยื่อของพืช ทำให้เกิดการดูดซับโครเมียมในดินที่มีการปนเปื้อนเพื่อสะสมในพืชซึ่งในต้นขลู่ (*Pluchea indica*) มีการสะสมโครเมียมมากกว่าในหญ้าแพรก (*Cynodon dactylon*)

2.5.2 การศึกษาการกำจัดโครเมียมโดยวิธีปลูกพืชแบบไร้ดิน

Skeffington, Shewry and Peterson (1976) พบว่า โปตัสเซียมโครเมท (Potassium Chromate) มีความเป็นพิษต่อข้าวบาร์เลย์ (Barlay) ที่ปลูกในสารละลาย โดยในการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงการดูดซับโครเมท (CrO_4^{-2}) ได้อย่างรวดเร็ว ส่วนการดูดซับโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] กลับไม่มีการตอบสนอง แสดงให้เห็นว่าโครเมียม (Cr) ทั้ง 2 รูปนี้พืชไม่สามารถที่จะดูดซับขึ้นไปพร้อมกันได้ จากการศึกษาถึงรูปของโครเมียม (Cr) ภายในเซลล์รากพืช (Root Cell) ที่ดูดเอาโครเมท (CrO_4^{-2}) ไปใช้นั้น โครเมียมที่พบส่วนใหญ่จะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นโครเมียมเมียมไตรวาเลนท์ และยังพบว่าการเคลื่อนย้ายโครเมียมที่ดูดซับด้วยรากนั้นจะช้ามาก ซึ่งสามารถอธิบายถึงการมีโครเมียมระดับที่ต่ำในลำต้นได้ และการเคลื่อนย้ายโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] จะดีกว่าโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)]

Moral et al. (1995) ได้ศึกษาผลกระทบของโครเมียมที่มีต่อธาตุอาหาร และลักษณะทางโครงสร้างของมะเขือเทศที่มีการปลูกมะเขือเทศในระบบไฮโดรโพนิคส์ (Hydroponics) โดยศึกษาผลกระทบของโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] ที่มีผลต่อไนโตรเจน(N) ฟอสฟอรัส (P) โปตัสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) และโครเมียม (Cr) ในพืช สำหรับการเจริญเติบโต และผลผลิตของมะเขือเทศ ซึ่งเตรียมสารละลายธาตุอาหารให้มีความเข้มข้นของโครเมียม 3 ระดับ คือ 0, 50 และ 100 มิลลิกรัมโครเมียมต่อลิตร พบว่า โครเมียมถูกสะสมไว้ในรากมากที่สุด ในขณะที่มีอยู่ในส่วนยอดน้อยมาก และพบว่ามะเขือเทศมีการเจริญเติบโตลดลงเมื่อมีโครเมียมในสารละลายเพิ่มขึ้น แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อผลผลิต

Lytle et al. (1998) ได้ทำการศึกษาการรีดิวส์ (Reduce) ของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] ไปเป็นโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] ซึ่งมีความเป็นพิษลดลงโดยใช้ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) พบว่า มีการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] ซึ่งไม่เป็นพิษต่อรากและลำต้น ซึ่งปฏิกิริยาข้างต้นนี้ปรากฏอยู่บริเวณรากฝอยของพืช และโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] จะถูกเคลื่อนย้ายไปยังใบ และทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Absorption Spectroscopy ทุก 4, 24 และ 72 ชั่วโมง พบว่า มีการสะสมโครเมียมในผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรากมีการสะสมโครเมียมประมาณ 5,000-6,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากได้รับโครเมียมจำนวน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 14 วัน ดังนั้น ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) จึงเป็นพืชที่มีประสิทธิภาพสูงในการฟื้นฟูสภาพน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนโครเมียม เนื่องจากสามารถดูดซับและเคลื่อนย้ายโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] ที่เป็นพิษและรีดิวส์ให้เป็นโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] ซึ่งไม่เป็นพิษ รวมทั้งยังมีการสะสมโครเมียมที่มีความเข้มข้นสูงในส่วนต่างๆ ของพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งในราก ซึ่งมีมวลชีวภาพ (Biomass) สูงด้วย

มงคล เพ็ญสายใจ และคณะ (2541) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ โดยยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* จำนวน 4 สายพันธุ์ คือสายพันธุ์ G, S, B และ F ซึ่งแยกได้จากยีสต์ขนมปังชนิดต่างๆ พบว่า *S. cerevisiae* สายพันธุ์ G ของการทดลองในการดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ ที่ระดับของความเข้มข้น 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการเขย่า 180 รอบต่อนาที และในสารละลายโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6 ยีสต์สามารถดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในสารละลายโครเมียมได้สูงสุด 0.40 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเวลา 24 ชั่วโมง

Pulford, Watson and Mcgregor (2001) ได้ศึกษาระดับความเข้มข้นของโครเมียม (Cr) และสังกะสี (Zn) ในส่วนต่างๆ ของไม้ยืนต้นคือ Birch, Pine, Alder, Poplar และ Willow ด้วยการปลูกพืชในระบบไฮโดรโพนิคส์ (Hydroponics) โดยมีโครเมียม และสังกะสีปนเปื้อนที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งพบว่า พืชมีการสะสมโครเมียม (Cr) ทั้ง 2 รูปคือ โครเมียมไตรวาเลนท์และโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ โดยส่วนใหญ่มีการสะสมอยู่ในรากและในส่วนเหนือรากมีปริมาณสะสมอยู่น้อยมาก ส่วนสังกะสี (Zn) มีการสะสมกระจายอยู่ทั่วทุกส่วนของพืช ทั้งนี้เนื่องจากมีการเคลื่อนย้ายจากรากไปยังลำต้นได้ดี

Aldrich et al. (2003) ได้ทำการศึกษาความสามารถของต้น Mesquite (*Prosopis* spp.) ที่สามารถดูดซับโครเมียมจากบริเวณที่มีการปนเปื้อน ซึ่งจุดประสงค์ในการศึกษานี้ เพื่อศึกษาการเจริญเติบโตของต้น Mesquite (*Prosopis* spp.) ที่เจริญเติบโตบนอาหารวุ้น (Agar) ที่มีโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 75 และ 125 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 3 ซ้ำ เพื่อจัดจำแนกเป็นพืช Hyperaccumulator Chromium ในการศึกษาครั้งนี้ พบว่า ในรากมีการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] จำนวน 7,636 และ 10,983 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระดับความเข้มข้น 75 และ 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนในลำต้นมีการสะสมอยู่จำนวน 889 และ 2,263 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระดับความเข้มข้น 75 และ125 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยใบมีการสะสมของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] ในปริมาณที่น้อยที่สุดคือ ประมาณ 323 และ 992 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระดับความเข้มข้น 75 และ 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังได้ทำการศึกษาโดยการปลูกพืชแบบไฮโดรโพนิคส์ (Hydroponics) พบว่ามีการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์และโครเมียมไตรวาเลนท์ ในส่วนของราก ลำต้น และใบ ด้วยเช่นกัน

Bennicelli et al. (2004) ได้ทำการศึกษาความสามารถของเฟิร์นน้ำ *Azolla caroliniana* ในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนปรอทและโครเมียม โดยทำการเลี้ยงเฟิร์นน้ำ *Azolla caroliniana* เพื่อดูการเจริญเติบโตในน้ำที่มีการปนเปื้อนปรอท โครเมียมไตรวาเลนท์ และโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ เป็นเวลา 12 วัน โดยสารปนเปื้อนแต่ละชนิดมีระดับความเข้มข้นอยู่ 3 ระดับ คือ 0.1, 0.5 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลูกบากศ์เดซิเมตร พบว่า ไอออนของโลหะหนัก 20-30% สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเฟิร์นน้ำ *Azolla caroliniana* ได้ โดยที่ปรอทมีปริมาณมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม และภายหลังจาก 12 วันของการทดลอง ในน้ำที่ปนเปื้อนโลหะหนัก มีปริมาณลดลง 0-0.25 มิลลิกรัมต่อลูกบากศ์เดซิเมตร และลดลงอยู่ระหว่าง 74 และ 100% ที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียมไตรวาเลนท์และโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 1.0 มิลลิกรัมต่อลูกบากศ์เดซิเมตร ตามลำดับ ซึ่งการสะสมโลหะหนักดังกล่าวในเนื้อเยื่อของเฟิร์นน้ำ *Azolla caroliniana* ที่ระดับความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลูกบากศ์เดซิเมตร ซึ่งมีปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบกับที่ระดับความเข้มข้น 0.5 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลูกบากศ์เดซิเมตร

Choo et al. (2005) ได้ทำการศึกษาการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ และศึกษาปริมาณสะสมโครเมียมในพืชน้ำ โดยพืชน้ำที่ใช้ในการศึกษาคือ บัว *Nymphaea spontanea* ซึ่งทำการปลูกในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลา 3, 6 และ 9 สัปดาห์ จากการศึกษานี้ พบว่า พืชมีความสามารถในการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ ได้ถึง 2.119 มิลลิกรัมต่อกรัมโดยน้ำหนักแห้ง จากระดับความเข้มข้นโครเมียมในน้ำเสีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นระยะเวลา 9 สัปดาห์ โดยรากพืชดังกล่าวเป็นส่วนที่มีการสะสมโครเมียมในปริมาณมากที่สุด ตามด้วยใบ และลำต้น ตามลำดับ นอกจากนี้ อายุของพืชยังมีความสำคัญต่อการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ โดยพืชที่มีอายุ 9 สัปดาห์ พบว่า มีการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์มากที่สุด รองลงมาคือ 6 และ 3 สัปดาห์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า การสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในพืชยังส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ทำให้พืชมีการเจริญเติบโตลดลง และแสดงอาการความเป็นพิษ คือ มีปริมาณคลอโรฟิลล์ โปรตีน และปริมาณน้ำตาลในพืชลดลงอย่างเห็นได้ชัด

พันธวัศ สัมพันธ์พานิช [2549(ข)] ได้ทำการศึกษาการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังโดยวิธีการดูดซับทางชีวภาพด้วยพืช โดยแบ่งพืชเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ได้แก่ หญ้าข้าวนก (*Echinochloa colonum* Link.) และหญ้าแพรก (*Cynodon dactylon* Pers.) และกลุ่มพืชใบเลี้ยงคู่ ได้แก่ ต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus* Poir.) และต้นขลู่ (*Pluchea indica* Less.) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพ และความสามารถในแต่ละสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสีย โดยใช้สารละลายโปตัสเซียมไดโครเมท ($K_2Cr_2O_7$) สังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์

[Cr(VI)] เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และระดับค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ใช้คือ 2, 4, 6 และ 8 นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองแบบใช้คอลัมน์โดยวิธี Empty Bed Contact Time (EBCT) โดยใช้เทคนิคในการดูดซับโครเมียมบนแบตซ์ไอโซเทอม เพื่อศึกษากลไกในการกำจัดโครเมียมจากพืชที่เลือกใช้ในการศึกษา และเพื่อศึกษาอัตราการไหลของน้ำ (Flow Rate) ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 10, 20 และ 30 นาที และระดับความเข้มข้นของโครเมียมก่อนและหลังผ่านกระบวนการแบบคอลัมน์ที่บรรจุมวลชีวภาพที่เลือกใช้

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าชนิดและส่วนต่างๆ ของมวลชีวภาพมีผลต่อการดูดซับโครเมียม โดยใบของต้นขลู่ และต้นก้างปลา มีความสามารถสูงสุดในการดูดซับโครเมียม ตามด้วยใบของหญ้าข้าวนก คิดเป็น 99-100% ที่ระดับค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 2 และจุดสมดุลของเวลาที่ 24 ชั่วโมง สำหรับมวลชีวภาพของพืชใบเลี้ยงคู่สามารถแสดงความสามารถได้ดีกว่าพืชกลุ่มใบเลี้ยงเดี่ยว โดยเฉพาะมวลชีวภาพในส่วนที่เป็นใบ ซึ่งเป็นส่วนที่มีการสะสมโครเมียมสูงสุด และผลจากการทดลองแบบคอลัมน์พบว่า ใบของต้นขลู่ มีความสามารถในการดูดซับโครเมียมสูงสุด คิดเป็นปริมาตรเท่ากับ 8.2 ลิตร ที่ระดับค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 2 และBreakthrough Time เท่ากับ 102 ชั่วโมง และอัตราการไหล 1.3 มิลลิลิตรต่อนาทีหรือ EBCT เท่ากับ 30 นาที ตามด้วยใบของหญ้าข้าวนก และต้นก้างปลา ตามลำดับ

นอกจากนี้ Sampanpanish [2006(a)] ยังได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับโครเมียมด้วยไฮโดรโพนิคส์ (Hydroponics) โดยใช้วัชพืชได้แก่ หญ้าข้าวนก (*Echinochloay colonum*) หญ้าแพรก (*Cynodon dactylon*) และหญ้าแฝก (*Vetiveria nemoralis*) โดยระดับความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] ที่ใช้มีค่าเท่ากับ 0, 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลจากการศึกษาพบว่า รากของหญ้าข้าวนก (*Echinochloay colonum*) มีความสามารถในการสะสมโครเมียมได้สูงสุดคือ 5,004 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามด้วยรากของหญ้าแพรก (*Cynodon dactylon*) และหญ้าแฝก (*Vetiveria nemoralis*) มีการสะสมโครเมียมเท่ากับ 3,786 และ 915 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เป็นเวลา 60 วัน ที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] เท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร และสามารถจัดจำแนกหญ้าข้าวนก (*Echinochloay colonum*) เป็น Hyperaccumulator Chromium ที่มีความสามารถในการดูดซับโครเมียมในน้ำที่มีการปนเปื้อนได้มากกว่าพืชชนิดอื่นๆ

Sampanpanish and Tippayasak (2007) ได้ทำการศึกษาปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์โดยวิธีการปลูกพืชไร้ดิน โดยพืชที่ใช้ในการศึกษาคือ ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes* Hart. Solms.) และแว่นแก้ว (*Hydrocotyle umbellate* L.) ที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 0, 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งการศึกษานี้พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลา 7, 15, 21 และ 30 วัน ผักตบชวาทั้งต้นมีปริมาณการสะสมโครเมียมเท่ากับ 1.29, 1.76, 2.56 และ 2.70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ส่วนแว่นแก้วทั้งต้นมีปริมาณโครเมียมสะสมอยู่เท่ากับ 0.74, 1.10, 1.26 และ 1.23 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และยังพบว่าในส่วนรากของพืชทั้งสองชนิดนี้มีความสามารถในการเปลี่ยนรูปโครเมียมจากโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ไปเป็นโครเมียมไตรวาเลนท์ได้มากที่สุด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการปลูกต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*)

1) กระถางพลาสติกสีดำ (ไม่มีรู) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 เซนติเมตร (สำหรับปลูกพืชในน้ำ)

2) กระถางพลาสติกสีดำที่มีรูระบายน้ำ และจานรองกระถาง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 24 เซนติเมตร (สำหรับปลูกพืชในดิน)

3) ต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*)

4) ถุงพลาสติกหนา

5) กาลักน้ำ

6) ปั๊มอากาศและหัวฟู่เติมอากาศ

7) โฟม

8) ฟองน้ำ

9) ปุ๋ยน้ำไฮโดรโพนิคส์ สูตร A และ B

10) ปุ๋ยเม็ด สูตร 15-15-15

3.1.2 วัสดุและอุปกรณ์ในการเก็บตัวอย่างดิน และน้ำ

1) พลั่วตักดิน และเสียม

2) ถุงพลาสติก

3) ปากกาทำเครื่องหมาย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4) ขวดพลาสติกขนาด 200 มิลลิลิตร

5) กระดาษกาว

3.1.3 วัสดุและอุปกรณ์ในการเก็บตัวอย่างพืช

1) กรรไกรตัดกิ่ง

2) ตระกร้า

3) ถุงกระดาษ

4) ปากกาทำเครื่องหมาย

5) เครื่องชั่งน้ำหนัก

3.1.4 วัสดุและอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ

1) สารเคมี ใช้สารเคมีเกรดงานวิเคราะห์ (Analytical Reagent Grade) สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ และพืช เพื่อหาปริมาณโครเมียมทั้งหมดและโครเมียมเฮกซาวาเลนท์

2) วัสดุในห้องปฏิบัติการ เป็นเครื่องแก้วสำหรับวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ เช่น ขวดรูปชมพู่ (Erlenmayer Flask) กระบอกตวง (Cylinder) บีกเกอร์ (Beaker) ปิเปต (Pipet) ถ้วยกระเบื้องตะแกรงร่อนดินขนาด 2 มิลลิเมตร และช้อนตักสาร

3) อุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

3.1) เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH Meter)

3.2) เครื่องชั่งไฟฟ้าอย่างละเอียด (Analytical Balance)

3.3) เครื่องอบอุณหภูมิสูง (Oven)

3.4) เครื่องกรองแบบดูดอากาศ

3.5) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (EC)

3.6) เครื่องวัดศักยภาพออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (ORP)

3.7) อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิความร้อน (Hot Water Bath)

3.8) เครื่องเขย่า (Shaker)

3.9) เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

3.10) เครื่อง Microwave รุ่น Milestone Ethos Sel

3.11) เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชั่นสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer) รุ่น Analis 800

3.2 สถานที่ทำการศึกษา

การศึกษาวิจัยภาคสนามได้ทำการศึกษาในโรงเรือน ที่มีหลังคากันน้ำฝน และแสงสว่างสามารถส่องผ่านได้อย่างเพียงพอ ที่ชั้น 2 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการวิจัยในห้องปฏิบัติการดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการ ชั้น 3 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อทำการวิเคราะห์หาโครเมียมในตัวอย่างดิน น้ำ และพืช

3.3 ระยะเวลาที่ทำการศึกษา

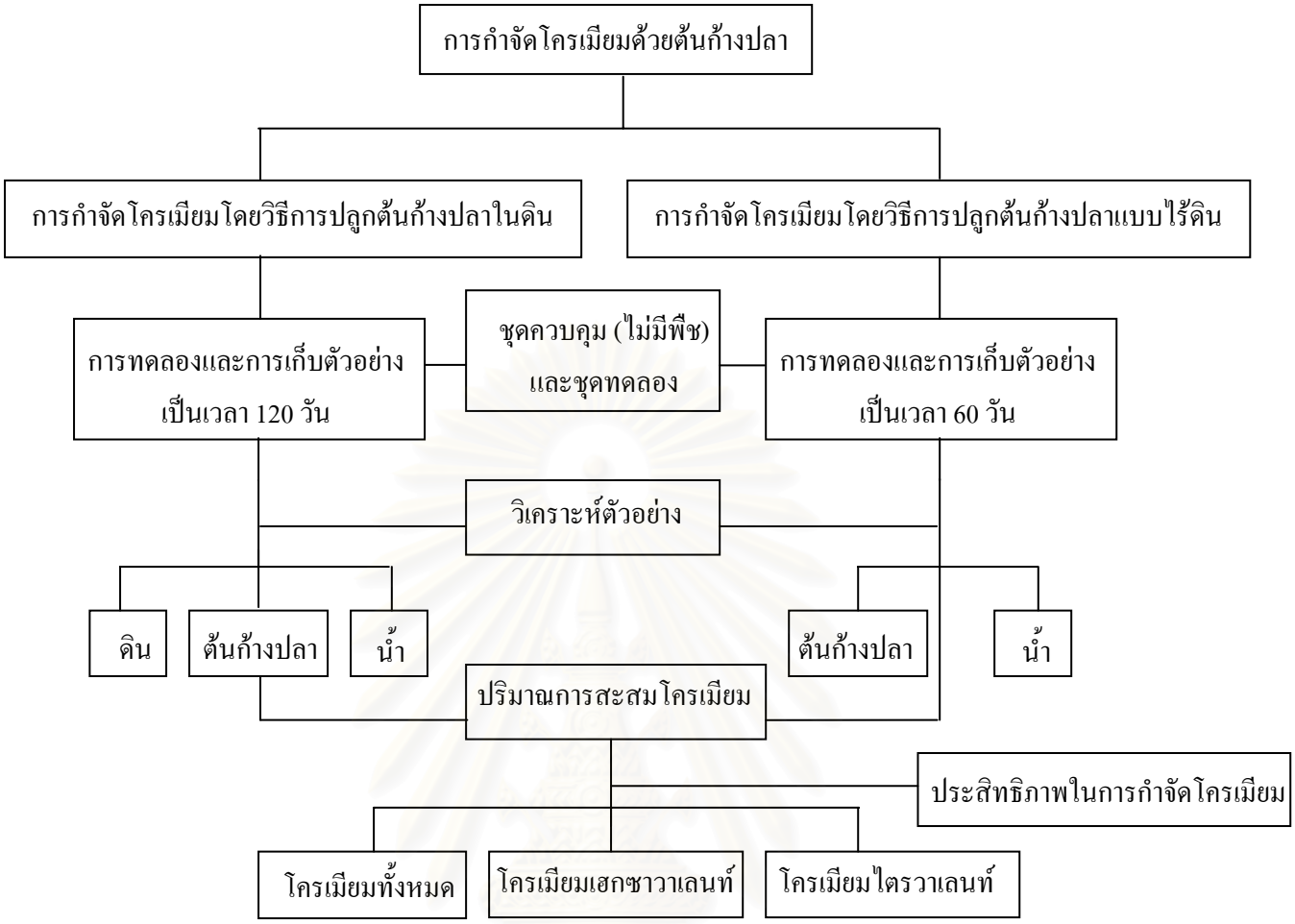
ทำการศึกษาในระหว่างเดือน ตุลาคม พ.ศ. 2549 ถึงเดือนพฤษภาคม พ.ศ.2550 โดยการศึกษาการกำจัดโครเมียมในดิน (Phytoremediation) ได้ทำการเก็บตัวอย่างพืช และดินในทุกๆ 30 วัน เป็นระยะเวลา 120 วัน สำหรับการศึกษาการกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย (Hydroponics) ได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำ และพืชในทุกๆ 15 วัน เป็นระยะเวลา 60 วัน อย่างไรก็ตาม ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างดิน น้ำ และพืช สามารถแสดงได้ในตารางที่ 3.1 และ 3.2 และสามารถสรุปขั้นตอนการดำเนินงานได้ในรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดกิจกรรมในการศึกษาการกำจัดโครเมียมในดิน (Phytoremediation)

การศึกษา	วันที่
1. การจัดเตรียมโรงเรือน พืชตัวอย่าง และดินสำหรับปลูกพืช	ตุลาคม-พฤศจิกายน พ.ศ. 2549
2. การเก็บตัวอย่างของการศึกษาการกำจัดโครเมียมในดิน (Phytoremediation)	15 ธันวาคม พ.ศ. 2549
เก็บตัวอย่างครั้งที่ 1	13 มกราคม พ.ศ. 2550
เก็บตัวอย่างครั้งที่ 2	12 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2550
เก็บตัวอย่างครั้งที่ 3	13 มีนาคม พ.ศ. 2550
เก็บตัวอย่างครั้งที่ 4	12 เมษายน พ.ศ. 2550
3. การวิเคราะห์ตัวอย่าง	เมษายน- พฤษภาคม พ.ศ. 2550

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดกิจกรรมในการศึกษาการกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย (Hydroponics)

การศึกษา	วันที่
1. การจัดเตรียมโรงเรือน พืชตัวอย่าง และดินสำหรับปลูกพืช	ตุลาคม-พฤศจิกายน พ.ศ. 2549
2. การเก็บตัวอย่างของการศึกษาการกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย (Hydroponics)	26 ธันวาคม พ.ศ. 2549
เก็บตัวอย่างครั้งที่ 1	27 ธันวาคม พ.ศ. 2549
เก็บตัวอย่างครั้งที่ 2	10 มกราคม พ.ศ. 2550
เก็บตัวอย่างครั้งที่ 3	25 มกราคม พ.ศ. 2550
เก็บตัวอย่างครั้งที่ 4	9 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2550
เก็บตัวอย่างครั้งที่ 5	24 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2550
3. การวิเคราะห์ตัวอย่าง	มีนาคม-เมษายน พ.ศ. 2550



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 การเตรียมการทดลอง

3.4.1 การใช้พืชในการกำจัดโครเมียมที่ปลูกในดิน (Phytoremediation) ดังรูปผนวกที่ 1

1) การเตรียมดิน

1.1) ทำการขุดดินจากสถานีวิทยุการบินบางปิ้ง บ้านท้ายเมือง อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งเป็นดินที่มีลักษณะเนื้อดินเหมือนเนื้อดินบริเวณโรงงานหรืออุตสาหกรรมฟอกหนัง กม. 30 และ กม. 34 (Sampanpanish, 2005) โดยขุดดินที่ระดับความลึก 0-50 เซนติเมตร

1.2) นำดินมาผึ่งในร่ม และทำการสุ่มเก็บตัวอย่างดินโดยทั่ว และทำการอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส และบดร่อนดินด้วยตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร โดยนำดินใส่ถุงพลาสติกหรือถุงซิบเพื่อนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของดินเบื้องต้น

1.3) ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติดิน (Soil Properties) พารามิเตอร์ดังนี้ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), ความชื้น (Moisture Content), ค่าการนำไฟฟ้า (Conducticity), เนื้อดิน (Soil Texture), อินทรียวัตถุ (Organic Matter), ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity; CEC), ไนโตรเจน (N), ฟอสฟอรัส (P), โพแทสเซียม (K), ค่าปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)], ค่าโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] และค่าปริมาณโครเมียมทั้งหมด (TCr) ทั้งนี้คุณสมบัติของดินเบื้องต้นที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.3 นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมในต้นก้างปลาก่อนทำการทดลองพบว่า ไม่พบปริมาณโครเมียมสะสมในต้นก้างปลา

1.4) นำดินที่ขุดมาผึ่งในที่ร่มที่อุณภูมิห้องให้แห้งพร้อมทั้งทุบดินให้มีขนาดเล็กลง จากนั้นใช้กระถางพลาสติกสีดำที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 เซนติเมตร มีรูระบายน้ำออกที่ก้นกระถางพร้อมวางจานรองกระถาง แล้วทำการชั่งดินที่เตรียมไว้จำนวน 5 กิโลกรัมต่อกระถาง ใส่ลงในกระถางที่มีจานรอง โดยกระถางพร้อมจานรองทำการหุ้มด้วยถุงพลาสติกใหญ่ เพื่อป้องกันและรองรับน้ำที่ใช้รดต้นไม้ชะละลาย (Leachate) ออกภายนอกกระถางอันเป็นการป้องกันของเสียอันตรายออกสู่สิ่งแวดล้อมด้วย

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของดินเบื้องต้นที่ใช้ในการศึกษา

พารามิเตอร์	หน่วย	คุณสมบัติของดิน
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)		5.2±0.0
ค่าสภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity)	(mS/cm)	4.0±0.4
ความชื้นของดิน (Soil Moisture)	(%)	0.5±0.0
อิทรียวัตถุ (Organic Matter)	(%)	4.8±0.0
ไนโตรเจน (Nitrogen)	(%)	0.2±0.0
ฟอสฟอรัส (Phosphorus)	(mg/kg)	748±5
โพแทสเซียม (Potassium)	(mg/kg)	6170±28
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC)	(meq/100g)	21.1±0.6
โครเมียมทั้งหมด (Total Chromium)	(mg/kg soil dry weight)	56.2±4.4
โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (Hexavalent Chromium)	(mg/kg soil dry weight)	ND
อนุภาคทราย (Sand)	(%)	65
อนุภาคดินร่วน (Silt)	(%)	8
อนุภาคดินเหนียว (Clay)	(%)	27
เนื้อดิน (Soil Texture)		ดินร่วนเหนียวปนทราย (Sandy Clay Loam)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) การเตรียมพืช

วัชพืชที่ใช้คือ ต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) ซึ่งมีคุณสมบัติในการขยายพันธุ์ได้เร็ว และวิธีการขยายพันธุ์ที่ดีที่สุดคือ วิธีการปักชำ

2.1) ทำการคัดเลือกกิ่งพันธุ์ที่มีขนาด และความยาวใกล้เคียงกันสูงประมาณ 10-15 เซนติเมตร

2.2) ทำการปักชำในทราย จากนั้น ดูแลรักษาให้น้ำทุกวันประมาณ 2-3 สัปดาห์ในเรือนเพาะชำ

2.3) คัดเลือกต้นที่มีขนาดและความแข็งแรงที่ใกล้เคียงกันย้ายลงปลูกในกระถางทดลองที่เตรียมไว้ และดูแลรักษาให้น้ำทุกวันประมาณ 1-2 สัปดาห์ ในเรือนเพาะชำ

3.4.2 การใช้พืชในการกำจัดโครเมียมที่ปลูกแบบไร้ดิน (Hydroponics) ดังรูปในภาคผนวก ข ที่ 2

1) การเตรียมภาชนะและน้ำเสียสังเคราะห์

1.1) การเตรียมภาชนะโดยใช้กระถางพลาสติก (ไม่มีรู) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 24 เซนติเมตร ด้านบนของภาชนะจะวางด้วยโฟม ซึ่งมีการเจาะรูหรือเปิดช่องให้ต้นไม้เข้าได้ ทั้งนี้ภาชนะที่ใช้ในการทดลองนั้น ได้ทำการแช่ด้วยกรดไนตริก 10% นาน 1 วัน แล้วล้างออกด้วยน้ำประปา และสุดท้ายใช้น้ำกลั่นล้างอีกครั้ง

1.2) การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ โดยได้ทำการเตรียมสารละลายจากโปตัสเซียมไดโครเมท [Potassium Dichromate ($K_2Cr_2O_7$)] ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 0, 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์จำนวน 2 ลิตรต่อหนึ่งภาชนะ

2) การเตรียมพืช

วัชพืชที่ใช้คือ ต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) ได้จากการขยายพันธุ์ด้วยวิธีการปักชำ

2.1) ทำการคัดเลือกกิ่งพันธุ์ที่มีขนาด และความยาวใกล้เคียงกันสูงประมาณ 10-15 เซนติเมตร

2.2) ปักชำในทราย จากนั้น ดูแลรักษาให้น้ำทุกวันประมาณ 2-3 สัปดาห์ในเรือนเพาะชำ

2.3) คัดเลือกต้นที่มีราก ขนาด และความแข็งแรงที่ใกล้เคียงกันย้ายลงปลูกในภาชนะที่ใส่เฉพาะน้ำประมาณ 1 สัปดาห์ ก่อนแล้วจึงย้ายลงในภาชนะทดลองที่เตรียมไว้

3.5 การดำเนินการทดลอง

3.5.1 การใช้พืชในการกำจัดโครเมียมที่ปลูกในดิน (Phytoremediation)

1) ทำการเตรียมสารละลายโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] โดยเตรียมสารละลายจากโปตัสเซียมไดโครเมท [Potassium Dichromate ($K_2Cr_2O_7$)] ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 0 และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน

2) กระถางดินปลูกต้นก้างปลาทำการใส่สารละลายโปตัสเซียมไดโคเมท ($K_2Cr_2O_7$) ที่เตรียมไว้จำนวน 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน โดยการเทใส่ลงไปในกระถางที่มีดินและต้นก้างปลาปลูกไว้แล้ว สำหรับในกระถางควบคุมที่มีการปลูกพืชนั้น หรือที่ระดับความเข้มข้น 0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน แทนที่จะใส่สารละลาย หากแต่ใส่เฉพาะน้ำจำนวน 100 มิลลิลิตรเท่านั้น (ดังรูปผนวกที่ 1)

3) กระถางดินที่ไม่มีการปลูกพืช หรือชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ทำการใส่สารละลายโปตัสเซียมไดโครเมท ($K_2Cr_2O_7$) ที่เตรียมไว้จำนวน 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน โดยการเทใส่ลงไปในกระถางที่มีแต่ดินซึ่งไม่มีการปลูกต้นก้างปลาลงไป และในกระถางควบคุมไม่มีการปลูกพืช หรือที่ระดับความเข้มข้น 0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ทำการใส่เฉพาะน้ำจำนวน 100 มิลลิลิตรเท่านั้น

4) การดูแล รักษา โดยทำการรดน้ำทุกวันในตอนเช้า ในปริมาณน้ำใช้ 500 มิลลิลิตรต่อกระถาง ซึ่งในกรณีที่มีน้ำล้นออกมาจากกระถางลงจานรอง และ/หรือออกมาถึงถุงพลาสติกนอกสุดนั้น ได้มีการดึงน้ำด้วยกาลักน้ำกลับไปในกระถางใหม่ โดยไม่ต้องรดน้ำในวันดังกล่าว นอกจากนี้ ได้มีการเติมปุ๋ยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโปตัสเซียม สูตร 15:15:15 จำนวน 5 กรัม ในทุกๆ 30 วัน เพื่อให้พืชสามารถดูดธาตุอาหารในรูปที่เป็นประโยชน์ไปใช้ในการเจริญเติบโต ซึ่งธาตุอาหารในดินเดิมนั้นอาจอยู่ในรูปที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ และปริมาณของธาตุอาหารพืชที่ใส่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปของโครเมียมแต่อย่างใด

3.5.2 การใช้พืชในการกำจัดโครเมียมที่ปลูกแบบไร้ดิน (Hydroponics)

1) นำต้นพืชที่ได้เตรียมไว้จากการปักชำมาปลูกลงในภาชนะที่มีสารละลายโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 0, 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้ต้นก้างปลาได้ทำการหุ้มลำต้นพืชด้วยฟองน้ำ เพื่อป้องกันการกระแทกหรือหักล้มซึ่งอาจทำให้ต้นไม้บอบช้ำหรือตายได้ และโฟมที่ใช้ต้องตัดให้พอดีกับปากกระถางและเจาะรูสำหรับเป็นเครื่องช่วยพยุงต้นไม้ไม่ให้ล้มหรือร่วงลงไปในสารละลาย (ดังรูปผนวกที่ 2)

2) สำหรับในชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ได้นำภาชนะใส่สารละลายโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 0, 5, 10 และ15 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ไม่มีการปลูกต้นก้างปลาลงไปในสารละลายดังกล่าว

3) การดูแลรักษา ในแต่ละภาชนะได้ทำการติดตั้งเครื่องเติมอากาศในน้ำ และได้ทำการเติมสารอาหารน้ำ โดยใช้ชนิด A และชนิด B ในปริมาณ 10 มิลลิลิตร โดยใส่ทุกๆ 15 วัน ในทุกๆ ภาชนะที่ทำการศึกษา

3.6 การเก็บตัวอย่าง

3.6.1 การใช้พืชในการกำจัดโครเมียมที่ปลูกในดิน (Phytoremediation)

1) การเก็บตัวอย่างดิน โดยการเก็บตัวอย่างดินทั้งหมดจากกระถาง นำมารวมและผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยทำการเก็บตัวอย่างดินภายหลังจากการใส่สารละลายลงไปจนครบ 30 วัน และทำการเก็บต่อไปทุกๆ 30 วัน จนสิ้นสุดการทดลอง 120 วัน สำหรับตัวอย่างดินที่ไม่มีการปลูกพืชลงไปในดินได้ทำการเก็บแต่ตัวอย่างดินภายหลังจากการใส่สารละลายลงไปแล้วที่ 1, 15, 30, 60 และ 90

วัน สำหรับตัวอย่างดินที่เก็บมาแล้วนำมาผึ่งให้แห้งในร่มที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำไปบดด้วยตะแกรงร่อนขนาด 2 มิลลิเมตร ใส่ถุงซิบและนำไปวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณโครเมียมทั้งหมด โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ และโครเมียมไตรวาเลนท์ในดิน

2) การเก็บตัวอย่างพืชทำการเก็บตัวอย่างพืชภายหลังจากปลูกพืชเป็นเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน ซึ่งทำการแยกส่วนเป็น ราก ลำต้น และใบ ในการเก็บตัวอย่างพืชโดยการนำตัวอย่างพืชมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น จนตัวอย่างพืชสะอาดจากสิ่งสกปรกที่ติดมากับดิน นำตัวอย่างพืชไปผึ่งในที่ร่มประมาณ 2-3 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักเปียก จากนั้นแยกส่วนของพืชเป็น ราก ลำต้น และใบ ผึ่งทิ้งไว้ต่ออีก 3 วัน แล้วนำไปอบที่ 70 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำไปบดแยกส่วนของพืช เก็บตัวอย่างพืชใส่ถุงเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมทั้งหมด โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ และโครเมียมไตรวาเลนท์ที่สะสมอยู่ในส่วนต่างๆ ของพืช

3) การเก็บตัวอย่างน้ำที่ถูกชะล้าง หรือน้ำที่สะสมอยู่ในจานรองกระถางภายหลังการใส่สารละลายลงไปจนครบ 30 วัน และทำการเก็บต่อไปทุกๆ 30 วัน จนสิ้นสุดการทดลอง 120 วัน สำหรับตัวอย่างน้ำชะล้างในดินที่ไม่การปลูกพืชลงไปในดินได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำชะล้างจากจานรองกระถางภายหลังจากการใส่สารละลายลงไปในดินที่ 1 , 15 , 30 , 60 และ 90 วัน สำหรับตัวอย่างน้ำนั้นทำการเก็บใส่ขวดตัวอย่างปริมาตร 200 มิลลิลิตร จำนวน 2 ขวด โดยในขวดแรกใส่กรดไนตริก 65% จำนวน 2-3 หยด นำเข้าตู้แช่เย็นและนำไปวิเคราะห์หาปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดและในตัวอย่างน้ำขวดที่สองไม่ต้องใส่กรดใดๆ หากแต่แช่ตู้เย็น และนำไปวิเคราะห์ปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในตัวอย่างน้ำ

3.6.2 การใช้พืชในการกำจัดโครเมียมที่ปลูกแบบไร้ดิน (Hydroponics)

1) การเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ ภายหลังจากการปลูกพืชลงในน้ำเสียสังเคราะห์แล้วที่เวลา 1 วันและเก็บต่อไปทุกๆ 15 วัน จนสิ้นสุดการทดลอง 60 วัน สำหรับน้ำตัวอย่างนำใส่ขวดตัวอย่างปริมาตร 200 มิลลิลิตร จำนวน 2 ขวด และใส่กรดไนตริก 65% จำนวน 2-3 หยด ในขวดแรกนำเข้าตู้แช่เย็นและนำไปวิเคราะห์หาปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในตัวอย่างน้ำและขวดที่สองไม่ต้องใส่กรดใดๆ นำไปวิเคราะห์ปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในตัวอย่างน้ำ สำหรับการเก็บตัวอย่างน้ำในชุดควบคุมที่ไม่มีการปลูกพืชลงไปเป็นการเก็บเพียงตัวอย่างน้ำเท่านั้น ที่เวลา 1 วัน และเก็บต่อไปทุกๆ 15 วัน จนสิ้นสุดการทดลอง 60 วัน ซึ่งในการเก็บตัวอย่างน้ำนั้นทำโดยนำใส่ขวดตัวอย่างปริมาตร 200 มิลลิลิตร จำนวน 2 ขวด และใส่กรดไนตริก 65% จำนวน 2-3 หยด ในขวดแรก

นำเข้าตู้แช่เย็นและนำไปวิเคราะห์หาปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในตัวอย่างน้ำ และขวดที่สองไม่ต้องใส่กรดใดๆ นำไปวิเคราะห์ปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในตัวอย่างน้ำ

2) การเก็บตัวอย่างพืช โดยการนำพืชตัวอย่างมาล้างความสะอาดตัวอย่างพืชด้วยน้ำกลั่นประมาณ 3-4 ครั้ง เพื่อให้ตัวอย่างมีความสะอาดจากสิ่งสกปรกติดค้าง จากนั้นผึ่งในที่ร่มประมาณ 2-3 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักเปียก และทำการแยกส่วนของพืชออกเป็น ราก ลำต้น และใบ แล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เพื่อหาน้ำหนักแห้ง แล้วจึงนำไปบด เก็บตัวอย่างใส่ถุงเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมที่สะสมอยู่

3.7 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

1) การวิเคราะห์คุณสมบัติดินได้แก่ ความชื้น (Moisture Content) ค่าการนำไฟฟ้า (Conducticity) เนื้อดิน (Soil Texture) อินทรียวัตถุ (Organic Matter) ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity; CEC) ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) โพแทสเซียม (K) และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดิน

2) การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (Oxidation Reduction Potential; ORP) ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) และค่าของแข็งละลายน้ำ (Total Suspended Solid)

3) การวิเคราะห์หาโครเมียมทั้งหมด (TCr) ในตัวอย่างดิน พืช และน้ำเสียนั้น ใช้วิธีการของ USEPA method 3052 โดยการย่อยด้วยกรด (Acid Digestion) และตรวจวัดหาค่าปริมาณโครเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชั่นสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometry) (USEPA, 1996a)

4) การวิเคราะห์หาโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] ในตัวอย่างดิน และพืช ใช้วิธีการของ USEPA method 3060 (USEPA, 1996b) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบพัฒนาสี (Colorimetric) โดยวัดค่าปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer ส่วนการวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] ในตัวอย่างน้ำเสียนั้น ใช้วิธีการของ USEPA method 7196A (USEPA, 1992) โดยเป็นการแบบพัฒนาสี (Colorimetric) และวัดค่าปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer เช่นกัน

สำหรับการหาปริมาณความเข้มข้นของโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] นั้น เป็นการหาค่าความแตกต่างระหว่างปริมาณความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมด (TCr) และโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)]

5) การวิเคราะห์หาโครงสร้างของโครเมียมและองค์ประกอบทางเคมีภายในพืช โดยทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชั่น (X-ray Diffraction: X-RD) และเอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray Fluorescence: X-RF)

ทั้งนี้สามารถสรุปพารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 3.4 และ 3.5

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ วิธีการวิเคราะห์ และเครื่องมือวิเคราะห์ตัวอย่างดิน พืช และน้ำ ที่ปลูกด้วยวิธีปลูกพืชในดิน (Phytoremediation)

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	เครื่องมือวิเคราะห์
1. โครเมียมทั้งหมด (TCr) ในดิน พืช และน้ำ	USEPA 3052	AAS
2. โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)]ในดินและพืช	USEPA 3060	Spectrophotometer
3. โครเมียมเฮกซาวาเลนท์[Cr(VI)]ในน้ำ	USEPA 7196A	Spectrophotometer
4. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	Method 4500-H^+B.	pH Meter
5. อินทรียวัตถุ (Organic Matter)	Wet Oxidation	Titrate
6. ไนโตรเจน (N)	Method 4500-NO_3^- D.	Titrate
7. ฟอสฟอรัส (P)	Ascorbic Acid Method 4500-P E.	Spectrophotometer
8. โพแทสเซียม (K)	-	AAS
9. ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)	2520 B. Electrical conductivity	Conductivity Meter
10. ความชื้น (Moisture Content)	-	Oven
11. เนื้อดิน (Soil Texture)	-	Hydrometer
12. โครงสร้างของโครเมียมในพืช	-	X-ray Diffraction
13. องค์ประกอบทางเคมีในพืช	-	X-ray Fluorescence

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ วิธีการวิเคราะห์ และเครื่องมือวิเคราะห์ตัวอย่างพืช และน้ำ ที่ปลูกด้วยวิธีปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics)

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	เครื่องมือวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	Method 4500-H^+B.	pH Meter
2. ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (ORP)	2580 B. Oxidation Reduction Potential	ORP Meter
3. ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)	2520 B. Electrical conductivity	Conductivity Meter
4. ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)	Total Suspended Solids Dried At 103-105°C 2540 D.	Oven
5. โครเมียมทั้งหมด (TCr) พืช และน้ำ	USEPA 3052	AAS
6. โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)]ในพืช	USEPA 3060	Spectrophotometer
7. โครเมียมเฮกซาวาเลนท์[Cr(VI)]ในน้ำ	USEPA 7196A	Spectrophotometer
8. โครงสร้างของโครเมียมในพืช	-	X-ray Diffraction
9. องค์ประกอบทางเคมีในพืช	-	X-ray Fluorescence

3.8 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การประมวลและการวิเคราะห์ผล ทำการวิเคราะห์ผลจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองปลูกต้นก้างปลาทั้งในดินและในน้ำที่ปนเปื้อนโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ โดยใช้หลักวิชาการในการเปรียบเทียบผลของข้อมูลที่ได้ในแต่ละความเข้มข้นของโครเมียมและระยะเวลาในการทดลอง ด้วยวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS ในการวิเคราะห์หาความแปรปรวนของค่าเฉลี่ย (ANOVA) และหาความแตกต่างตามวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการศึกษา

4.1 การกำจัดโครเมียมด้วยต้นก้างปลาโดยวิธีการปลูกพืชในดิน (Phytoremediation)

จากการศึกษาการกำจัดโครเมียมด้วยต้นก้างปลาโดยวิธีการปลูกพืชในดิน ได้ทำการทดลองปลูกต้นก้างปลาลงในดินและดินที่ไม่มีพืช ที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียมในดินเท่ากับ100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน และในดินที่ไม่มีการเติมโครเมียม ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดผลของการทดลองได้ ดังนี้

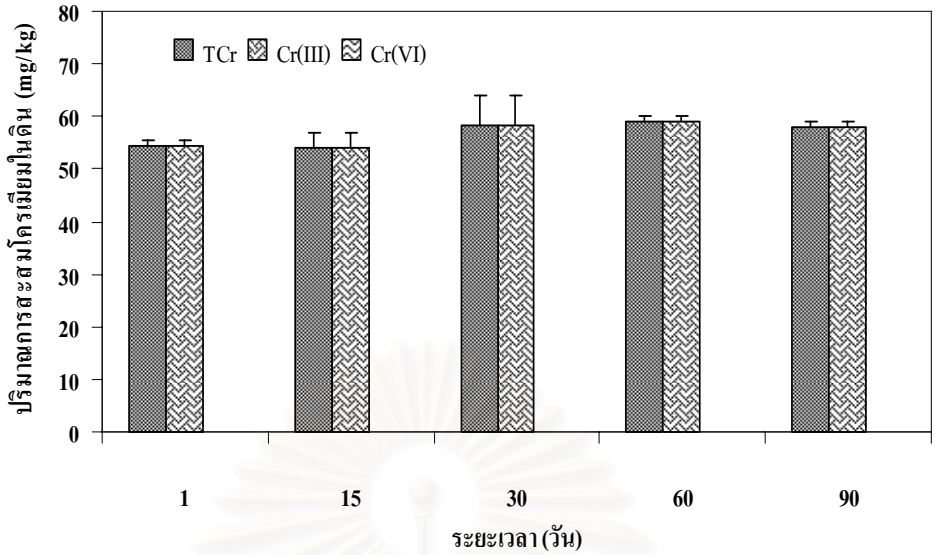
4.1.1 ชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ในดินที่ไม่มีการใส่สารประกอบโครเมียม

ค่าความเป็นกรด-ด่าง ในดินชุดควบคุม (ไม่มีพืช) และไม่มีการใส่สารประกอบโครเมียม พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างในดินมีค่าเท่ากับ 5.26, 5.25, 5.35, 5.29 และ 5.33 ที่ระยะเวลา 1, 15, 30, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1) ซึ่งมีค่าค่อนข้างคงที่ และยังพบว่ามีการสะสมโครเมียมทั้งหมดในดินมีค่าเท่ากับ 54.46, 54.00, 58.37, 59.01 และ 57.98 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน เมื่อระยะเวลา 1, 15, 30, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ โดยมีการสะสมโครเมียมอยู่ในรูปของโครเมียมไตรวาเลนท์ทั้งหมด (รูปที่ 4.1) จะเห็นได้ว่าปริมาณโครเมียมเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลยทั้งที่ไม่มีการใส่สารประกอบโครเมียมลงไป ทั้งนี้เนื่องจากดินโดยทั่วไปมีองค์ประกอบของโลหะหนักโดยเฉพาะโครเมียมสะสมอยู่แล้ว จึงทำให้ดินที่นำมาใช้ทดลองนั้นมีการปนเปื้อนโครเมียม ซึ่งจากการวิเคราะห์ดินเบื้องต้นก่อนการทดลอง พบว่า ดินมีปริมาณโครเมียมอยู่ประมาณ 56.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน (ตารางที่ 3.3) นอกจากนี้ที่ระยะเวลา 30 วัน ปริมาณโครเมียมที่พบในดินแต่ละกระถางที่นำมาทำการทดลองนั้นโดยธรรมชาติของดินอาจมีปริมาณโครเมียมที่ไม่เท่ากัน แต่อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดสอบค่าทางสถิติพบว่า ปริมาณโครเมียมที่สะสมในดินมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% นอกจากนี้ ในการศึกษาไม่พบปริมาณโครเมียมปนเปื้อนในน้ำชะล้างจากจานรองกระถางที่ในกระถางที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้

ตารางที่ 4.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง ในดินชุดควบคุม (ไม่มีพืช) และชุดทดลอง (มีพืช) ที่ไม่มีการใส่สารประกอบโครเมียม และที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน

ระดับความเข้มข้น (มิลลกรัมต่อกิโลกรัมดิน)	ชุดการทดลอง	ระยะเวลา (วัน)	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)
ไม่ใส่โครเมียม	ชุดควบคุม (ไม่มีพืช)	1	5.26±0.08
		15	5.25±0.13
		30	5.35±0.08
		60	5.29±0.10
		90	5.33±0.11
ไม่ใส่โครเมียม	ชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา)	30	5.17±0.05
		60	5.24±0.03
		90	4.89±0.47
		120	5.55±0.10
100	ชุดควบคุม (ไม่มีพืช)	1	5.25±0.07
		15	5.15±0.09
		30	5.37±0.19
		60	5.33±0.03
		90	5.38±0.15
100	ชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา)	30	5.35±0.13
		60	5.35±0.08
		90	5.46±0.07
		120	5.55±0.03

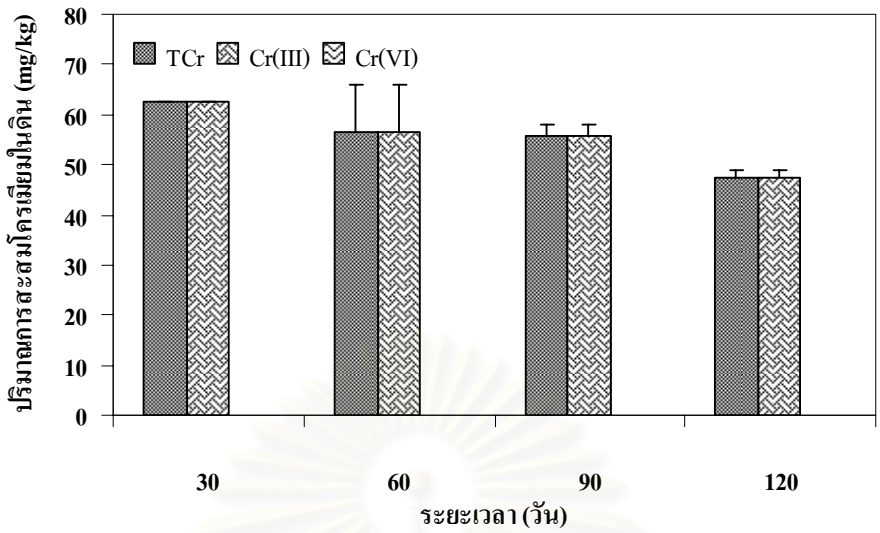
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1 ปริมาณการสะสมโครเมียมในดินชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ที่ไม่มีการใส่สารประกอบโครเมียม

4.1.2 ชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) ในดินที่ไม่มีการใส่สารประกอบโครเมียม

สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่างในดินชุดทดลอง และไม่มีการใส่สารโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ หากแต่ได้มีการปลูกต้นก้างปลาลงไปในกระถางที่มีดิน 5 กิโลกรัมนั้นพบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างในดินมีค่าเท่ากับ 5.17, 5.24, 4.89 และ 5.55 ที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1) ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากมีการปลูกต้นก้างปลาลงไป โดยบริเวณรากพืชมีการปล่อยสารอินทรีย์ออกมา ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของจุลินทรีย์ในดิน (สุบัณฑิต นิ่มรัตน์, 2549) จึงส่งผลให้ดินในช่วงแรกของการทดลองมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่า มีการสะสมโครเมียมทั้งหมดในดินที่มีการปลูกต้นก้างปลาแต่ไม่ใส่สารประกอบโครเมียมมีค่าเท่ากับ 62.38, 56.66, 55.79 และ 47.44 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน เมื่อระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน ตามลำดับ โดยมีการสะสมโครเมียมอยู่ในรูปของโครเมียมไตรวาเลนท์ทั้งหมด (รูปที่ 4.2) จะเห็นได้ว่า ปริมาณโครเมียมมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น แต่จากการทดสอบค่าทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในดินชุดทดลองนี้มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ



รูปที่ 4.2 ปริมาณการสะสมโครเมียมในดินชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) ที่ไม่มีการเติมสารประกอบโครเมียม

จากการศึกษาการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีปลูกต้นก้างปลาในดินนั้น โดยในกระถางทดลองไม่ได้ใส่สารประกอบโครเมียมลงไป หากแต่ทำการปลูกพืชอย่างเดียวเท่านั้น ที่ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างพืช 30, 60, 90 และ 120 วัน พบว่า ในน้ำชะล้างจากจานรองกระถางไม่มีการสะสมโครเมียมอยู่เลย สำหรับการสะสมโครเมียมในต้นก้างปลา พบว่าต้นก้างปลาไม่มีการสะสมโครเมียมอยู่ในส่วนต่างๆ ของพืช แต่จากการวิเคราะห์ดินเบื้องต้นพบปริมาณโครเมียมทั้งหมดในดินประมาณ 56.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน (ตารางที่ 3.3) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการสะสมโครเมียมทั้งหมดในดินส่วนใหญ่อยู่ในรูปของโครเมียมไตรวาเลนท์ ซึ่งละลายน้ำและเคลื่อนที่ได้น้อยกว่าโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ ซึ่งโดยทั่วไปพืชมีการดูดซับโครเมียมเข้าไปในรูปของโครเมท (CrO_4^{-2}) (Vajpayee et al., 1999) พืชจึงดูดซับโครเมียมในดินได้ในปริมาณที่น้อยมาก อีกทั้งในการวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมที่สะสมอยู่ในพืชนั้น อาจมีปริมาณโครเมียมในพืชน้อยมาก ทำให้เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าไม่สามารถอ่านค่าได้ จึงทำให้ไม่พบปริมาณการสะสมโครเมียมในต้นก้างปลา และในน้ำชะล้างจากจานรองกระถาง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Sampanpanish (2005) ที่ได้ทำการศึกษาการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการปลูกพืชในดิน ซึ่งพืชที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ หญ้าแพรก (*Cynodon dactylon*) ขลู่ (*Pluchea indica*) ก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) หญ้าข้าวนก (*Echinochloa colonum*) หญ้าแฝก (*Vetiveria nemoralis*) และผักขม (*Amaranthus viridis)* โดยพบว่า ในดินที่ไม่มีการใส่สารประกอบโครเมียม หากแต่มีการปลูกพืชลงในดินนั้น ต้นก้างปลามีการสะสมโครเมียมทั้งหมดในส่วนของราก ลำต้น และใบ รวมกันมีค่าเท่ากับ 0.258, 0.286 และ 0 มิลลิกรัม ที่ระยะเวลา 30, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ แสดงให้เห็นได้ว่าปริมาณการสะสมโครเมียม

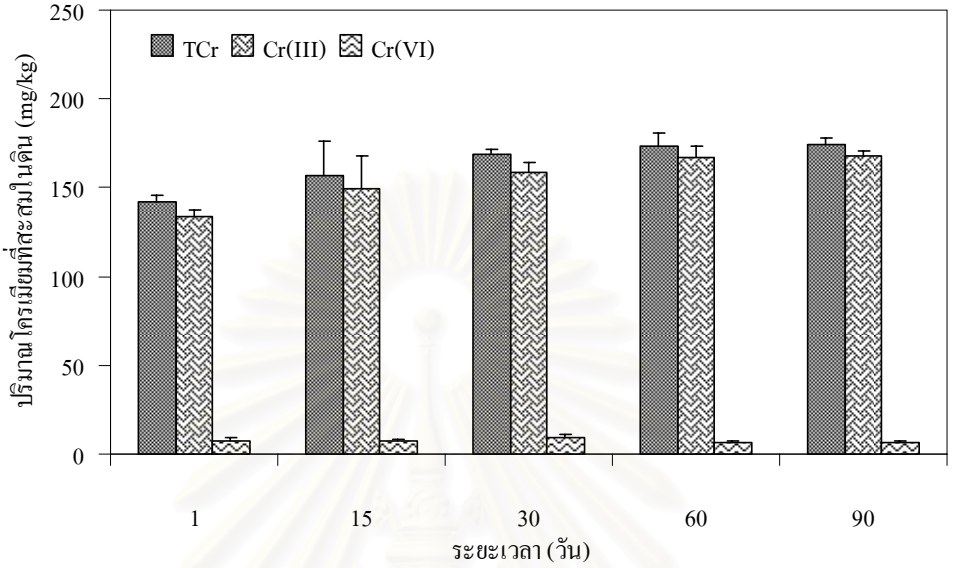
ในต้นก้างปลาในช่วงการทดลองที่ 30 และ 60 วัน มีค่าน้อยมาก และที่ระยะเวลา 90 วัน ไม่พบปริมาณการสะสมโครเมียมในต้นก้างปลาเลย

4.1.3 ชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน

1) การกำจัดโครเมียมจากดิน

จากการศึกษาถึงการกำจัดโครเมียมในดินด้วยต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) นั้น พบว่า ในดินชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ที่มีการใส่สารประกอบโครเมียม ($K_2Cr_2O_7$) ระดับความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน มีค่าความเป็นกรด-ด่างตลอดการทดลองที่ระยะเวลา 1, 15, 30, 60 และ 90 วัน เท่ากับ 5.25, 5.15, 5.37, 5.33 และ 5.38 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1) ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างคงที่ จากรูปที่ 4.3 แสดงปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในดินชุดควบคุม (ไม่มีพืช) พบว่า ปริมาณการสะสมโครเมียมในดินทั้งหมดมีปริมาณเท่ากับ 141.82, 156.37, 168.50, 173.80 และ 174.80 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลา 1, 15, 30, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าค่อนข้างคงที่โดยทำการทดสอบค่าทางสถิติแล้วพบว่า ปริมาณโครเมียมที่สะสมในดินมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่สะสมอยู่ในดินมีค่าสูงสุดเท่ากับ 174.80 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลา 90 วัน ทั้งนี้เนื่องมาจากดินที่ใช้ในการทดลองนั้นมีลักษณะของเนื้อดินที่เป็นดินร่วนเหนียวปนทราย (Sandy Clay Loam) ซึ่งมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ได้ จึงอาจทำให้เมื่อระยะเวลาในการทดลองที่นานขึ้นดินมีการดูดซับโครเมียมไว้ในดินมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบการสะสมโครเมียมในรูปของโครเมียมไตรวาเลนท์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 134.21, 149.40, 159.05, 166.90 และ 168.20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ที่เวลา 1, 15, 30, 60 และ 90 วันของการเก็บตัวอย่างดินตามลำดับ (รูปที่ 4.3) สำหรับการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์พบว่า มีปริมาณการสะสมในดินที่ไม่มีการปลูกพืช แต่มีการใส่สารประกอบโครเมียมลงดินนั้นมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งคิดเป็นปริมาณการสะสมเท่ากับ 7.61, 6.97, 9.45, 6.89 และ 6.61 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ที่เวลาของการเก็บตัวอย่างดิน 1, 15, 30, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ (รูปที่ 4.3) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก สารละลายโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่ใส่ลงไปในดินที่ไม่มีการปลูกพืชทดลองนั้น ดินเกิดการดูดซับโครเมียมด้วยอนุภาคของดินและเกิดปฏิกิริยารีดักชั่น (Reduction) จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปจากโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ไปเป็นโครเมียมไตรวาเลนท์ได้ (Sampanpanish, 2005) นอกจากนี้ Sampanpanish (2005) ยังได้ทำการศึกษาการกำจัดโครเมียมโดยวิธีการใช้พืชและการดูดซับทางชีวภาพพบว่า ในดินที่ไม่มีการปลูกพืช แต่มีการใส่สารประกอบโครเมียมลงไป มีการสะสมโครเมียมในดินเพิ่มขึ้น

เมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยโครเมียมที่มีการสะสมอยู่ในดินส่วนใหญ่อยู่ในรูปโครเมียมไตรวาเลนท์และมีการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในปริมาณที่น้อยมาก



รูปที่ 4.3 ปริมาณการสะสมโครเมียมในดินชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน

2) ปริมาณการสะสมโครเมียมในน้ำชะล้าง

จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำชะล้างจากดินชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียม ($K_2Cr_2O_7$) เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งมีค่าระหว่าง 6.4 ถึง 7.8 ตลอดระยะการทดลอง อีกทั้งปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่สะสมอยู่ในน้ำชะล้างนี้ มีปริมาณลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 374.00, 78.90, 38.78, 3.62 และ 3.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลาของการเก็บตัวอย่าง 1, 15, 30, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ นอกจากนี้การศึกษาในครั้งนี้ยังพบปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่สะสมอยู่เท่ากับ 304.41, 75.90, 28.16, 0.50 และ 1.14 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลาของการเก็บตัวอย่าง 1, 15, 30, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณลดลงตามระยะเวลาของการทดลอง ในขณะที่การสะสมโครเมียมในรูปของโครเมียมไตรวาเลนท์ พบว่า การสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในน้ำชะล้างมีปริมาณสูงในวันที่เก็บตัวอย่างในวันแรกของการทดลอง ภายหลังจากนั้นปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์มีการสะสมในน้ำชะล้างลดลงจนสิ้นสุดการทดลองซึ่งมีปริมาณการสะสมเท่ากับ 69.60, 3.03, 10.65, 3.14 และ 1.92 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่

เวลาของการเก็บตัวอย่าง 1, 15, 30, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณการสะสมโครเมียมในดินชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งมีปริมาณการสะสมโครเมียมในดินเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.2 ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณการสะสมโครเมียมจากน้ำชะล้างในจานรองกระถางชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน

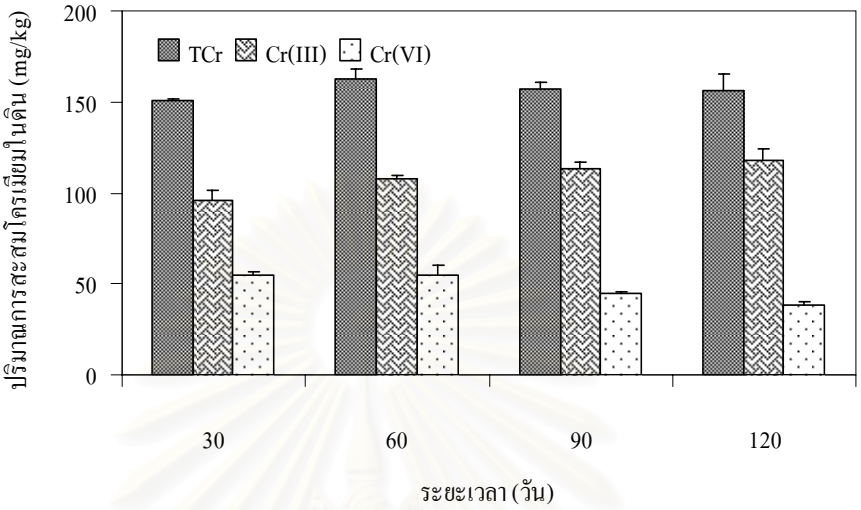
ระยะเวลา (วัน)	ค่าความเป็นกรด-ด่าง	โครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	โครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
1	6.5	374.0±31.6	69.6±25.7	304.4±5.8
15	7.7	78.9±12.0	3.0±2.0	75.9±9.9
30	7.8	38.8±6.6	10.7±2.3	28.2±8.9
60	6.4	3.6±0.8	3.1±0.7	0.5±0.1
90	7.4	3.1±0.8	1.9±0.7	1.1±0.04

4.1.4 ชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) ที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

1) การกำจัดโครเมียมจากดิน

จากการศึกษาปริมาณการสะสมโครเมียมในดินที่มีการปลูกต้นก้างปลาและใส่สารประกอบโครเมียม ($K_2Cr_2O_7$) ลงดินนั้นพบว่า ในดินชุดทดลองดังกล่าวมีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5.35, 5.35, 5.46 และ 5.55 ที่เวลา 30, 60, 90, และ 120 วันของการเก็บตัวอย่างดิน ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1) ซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่างค่อนข้างคงที่ และจากรูปที่ 4.2 แสดงปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในดินชุดทดลองนั้นพบว่า ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในดินมีค่าค่อนข้างคงที่ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 150.59, 162.52, 157.42 และ 156.55 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ที่เวลา 30, 60, 90, และ 120 วัน ตามลำดับ โดยการสะสมโครเมียมในรูปของโครเมียมไตรวาเลนท์มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาผ่านไปนานขึ้น โดยมีค่าการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์เท่ากับ 95.71, 107.47, 112.88 และ 118.12 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลาของการศึกษา 30, 60, 90 และ 120 วัน ตามลำดับ (รูปที่ 4.4) สำหรับปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในดินชุดทดลองพบว่า มี

ปริมาณลดลงเท่ากับ 54.88, 55.06, 44.55 และ 38.43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ที่เวลา 30, 60, 90, และ 120 วัน ตามลำดับ อย่างไรก็ตามได้ทำการทดสอบค่าทางสถิติพบว่า ปริมาณโครเมียมที่สะสมในดินมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



รูปที่ 4.4 ปริมาณการสะสมโครเมียมในดินชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) ที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน

2) ปริมาณการสะสมโครเมียมในน้ำชะล้าง

จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึง ค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำชะล้างจากจานรองกระถางในดินชุดทดลองที่มีการปลูกต้นก้างปลาและใส่โครเมียมที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียม ($K_2Cr_2O_7$) เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินนั้นพบว่า มีค่าความเป็นกรด-ด่างตลอดช่วงระยะการทดลองค่อนข้างคงที่คือ 7.9 ถึง 8.0 นอกจากนี้ ปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่สะสมในน้ำชะล้างในจานรองกระถางจากชุดทดลองพบว่า มีค่าการสะสมโครเมียมเพิ่มขึ้น โดยแปรผันตามระยะเวลาของการทดลองที่เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.03, 1.39, 2.22 และ 2.21 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 30, 60, 90 และ 120 วันของการเก็บตัวอย่างตามลำดับ โดยการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในน้ำชะล้างจากจานรองกระถางมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.45, 1.28, 2.13 และ 2.13 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน ตามลำดับ สำหรับการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในน้ำชะล้างจากจานรองกระถางนั้นมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.58, 0.11, 0.09 และ 0.09 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 30, 60, 90 และ120 วัน ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาถึงปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่สะสมอยู่ในน้ำชะล้างจากจานรองกระถางทั้ง 2 ชุดการทดลอง ดังตารางที่ 4.2 และ 4.3 สามารถกล่าวได้ว่า ปริมาณการสะสมของโครเมียมทั้งหมดมีแนวโน้มไปในทิศทางตรงกันข้ามกันระหว่าง 2 ชุดการทดลอง โดยปริมาณโครเมียมที่สะสมในน้ำชะล้างในดินชุดควบคุม (ไม่มีพืช) หากแต่มีการใส่สารประกอบโครเมียมที่ระดับความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อ

กิโลกรัมดิน มีค่าลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณโครเมียมที่สะสมในน้ำชะล้างในดินชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) และมีการใส่สารประกอบโครเมียมพบว่า มีปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากในชุดควบคุม (ไม่มีพืช) นั้นในช่วงแรกของการทดลองได้มีการรดน้ำทุกวันจึงทำให้โครเมียมที่มีอยู่ในดินมีการปนเปื้อนออกมากับน้ำชะล้างมาก และเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้นมีการหมุนเวียนน้ำจากจานรองกระถางมารดน้ำทำให้มีการดูดซับโครเมียมได้มากขึ้นด้วยอนุภาคของดิน จึงมีโครเมียมปนเปื้อนออกมากับน้ำชะล้างได้น้อยลง ในขณะที่ในดินชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) พบปริมาณโครเมียมทั้งหมดสะสมอยู่ในน้ำชะล้างเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากในช่วงระยะเวลาการทดลองที่ 30 วัน โครเมียมบางส่วนอาจถูกดูดซับโดยต้นก้างปลา บางส่วนถูกยึดติดกับอนุภาคดิน จึงทำให้โครเมียมในช่วงการทดลองที่ 30 วันมีปริมาณโครเมียมในน้ำชะล้างต่ำ และเมื่อระยะเวลาในการทดลองที่เพิ่มขึ้น พืชอาจได้รับอันตรายจากสารประกอบโครเมียมในดินซึ่งมีความเป็นพิษต่อพืช อย่างไรก็ตาม หากเปรียบเทียบจากปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดแล้ว น้ำชะล้างในดินชุดทดลองที่ปลูกต้นก้างปลานั้น มีปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดน้อยกว่าน้ำชะล้างจากดินชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่า ในดินชุดทดลองที่ปลูกต้นก้างปลานั้น ปริมาณโครเมียมในดินอาจมีการดูดซับโครเมียมโดยต้นก้างปลาจึงทำให้มีปริมาณโครเมียมปนเปื้อนออกมากับน้ำชะล้างน้อยกว่าในชุดควบคุม (ไม่มีพืช) และการปลูกต้นก้างปลาลงไปในดินสามารถลดการปนเปื้อนโครเมียมในน้ำชะล้างจากดินได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sampanpanish (2005) ที่ได้ทำการศึกษาการกำจัดโครเมียมโดยวิธีการใช้พืชและการดูดซับทางชีวภาพ พบว่า น้ำชะล้างจากจานรองกระถางในชุดควบคุม (ไม่มีพืช) มีปริมาณการสะสมโครเมียมสูงในช่วงแรกของการทดลองและลดลงเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น ส่วนในชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) กลับมีปริมาณการสะสมโครเมียมเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน อีกทั้งยังมีปริมาณโครเมียมในน้ำชะล้างยังมีค่าน้อยกว่าในชุดควบคุม (ไม่มีพืช)

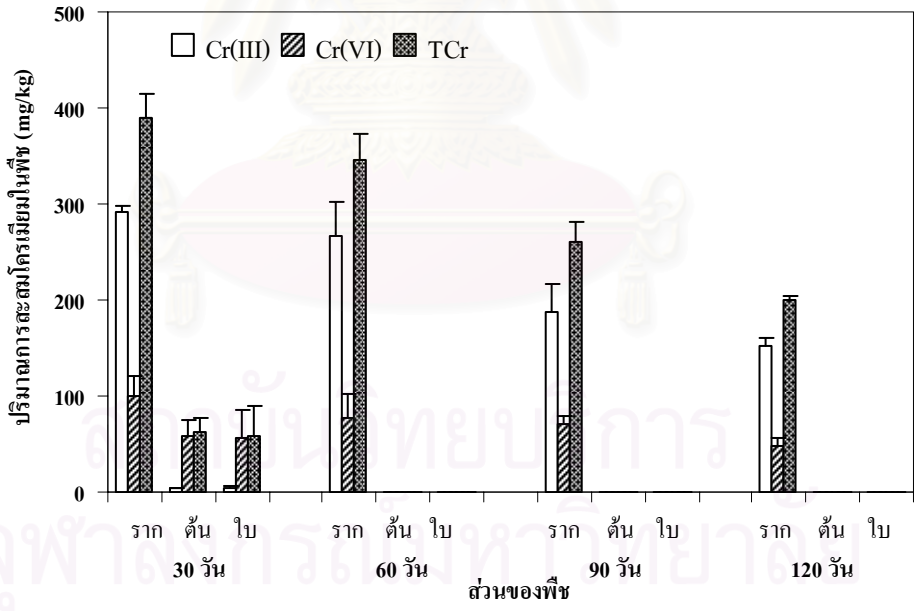
ตารางที่ 4.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณการสะสมโครเมียมจากน้ำชะล้างในจานรองกระถางชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) ที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน

ระยะเวลา (วัน)	ค่าความเป็นกรด-ด่าง	โครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	โครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
30	7.97	1.0±0.1	0.5±0.1	0.6±0.1
60	7.74	1.4±0.4	1.3±0.1	0.1±0.04
90	6.94	2.2±0.3	2.1±0.2	0.1±0.05
120	7.96	2.2±0.3	2.1±0.2	0.1±0.04

3) ปริมาณการสะสมโครเมียมในต้นก้างปลา

3.1) ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดของต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*)

จากผลการศึกษาการสะสมโครเมียมในต้นก้างปลาที่ปลูกในดินที่มีระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียม ($K_2Cr_2O_7$) 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ต้นก้างปลามีความสามารถในการดูดซับและสะสมโครเมียมทั้งหมดไว้ในส่วนรากโดยมีปริมาณการสะสมเท่ากับ 390.57, 345.30, 259.63 และ 199.37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างพืช 30, 60, 90 และ 120 วัน ตามลำดับ ส่วนการสะสมโครเมียมทั้งหมดในลำต้นของต้นก้างปลาพบว่า มีปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 61.47 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง และในส่วนใบของต้นก้างปลามีการสะสมโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 58.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างพืช 30 วัน สำหรับที่ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างพืช 60, 90 และ 120 วัน ไม่พบปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในส่วนของลำต้น และใบของต้นก้างปลา ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ปริมาณการสะสมโครเมียมในส่วนต่างๆ ของต้นก้างปลาในชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) ที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน

3.2) ปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ของต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*)

จากผลการศึกษาการสะสมโครเมียมในต้นก้างปลาที่ปลูกในดินที่มีระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียม ($K_2Cr_2O_7$) 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่าปริมาณโครเมียม เฮกซาวาเลนท์ที่สะสมในรากมีค่าเท่ากับ 99.21, 77.79, 71.36 และ 48.08 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างพืช 30, 60, 90 และ 120 วัน ตามลำดับ และพบโครเมียมเฮกซาวาเลนท์มีการสะสมในลำต้นเท่ากับ 58.04 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ส่วนการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในใบของต้นก้างปลามีค่าเท่ากับ 55.32 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างพืช 30 วัน แต่จากผลการศึกษาไม่พบปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในลำต้น และใบของต้นก้างปลา ที่ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างพืช 60, 90 และ 120 วัน (รูปที่ 4.5)

3.3) ปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ของต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*)

จากผลการศึกษาการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในต้นก้างปลา พบว่า มีปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์สะสมในรากมีค่าเท่ากับ 291.35, 267.51, 188.28 และ151.29 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง อีกทั้งยังพบโครเมียมไตรวาเลนท์สะสมในลำต้น และใบ เท่ากับ 3.43 และ 3.35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างพืช 30 วัน แต่ไม่พบปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในส่วนลำต้น และใบของต้นก้างปลา ที่ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างพืช 60, 90 และ 120 วัน (รูปที่ 4.5)

จากรูปที่ 4.5 ผลการศึกษาปริมาณการสะสมโครเมียมในต้นก้างปลาสามารถสรุปได้ว่า ที่ระยะเวลา 30 วัน รากของต้นก้างปลามีการสะสมโครเมียมทั้งหมดได้สูงที่สุด รองลงมาคือในส่วนลำต้นและใบ โดยปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่สะสมอยู่ในรากนั้น ส่วนใหญ่มีการสะสมอยู่ในรูปโครเมียมไตรวาเลนท์ และในรูปโครเมียมเฮกซาวาเลนท์น้อยที่สุด ซึ่งเมื่อระยะเวลาการทดลองมากกว่า 30 วัน ทั้งลำต้นและใบของต้นก้างปลาไม่พบการสะสมโครเมียมอยู่เลย ทั้งนี้เนื่องจาก พืชมีการเจริญเติบโตจึงทำให้มีมวลชีวภาพเพิ่มขึ้นและเมื่อมีการดูดซับโครเมียมจากดินก็จะนำไปสะสมยังส่วนต่างๆ ของต้นก้างปลา แต่เนื่องจากมวลชีวภาเพิ่มขึ้นจึงทำให้พบปริมาณการสะสมโครเมียมในพืชน้อยลงเมื่อระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้นและไม่พบการสะสมโครเมียมในส่วนของลำต้น และใบของต้นก้างปลา ซึ่งจากการศึกษาของ Sampanpanish et al. (2004) ได้ศึกษาความสามารถของวัชพืชในประเทศไทยเพื่อดูดซับโครเมียมจากดิน โดยใช้วัชพืช 6 ชนิด ได้แก่ หญ้าแพรก (*Cynodon dactylon*) ขลู่

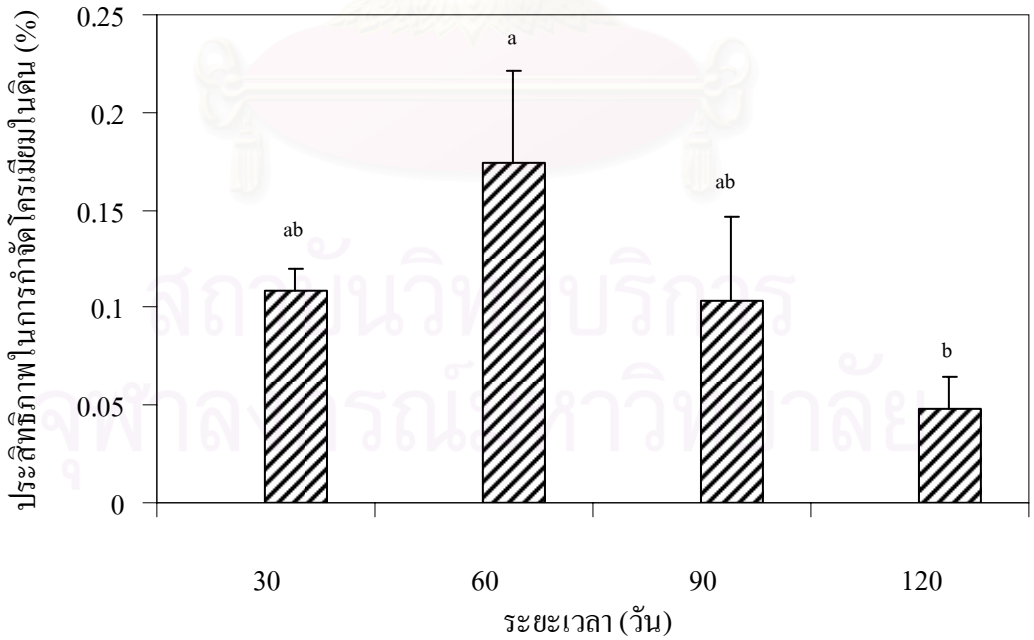
(*Pluchea indica*) ก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) หญ้าข้าวนก (*Echinochloa colonum*) หญ้าแฝก (*Vetiveria nemoralis*) และผักขม (*Amaranthus viridis)* พบว่า มีการสะสมโครเมียมในส่วนของรากมีปริมาณมากที่สุด รองลงมาคือ ในส่วนลำต้น และใบ ตามลำดับ ในขณะที่ Salt et al. (1995) ได้อธิบายถึงความสามารถของต้น *Brassica juncea* (Indian Mustard) ในการสะสมโลหะหนักชนิดต่างๆ ได้แก่ ตะกั่ว (Pb) สังกะสี (Zn) แคดเมียม (Cd) นิกเกิล (Ni) ทองแดง (Cu) และโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] จากดินพบว่า มีการสะสมโลหะหนักทั้งในส่วนของราก และลำต้น โดยปริมาณโลหะหนักส่วนใหญ่สะสมอยู่ในส่วนราก นอกจากนี้ Arteaga et al. (2000) ได้รายงานถึงต้น *Larrea tridentate* (Creosote bush) มีการสะสมโครเมียมสูงในส่วนราก และยังพบว่าการสะสมโครเมียมทั้งหมดในส่วนต่างๆ ของ *Larrea tridentate* ในระดับที่แตกต่างกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก องค์ประกอบของโมเลกุลในเนื้อเยื่อพืช (Tissues) แตกต่างกัน โดยเฉพาะส่วนรากและต้นมีเซลลูโลส (Cellulose) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) มากกว่าในส่วนของใบ (มีโปรตีนมาก) ดังนั้น ในส่วนราก และลำต้น ซึ่งเป็นกลุ่มไฮดรอกซิล (Hydroxyl Groups) ที่มีความสามารถในการจับกับโครเมียมได้ดีและดูดซับเข้าไปภายในเนื้อเยื่อได้มากกว่าในส่วนของใบ

4.1.5 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในดิน

ในการศึกษาถึงประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในดินโดยต้นก้างปลาที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนด้วยสารประกอบโครเมียม ($K_2Cr_2O_7$) ที่ระดับความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ตลอดระยะการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในดินด้วยต้นก้างปลามีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาในการทดลองที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.11, 0.17, 0.10 และ 0.05% ที่เวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน ของการเก็บตัวอย่าง ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากในช่วงแรกของการทดลองดินมีการสะสมโครเมียมในรูปเฮกซาวาเลนท์ซึ่งมีปริมาณลดลงเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น โดยโครเมียมเฮกซาวาเลนท์สามารถละลายน้ำได้ดีกว่าโครเมียมไตรวาเลนท์ ซึ่งมีปริมาณการสะสมในดินเพิ่มมากขึ้น เมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มมากขึ้น จึงอาจทำให้ต้นก้างปลาสามารถดูดซับโครเมียมจากดินซึ่งมีปริมาณโครเมียมในรูปเฮกซาวาเลนท์มากที่สุดในช่วงแรกของการทดลอง อีกทั้งเมื่อระยะเวลาการทดลองนานขึ้นพืชอาจได้รับอันตรายจากความเป็นพิษของโครเมียมได้และอนุภาคดินมีการดูดยึดโครเมียมได้มากขึ้น พร้อมทั้งอาจเกิดปฏิกิริยารีดักชั่น (Reduction) ในดินซึ่งสามารถลดรูปของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ให้เป็นโครเมียมไตรวาเลนท์ได้มากขึ้น จากรูปที่ 4.6 จึงสามารถสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในดินโดยใช้ต้นก้างปลามีค่าสูงสุดคือ 0.17% ที่เวลา 60 วัน กล่าวคือ มีปริมาณโครเมียมสะสมอยู่ในดินมากกว่า 80% ของสารประกอบโครเมียมที่ใส่ลงไปในดิน ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในดิน และน้ำชะล้างจากจานรองกระถางที่มีปริมาณการสะสมโครเมียมต่ำในช่วงแรกของการทดลอง ในขณะที่ปริมาณการสะสมโครเมียมในต้นก้างปลามีค่าสูงในช่วงแรกของการทดลองด้วยเช่นกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในช่วงแรกของ

การทดลองต้นก้างปลามีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในดินสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Chen, Shen and Li (2004) ที่ได้ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพของหญ้าแฝกในการฟื้นฟูสภาพดินที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนัก พบว่า ดินที่ปลูกด้วยหญ้าแฝกสามารถดูดซับ ตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียม ไว้ได้ถึง 98, 54, 41 และ 88% ตามลำดับ และ ดุษลักษณ์ ฐิติวร (2543) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของแฝกหอม *Vetiveria zizanioides* (Linn.) Nash และแฝกดอน *Vetiveria nemoralis* (Balansa) A. Camus ในการกำจัดสารหนูที่ปนเปื้อนในดิน พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของสารหนูในดิน 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน หญ้าแฝกหอม *Vetiveria zizanioides* (Linn.) Nash มีประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูเท่ากับ 0.0122, 0.0264, 0.0170, 0.0180, 0.0281 และ 0.0421% ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูด้วยแฝกดอน *Vetiveria nemoralis* (Balansa) A. Camus มีค่าเท่ากับ 0.0123, 0.0159, 0.0157, 0.0238, 0.0271 และ 0.0390% ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามในการศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการวิเคราะห์ค่าทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าระยะเวลาในการทดลองมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในดินโดยพบว่าในช่วงของการทดลองที่ 60 วัน มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หากแต่ในช่วงของวันที่ 30 และ 90 วัน มีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในขณะที่ระยะเวลา 120 วัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในดินด้วยต้นก้างปลาที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างระหว่างระยะเวลาในการทดลอง อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.2 การกำจัดโครเมียมด้วยต้นก้างปลาโดยวิธีการปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics)

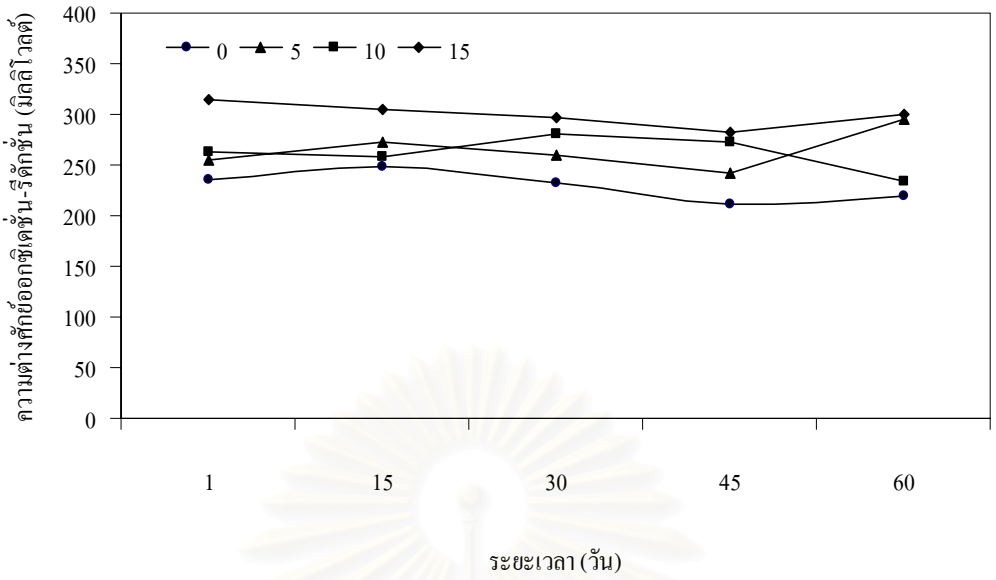
จากการศึกษาการกำจัดโครเมียมด้วยต้นก้างปลาโดยวิธีการปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics) ซึ่งเป็นการทดลองที่มีการปลูกต้นก้างปลาลงในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่มีพืช ที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียมเท่ากับ 0, 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีระยะเวลาในการทดลองคือ 1, 15, 30, 45 และ 60 วัน ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดผลของการทดลองได้ ดังนี้

4.2.1 คุณภาพของน้ำเสียสังเคราะห์

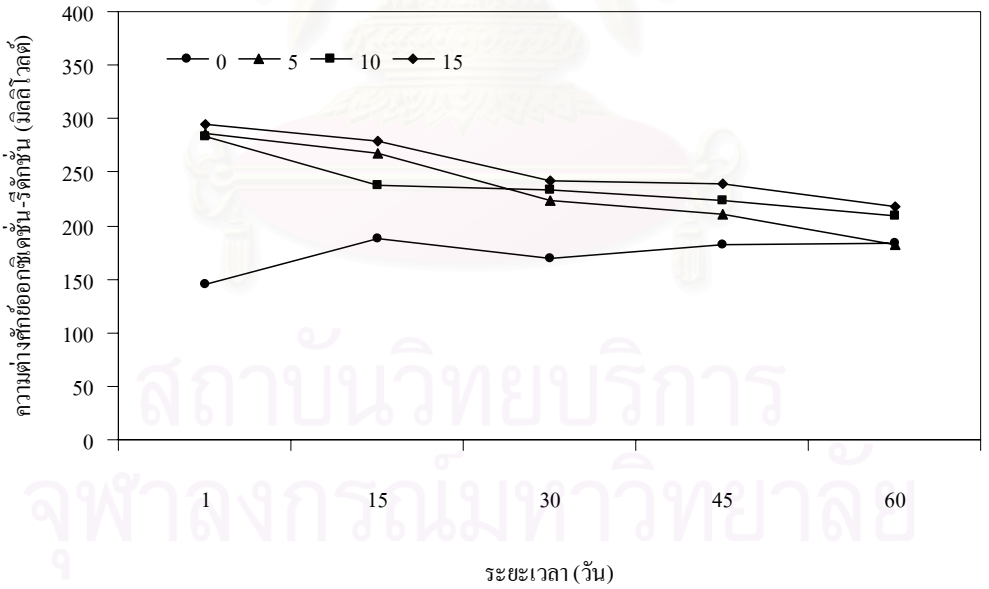
1) ความต่างศักย์ออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (ORP)

จากการศึกษาทดลองเลี้ยงพืช คือ ต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) ในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งได้ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมที่ใช้เลี้ยงพืช และน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมในชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ทุกๆ 15 วัน ในตลอดช่วงการทดลอง 60 วัน พบว่า ในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียม 0, 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชั่น-รีดักชั่น เท่ากับ 219.4-236, 254.2-294.8, 233.8-263.5 และ 299.8-314.6มิลลิโวลต์ หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 229.5, 264.74, 261.78 และ 299.7 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.7) ส่วนในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมในชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) นั้น พบว่ามีค่าออกซิเดชั่น-รีดักชั่น เท่ากับ 144.8-183.4, 181.6-286.12, 209.2-283.5 และ 217.8-294.3 มิลลิโวลต์ ซึ่งคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 173.42, 234.044, 237.34 และ 254.3 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.8) ซึ่งแสดงเห็นได้ว่าค่าความต่างศักย์ออกซิเดชั่น-รีดักชั่นในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมที่ใช้เลี้ยงต้นก้างปลา ตลอดช่วงการทดลอง 60 วันนั้น มีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชั่น-รีดักชั่นลดลงจากในช่วงวันแรกของการทดลอง ในทางตรงกันข้ามน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมในชุดควบคุม (ไม่มีพืช) มีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชั่น-รีดักชั่น เพิ่มขึ้นและลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 ความต่างศักย์ออกซิเดชั่น-รีดักชั่นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดควบคุม (ไม่มีพืช)



รูปที่ 4.8 ความต่างศักย์ออกซิเดชั่น-รีดักชั่นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา)

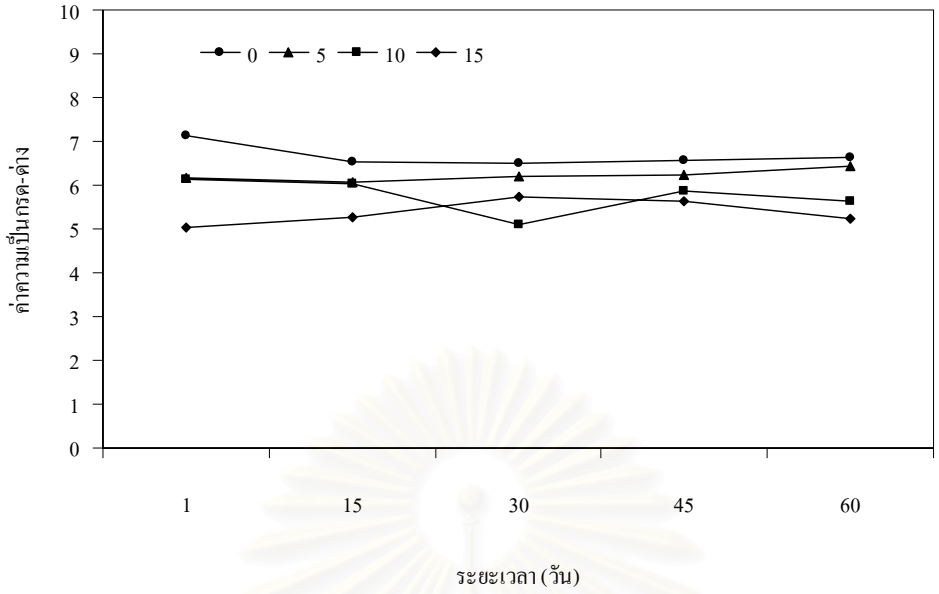
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการศึกษาพบว่า ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชั่น-รีดักชั่น ของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมที่ใช้เลี้ยงต้นก้างปลามีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น ในขณะที่ในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชั่น-รีดักชั่น ของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงเล็กน้อย เมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการลดลงของปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้เลี้ยงต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) นั้นมีปริมาณลดลงและโครเมียมเฮกซาวาเลนท์มีค่าศักยภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น-รีดักชั่นได้ค่อนข้างสูง ในสภาวะที่เป็นกรดนั้น สามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ และเปลี่ยนโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ให้อยู่ในรูปของโครเมียมไตรวาเลนท์ได้ จึงทำให้ค่าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นมีแนวโน้มลดลง (พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย และพันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2550)

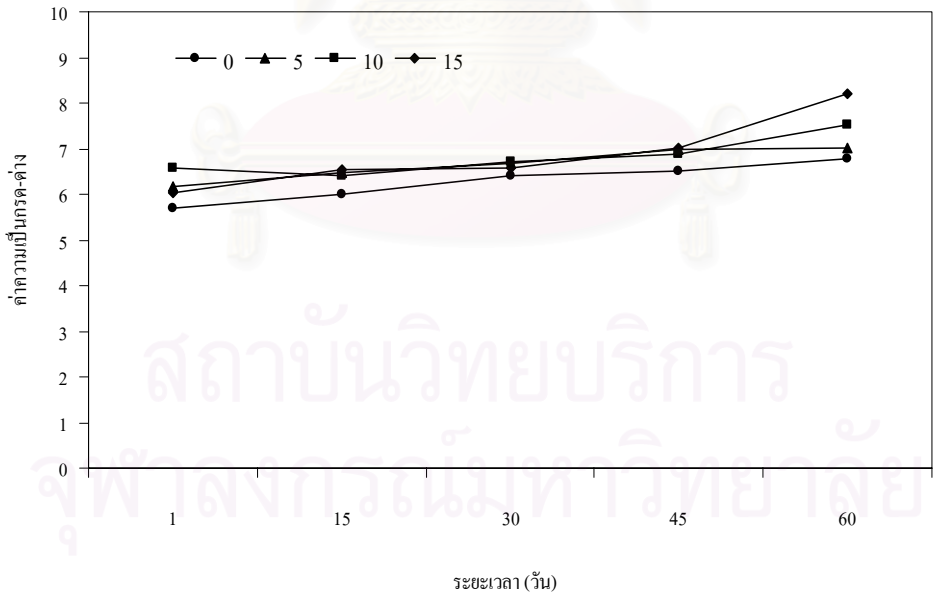
2) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

จากการศึกษาทดลองเลี้ยงพืช คือ ต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) ในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งได้ทำการตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมในชุดควบคุม (ไม่มีพืช) และน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมที่ใช้เลี้ยงต้นก้างปลา เป็นระยะเวลาทุกๆ 15 วัน ในช่วงการทดลอง 60 วัน พบว่า ในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ที่ระดับความเข้มข้นโครเมียม 0, 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 6.63-7.15, 6.16-6.45, 5.62-6.15และ 5.05-5.23 ซึ่งคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.68, 6.22, 5.75 และ 5.39 ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.9) สำหรับในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมที่มีการปลูกต้นก้างปลานั้นพบว่า มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5.71-6.77, 6.17-7.38, 6.11-7.95 และ 6.05-8.53 หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.28, 6.70, 7.05 และ 7.03 ที่ระดับความเข้มข้นโครเมียม 0, 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.10) ซึ่งพบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง ในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมที่ใช้เลี้ยงต้นก้างปลา ในช่วงการทดลอง 60 วัน นั้น มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากช่วงวันแรกของการทดลอง สำหรับในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดควบคุม (ไม่มีพืช) มีค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงเล็กน้อยตลอดระยะเวลาในการทดลอง 60 วัน ดังรูปที่ 4.9 และ 4.10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม ชุดควบคุม (ไม่มีพืช)



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา)

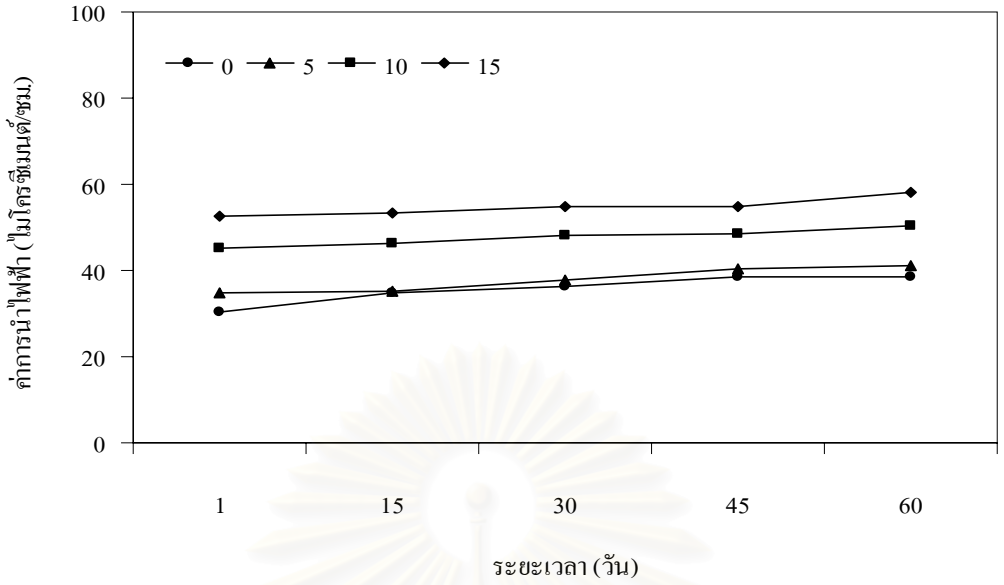
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการศึกษาจะเห็นว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมที่ใช้เลี้ยงต้นก้างปลามีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ทั้งนี้เนื่องจาก ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำถูกควบคุมโดยปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอเนต (วงศ์พงาเส็งสาย, 2544) และในการทดลองนั้นได้มีการใส่ปุ๋ยน้ำทุกๆ 15 วัน และให้ออกซิเจนแก่ต้นก้างปลาที่เลี้ยง จึงอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาชีวเคมีและกิจกรรมต่างๆ ในการดูดซับสารอาหารได้ ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลทำให้สมดุลของคาร์บอเนตเปลี่ยนไป ค่าความเป็นกรด-ด่างจึงเพิ่มขึ้น อีกทั้งเมื่อมีจำนวนโมลและปริมาณของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ลดลง ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง เพิ่มขึ้นได้ เพราะโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในสภาพปกติ เมื่อละลายน้ำแล้วจะทำให้สารละลายมีสภาพเป็นกรด

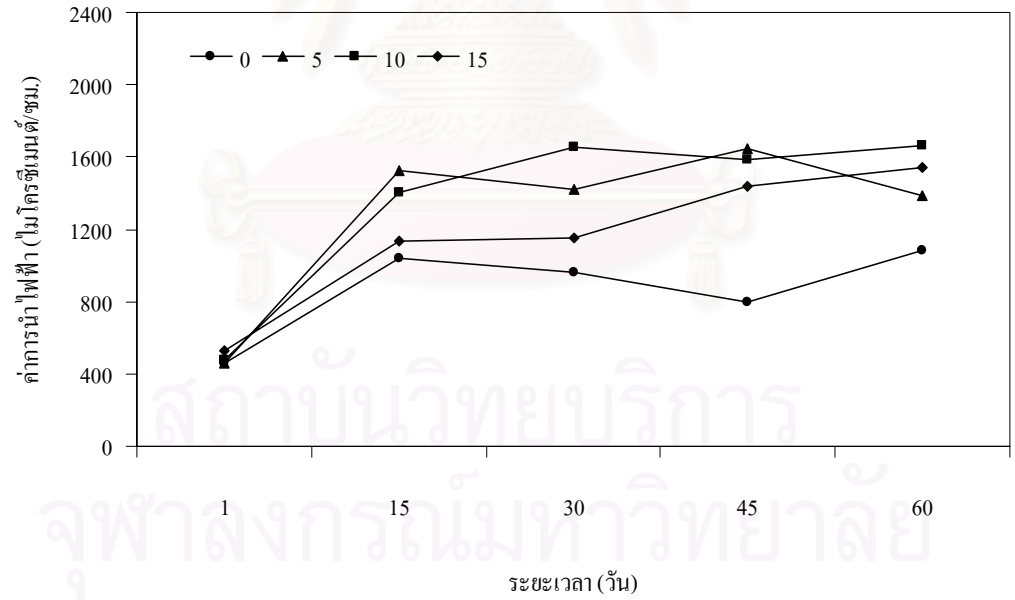
3) ค่าการนำไฟฟ้า (EC)

จากการศึกษาทดลองเลี้ยงพืชคือ ต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) ในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ ซึ่งได้ทำการตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมในชุดควบคุม (ไม่มีพืช) และน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมที่ใช้เลี้ยงต้นก้างปลา เป็นระยะเวลาทุกๆ 15 วัน โดยในช่วงการทดลอง 60 วัน พบว่า ในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ที่ระดับความเข้มข้นโครเมียม 0, 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าการนำไฟฟ้า เท่ากับ 30.2-38.7, 34.9-41.1, 45.0-50.4 และ 52.5-58.3 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 35.7, 37.8, 47.2 และ 54.7 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.11) ส่วนในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมในชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) นั้น พบว่ามีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 459-1,079, 455-1,386, 480-1,661 และ 526-1,541 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 866, 1,287, 1,357 และ 1,160 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ที่ระดับความเข้มข้นโครเมียม 0, 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.12) ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมในชุดทดลอง ในช่วงการทดลอง 60 วันนั้น มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ดังรูปที่ 4.11 และ 4.12

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดควบคุม (ไม่มีพืช)



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา)

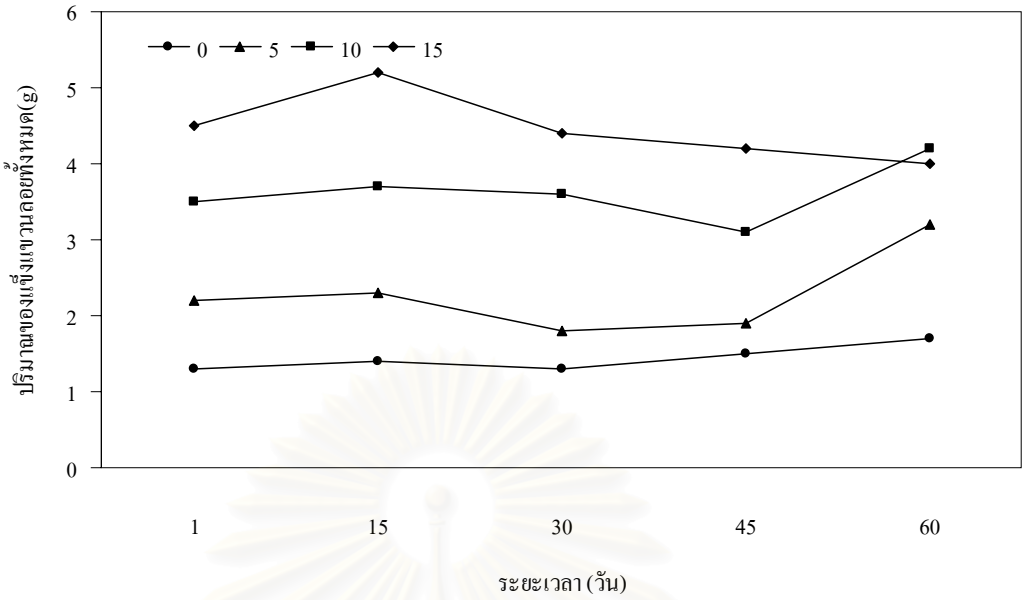
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) มีค่าสูงกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดควบคุม (ไม่มีพืช) นั้นแสดงว่า ปริมาณไอออน (Ion) ภายในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารละลายในน้ำ ค่าความเป็นกรด-ด่างและปัจจัยอื่นๆ ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมการแตกตัวของสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ (พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย และพันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2550) ดังนั้น ถ้าค่าความเป็นกรด-ด่าง และปัจจัยควบคุมอื่นๆ สูงขึ้นค่าการนำไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้นด้วย

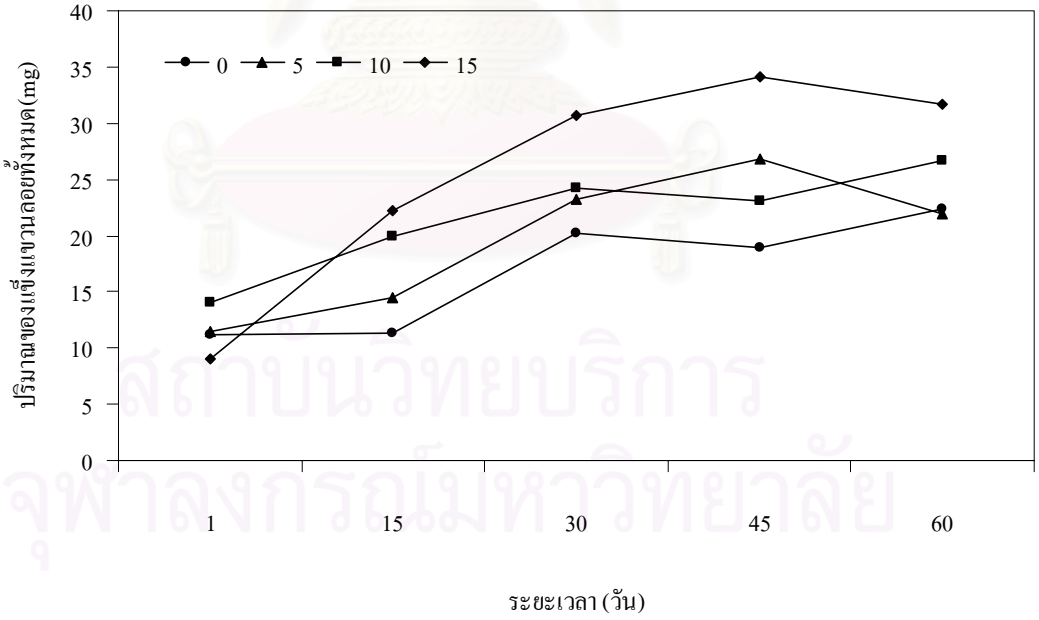
4) ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)

จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 พบว่า ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่พบในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดควบคุม (ไม่มีพืช) นั้นมีค่าค่อนข้างคงที่และต่ำมาก โดยตลอดช่วงการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 1.3-1.7, 1.8-3.2, 3.1-4.2 และ 4.0-5.2 มิลลิกรัม หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.4, 2.3, 3.6 และ 4.5 มิลลิกรัม ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 0, 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.13) ซึ่งมีค่าค่อนข้างคงที่ ทั้งนี้เนื่องมาจากน้ำเสียสังเคราะห์ดังกล่าวนี้ไม่มีการปลูกพืชลงไป จึงทำให้มีของแข็งแขวนลอยปริมาณเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) นั้น มีค่าเท่ากับ 11.2-22.4, 11.4-26.8, 14.0-26.7 และ 9.1-34.1 มิลลิกรัม หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 16.8, 19.6, 21.6 และ 25.6 มิลลิกรัม ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 0, 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.14) โดยมีปริมาณเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เกิดขึ้นนั้นอาจเกิดจากเศษซากเปลือกของต้นพืช และรากของต้นก้างปลา ซึ่งแช่ในน้ำเสียสังเคราะห์หลุดร่วงออกมาปนกับน้ำเสียสังเคราะห์ได้ อีกทั้งสารอาหารน้ำที่ใส่ลงไปทุกๆ 15 วัน อาจเกิดการตกตะกอนขึ้นได้จึงทำให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยมีปริมาณเพิ่มขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดควบคุม (ไม่มีพืช)



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.2 ปริมาณการสะสมโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

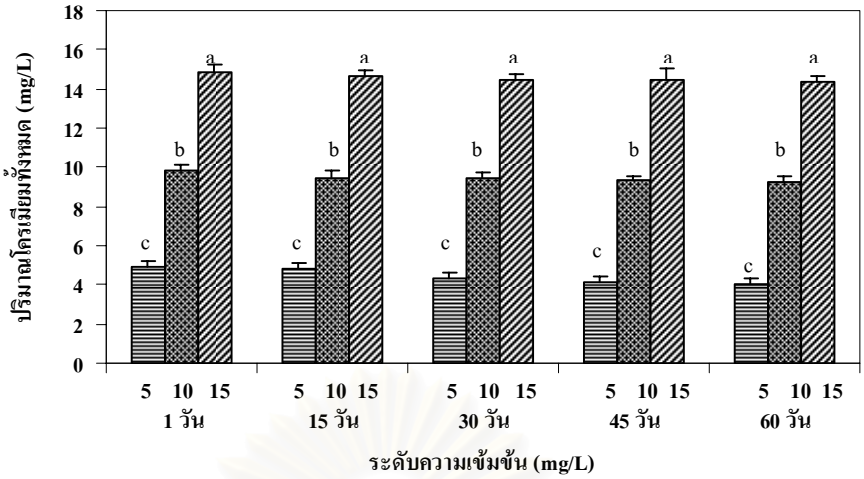
จากการศึกษาทดลองเลี้ยงต้นก้างปลา (*Phylllanthus reticulatus*) ในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับโครเมียม และรูปของโครเมียมที่พืชดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดควบคุม (ไม่มีพืช) และชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา)

1) โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดควบคุม (ไม่มีพืช)

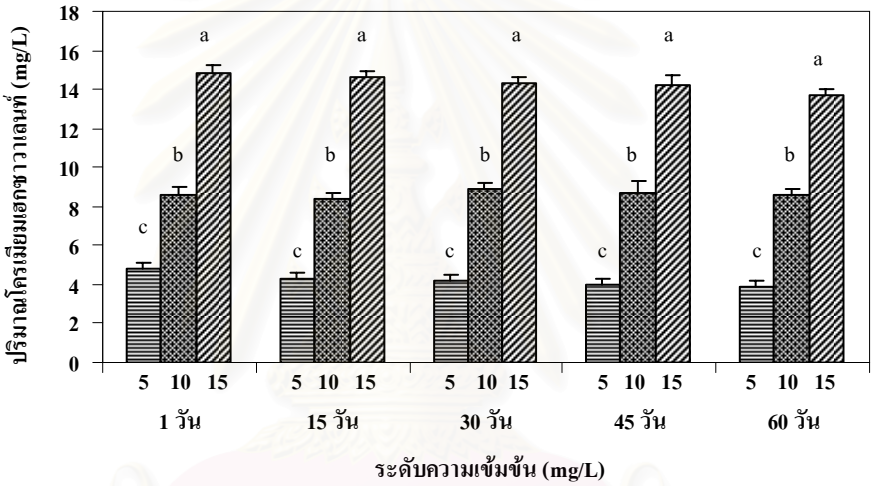
ในการศึกษาถึงปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดควบคุม (ไม่มีพืช) พบว่า ทุกช่วงการทดลองที่ 1, 15, 30, 45 และ 60 วัน มีปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์จากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังรูปที่ 4.15 โดยระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 วัน จนสิ้นสุดการทดลองที่ 60 วัน พบว่า ปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5, 10 และ15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณโครเมียมทั้งหมดสูงสุดเท่ากับ 4.91, 9.82 และ14.84 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างน้ำ 1 วัน และมีปริมาณโครเมียมทั้งหมดต่ำที่สุดเท่ากับ 4.07, 9.20 และ 14.33 มิลลิกรัมต่อลิตร จากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมที่ 5, 10 และ15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างน้ำ 60 วัน ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นได้ว่า ปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่พบในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดควบคุม (ไม่มีพืช) มีปริมาณลดลงเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดควบคุม (ไม่มีพืช) นั้นไม่ได้ทำการปลูกพืชลงไป จึงทำให้ปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่พบมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Sampanpanish (2007) ได้ทำการศึกษาปริมาณการสะสมโครเมียม เฮกซาวาเลนท์โดยวิธีการปลูกพืชไร้ดิน โดยใช้ผักตบชวาและแว่นแก้ว ที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 0, 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า น้ำเสียสังเคราะห์ชุดควบคุมซึ่งไม่มีการปลูกผักตบชวา และแว่นแก้ว ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์มีค่าลดลงประมาณ 1-3% เท่านั้น

นอกจากนี้ การสะสมโครเมียมในรูปของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดควบคุม (ไม่มีพืช) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 4.81, 9.18 และ 14.83 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5, 10 และ15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างน้ำ 1 วัน และปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่พบในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 3.80, 8.63 และ 13.67 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5, 10 และ15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างน้ำ 60 วัน (รูปที่ 4.16) แสดงให้เห็นได้ว่าปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์มีค่าลดลง เมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มมากขึ้น สำหรับปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ15 มิลลิกรัมต่อลิตรพบว่า ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.27, 0.57 และ 0.66 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างน้ำ 60 วัน และมีปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.11, 0.64 และ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ระยะเวลาการทดลอง 1 วัน (รูปที่ 4.17) นอกจากนี้ยังพบว่าระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการศึกษานั้น มีผลต่อปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในรูปของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ และโครเมียมไตรวาเลนท์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดควบคุม (ไม่มีพืช) ทั้งนี้ในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดควบคุมซึ่งไม่มีการปลูกต้นก้างปลานั้น ได้มีการเปลี่ยนรูปของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ไปเป็นโครเมียมไตรวาเลนท์ในปริมาณเพียงเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครเมียมเฮกซาวาเลนท์อยู่ในรูปที่ง่ายต่อการถูกรีดิวส์ไปเป็นโครเมียมไตรวาเลนท์ และในสภาพที่เป็นกรดโครเมียมเฮกซาวาเลนท์สามารถเปลี่ยนรูปเป็นโครเมียมไตรวาเลนท์ได้มากกว่าในสภาพที่เป็นด่าง (Cervantes et al., 2001) ซึ่งจากการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียสังเคราะห์ในชุดควบคุม (ไม่มีพืช) พบว่าน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าเป็นกรดอ่อนในทุกๆ ระดับความเข้มข้นที่ทำการทดลองโดยมีค่าความ เป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5-6 จึงทำให้โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดควบคุม (ไม่มีพืช) บางส่วนเปลี่ยนรูปเป็นโครเมียมไตรวาเลนท์ได้

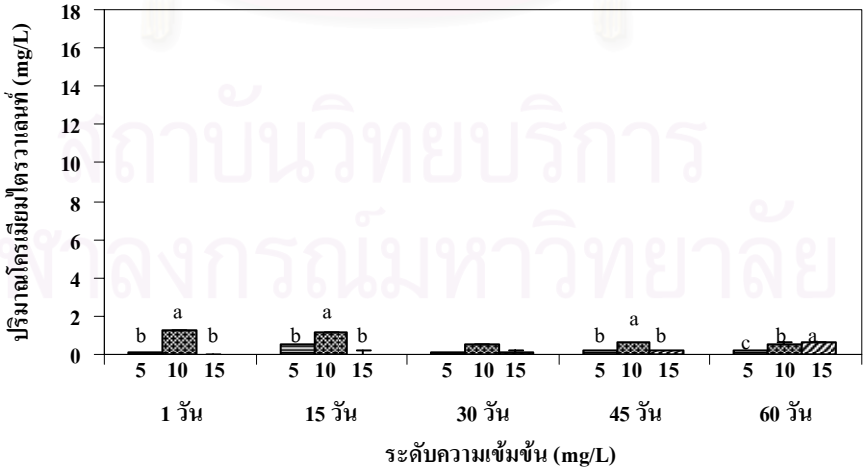
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.15 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดควบคุม (ไม่มีพืช)



รูปที่ 4.16 ปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดควบคุม (ไม่มีพืช)



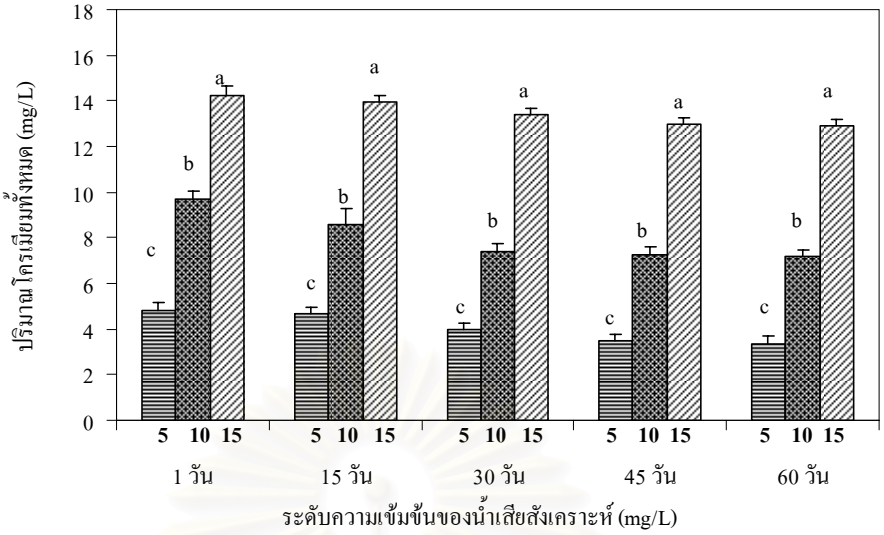
รูปที่ 4.17 ปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดควบคุม (ไม่มีพืช)

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของโครเมียม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

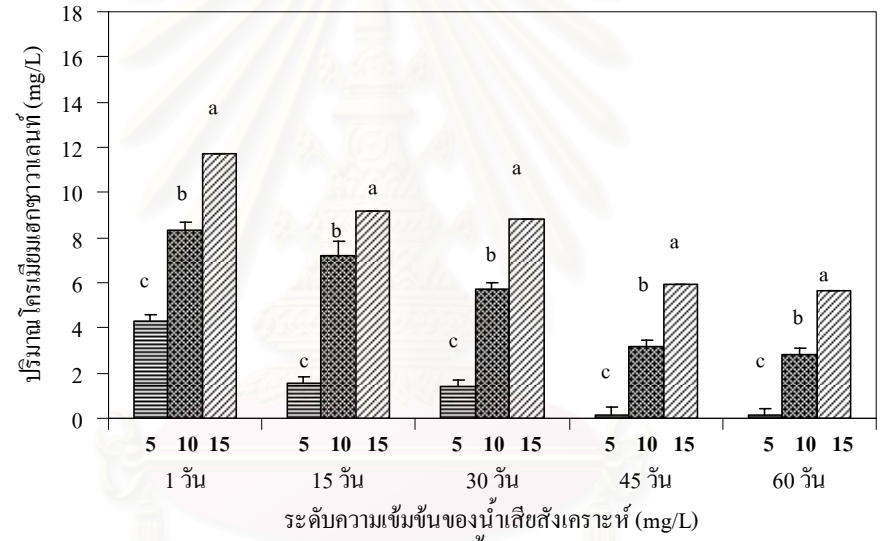
2) โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา)

จากรูปที่ 4.18 แสดงปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5, 10 และ15 มิลลิกรัมต่อลิตรพบว่า มีปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดสูงสุดเท่ากับ 4.84, 9.69 และ14.27 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างน้ำ 1 วัน และโครเมียมทั้งหมดที่พบในน้ำเสียสังเคราะห์มีปริมาณต่ำที่สุดเท่ากับ 3.38, 7.16 และ12.91 มิลลิกรัมต่อลิตร จากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ระยะเวลา 60 วัน นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณโครเมียมทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์มีปริมาณลดลง เมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มมากขึ้น

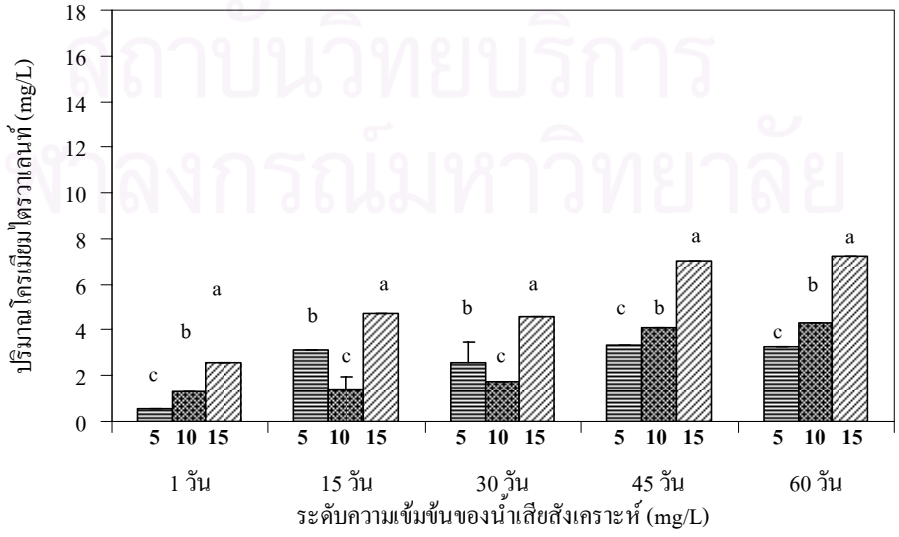
อย่างไรก็ตาม การศึกษาในครั้งนี้พบปริมาณการสะสมโครเมียมในรูปของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในน้ำเสียสังเคราะห์มีปริมาณมากที่สุดในระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 วัน เท่ากับ 4.32, 8.35 และ 11.70 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างน้ำ 60 วัน พบปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 0.13, 2.84 และ 5.67 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5, 10 และ15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ลดลงเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มมากขึ้น สำหรับปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ในน้ำเสียสังเคราะห์พบว่า ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้น 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 0.53, 1.34 และ 2.56 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างน้ำ 1 วัน และพบว่าปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 3.32 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 45 วัน ดังรูปที่ 4.20 สำหรับระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 และ15 มิลลิกรัมต่อลิตร พบปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์สูงที่สุดเท่ากับ 4.32 และ 7.24 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างน้ำ 60 วัน อย่างไรก็ตาม การสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้น 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณเพิ่มขึ้นจากระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 วัน อีกทั้ง ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการทดลอง ได้แก่ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลต่อปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ทั้งในรูปโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ และโครเมียมไตรวาเลนท์



รูปที่ 4.18 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา)

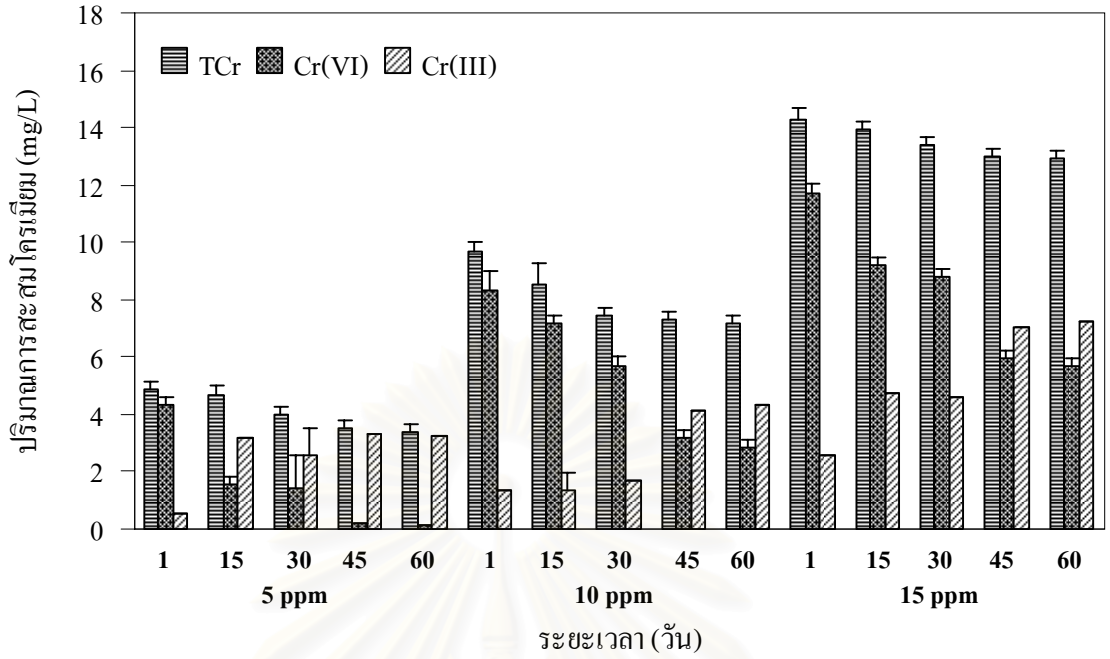


รูปที่ 4.19 ปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา)



รูปที่ 4.20 ปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา)

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของโครเมียม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



รูปที่ 4.21 ปริมาณการสะสมโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา) ที่ระดับความเข้มข้น 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4.21 สามารถสรุปได้ว่า ต้นก้างปลาสามารถดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์เข้าสะสมยังส่วนต่างๆ ของต้นก้างปลา และสามารถลดความเป็นพิษของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ ซึ่งเห็นได้จากปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่สะสมอยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์จากทุกๆ ระดับความเข้มข้นมีปริมาณลดลง และการสะสมโครเมียมในรูปไตรวาเลนท์มีปริมาณมากกว่าโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ ซึ่งมีปริมาณลดลงเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในน้ำเสียสังเคราะห์สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น-รีดักชั่นกับสารอินทรีย์ที่พืชปล่อยออกมาทางราก (Sampanpanish, 2007) ซึ่งสอดคล้องกับ พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย และพันธวัศ สัมพันธ์พานิช (2550) ที่ได้ทำการศึกษาการกำจัดโครเมียมโดยใช้ จอก ผักแว่น และสาหร่ายหางกระรอก พบว่า น้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้น 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งใช้เลี้ยงจอกมีปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ลดลงเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น และ Sampanpanish (2007) ได้ศึกษาปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์โดยวิธีการปลูกพืชไร้ดิน โดยใช้ผักตบชวา และแว่นแก้ว ที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 0, 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้เลี้ยงผักตบชวา และแว่นแก้วมีปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ลดลงประมาณ 46-59% และ 32-53% ตามลำดับ

4.2.3 ปริมาณการสะสมโครเมียมในต้นก้างปลา

ในการศึกษาการสะสมโครเมียมในส่วนต่างๆ ของต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) ที่เลี้ยงในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมนั้นได้แบ่งทำการศึกษาการสะสมโครเมียมออกเป็น 3 รูป ด้วยกันคือ โครเมียมทั้งหมด (TCr) โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] และโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)]

1) ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดของต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*)

1.1) ในช่วงการทดลองที่ 15 วัน (รูปที่ 4.22) พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดที่สะสมอยู่ในรากต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) มีค่าสูงที่สุด เท่ากับ 4,221.50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง, กลุ่มอักษร a ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กับทุกระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ระดับอื่นๆ และปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในรากจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดต่ำกว่าระดับความเข้มข้นอื่นๆ (TCr = 1,610.05^{b} มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง) ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% อีกทั้ง ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดที่ระดับความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร นั้นไม่แตกต่างกันทางสถิติกับปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่สะสมจากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (TCr = 2,216.85^{ab} มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง)

สำหรับปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่สะสมในส่วนของลำต้นมีปริมาณมากที่สุด เท่ากับ 124.34 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามด้วยระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในลำต้นเท่ากับ 74.31 และ 55.01 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณโครเมียมทั้งหมดในลำต้นมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (รูปที่ 4.23) ส่วนปริมาณการสะสมโครเมียมในใบ พบว่า ปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่สะสมในใบต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) มีค่าสูงสุด เท่ากับ 95.58 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง, กลุ่มอักษร a จากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กับปริมาณการสะสมโครเมียมจากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ระดับอื่นๆ สำหรับที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณโครเมียมทั้งหมดในใบต่ำที่สุดเท่ากับ 0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง, กลุ่มอักษร b ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัม

ต่อลิตร (TCr = 44.12[ab] มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง) มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังรูปที่ 4.24

1.2) ในช่วงการทดลองที่ 30 วัน (รูปที่ 4.22) พบว่า ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในรากจากน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่ระดับความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่ามากที่สุด คือ 5,006.32 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง, กลุ่มอักษร a ซึ่งมีปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กับทุกระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ นอกจากนี้ที่ระดับความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ยังมีปริมาณการสะสมโครเมียมต่ำที่สุด (TCr = 3,142.94[b] มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง) ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเปรียบเทียบกับระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่ระดับอื่น แต่ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (TCr = 4,061.52[ab] มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง) พบว่า ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กับปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดจากระดับความเข้มข้นที่ 5 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดที่สะสมในลำต้น พบว่าที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่สะสมในส่วนของลำต้นมีค่าเท่ากับ 41.83 และ 42.26 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีค่ามากกว่าปริมาณโครเมียมทั้งหมดจากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (TCr = 29.55 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง) อย่างไรก็ตาม ปริมาณโครเมียมทั้งหมดในลำต้นจากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ ทั้ง 3 ระดับ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังรูปที่ 4.23

นอกจากนี้ ยังพบการสะสมโครเมียมทั้งหมดในใบของต้นก้างปลาอีกด้วย โดยมีปริมาณโครเมียมทั้งหมดจากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 3 ระดับ คือ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยปริมาณโครเมียมทั้งหมดจากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 17.81 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง รองลงมาคือ ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 และ5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณเท่ากับ 9.64 และ 0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.24

1.3) ช่วงการทดลองที่ 45 วัน จากรูปที่ 4.22 พบว่าปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 3 ระดับ คือ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดสูงสุดเท่ากับ 6,595.24 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง, กลุ่มอักษร a ซึ่งมีค่าแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กับปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดจากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์

ระดับอื่นๆ และปริมาณโครเมียมทั้งหมดจากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการสะสมโครเมียมทั้งหมดในรากต่ำที่สุด (TCr = 3,598.34^{b} มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง) ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในขณะที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 4,327.75^{ab} มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง พบว่า ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดจากระดับความเข้มข้นที่ 5 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

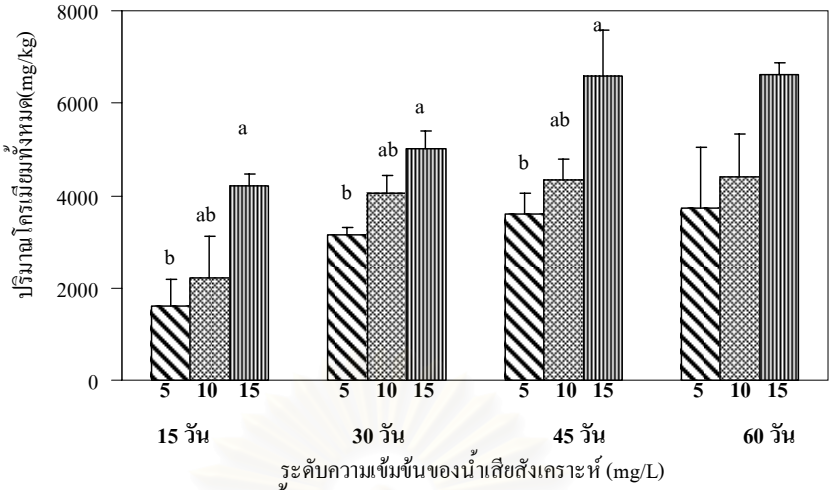
จากรูปที่ 4.23 พบว่า ปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่สะสมในส่วนของลำต้นมีค่าเท่ากับ 55.73 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีปริมาณมากที่สุดในระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร รองลงมาคือ 19.07 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนที่ระดับความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร พบโครเมียมทั้งหมดสะสมอยู่ในลำต้นเท่ากับ 3.17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง อย่างไรก็ตาม ปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่พบในส่วนของลำต้นจากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และการสะสมโครเมียมทั้งหมดในใบ พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่สะสมอยู่ในใบมีค่าเท่ากับ 73.53 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีค่าสูงที่สุดและรองลงมาคือ ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณโครเมียมทั้งหมด เท่ากับ 18.48 และ 0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่สะสมอยู่ในใบของต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) ดังกล่าว มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังรูปที่ 4.24

1.4) ช่วงการทดลองที่ 60 วัน พบว่าระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่ 5, 10 และ15 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในรากต้นก้างปลามีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการสะสมโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 6,616.12 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีปริมาณโครเมียมทั้งหมดสูงที่สุด ตามด้วยที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4,394.22 และ3,710.98 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.22 สำหรับการสะสมโครเมียมในลำต้นของต้นก้างปลานั้น พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่สะสมในส่วนของลำต้นมีค่าเท่ากับ 2.59 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีค่ามากกว่าปริมาณโครเมียมทั้งหมดจากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร (TCr = 0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง)

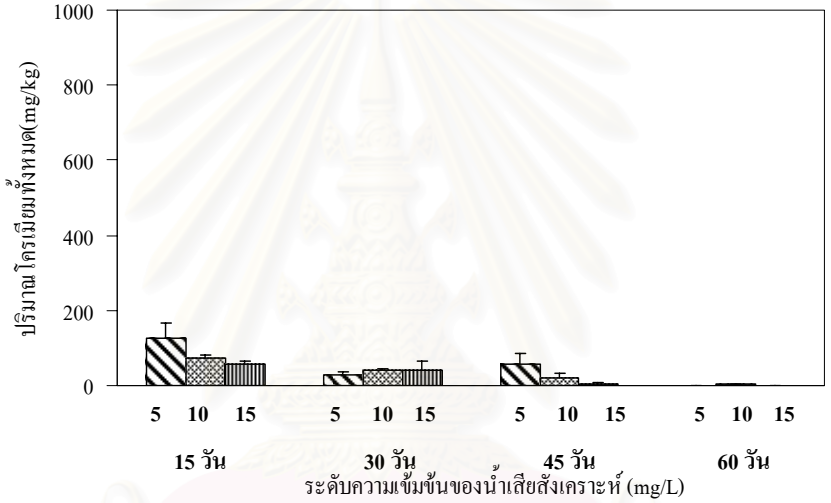
อย่างไรก็ตามปริมาณโครเมียมทั้งหมดในลำต้นจากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ ทั้ง 3 ระดับ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังรูปที่ 4.23

นอกจากนี้ ในส่วนใบของต้นก้างปลานั้น พบปริมาณโครเมียมทั้งหมดจากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 3 ระดับ คือ 5, 10 และ15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยปริมาณโครเมียมทั้งหมดจากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 59.34 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง รองลงมาคือ ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในใบของต้นก้างปลาเท่ากับ 14.74 และ 14.46 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.24

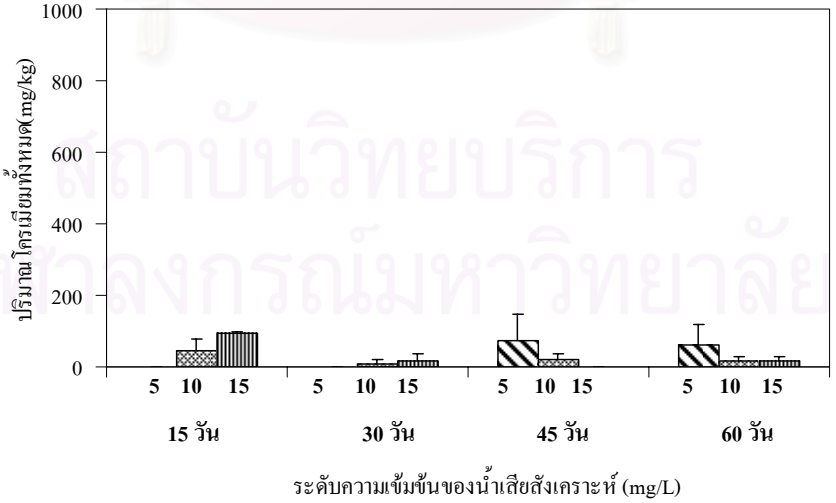
จากรูปที่ 4.22 สามารถสรุปได้ว่า ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในรากของต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) ทั้ง 4 ช่วงเวลาในการเก็บตัวอย่าง คือ 15, 30, 45 และ 60 วัน ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในรากมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ในทุกๆ ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการทดลองที่ 15 วัน พบปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่สะสมในรากจากทุกๆ ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์มีปริมาณต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 1,610.05, 2,216.85 และ 4,221.50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้นจนสิ้นสุดการทดลองที่ 60 วัน พบว่า รากของต้นก้างปลามีปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดสูงที่สุดเท่ากับ 3,710.98, 4,394.22 และ 6,616.12 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5, 10 และ15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ อีกทั้งในช่วงการทดลองที่ 15 วันจนถึงช่วงการทดลองที่ 45 วัน พบว่า ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลต่อการสะสมโครเมียมทั้งหมดในส่วนของราก และทำให้ทราบถึงความสามารถในการเจริญเติบโตของต้นก้างปลาในสภาวะที่มีความเข้มข้นของโครเมียมสูงขึ้นได้ อีกทั้งต้นก้างปลายังสามารถดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ไปสะสมไว้ยังส่วนรากได้ในปริมาณสูงที่สุด



รูปที่ 4.22 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด (TCr) ในรากของต้นก้างปลา

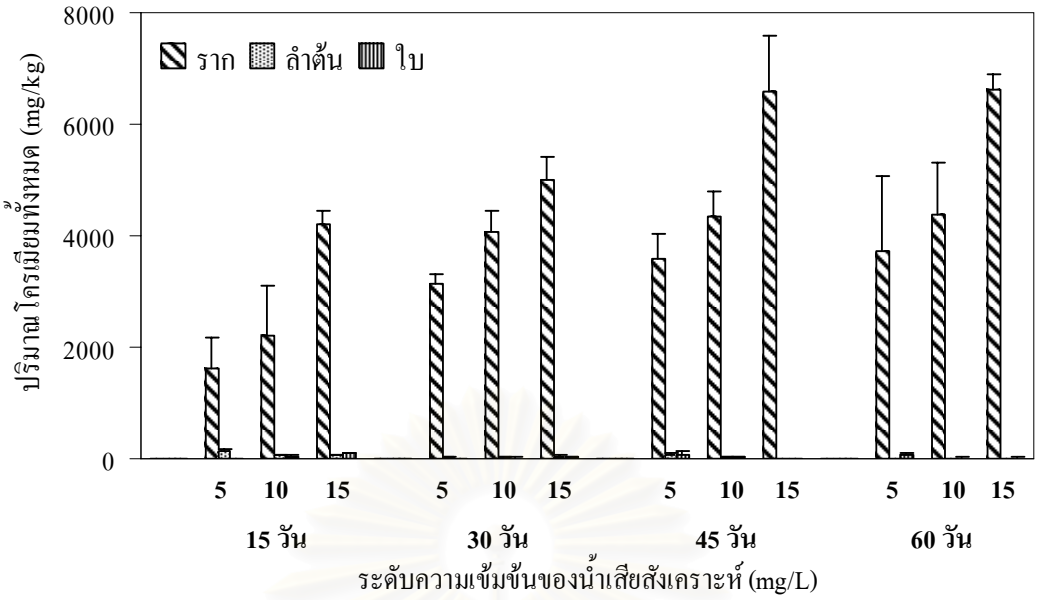


รูปที่ 4.23 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด (TCr) ในลำต้นของต้นก้างปลา



รูปที่ 4.24 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด (TCr) ในใบของต้นก้างปลา

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของโครเมียม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



รูปที่ 4.25 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในต้นก้างปลาทั้งส่วนราก ลำต้น และใบ

สำหรับการสะสมโครเมียมทั้งหมดในส่วนของลำต้น และใบนั้น พบว่าการสะสมโครเมียมทั้งหมดในส่วนของลำต้นมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น ซึ่งมีปริมาณสูงสุดในช่วงการทดลองที่ 15 วัน มีค่าเท่ากับ 124.34, 74.31 และ 55.01 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5, 10 และ15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การศึกษาครั้งนี้พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5, 10 และ15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตลอดช่วงการทดลอง ไม่มีผลต่อปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในลำต้นของต้นก้างปลา (รูปที่ 4.23) และการสะสมโครเมียมทั้งหมดในส่วนของใบพบว่า ในช่วงการทดลองที่ 15 วัน ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดจากระดับน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 0, 44.12 และ 95.58 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ไม่มีผลต่อการสะสมโครเมียมในใบของต้นก้างปลา ดังรูปที่ 4.24 หรืออาจกล่าวโดยสรุปได้ว่า ต้นก้างปลาสามารถสะสมโครเมียมทั้งหมดไว้ในส่วนต่างๆ ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของราก ดังรูปที่ 4.25 ซึ่งพบปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดสูงที่สุด นอกจากนี้ ในส่วนของลำต้นยังมีการสะสมโครเมียมทั้งหมดได้ในปริมาณที่สูงกว่าส่วนของใบ เมื่อคิดเป็นค่าเฉลี่ยรวมในตลอดการทดลอง 60 วัน โดยพบว่า ในลำต้นมีค่าการสะสมโครเมียมเท่ากับ 209.62, 137.80 และ 100.44 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ส่วนใบนั้นมีค่าเท่ากับ 132.87, 86.98 และ 127.85 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และพบปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดสูงสุดในส่วนรากของต้นก้างปลา ทั้งนี้เนื่องมาจากในส่วนรากของพืชสามารถสะสมโครเมียมได้มากกว่าในส่วนของลำต้น และส่วนอื่นๆ ถึง 10-100 เท่า และโครเมียมสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วในเนื้อเยื่อของพืชที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นไซเลม (Xylem) ซึ่งพบมากในส่วนของราก (Cervantes et. Al., 2001) จึงพบ

การสะสมโครเมียมในส่วนของรากมีปริมาณสูงที่สุด ตามด้วยลำต้น และใบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lytle et al. (1998) ได้รายงานว่า ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) มีการสะสมโครเมียมส่วนใหญ่อยู่ในรากซึ่งมีค่าเท่ากับ 5,000-6,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และจากรายงานการวิจัยของ Choo et al. (2005) ซึ่งได้ทำการศึกษาการกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะและศึกษาปริมาณการสะสมโครเมียมในบัว *Nymphaea spontanea* พบว่า บัวมีความสามารถสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] ได้ถึง 2.119 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามด้วยใบและลำต้น ตามลำดับ และผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับ Sampanpanish [2006(b)] ที่ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับโครเมียมด้วยไฮโดรโพนิคส์ (Hydroponics) โดยใช้วัชพืชได้แก่ หญ้าข้าวนก (*Echinochloay colonum*) หญ้าแพรก (*Cynodon dactylon*) และหญ้าแฝก (*Vetiveria nemoralis*) พบว่า รากของหญ้าข้าวนก (*Echinochloay colonum*) มีความสามารถในการสะสมโครเมียมได้สูงสุดคือ 5,004 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามด้วยรากของหญ้าแพรก (*Cynodon dactylon*) และหญ้าแฝก (*Vetiveria nemoralis*) มีการสะสมโครเมียมเท่ากับ 3,786 และ 915 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ เป็นเวลา 60 วัน ที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] 15 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ Jiraporn Yongpisanphop (2003) ได้ทำการศึกษา การสะสมและความเป็นพิษของตะกั่วและโครเมียม โดยใช้แว่นแก้ว (*Hydrocotyle umbellate* L.) พบว่า ปริมาณการสะสมของตะกั่วและโครเมียมในพืชเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของโลหะหนัก และระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น โดยการสะสมของตะกั่วและโครเมียมในรากมีปริมาณสูงกว่าในส่วนต้นและใบ

2) ปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ของต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*)

2.1) ช่วงการทดลองที่ 15 วัน พบว่า ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่สะสมในส่วนของรากพืช จากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ทั้ง 3 ระดับคือ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์สูงที่สุดเท่ากับ 677.59 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง รองลงมาคือ 499.82 และ 420.10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.26 และปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่สะสมอยู่ในลำต้น จากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 3 ระดับ คือ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่พบในลำต้นมีค่าสูงสุด ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ 55.93 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง รองมาคือ 47.58 และ 45.17 มิลลิกรัมต่อ

กิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 15 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.27

สำหรับปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่สะสมอยู่ในใบนั้น มีปริมาณสูงสุดเท่ากับ 80.16 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง, กลุ่มอักษร a จากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กับระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ระดับอื่นๆ ในขณะที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ปริมาณต่ำที่สุดเท่ากับ 0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง, กลุ่มอักษร b ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (Cr(VI) = 43.12^{ab} มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง) นั้น มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กับปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์จากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ระดับอื่นๆ ดังรูปที่ 4.28

2.2) ช่วงการทดลองที่ 30 วัน พบว่า ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่สะสมในส่วนของรากพืช จากทุกระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่สะสมในรากพืชมีปริมาณสูงสุดเท่ากับ 705.09 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามด้วย 642.29 และ 585.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.26

นอกจากนี้ ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่สะสมอยู่ในลำต้นนั้นมีปริมาณสูงสุดเท่ากับ 37.44 มิลลิกรัมต่อกรัมโดยน้ำหนักแห้ง จากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามด้วยระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 10 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ 35.57 และ 26.37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ อย่างไรก็ตามปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์จากทุกระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ นั้นมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังรูปที่ 4.27 และการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในใบนั้น พบว่าปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์จากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 3 ระดับ คือ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมีปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์สูงสุด เท่ากับ 12.62 และ 8.58 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 15 และ10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์จากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่พบปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์สะสมอยู่ในใบของต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*)

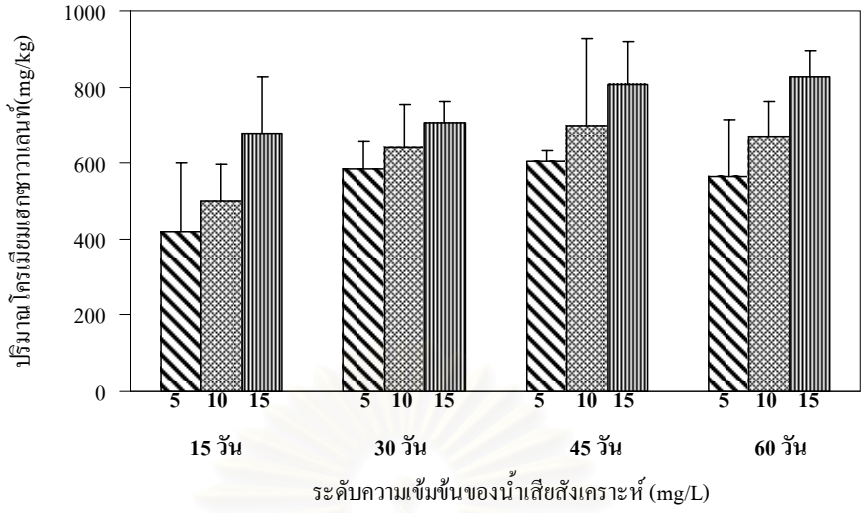
2.3) ช่วงการทดลองที่ 45 วัน (รูปที่ 4.26) พบว่าปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่รากพืชดูดซับเข้าไปนั้นมีค่าสูงสุดเท่ากับ 806.52 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร รองลงมาคือ 697.10 และ 603.38 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระดับความเข้มข้น 10 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์ค่าทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่สะสมในรากจากทุกระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สำหรับการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในลำต้นของต้นก้างปลานั้น พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์สูงสุด เท่ากับ 38.58 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง, กลุ่มอักษร a ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กับระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ระดับอื่น โดยปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ จากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ต่ำที่สุดเท่ากับ 2.05 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง, กลุ่มอักษร b ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ระดับอื่นๆ ส่วนปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ($Cr(VI) = 10.82^{ab}$ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง) มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 4.27 ในขณะที่โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในใบของต้นก้างปลา จากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่สะสมอยู่มีค่าเท่ากับ 22.65 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีค่าสูงที่สุด และรองลงมาคือ ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 13.04 และ 0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่สะสมอยู่ในใบของต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) ดังกล่าว ไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังรูปที่ 4.28

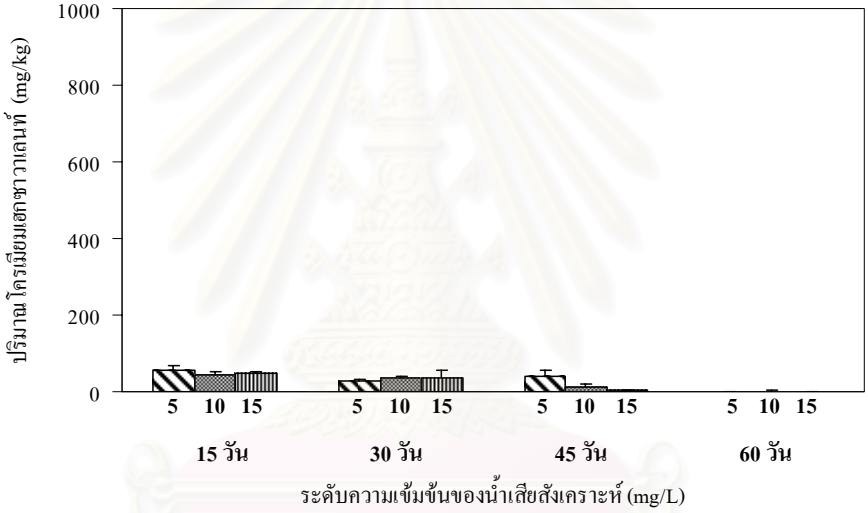
2.4) ช่วงการทดลองที่ 60 วัน จากรูปที่ 4.26 พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่สะสมอยู่ในส่วนของรากพืชเท่ากับ 826.10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีค่าสูงสุด รองลงมาคือ ที่ระดับความเข้มข้น 10 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ 669.71 และ 564.28 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่สะสมในรากพืชจากทุกระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากรูปที่ 4.27 พบปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในลำต้นของต้นก้างปลา ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เพียงระดับความเข้มข้นเดียวเท่านั้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.22 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง โดยที่

ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ระดับอื่นๆ ไม่พบปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์อยู่เลย และปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในใบของต้นก้างปลา พบว่าปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ จากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 3 ระดับ คือ 5, 10 และ15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์จากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 28.13 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง รองลงมาคือ ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 และ15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์มีค่าเท่ากับ คือ 12.27 และ 6.41 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้งตามลำดับ ดังรูปที่ 4.28

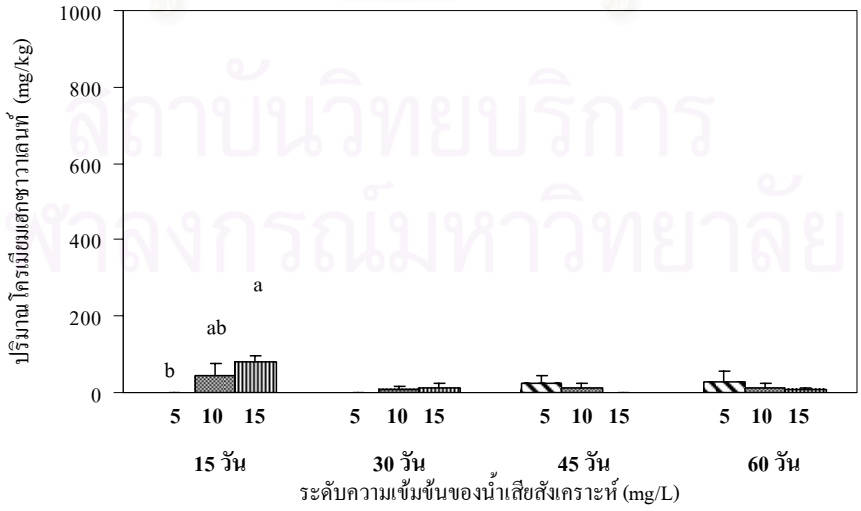
จากรูปที่ 4.29 แสดงปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่สะสมอยู่ในราก ซึ่งปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในรากมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 603.38 และ 697.10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ที่ระยะเวลาในการทดลอง 45 วัน และมีปริมาณลดลงที่ระยะเวลาในการทดลอง 60 วัน ส่วนที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 15 มิลลิกรัมต่อลิตรนั้น มีปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์สูงสุดเท่ากับ 826.10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระยะเวลาในการทดลอง 60 วัน อย่างไรก็ตาม ในการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในส่วนรากของต้นก้างปลาตลอดช่วงการทดลองทั้ง 60 วัน พบว่าระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่มีผลต่อการสะสมโครเมียมในรูปของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในส่วนรากของต้นก้างปลา นอกจากนี้ยังพบการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในส่วนของลำต้น และใบของต้นก้างปลาอีกด้วย โดยในลำต้นมีปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์จากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากับ 55.93, 45.17 และ 47.58 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ที่ระยะเวลาในการทดลอง 15 วัน ส่วนที่ระยะเวลาในการทดลองที่ 60 วัน มีปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในลำต้นเท่ากับ 0, 1.22 และ 0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าลดลงตามระยะเวลาในการทดลองที่เพิ่มขึ้น และตลอดช่วงการทดลอง 60 วัน ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่มีผลต่อการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในส่วนของลำต้น สำหรับปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่สะสมในส่วนของใบนั้น พบว่าที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์สูงสุดเท่ากับ 43.12 และ 80.16 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ที่ระยะเวลา 15 วัน และปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์มีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตรนั้น พบปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์เพิ่มขึ้นจนสิ้นสุดการทดลอง



รูปที่ 4.26 ปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr (VI)] ในรากของต้นก้างปลา



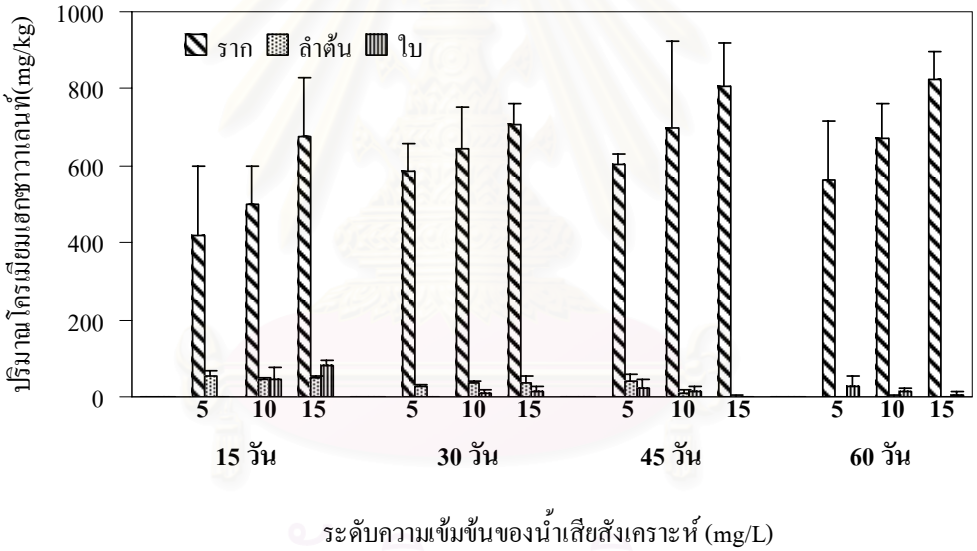
รูปที่ 4.27 ปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr (VI)]ในลำต้นของต้นก้างปลา



รูปที่ 4.28 ปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr (VI)] ในใบของต้นก้างปลา

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของโครเมียม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ที่ 60 วัน มีค่าสูงสุดเท่ากับ 22.13 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง อย่างไรก็ตามในช่วงการทดลองที่ 15 วัน พบว่าระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการทดลองมีผลต่อการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในส่วนของใบ แต่ในช่วงการทดลองอื่นๆ ไม่มีผลต่อการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในใบ ทั้งนี้เนื่องจากต้นก้างปลามีการเปลี่ยนรูปของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ไปเป็นโครเมียมไตรวาเลนท์ซึ่งมีความเป็นพิษน้อยกว่า และรากของต้นก้างปลายังเป็นส่วนที่สัมผัสกับน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมซึ่งสามารถดูดซับโครเมียมได้โดยตรง และรากยังมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูง เนื่องจากมีระดับของกรดอินทรีย์และกรดอะมิโนสูง ซึ่งกรดเหล่านี้สามารถจับกับพวกโลหะหนักได้ จึงเกิดการเคลื่อนย้ายอิออนจากภายนอกเข้าสู่พืชโดยผ่านทางราก แต่การสะสมโครเมียมในต้น และใบนั้นจะต้องผ่านกระบวนการลำเลียงโครเมียมจากรากไปสู่ยอดด้วย (Kadlec and Knight, 1996 อ้างถึงใน วงศ์พงา เส็งสาย, 2544) ดังนั้น จึงทำให้พบปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์มีการสะสมในราก ลำต้น และใบของต้นก้างปลา



รูปที่ 4.29 ปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] ในต้นก้างปลาทั้งส่วนราก ลำต้น และใบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3) ปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ของต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*)

3.1) ช่วงการทดลองที่ 15 วัน จากรูปที่ 4.30 พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณโครเมียมในรูปของโครเมียมไตรวาเลนท์ที่สะสมในรากสูงที่สุด เท่ากับ 3,543.91 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง, กลุ่มอักษร a ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ต่ำที่สุด (Cr(III) = 1,189.95[b] มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง) ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กับระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์อื่นๆ ในขณะที่ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ที่สะสมอยู่ในราก จากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (Cr(III) = 1,717.03 [a b] มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง) มีปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์สะสมในรากไม่แตกต่างกันทางสถิติกับระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร จากรูปที่ 4.31 พบว่า ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ที่สะสมอยู่ในลำต้นของพืชที่ทดลองนั้น มีปริมาณมากที่สุดเท่ากับ 68.42 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง, กลุ่มอักษร a ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเปรียบเทียบกับระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ระดับอื่นๆ และที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร พบปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ต่ำที่สุดเท่ากับ 7.43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง, กลุ่มอักษร b ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ อีกทั้งยังมีค่าน้อยกว่าปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (Cr(III) = 29.14 [ab] มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง) ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กับระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ระดับอื่น

ส่วนการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในส่วนใบของต้นก้างปลา พบว่า มีปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ที่สะสมในใบต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 15.42 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง, กลุ่มอักษร a จากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กับปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์จากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับอื่น โดยที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในใบของพืชเท่ากับ 1.01 และ 0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง, กลุ่มอักษร b ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังรูปที่ 4.32

3.2) ช่วงการทดลองที่ 30 วัน ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ที่สะสมในรากมีปริมาณสูงที่สุด เท่ากับ 4,301.22 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง, กลุ่มอักษร a ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กับระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ระดับอื่น และที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ต่ำที่สุด (Cr(III) = 2,557.94^{b} มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง) ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กับระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ระดับอื่น อีกทั้งที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร(Cr(III) = 3,419.23^{ab} มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง) มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังรูปที่ 4.30 ส่วนปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในลำต้นนั้น มีค่าสูงสุดเท่ากับ 6.26 และ4.83 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์จากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าต่ำที่สุดซึ่งมีปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์เท่ากับ 3.18 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง และปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังรูปที่ 4.31

จากรูปที่ 4.32 พบว่าปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ที่สะสมอยู่ในใบนั้น มีปริมาณสูงสุดเท่ากับ 5.19 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง จากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร พบปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ในใบของพืชมีปริมาณเท่ากับ 1.06 และ 0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์ค่าทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์จากทุกๆระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3.3) ช่วงการทดลองที่ 45 วัน (รูปที่ 4.30) พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในรากสูงที่สุด ซึ่งมีปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์เท่ากับ 5,788.72 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง, กลุ่มอักษร a ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กับระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ระดับอื่นๆ ตามด้วยที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์เท่ากับ 3,630.65 และ 2,994.96 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง, กลุ่มอักษร b ซึ่งมีปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในลำต้นนั้น พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ที่สะสมในลำต้น เท่ากับ 17.15, 8.25 และ 1.12 มิลลิกรัม

ต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (รูปที่ 4.31) ส่วนโครเมียมไตรวาเลนท์ในใบนั้น พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ที่สะสมอยู่ในใบมีค่าเท่ากับ 50.88 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีค่าสูงที่สุด และรองลงมาคือ ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์เท่ากับ 5.44 และ 0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ที่สะสมอยู่ในใบของต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) ดังกล่าวนั้น มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังรูปที่ 4.32

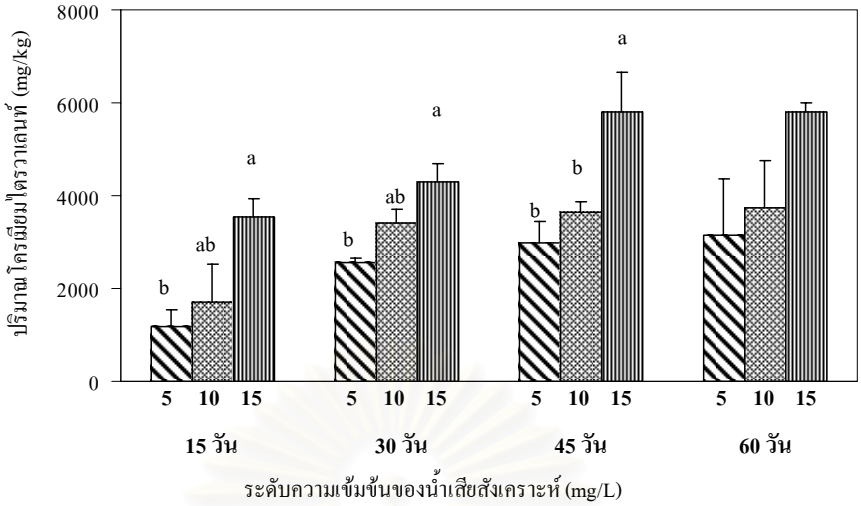
3.4) ช่วงการทดลองที่ 60 วัน พบว่าปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 5,790.03, 3,724.51 และ 3,146.70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 15, 10 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังรูปที่ 4.30

จากรูปที่ 4.31 พบว่าที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ที่สะสมในลำต้น เท่ากับ 0, 1.37 และ 0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ที่สะสมในใบของต้นก้างปลา จากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 3 ระดับ คือ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์จากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 31.21 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง รองลงมาคือ ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 15 และ10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์เท่ากับ 8.04 และ 2.46 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.32 อย่างไรก็ตาม ในการสะสมโครเมียมในรูปโครเมียมไตรวาเลนท์ในส่วนใบของต้นก้างปลานั้น ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่ทำการศึกษาทดลองไม่มีผลต่อปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ที่สะสมในใบพืช

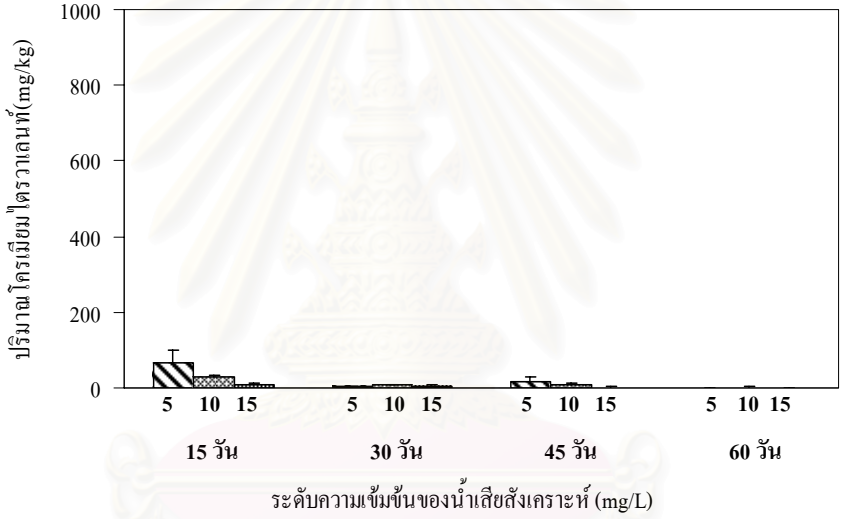
ปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในรากของต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) ตลอดช่วงการทดลอง 60 วัน พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์สูงที่สุดเท่ากับ 3,146.70, 3,724.51 และ5,790.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ที่ระยะเวลาในการทดลอง 60 วัน ซึ่งมีปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในรากของต้นก้างปลามีจำนวนเพิ่มขึ้นแปรผันตามระยะเวลาในการทดลอง อย่างไรก็ตาม ที่ระยะเวลาในการทดลอง 15 ถึง 45 วัน พบว่า ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ทั้งสามระดับมีผลต่อปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในส่วนรากของต้นก้างปลา แต่ที่ระยะเวลา 60 วัน ระดับความเข้มข้น

ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการทดลองไม่มีผลต่อปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในรากของต้นก้างปลา ดังรูปที่ 4.30 สำหรับการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในส่วนของลำต้น พบว่า ปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 68.42, 29.14 และ 7.43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ระยะเวลาในการทดลอง 15 วัน โดยปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในลำต้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มมากขึ้น อีกทั้ง ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลองนั้นไม่มีผลต่อปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในส่วนของลำต้น (รูปที่ 4.31) ส่วนการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในใบของต้นก้างปลามีปริมาณสูงสุดเท่ากับ 50.88 และ 5.44 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5 และ10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในช่วงการทดลองที่ 45 และที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 15.42 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่เวลา 15 วัน อย่างไรก็ตาม ในช่วงระยะเวลาในการทดลองที่ 15 วัน พบว่าระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลต่อปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในใบของต้นก้างปลา แต่หลังจากการทดลองที่ 15 วัน จนสิ้นสุดการทดลอง ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการศึกษาไม่มีผลต่อปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในใบของต้นก้างปลา (รูปที่ 4.32) ทั้งนี้การสะสมโครเมียมในต้นก้างปลาสามารถบ่งชี้ได้ว่า ต้นก้างปลาสามารถลดความเป็นพิษจากโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ให้เป็นโครเมียมไตรวาเลนท์ได้

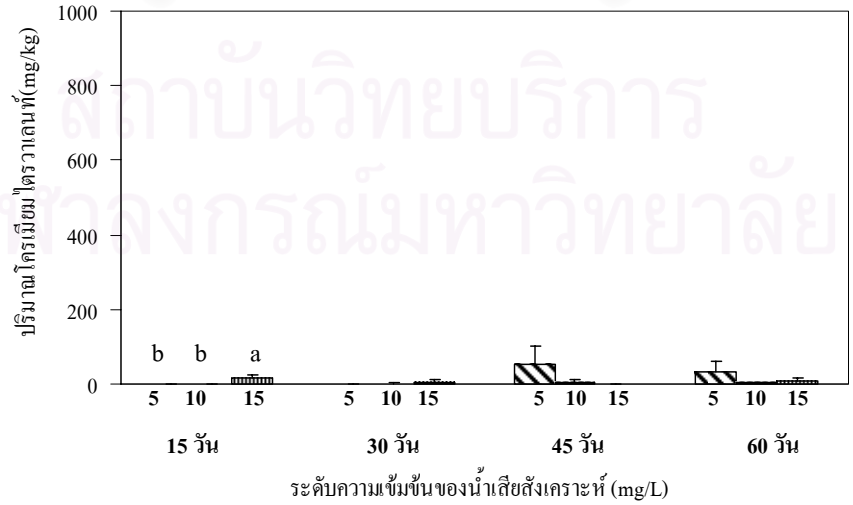
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.30 ปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] ในรากของต้นก้างปลา

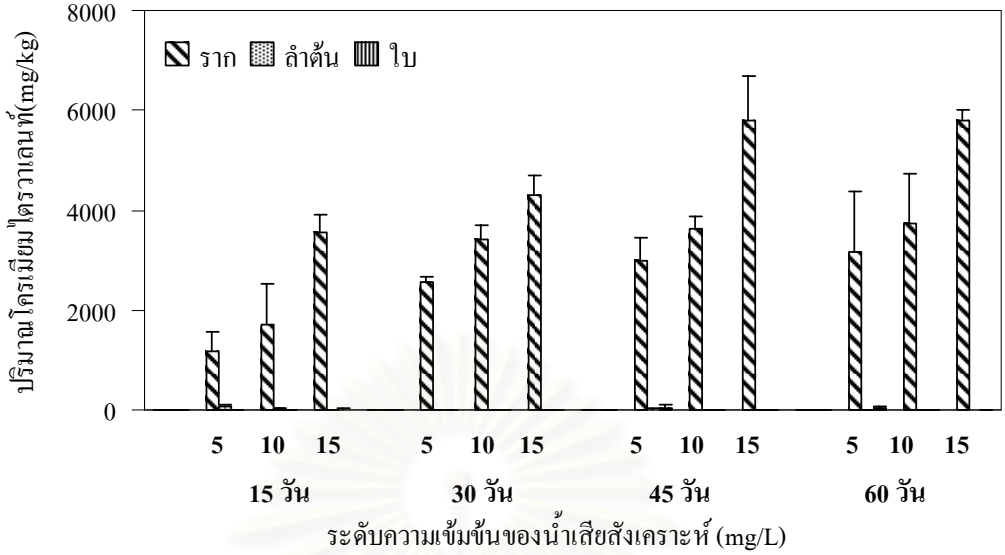


รูปที่ 4.31 ปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] ในลำต้นของต้นก้างปลา



รูปที่ 4.32 ปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] ในใบของต้นก้างปลา

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของโครเมียม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



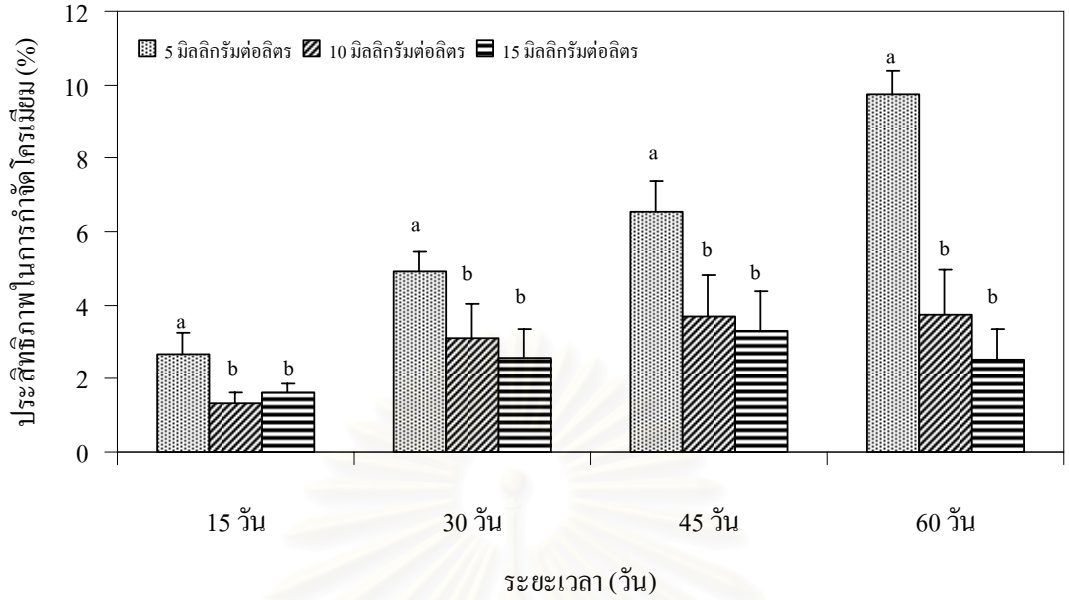
รูปที่ 4.33 ปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] ในต้นก้างปลาทั้งในส่วนราก ลำต้น และใบ

จากรูปที่ 4.33 สามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า ในการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในส่วนรากของต้นก้างปลามีปริมาณสูงที่สุด โดยคิดเป็นค่าเฉลี่ยรวมตลอดระยะเวลาในการทดลองที่ 60 วัน มีค่าเท่ากับ 2,472.39, 3,122.85 และ 4,855.97 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ รองลงมาคือในส่วนของลำต้น และใบ โดยในลำต้นมีค่าเท่ากับ 22.19, 11.26 และ 3.35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ส่วนในใบของต้นก้างปลามีปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์เท่ากับ 20.52, 2.49 และ 7.16 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งในส่วนรากของต้นก้างปลาสามารถรีดิวส์โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ไปเป็นโครเมียมไตรวาเลนท์ซึ่งมีความเป็นพิษลดลง เมื่อมีการดูดซับโครเมียมในรูปโครเมียมเฮกซาวาเลนท์เข้าไปสะสมในพืช โครเมียมเฮกซาวาเลนท์จะถูกเปลี่ยนรูปให้เป็นโครเมียมไตรวาเลนท์ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในส่วนของราก (Lytle et al., 1998) และจากการศึกษาของ Sampanpanish (2007) ซึ่งได้ทำการศึกษาปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในผักตบชวา และแว่นแก้ว โดยวิธีการปลูกพืชไร้ดินพบว่า ผักตบชวาและแว่นแก้วมีการสะสมโครเมียมทั้งหมดส่วนใหญ่ไว้ในส่วนของราก และรากของพืชทั้งสองชนิดนี้ยังมีความสามารถในการเปลี่ยนรูปโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ไปเป็นโครเมียมไตรวาเลนท์ได้มากที่สุดด้วย และจากการศึกษาของ Pulford, Watson and Mcgregor (2001)ได้ทำการศึกษาระดับความเข้มข้นของโครเมียม (Cr) และสังกะสี (Zn) ในส่วนต่างๆ ของไม้ยืนคือ Birch, Pine, Alder, Poplar และ Willow พบว่า พืชมีการดูดซับโครเมียมทั้ง 2 รูปคือ โครเมียมไตรวาเลนท์ และโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ โดยส่วนใหญ่มีการสะสมอยู่ในราก และส่วนเหนือรากซึ่งมีปริมาณน้อยมาก นอกจากนี้ Aldrich et al. (2003) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการสะสมโครเมียมของต้น Mesquite

(*Prosopis* spp.) โดยการปลูกแบบไฮโดรโพนิคส์ (Hydroponics) พบว่า ต้นMesquite (*Prosopis* spp.) มีการสะสมโครเมียม เฮกซาวาเลนท์ และโครเมียมไตรวาเลนท์มากที่สุดในส่วนของราก ลำต้น และใบ ตามลำดับ ด้วยเช่นกัน

4.2.4 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

ในการศึกษาถึงประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำโดยต้นก้างปลาที่ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม ($K_2Cr_2O_7$) ที่ระดับความเข้มข้น 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตลอดระยะการทดลอง 60 วัน พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 2.68, 4.91, 6.53 และ 9.76% ที่ระยะเวลาการทดลอง 15, 30, 45 และ 60 วัน ตามลำดับ สำหรับที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมเท่ากับ 1.35, 3.11, 3.66 และ 3.75% ตามลำดับ และที่ระดับความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า มีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ คิดป็น 1.62, 2.57, 3.28 และ 2.53% ที่ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 วัน ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ค่าทางสถิติพบว่า ที่ระยะเวลา 15 วัน จนสิ้นสุดการทดลอง 60 วัน ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กับระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันทางสถิติ ดังรูปที่ 4.34 นอกจากนี้ ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมเพิ่มสูงขึ้น แปรผันตามระยะเวลาในการทดลองที่เพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์สูงที่สุด เท่ากับ 9.76 และ 3.75% ตามลำดับ ที่ระยะเวลา 60 วัน ส่วนที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 3.28% ที่ระยะเวลา 45 วัน จากนั้นจึงมีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมลดลง แสดงให้เห็นว่า ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ดีที่สุด รองลงมาคือ ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้น 0.5-5 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถทำอันตรายต่อพืชได้ โดยโครเมียมเฮกซาวาเลนท์จะยับยั้งการเจริญเติบโตของรากอ่อน อีกทั้งยังลดการสร้างคลอโรฟิลล์ในใบพืชอีกด้วย จึงทำให้ใบพืชเหี่ยวตาย (Cervantes et al., 2001) ดังนั้น ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงมีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมต่ำกว่าที่ระดับความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.34 ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของโครเมียม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.3 สมดุลมวล (Mass Balance)

4.3.1 การกำจัดโครเมียมด้วยต้นก้างปลาโดยวิธีการปลูกพืชในดิน (Phytoremediation)

จากผลการเก็บตัวอย่างดิน น้ำ และพืช สามารถแสดงปริมาณการสะสมและการกำจัดโครเมียมที่ปนเปื้อนในดินได้ อย่างไรก็ตามผลการศึกษาดังกล่าว ได้ทำการวิเคราะห์และจัดทำสมดุลมวล ดิน น้ำ และพืช ที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโปตัสเซียมไดโครเมท ($K_2Cr_2O_7$) 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน โดยโครเมียมที่มีการสะสมทั้งในดิน น้ำ และพืช นั้นอยู่ในรูปของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์และไตรวาเลนท์ ซึ่งการศึกษาครั้งนี้พบว่า สารประกอบโครเมียมส่วนใหญ่มีการสะสมอยู่ในดินมากกว่า 90% ของการสะสมโครเมียมในระบบ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการสะสมโครเมียมในพืช และน้ำชะล้าง โดยในดินมีปริมาณการสะสมโครเมียมเท่ากับ 726.67, 752.33, 758.85 และ 771.83 มิลลิกรัม ซึ่งคิดเป็น 93.04, 96.33, 97.17 และ 98.83% ของปริมาณโครเมียมที่สะสมในระบบ ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างดิน 30, 60, 90 และ 120 วัน ตามลำดับ ส่วนปริมาณโครเมียมที่พบในน้ำนั้นมีปริมาณเท่ากับ 0.61, 1.07, 2.17 และ 2.16 มิลลิกรัม ซึ่งคิดเป็น 0.07, 0.14, 0.28 และ 0.28% ของปริมาณโครเมียมที่สะสมในระบบ ส่วนปริมาณโครเมียมที่สะสมในพืช พบว่ามีปริมาณเท่ากับ 0.82, 1.32, 0.79 และ 0.36 มิลลิกรัม ซึ่งคิดเป็น 0.10, 0.17, 0.10 และ 0.05% ของปริมาณโครเมียมที่สะสมในระบบ ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างน้ำและพืช 30, 60, 90 และ 120 วัน ตามลำดับ จากตารางที่ 4.4 สามารถกล่าวสรุปได้ว่า ปริมาณ

ตารางที่ 4.4 สมดุลมวล (Mass Balance) ในการกำจัดโครเมียมโดยใช้ต้นก้างปลาด้วยวิธีปลูกพืชในดิน

ระยะเวลา (วัน)	ปริมาณโครเมียม (มิลลิกรัม)									ปริมาณโครเมียม (%)									ผลรวมปริมาณโครเมียม (%)
	พืช			น้ำชะล้าง			ดิน			พืช (%)			น้ำชะล้าง (%)			ดิน (%)			
	Cr (VI)	Cr (III)	TCr	Cr (VI)	Cr (III)	TCr	Cr (VI)	Cr (III)	TCr	Cr (VI)	Cr (III)	TCr	Cr (VI)	Cr (III)	TCr	Cr (VI)	Cr (III)	TCr	
30	0.33	0.49	0.82	0.34	0.27	0.61	264.79	461.88	726.67	0.04	0.06	0.10	0.04	0.03	0.07	33.90	59.14	93.04	93.21
60	0.30	1.02	1.32	0.08	0.98	1.07	254.90	497.43	752.33	0.04	0.13	0.17	0.01	0.13	0.14	32.64	63.69	96.33	96.64
90	0.22	0.57	0.79	0.09	2.08	2.17	214.67	544.18	758.85	0.03	0.07	0.10	0.01	0.27	0.28	27.49	69.68	97.17	97.55
120	0.09	0.28	0.36	0.09	2.07	2.16	189.46	582.37	771.83	0.01	0.04	0.05	0.01	0.27	0.28	24.26	74.57	98.83	99.16

หมายเหตุ : Cr (VI) แสดงปริมาณการสะสมโครเมียมในรูปเฮกซาวาเลนท์

: Cr (III) แสดงปริมาณการสะสมโครเมียมในรูปไตรวาเลนท์

: TCr แสดงปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โครเมียมทั้งหมดที่มีการสะสมอยู่ในดินส่วนใหญ่อยู่ในรูปของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ ซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น และปริมาณโครเมียมที่สะสมในพืชและน้ำชะล้างกลับมีปริมาณลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในดินเพิ่มขึ้น พืชก็จะได้รับความเป็นพิษจากโครเมียมเฮกซาวาเลนท์มากขึ้นและโครเมียมมีการสะสมอยู่ในอนุภาคของดินมากขึ้น เมื่อระยะเวลาในการทดลองมากขึ้น จึงทำให้พบปริมาณโครเมียมสะสมอยู่ในส่วนของพืช และน้ำชะล้างลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า มีปริมาณโครเมียมในระบบมีค่าเท่ากับ 93.21, 96.64, 97.55 และ99.16% ของปริมาณโครเมียมที่สะสมในระบบ ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างน้ำและพืช 30, 60, 90 และ 120 วัน ตามลำดับ แสดงให้เห็นได้ว่า มีโครเมียมบางส่วนสูญหายไป ทั้งนี้เนื่องมาจากโครเมียมบางส่วนอาจติดอยู่กับภาชนะที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ วงศ์พงา เส็งสาย (2544) ซึ่งได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของหญ้าแฝกหอม (*Vetiveria zizaniodes* (Linn.) Nash) และแฝกดอน (*Vetiveria nemoralis* A. Camus) ในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียขั้นสุดท้ายจากโรงฟอกหนังพบว่า มีปริมาณโครเมียมส่วนหนึ่งหายไปจากการทำสมดุลมวลประมาณ 6.86% และ ลักษณี คณานิธินันท์ (2539) อ้างถึงใน วงศ์พงา เส็งสาย (2544) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของกกกลม ธูปฤาษี อ้อ และ แห้วทรงกระเทียม ในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะ พบว่า มีปริมาณโครเมียมบางส่วนหายไปจากการทำสมดุลมวลประมาณ 10% เช่นกัน

4.3.2 การกำจัดโครเมียมด้วยต้นก้างปลาโดยวิธีการปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics)

จากตารางที่ 4.5 ได้มีการทำสมดุลมวลในส่วนของการปลูกต้นก้างปลาในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งได้มีการแบ่งการคำนวณออกเป็นในพืช และน้ำ โดยมีการสะสมโครเมียมในรูปเฮกซาวาเลนท์และไตรวาเลนท์ พบว่า การสะสมโครเมียมที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณโครเมียมทั้งหมดสะสมอยู่เท่ากับ 96.46, 84.45, 76.30 และ 77.32% ของปริมาณโครเมียมที่สะสมในระบบ ที่ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 วัน ตามลำดับ ส่วนที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า มีปริมาณโครเมียมทั้งหมดสะสมอยู่เท่ากับ 86.89, 77.32, 76.56 และ 75.30% ของปริมาณโครเมียมที่สะสมในระบบ ที่ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 วัน ตามลำดับ และที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า มีปริมาณโครเมียมทั้งหมดสะสมอยู่เท่ากับ 94.53, 91.75, 89.80 และ88.61% ของปริมาณโครเมียมที่สะสมในระบบ ที่ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 วัน ตามลำดับ และปริมาณการสะสมโครเมียมส่วนใหญ่อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์มากกว่าในพืช ซึ่งมีปริมาณมากกว่า 60% ของปริมาณโครเมียมที่สะสมในระบบ ดังตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณโครเมียมทั้งระบบที่พบมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มมากขึ้นจากทุกๆ ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำ

ตารางที่ 4.5 สมดุลมวล (Mass Balance) ในการกำจัดโครเมียมโดยใช้ต้นก้างปลาด้วยวิธีการปลูกพืชไร้ดิน

ระดับความเข้มข้น (มิลลกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียม (มิลลิกรัม)	ระยะเวลา (วัน)	ปริมาณโครเมียม (มิลลิกรัม)						ปริมาณโครเมียม (%)						ผลรวมปริมาณโครเมียม (%)
			พืช (มิลลิกรัม)			น้ำ (มิลลิกรัม)			พืช (%)			น้ำ (%)			
			Cr (VI)	Cr (III)	TCr	Cr (VI)	Cr (III)	TCr	Cr (VI)	Cr (III)	TCr	Cr (VI)	Cr (III)	TCr	
5	10	15	0.03	0.24	0.27	3.07	6.30	9.37	0.29	2.39	2.68	30.74	63.04	93.78	96.46
10	20		0.03	0.24	0.27	14.34	2.77	17.11	0.14	1.20	1.34	71.68	13.87	85.55	86.89
15	30		0.03	0.46	0.49	18.40	9.47	27.87	0.11	1.52	1.63	61.33	31.57	92.90	94.53
5	10	30	0.03	0.46	0.49	2.87	5.08	7.95	0.33	4.58	4.91	28.70	50.84	79.54	84.45
10	20		0.03	0.59	0.62	11.42	3.42	14.84	0.17	2.93	3.10	57.12	17.10	74.22	77.32
15	30		0.04	0.74	0.78	17.58	9.18	26.76	0.12	2.45	2.57	58.59	30.59	89.18	91.75
5	10	45	0.04	0.62	0.66	0.35	6.63	6.98	0.37	6.15	6.52	3.48	66.30	69.78	76.30
10	20		0.04	0.70	0.74	6.36	8.21	14.57	0.19	3.48	3.67	31.82	41.07	72.89	76.56
15	30		0.04	0.95	0.99	11.86	14.09	25.95	0.13	3.15	3.28	39.54	46.98	86.52	89.80
5	10	60	0.04	0.94	0.98	0.27	6.49	6.76	0.40	9.36	9.76	2.66	64.90	67.56	77.32
10	20		0.04	0.71	0.75	5.68	8.63	14.31	0.20	3.55	3.75	28.40	43.15	71.55	75.30
15	30		0.04	0.72	0.76	11.34	14.48	25.82	0.13	2.40	2.53	37.81	48.27	86.08	88.61

หมายเหตุ : Cr (VI) แสดงปริมาณการสะสมโครเมียมในรูปเฮกซาวาเลนท์

: Cr (III) แสดงปริมาณการสะสมโครเมียมในรูปไตรวาเลนท์

: TCr แสดงปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลอง ซึ่งมีโครเมียมในระบบบางส่วนหายไป ทั้งนี้เนื่องจากโครเมียมอาจติดอยู่กับภาชนะ และวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง จึงทำให้เมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้นโครเมียมในระบบบางส่วนได้สูญหายไป นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณการสะสมโครเมียมในน้ำจากระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการสะสมโครเมียมส่วนใหญ่อยู่ในรูปของโครเมียมไตรวาเลนท์ ในทางตรงข้ามที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการสะสมโครเมียมในรูปเฮกซาวาเลนท์มากกว่าโครเมียมไตรวาเลนท์ แต่เมื่อพิจารณาถึงปริมาณการสะสมโครเมียมในพืช แสดงให้เห็นได้ว่าเมื่อปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่สะสมในน้ำจากทุกๆ ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ลดลง และโครเมียมไตรวาเลนท์ในน้ำเสียสังเคราะห์จากทุกๆ ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์มีปริมาณเพิ่มขึ้น พืชสามารถดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ไปสะสมในส่วนต่างๆ ของพืชได้มากขึ้น ทั้งในรูปของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์และไตรวาเลนท์ ทั้งนี้เนื่องจากโครเมียมในรูปเฮกซาวาเลนท์มีความเป็นพิษต่อพืชมากกว่าโครเมียมไตรวาเลนท์ ดังนั้นเมื่อโครเมียมเฮกซาวาเลนท์มีปริมาณลดลง และโครเมียมไตรวาเลนท์มีปริมาณเพิ่มขึ้น พืชจึงสามารถดูดซับโครเมียมได้มากขึ้นด้วยเช่นกัน

4.4 องค์ประกอบทางเคมีของต้นก้างปลา

จากการศึกษาได้ทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีภายในของต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) โดยวิธีการของเอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray Fluorescence: X-RF) ทั้งที่ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์ และการปลูกในดิน ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.5 และ 4.6 เป็นการแสดงให้เห็นองค์ประกอบทางเคมีในส่วนของรากพืชที่ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ระยะเวลาของการทดลอง 60 วัน พบว่าองค์ประกอบภายในของต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) ดังตารางที่ 4.5 ส่วนใหญ่ประกอบด้วย แคลเซียม (Ca) โครเมียม (Cr) โพแทสเซียม (K) เหล็ก (Fe) ฟอสฟอรัส (P) ซิลิกา (Si) กำมะถัน (S) สังกะสี (Zn) คลอรีน (Cl) ไทเทเนียม (Ti) ทองแดง (Cu) อาร์เซนิก (As) และ สตรอนเซียม (Sr) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.440, 6.170, 1.950, 1.630, 1.000, 0.640, 0.300, 0.151, 0.122, 0.095, 0.056, 0.007 และ0.004% ตามลำดับ สำหรับการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีภายในของต้นก้างปลาที่ปลูกในดิน (ตารางที่ 4.7) แสดงให้เห็นว่า ส่วนของรากพืชที่ปลูกในดินเป็นเวลา 30 วัน ส่วนใหญ่ประกอบด้วย โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) ซิลิกา (Si) โครเมียม (Cr) คลอรีน (Cl) เหล็ก (Fe) อะลูมินัม (Al) ไทเทเนียม (Ti) ฟอสฟอรัส (P) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) นิเกิล (Ni) โบรมีน (Br) สตรอนเซียม (Sr) และโมลิบดินัม (Mo) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.730, 1.720, 1.250, 0.930, 0.600, 0.490, 0.250, 0.123, 0.121, 0.076, 0.037, 0.009, 0.005, 0.002, 0.002 และ 0% ตามลำดับ และในระยะเวลาของการทดลองที่ 120 วัน พบว่าส่วนรากของต้นก้างปลาประกอบด้วย โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) เหล็ก (Fe) ซิลิกา (Si) คลอรีน (Cl) โครเมียม (Cr) ฟอสฟอรัส (P) อะลูมินัม (Al) ไทเทเนียม (Ti) แมงกานีส (Mn) โมลิบดินัม (Mo) นิเกิล (Ni) ทองแดง (Cu) โบรมีน (Br) สตรอนเซียม (Sr) และสังกะสี (Zn) มีค่าเท่ากับ 1.800,

1.620, 0.590, 0.490, 0.350, 0.340, 0.148, 0.147, 0.112, 0.084, 0.019, 0.012, 0.006, 0.001, 0.001 และ0% ตามลำดับ

ดังเห็นได้ว่า ต้นก้างปลาที่ปลูกด้วยวิธีไร้ดินที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาในการทดลอง 60 วัน พบองค์ประกอบทางเคมีภายในรากของต้นก้างปลาส่วนใหญ่ประกอบไปด้วย แคลเซียม (Ca) โครเมียม (Cr) และโพแทสเซียม (K) มีค่าเท่ากับ 6.440, 6.170 และ 1.950% ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณมากที่สุด นอกจากนี้ ในการศึกษาการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีปลูกพืชในดิน ที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียม 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลาการทดลอง 30 วัน พบว่า โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) ซิลิกา (Si) และโครเมียม (Cr) เป็นองค์ประกอบทางเคมีซึ่งมีปริมาณมากที่สุดเท่ากับ 1.730, 1.720, 1.250 และ 0.930% ตามลำดับส่วนที่ระยะเวลาการทดลอง 120 วัน ซึ่งประกอบไปด้วย โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) เหล็ก (Fe) ซิลิกา (Si) คลอรีน (Cl) และ โครเมียม (Cr) มีค่าเท่ากับ 1.800, 1.620, 0.590, 0.490, 0.350 และ 0.340% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่า จากการศึกษาการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการปลูกพืชไร้ดินนั้น มีการสะสมโครเมียมอยู่ในส่วนรากมากกว่าการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการปลูกพืชในดินถึงแม้ความเข้มข้นของโครเมียมในดินมีค่าสูงกว่าก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากพืชมีการดูดซับโครเมียมเข้าไปสะสมไว้ในส่วนของราก โดยรากของต้นก้างปลาสามารถดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ได้โดยตรง ซึ่งต่างกับวิธีการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีปลูกพืชในดิน โดยโครเมียมที่อยู่ในดินบางส่วนอาจเกาะยึดอยู่กับอนุภาคของดิน และบางส่วนถูกดูดซับไว้ในต้นก้างปลา นอกจากนี้ รากของต้นก้างปลายังมีองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ นอกเหนือจากโครเมียม ได้แก่ ปริมาณการสะสมโพแทสเซียม (K) และแคลเซียม (Ca) ซึ่งพบมากในส่วนรากของต้นก้างปลาที่ปลูกทั้งในดินและในน้ำ เนื่องจากทั้งในดินและในน้ำที่ทำการทดลองได้มีการใส่ปุ๋ยให้ทั้งสองระบบ จึงอาจทำให้ในดินและน้ำมีปริมาณโพแทสเซียม (K) อยู่มาก ซึ่งเป็นธาตุอาหารหลักที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ส่วนแคลเซียม (Ca) นั้นพบว่า เป็นธาตุอาหารรองแต่ก็มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชเช่นกัน

สำหรับการหาโครงสร้างของโครเมียมภายในต้นก้างปลา โดยวิธีการของเอ็กซเรย์ดิฟแฟรคชั่น (X-ray Diffraction: X-RD) เมื่อทำการวิเคราะห์หาโครงสร้างของโครเมียมแล้วพบว่า ไม่สามารถหาโครงสร้างของโครเมียมที่พบในต้นก้างปลาได้ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณโครเมียมที่สะสมอยู่ในต้นก้างปลามีปริมาณน้อยเกินไปสำหรับการวิเคราะห์หาโครงสร้างของโครเมียม จึงทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์หาโครงสร้างของโครเมียมในต้นก้างปลาได้

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบทางเคมีภายในต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) ที่ปลูกด้วยวิธีไร้ดิน [วิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-RF)]

ส่วนของพืช	ระยะเวลา (วัน)	องค์ประกอบทางเคมี	ความเข้มข้น (%)
ราก ที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียม 15 มิลลิกรัมต่อลิตร	60	Ca	6.440
		Cr	6.170
		K	1.950
		Fe	1.630
		P	1.000
		Si	0.640
		S	0.300
		Zn	0.151
		Cl	0.122
		Ti	0.095
		Cu	0.056
		As	0.007
		Sr	0.004

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบทางเคมีภายในต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) ที่ปลูกในดิน [วิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-RF)]

ส่วนของพืช	ระยะเวลา (วัน)	องค์ประกอบทางเคมี	ความเข้มข้น (%)
ราก	30	K	1.730
ที่ระดับความ		Ca	1.720
เข้มข้นของ		Si	1.250
สารประกอบ		Cr	0.930
โครเมียม 100		Cl	0.600
มิลลิกรัมต่อ		Fe	0.490
กิโลกรัมดิน		Al	0.250
		Ti	0.123
		P	0.121
		Mn	0.076
		Zn	0.037
		Cu	0.009
		Ni	0.005
		Br	0.002
		Sr	0.002
		Mo	0.000
ราก	120	K	1.800
ที่ระดับความ		Ca	1.620
เข้มข้นของ		Fe	0.590
สารประกอบ		Si	0.490
โครเมียม 100		Cl	0.350
มิลลิกรัมต่อ		Cr	0.340
กิโลกรัมดิน		P	0.148
		Al	0.147
		Ti	0.112
		Mn	0.084
		Mo	0.019
		Ni	0.012
		Cu	0.006
		Br	0.001
		Sr	0.001
		Zn	0.000

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่ปนเปื้อนในดินและในน้ำด้วยต้นก้างปลา

จากตารางที่ 4.7 แสดงถึงประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่ปนเปื้อนในดินและน้ำด้วยต้นก้างปลา พบว่า ต้นก้างปลามีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำสูงกว่าการกำจัดโครเมียมที่ปนเปื้อนในดิน โดยประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำมีค่าสูงสุดเท่ากับ 9.76% ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาในการกำจัด 60 วัน และมีประสิทธิภาพในการกำจัดได้มากว่าการกำจัดโครเมียมในดินประมาณ 50 เท่า โดยประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่ปนเปื้อนในดินมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.174% ที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียม 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลาในการกำจัด 60 วัน อีกทั้งในการกำจัดโครเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำ ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาของการทดลอง 15 วัน จนสิ้นสุดการทดลองที่ 60 วัน ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมมีค่าสูงกว่าประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในดิน ซึ่งมีระยะเวลาในการทดลอง 120 วัน ทั้งนี้อาจกล่าวสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำมีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมได้ดีกว่าการกำจัดโครเมียมที่ปนเปื้อนในดิน และเมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการกำจัดโครเมียมทั้งในดินและน้ำนั้น พบว่า การกำจัดโครเมียมในน้ำใช้เวลาในการกำจัดโครเมียมได้เร็วกว่าในการกำจัดโครเมียมในดิน และมีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมดีกว่าประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในดิน ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ระยะเวลาการทดลองที่ 60 วัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในน้ำดีที่สุด ในระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำสูงที่สุด ที่ระยะเวลาการทดลอง 45 วัน ในทางกลับกันการกำจัดโครเมียมที่ปนเปื้อนในดินกลับมีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมลดลงเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำจากทุกๆ ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ ตลอดระยะเวลาการทดลอง 60 วัน ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมก็ยังมีประสิทธิภาพสูงกว่าในดิน ทั้งนี้เนื่องจาก การกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการปลูกพืชไร้ดินนั้น รากพืชสามารถสัมผัสกับโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้โดยตรง ซึ่งต่างกับการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการปลูกพืชในดิน โดยโครเมียมถูกดูดซับไว้ในอนุภาคของดินทำให้พืชไม่สามารถดูดซับโครเมียมได้ในปริมาณที่สูงเหมือนกับการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการปลูกพืชไร้ดินได้

ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่ปนเปื้อนทั้งในดินและในน้ำ

ระดับความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)	ระยะเวลา (วัน)	ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม (%)
ดิน		
100	30	0.109
	60	0.174
	90	0.104
	120	0.048
น้ำ		
5	15	2.68
	30	4.91
	45	6.53
	60	9.76
10	15	1.35
	30	3.11
	45	3.66
	60	3.75
15	15	1.62
	30	2.57
	45	3.28
	60	2.53

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.1.1 การกำจัดโครเมียมด้วยต้นก้างปลาโดยวิธีการปลูกพืชในดิน (Phytoremediation)

1) ปริมาณการสะสมโครเมียมในดินและต้นก้างปลา

จากการศึกษาปริมาณการสะสมโครเมียมในดินชุดทดลอง ที่ระดับความเข้มข้นโครเมียม 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินพบว่า ปริมาณการสะสมโครเมียมในดินนั้นมีค่าเท่ากับ 150.59, 162.52, 157.42 และ 156.55 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน เป็นเวลา 30, 60, 90, และ 120 วัน ตามลำดับ โดยโครเมียมส่วนใหญ่ที่สะสมอยู่ในรูปโครเมียมไตรวาเลนท์ นอกจากนี้พบว่า การสะสมโครเมียมในรูปเฮกซาวาเลนท์มีปริมาณสูงสุดที่เวลา 30 วัน และลดปริมาณลงเรื่อยๆ จนสิ้นสุดการทดลองที่ 120 วัน และยังพบว่า ต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) มีความสามารถในการดูดซับโครเมียมที่ปนเปื้อนอยู่ในดินได้ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ต้นก้างปลาสามารถดูดซับโครเมียมที่ปนเปื้อนในดินและนำไปสะสมยังส่วนของราก ลำต้น และใบ ของพืชได้ โดยในส่วนรากของต้นก้างปลามีความสามารถในการดูดซับโครเมียมที่ปนเปื้อนในดินได้สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนของลำต้น และใบ ซึ่งในรากมีการสะสมโครเมียมทั้งหมด มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 390.57 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระยะเวลา 30 วัน และมีค่าลดลงเรื่อยๆ ส่วนการสะสมโครเมียมทั้งหมดในส่วนของลำต้นนั้นพบว่า มีปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดสูงสุดเท่ากับ 61.47 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระยะเวลา 30 วัน และการสะสมโครเมียมทั้งหมดในใบพบว่า มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนของราก และลำต้น โดยมีปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดสูงสุดเท่ากับ 58.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระยะเวลา 30 วัน ซึ่งกล่าวได้ว่า การกำจัดโครเมียมด้วยต้นก้างปลาที่ปนเปื้อนในดินที่ทำการทดลองครั้งนี้มีลักษณะแบบ Phytoextraction

2) ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม

การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในดิน ที่ระดับความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ต้นก้างปลามีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมมีแนวโน้มลดลง ตลอดระยะเวลาในการทดลองที่นานขึ้น ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.05-0.17% โดยในช่วงระยะเวลา 60 วัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมได้สูงสุด ทั้งนี้เนื่องมาจากในระหว่างการทดลองมีการรดน้ำทุกวัน ทำให้โครเมียมที่อยู่ในดินมีการหลุดและปนเปื้อนออกมาอยู่ในน้ำชะล้างได้ อีกทั้งโครเมียมบางส่วนอาจถูกยึดไว้กับอนุภาคของดินจึงทำให้พืชไม่สามารถที่จะดูดซับโครเมียมได้ อีกทั้งต้นก้างปลามีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นและมีมวลชีวภาพมากขึ้นเมื่อเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้นด้วย จึงอาจเป็นสาเหตุทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมได้จากมวลชีวภาพที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้การแสดงผลของประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น

5.1.2 การกำจัดโครเมียมด้วยต้นก้างปลาโดยวิธีการปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics)

1) ปริมาณการสะสมโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์และต้นก้างปลา

การวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมทั้งหมด และโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมชุดทดลองที่ 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาของการทดลองทดลองที่นานขึ้น โดยการสะสมโครเมียมทั้งหมดในน้ำเสียชุดทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 4.84-3.38, 9.69-7.16 และ14.27-12.91 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ต้นก้างปลามีความสามารถในการดูดซับโครเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำไปสะสมยังส่วนต่างๆ ของต้นก้างปลาได้ ซึ่งเรียกลักษณะการกำจัดโครเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำด้วยต้นก้างปลานี้ว่า Phytoextraction เช่นเดียวกัน

สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมทั้งหมด โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ และโครเมียมไตรวาเลนท์ ที่สะสมในพืชนั้นพบว่า ปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่สะสมในต้นก้างปลามีปริมาณสูงสุดเท่ากับ 3,770.32, 4,411.55และ 6,630.58 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ระดับความเข้มข้น 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในช่วง 60 วันของการทดลอง โดยในส่วนรากมีการสะสมโครเมียมมากที่สุด รองลงมาคือ ส่วนลำต้น และใบ และการสะสมโครเมียมในพืชนั้นส่วนใหญ่มีการสะสมโครเมียมในรูปโครเมียมไตรวาเลนท์ปริมาณมากที่สุด และอยู่ในรูปโครเมียมเฮกซาวาเลนท์น้อยที่สุด ทั้งนี้ปริมาณการสะสมโครเมียมมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการทดลองที่นานขึ้น โดยตลอดช่วงการทดลองพบว่า ในส่วนของรากมีสัดส่วนของการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ต่อโครเมียมเฮกซาวาเลนท์สูงสุดจากทุกระดับของความเข้มข้น

2) ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม

การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ระดับความเข้มข้น 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์สูงสุดเท่ากับ 9.76 และ 3.75% ในช่วงการทดลอง 60 วัน ที่ระดับความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ สำหรับระดับความเข้มข้นของโครเมียมที่ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าต้นก้างปลามีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในระดับต่ำเท่ากับ 3.28% ที่ระยะเวลาการทดลอง 45 วัน ทั้งนี้เนื่องจากโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่ระดับความเข้มข้น 0.5-5 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถทำอันตรายต่อพืชได้ โดยโครเมียมเฮกซาวาเลนท์จะเข้าไปยับยั้งการเจริญเติบโตของพืช จึงเป็นสาเหตุให้ต้นก้างปลามีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมต่ำกว่าระดับความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตาม การศึกษาครั้งนี้สามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า ต้นก้างปลามีความสามารถในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดี และมีประสิทธิภาพสูงกว่าการกำจัดโครเมียมในดิน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยการเติมสารคีเลท (Chelate) ลงไปในดินหรือในน้ำ เพื่อเพิ่มความสามารถของต้นก้างปลาในการดูดซับโครเมียมที่ปนเปื้อน

2) ควรมีการศึกษาทดลองการใช้ต้นก้างปลาในการกำจัดโครเมียมในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนโครเมียมจริง อาทิ บริเวณพื้นที่โรงงานฟอกหนัง และโรงงานชุบโลหะที่มีการปล่อยน้ำเสียขั้นสุดท้ายจากบ่อบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

3) ควรศึกษาองค์ประกอบทางเคมีในพืชต่อผลของการดูดซับและสะสมโลหะหนัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, สำนักงาน. 2547. **ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ เรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน**[Online]. แหล่งที่มา: http://www.parliament.go.th [2549, กรกฎาคม 26]

จันทร์นา สงวนรุ่งวงศ์. 2540. **การกำจัดโลหะหนักในน้ำโดยใช้ขี้เถ้าลอย**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สหสาขาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ดิเรก ทองอร่าม. 2546. **การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน**. ราชบุรี: ธรรมรักษ์การพิมพ์.

ดุษลักษณ์ ฐิติวร. 2543. **ประสิทธิภาพของแฝกหอม *Vetiveria zizanioides* (Linn.) Nash และแฝกดอน *Vetiveria nemoralis* (Balansa) A. Camus ในการกำจัดสารหนูที่ปนเปื้อนในดิน.** วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ถวัลย์ พัฒนเสถียรพงศ์. 2534. **ปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Soilless Culture)**. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์พรานนกการพิมพ์.

นพดล เรียบเลิศหิรัญ. 2538. **ปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Soilless Culture)**. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์รั้วเขียว.

ป้องกันควบคุมโรคที่ 9, สำนักงาน. 2541. **โรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม**[Online]. แหล่งที่มา: http://www.dpc9.ddc.moph.go.th [2548, กรกฎาคม 2]

ปรีชา พงศ์ภมร. 2532. **ตำรายาแพทย์แผนโบราณ**[Online]. แหล่งที่มา: http://www.thaidetail.com/WEB351T.htm [2548, กรกฎาคม 25]

พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. 2549(ก). เรื่องเก่าที่คุ้นเคย...กับคำใหม่ที่เรียกว่า...Phytoremediation. **วารสารสิ่งแวดล้อม** 10 (1): 16-19.

พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. 2549(ข). การกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังโดยวิธีการดูดซับทางชีวภาพด้วยพืชใบเลี้ยงคู่และพืชใบเลี้ยงเดี่ยว. **วารสารวิจัยสภาวะแวดล้อม** 1 (1): 24-33.

พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย และพันธวัศ สัมพันธ์พานิช. 2550. การกำจัดโครเมียมโดยใช้พืชน้ำ. **วารสารวิจัยสภาวะแวดล้อม**. 29: 69-79.

เพ็ญประภา คำป้อม. 2541. **การกำจัดโครเมียมไอออนในน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังด้วยวิธีตกตะกอนด้วยขี้เถ้าลอย**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มงคล เพ็ญสายใจ, ศุภัสรา จิรวิทยาภรณ์, พรรษพร พชรทิพย์, เชาวนีย์ ยงไสว และปริยา ปะบุญเรือง. 2541. การดูดซับโครเมียม (+6) ในน้ำเสีย โดย Sacchaomyces cerevisiae. ใน **เอกสารประกอบการสัมมนาทางวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24**, หน้า 626-627. 19-21 ตุลาคม 2541. ณ ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ กรุงเทพมหานคร.

วงศ์พงา เส็งสาย. 2544. **ประสิทธิภาพของหญ้าแฝกหอม *Vetiveria zizaniodes* (Linn.) Nash และแฝกดอน *Vetiveria nemoralis* A. Camus ในการกำจัดโครเมียมในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อการบำบัดน้ำเสียขั้นสุดท้ายจากโรงฟอกหนัง**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิชาการเกษตร, กรม. 2548. **ประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่อง มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2548**. [Online]. แหล่งที่มา: http://www.203.146.36.21/builder/moac/index [2550, กันยายน 21]

สถาบันเทคโนโลยีน้ำอุตสาหกรรม. 2549. **มาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม** [Online]. แหล่งที่มา: http://www2.diw.go.th/iwti [2550, พฤศจิกายน 1]

สมชาย สกุลอิสริยาภรณ์. 2539. **โครงการแก้ไขปัญหาน้ำเสียเจ้าพระยา**. กองอนามัยสิ่งแวดล้อม. 105-142.

สรวิทย์ งามพร้อมพันธุ์. 2544. **ประสิทธิภาพของบอน *Colocasia esculenta* (L.) Schott ในการกำจัดโครเมียมในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อการบำบัดน้ำเสียขั้นสุดท้ายจากโรงฟอกหนัง.** วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุบัณฑิต นิ่มรัตน์. 2549. **จุลชีววิทยาทางดิน**. กรุงเทพมหานคร: โอเดียนสโตร์.

อรรณพ หอมจันทร์. 2544. **ความเป็นพิษของโลหะหนักบางชนิดจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียชุมชน ต่อผักคะน้า *(Brassica oleracea L. Var. alboglabra Bailey)* และผักกาดหอม *(Lactuca sativa L.)* ในสภาพเรือนทดลอง**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อธิชัย นพแก้ว. 2539. **การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดติดผิวโลหะหนักจากน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านบ่อเก็บกัก**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อุตสาหกรรม, กระทรวง . 2539. **ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน**[Online]. แหล่งที่มา: http://www.pcd.go.th [2550, กรกฎาคม 2]

อานัฐ ตันโช. 2548. **การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน**. กรุงเทพมหานคร: ฝ่ายกิจการยาเสพติด สถานฑูตอเมริกาประจำประเทศไทย.

ภาษาอังกฤษ

Aldrich, M.V., Gardea-Toprresdey, J.L., Peralta-Videa, J.R. and Parsons. J.G. 2003. Uptake and Reduction of Cr (VI) by Mesquite (prosopis spp.): Chromate-Plant Interaction in Hydroponic and Solid Media Studied Using XAS. **Environ. Sci. Technol**. 37(9): 1859-1864.

Arteaga, S., Gardea-Torresdey, J.L., Chianelli, R., Pingitore, N., Mackay, W. and Arenas, J. 2000. Spectroscopic Confirmation of Chromium Uptake by Creosote Bush (*Larrea tridentate*) Using Hydroponics. In **Proceeding of the 2000 Conference on Hazardous Waste Research**, pp. 115-124.

Atta Aly, M.A., Shehata, N.G. and Kobbia, T.M. 1991. Effect of cobalt on tomato plant growth and mineral content. **Ann. Agril. Sci**. 36: 617-624.

Bennicelli, R., Stezpniewska, Z., Banach, A., Szajnocha, K. and Ostrowski, J. 2004. The ability of *Azolla caroliniana* to remove heavy metals (Hg(II), Cr(III), Cr(VI)) from municipal waste water. **Chemosphere** 55: 141-146.

Cervantes, C., Compos-Garcia, J., Devars, S., Gutierrez-Corona, F., Loza-Tavera, H., Torres-Guzman, J.C. and Moreno-Sanchez, R. 2001. Interaction of chromium with microorganisms and plants. **FEMS Microbiology Reviews** 25: 335-347.

Chen Yahua, Shen Zhenguo and Li Xiangdong. 2004. The use of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) in the phytoremediation of soils contaminated with heavy metals. **Applied Grochemistry** 19: 1553-1565.

Choo, T.P., Lee, C.K., Low, K.S and Hishamuddin, O. 2005. Accumulation of Chromium (VI) from aqueous solutions using water lilies (*Nymphaea spontanea*). **Chemosphere**. 62: 961-967.

Choudhury S. and Panda S.K. 2005. Toxic Metals in Plants: Chromium Stress in Plants. **Braz. J. Plant Physiol**. 17(1): 95-102.

Corradi M.G., Bianchi A. and Albasini A. 1993. Chromium toxicity in Salvia sclarea: Effects of hexavalent chromium on seed germination and seedling development. **Environ. Exp. Bot**. 33: 405-413.

Hasekawa, I. 2002. Phytoremediation: a Novel Strategy for Removing Toxic Heavy Metals from Contaminated Soils Using Plants. **Farming Japan**. 36(6): 10-15.

Interstate Technology and Regulatory Cooperration (ITRC). 1999. **Phytoremediation Decision Tree**. The Interstate Technology and Regulatory Cooperration Work Group, Phytoremediation Work Team, USA.

Jiraporn Yongpisanphop. 2003. **Accumulation and Toxicity of Lead and Chromium in *Hydrocotyle umbellate* L**. Master's Thesis, Department of Environmental Biology Science, Mahidol University.

Kimbrough, D.E. and Cohen, Y. 1999. A critical assessment of Chromium in the Environment. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology** 29(1): 1-46.

Kumar, P.B.A.N., Dushenkov, V., Motto, H. and Raskin, I. 1995. Phytoextraction: The Use of Plants to Remove Heavy Metals from Soils. **Environ. Sci. Technol**. 29: 1232-1241.

Liu, D.H., Jaing, W.S. and Li, M.X. 1993. Effect of chromium on root growth and cell division of Allium cepa. **Israel J. Plant Sci**. 42: 235-243.

Lytle, C.M., Lytle, F.W., Yang, N., Qian, J.H., Hansen, D., Zayd, A. and Terry, N. 1998. Reduction of Cr (VI) to Cr (III) by Wetland Plants: Potential for In Situ Heavy Metal Detoxification. **Environ. Sci. Technol**. 32(20): 3087-3093.

McCutcheon, S. C. and Schnoor, J. L. 2003. Overview of phytotransformation and control of wastes. **Phytoremediation: Transformation and Control of Contaminants**, New Jersey: John Wiley & Sons, pp. 3-58.

Memon, A.R., Aktoprakligil, D., Ozdemir, A. and Vertii, A. 2001. Heavy Metal Accumulation and Detoxification Mechanisms in Plants. **Turk J. Bot**. 25: 111-121.

Moral, R., Navarro Pedreno, J., Gomez, I. and Mataix, J. 1995. Effects of Chromium on the Nutrient Element Content and Morphology of Tomato. **Journal of plant nutrition** 18: 815-822.

Nayari, H.F., Szalai, T., Kadar, I. and Castho, P. 1997. Germination characteristics of pea seeds originating from a field trial treated with different level of harmful elements. **Acta Agron. Hung**. 45: 147-154.

Pulford, I.D., Watson, C. and Mcgregor, S.D. 2001. Uptake of Chromium by Trees: Prospects for Phytoremediation. **Environ. Grochem. Hlth**. 23: 307-315.

Rehwold, R., Lasko, L., Shaw, C. and Wirhowski, E. 1973. The Acute Toxicity of some Heavy Metals Irons toward Benthic Organism. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicity** 10: 291-294.

Salt, D.E., Blaylock. M., Kumar, N.P.B.A., Dushenkov, V., Ensley, D., Chet, I. and Raskin, I. 1995. Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. **Biotechnology** 13: 468-474.

Sampanpanish, P., Pongsapich, W., Khaodhiar, S. and Khan, E. 2004. Chromium Removal from Soil by Phytoremediation with Weed Plant Species in Thailand. In **Proceeding 36th Mid-Atlantic Industrial and Hazardous Waste Conference**. pp. 34-43.

Sampanpanish, P. 2005. **Chromium removal by phytoremediation and biosorption**. Doctoral dissertation. Inter-Department of Environmental Management. Chulalongkorn University.

Sampanpanish, P. 2006(a). Chromium Uptake by Using Hydroponics with Monocot Weed Plant Species in Thailand. In **International Conference on Hazardous Waste Management for a Sustainable Future**. p. 59.

Sampanpanish, P. 2006(b). Mechanisms of Hexavalent Chromium Removal by Using Hydroponics with Weed Plant Species. In **the 12th Korea-Thailand Conference on Environmental Engineering**. pp. 122-126.

Sampanpanish, P., Pongsapich, W., Khaodhiar, S. and Khan, E. 2006. Chromium Removal from Soil by Phytoremediation with Weed Plant Species in Thailand. In Water, Air, and Soil Focus. **Springer Netherlands** 6(1-2): 191-206.

Sampanpanish, P. and Tippayasak, K. 2007. Chromium Uptake on Speciation and Phytotoxicity Using Hydroponics by Aquatic Plants. In **Proceeding at The 34th Australasian Chemical Engineering Conference (CHEMECA 2007)**. p. 72.

Skeffington, R.A., Shewry, P.R. and Peterson, P.J. 1976. Chromium Uptake and Transport in Barley Seedlings (*Hordeum vulgave* L.). **Planta**. 132: 209-216.

Sustainable Strategies. 1997. **Phytoremediation**[Online]. Available from: http://www.ecological-engineering.com/phytorem.html [2006, September 2]

USEPA. 1992. **Chromium Hexavalent (Colorimetric)**. Method 7196A, Washington D.C., USA.

USEPA. 1996a. **Microwave Assisted Acid Digestion of Siliceous and Organically Based Matrices**. Method 3052, Washington D.C., USA.

USEPA. 1996b. **Alkaline Digestion for Hexavalent Chromium**. Method 3060, Washington D.C., USA.

USEPA. 1998. **A CitiZen's Guide to Phytoremediation**. Office of Solid Waste and Emergency Response.Washington D.C., USA.

USEPA. 1999. **Phytoremediation Resource Guide**. Office of Solid Waste and Emergency Response.Washington D.C., USA.

USEPA. 2000. **Introduction to Phytoremediation**. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development.Cincinnati, OH, USA.

Vajpayee, P., Sharma, S.C., Tripathi, R.D., Rai, U.N. and Yunus, M. 1999. Bioaccumulation of chromium and toxicity to photosynthetic pigments, nitrate reductase activity and protein content of Nelumbo nucifera Gaertn. **Chemosphere** 39: 2159-2169.

Van Der Putte, I., Brinkhorst, M.A. and Koeman, J.H. 1981. Effect of pH on the Acute Toxicity of Hexavalent Chromium to *Rainbow Trout* (Salmo Gairdneri). **Aquatic Toxicity**1: 129-142.

Wood, C.W. and Holliday, A.K. 1976. **Inorganic Chemistry**. 3rd ed. USA: Butterworth.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตารางผนวกที่ 1 มาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม

ตารางผนวกที่ 2 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด (TCr) โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr (VI)] และโครเมียม ไตรวาเลนท์ [Cr (III)] ในส่วนต่างๆ ของพืช ที่ปลูกในดิน ที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียม 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน

ตารางผนวกที่ 3 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด (TCr) โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr (VI)] และโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr (III)] ในดินที่ทำการปลูกพืช

ตารางผนวกที่ 4 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด (TCr) โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr (VI)] และโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr (III)] ในดินที่ไม่ได้ปลูกพืช

ตารางผนวกที่ 5 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด TCr โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr (VI)] และโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr (III)] ในน้ำชะล้างจากจานรองกระถางที่มีการปลูกต้นก้างปลา

ตารางผนวกที่ 6 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด TCr โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr (VI)] และโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr (III)] ในน้ำชะล้างจากจานรองกระถางที่ไม่มีการปลูกต้นก้างปลา

ตารางผนวกที่ 7 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด TCr โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr (VI)] และโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr (III)] ในส่วนต่างๆ ของพืชด้วยวิธีปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics)

ตารางผนวกที่ 8 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด TCr โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr (VI)] และโครเมียมไตรวา เลนท์ [Cr (III)] ในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ด้วยวิธีปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics)

ตารางผนวกที่ 9 คุณภาพน้ำเสียสังเคราะห์ในชุดควบคุม (ไม่มีพืช)

ตารางผนวกที่ 10 คุณภาพน้ำเสียสังเคราะห์ในชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา)

ตารางผนวกที่ 1 มาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าที่กำหนด
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	5.5-9.0
ค่าทีดีเอส (TDS)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่มากกว่า 3000
ค่าสารแขวนลอย (SS)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่มากกว่า 50
ปรอท (Hg)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่มากกว่า .005
เซเลเนียม (Se)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่มากกว่า 0.02
แคดเมียม (Cd)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่มากกว่า 0.03
ตะกั่ว (Pb)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่มากกว่า 0.2
อาร์เซนิค (As)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่มากกว่า 0.25
โครเมียม (Cr)	มิลลิกรัมต่อลิตร	-
Cr (VI)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่มากกว่า 0.25
Cr (III)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่มากกว่า 0.75
บาเรียม (Ba)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่มากกว่า 1.0
นิเกิล (Ni)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่มากกว่า 1.0
ทองแดง (Cu)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่มากกว่า 2.0
สังกะสี (Zn)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่มากกว่า 5.0
แมงกานีส (Mn)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่มากกว่า 5.0
ซัลไฟด์ (Sulphide)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่มากกว่า 1.0
ไซยาไนด์ (Cyanide)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่มากกว่า 0.2
ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่มากกว่า 1.0
สารประกอบฟีนอล (Phenolic Compound)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่มากกว่า 1.0
คอลรีนอิสระ (Free Chlorine)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่มากกว่า 1.0
เพสติไซด์ (Pesticide)		ต้องไม่มี
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	ไม่มากกว่า 40

ที่มา: สถาบันเทคโนโลยีน้ำอุตสาหกรรม, 2549

ตารางผนวกที่ 2 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด (TCr) โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] และโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] ในส่วนต่างๆ ของพืช ที่ปลูกในดิน ที่ระดับความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียม 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน

ระยะเวลา (วัน)	ตัวอย่างพืช	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
30	ราก-1	348.500	68.712	279.788
	ราก-2	433.500	141.884	291.616
	ราก-3	389.700	87.042	302.658
	ค่าเฉลี่ย	390.567	99.213	291.354
	SEM	24.541	21.982	6.603
30	ลำต้น-1	46.400	41.600	4.800
	ลำต้น-2	94.300	92.640	1.660
	ลำต้น-3	43.700	39.866	3.834
	ค่าเฉลี่ย	61.467	58.036	3.431
	SEM	16.435	17.310	0.929
30	ใบ-1	0.000	0.000	0.000
	ใบ-2	75.000	65.858	9.142
	ใบ-3	101.000	100.104	0.896
	ค่าเฉลี่ย	58.667	55.321	3.346
	SEM	30.278	29.374	2.910
60	ราก-1	346.000	30.953	315.047
	ราก-2	392.800	104.714	288.086
	ราก-3	297.100	97.689	199.411
	ค่าเฉลี่ย	345.300	77.786	267.514
	SEM	27.628	23.504	34.930

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ตัวอย่างพืช	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
60	ลำต้น-1	0.000	0.000	0.000
	ลำต้น-2	0.000	0.000	0.000
	ลำต้น-3	0.000	0.000	0.000
	ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.000
	SEM	0.000	0.000	0.000
60	ใบ-1	0.000	0.000	0.000
	ใบ-2	0.000	0.000	0.000
	ใบ-3	0.000	0.000	0.000
	ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.000
	SEM	0.000	0.000	0.000
90	ราก-1	299.300	64.668	234.632
	ราก-2	254.800	63.571	191.229
	ราก-3	224.800	85.835	138.965
	ค่าเฉลี่ย	259.633	71.358	188.275
	SEM	21.642	7.245	27.656
90	ลำต้น-1	0.000	0.000	0.000
	ลำต้น-2	0.000	0.000	0.000
	ลำต้น-3	0.000	0.000	0.000
	ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.000
	SEM	0.000	0.000	0.000

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ตัวอย่างพืช	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
90	ใบ-1	0.000	0.000	0.000
	ใบ-2	0.000	0.000	0.000
	ใบ-3	0.000	0.000	0.000
	ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.000
	SEM	0.000	0.000	0.000
120	ราก-1	200.700	64.980	135.720
	ราก-2	189.000	38.856	150.144
	ราก-3	208.400	40.393	168.007
	ค่าเฉลี่ย	199.367	48.076	151.290
	SEM	5.640	8.463	9.338
120	ลำต้น-1	0.000	0.000	0.000
	ลำต้น-2	0.000	0.000	0.000
	ลำต้น-3	0.000	0.000	0.000
	ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.000
	SEM	0.000	0.000	0.000
120	ใบ-1	0.000	0.000	0.000
	ใบ-2	0.000	0.000	0.000
	ใบ-3	0.000	0.000	0.000
	ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.000
	SEM	0.000	0.000	0.000

ตารางผนวกที่ 3 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด (TCr) โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] และโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] ในดินที่ทำการปลูกพืช

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)
30	ชุดทดลอง (0)-1	62.01	0.00	62.01
	ชุดทดลอง (0)-2	62.23	0.00	62.23
	ชุดทดลอง (0)-3	62.90	0.00	62.90
	ค่าเฉลี่ย	62.38	0.00	62.38
	SEM	0.27	0.00	0.27
30	ชุดทดลอง (100)-1	148.66	54.78	93.87
	ชุดทดลอง (100)-2	153.59	56.33	97.26
	ชุดทดลอง (100)-3	149.54	53.52	96.01
	ค่าเฉลี่ย	150.59	54.88	95.71
	SEM	1.52	1.41	0.99
60	ชุดทดลอง (0)-1	61.02	0.00	61.02
	ชุดทดลอง (0)-2	70.44	0.00	70.44
	ชุดทดลอง (0)-3	38.52	0.00	38.52
	ค่าเฉลี่ย	56.66	0.00	56.66
	SEM	9.47	0.00	9.47
60	ชุดทดลอง (100)-1	153.18	52.99	100.19
	ชุดทดลอง (100)-2	170.48	52.13	118.35
	ชุดทดลอง (100)-3	163.92	60.05	103.86
	ค่าเฉลี่ย	162.52	55.05	107.47
	SEM	5.04	2.51	5.54

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)
90	ชุดทดลอง (0)-1	52.95	0.00	52.95
	ชุดทดลอง (0)-2	60.39	0.00	60.39
	ชุดทดลอง (0)-3	54.04	0.00	54.04
	ค่าเฉลี่ย	55.79	0.00	55.79
	SEM	18.01	0.00	18.01
90	ชุดทดลอง (100)-1	155.26	35.55	119.72
	ชุดทดลอง (100)-2	158.34	51.47	106.87
	ชุดทดลอง (100)-3	158.67	46.63	112.04
	ค่าเฉลี่ย	157.42	44.55	112.88
	SEM	1.08	3.81	3.73
120	ชุดทดลอง (0)-1	46.97	0.00	46.97
	ชุดทดลอง (0)-2	50.42	0.00	50.42
	ชุดทดลอง (0)-3	44.93	0.00	44.93
	ค่าเฉลี่ย	47.44	0.00	47.44
	SEM	1.60	0.00	1.60
120	ชุดทดลอง (100)-1	159.66	30.28	129.38
	ชุดทดลอง (100)-2	156.57	34.66	121.92
	ชุดทดลอง (100)-3	153.41	50.34	103.07
	ค่าเฉลี่ย	156.55	38.43	118.12
	SEM	1.80	6.09	7.83

ตารางผนวกที่ 4 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด (TCr) โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] และโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] ในดินที่ไม่ได้ปลูกพืช

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)
1	ชุดควบคุม (0)-1	53.56	0.00	53.56
	ชุดควบคุม (0)-2	54.95	0.00	54.95
	ชุดควบคุม (0)-3	54.88	0.00	54.88
	ค่าเฉลี่ย	54.46	0.00	54.46
	SEM	0.45	0.00	0.45
1	ชุดควบคุม (100)-1	148.10	10.88	137.22
	ชุดควบคุม (100)-2	143.78	6.34	137.44
	ชุดควบคุม (100)-3	133.58	5.60	127.98
	ค่าเฉลี่ย	141.82	7.61	134.21
	SEM	4.30	1.65	3.12
15	ชุดควบคุม (0)-1	54.72	0.00	54.72
	ชุดควบคุม (0)-2	52.28	0.00	52.28
	ชุดควบคุม (0)-3	55.00	0.00	55.00
	ค่าเฉลี่ย	54.00	0.00	54.00
	SEM	0.86	0.00	0.86
15	ชุดควบคุม (100)-1	136.90	4.51	132.38
	ชุดควบคุม (100)-2	136.70	6.71	129.99
	ชุดควบคุม (100)-3	195.51	9.69	185.82
	ค่าเฉลี่ย	156.37	6.97	149.40
	SEM	19.57	1.50	18.22

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)
30	ชุดควบคุม (0)-1	58.92	0	58.92
	ชุดควบคุม (0)-2	63.56	0	63.56
	ชุดควบคุม (0)-3	52.64	0	52.64
	ค่าเฉลี่ย	58.37	0	58.37
	SEM	5.48	0	5.48
30	ชุดควบคุม (100)-1	174.24	6.63	167.61
	ชุดควบคุม (100)-2	167.61	8.27	159.33
	ชุดควบคุม (100)-3	163.66	13.45	150.22
	ค่าเฉลี่ย	168.50	9.45	159.05
	SEM	3.09	2.05	5.02
60	ชุดควบคุม (0)-1	60.36	0.00	60.36
	ชุดควบคุม (0)-2	56.19	0.00	56.19
	ชุดควบคุม (0)-3	60.49	0.00	60.49
	ค่าเฉลี่ย	59.01	0.00	59.01
	SEM	1.41	0.00	1.41
60	ชุดควบคุม (100)-1	160.80	6.31	154.49
	ชุดควบคุม (100)-2	185.28	7.26	178.02
	ชุดควบคุม (100)-3	175.31	7.11	168.20
	ค่าเฉลี่ย	173.80	6.89	166.90
	SEM	7.11	0.30	6.82

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)
90	ชุดควบคุม (0)-1	62.17	0.00	62.17
	ชุดควบคุม (0)-2	58.19	0.00	58.19
	ชุดควบคุม (0)-3	53.59	0.00	53.59
	ค่าเฉลี่ย	57.98	0.00	57.98
	SEM	2.48	0.00	2.48
90	ชุดควบคุม (100)-1	175.65	5.60	170.06
	ชุดควบคุม (100)-2	168.84	6.29	162.54
	ชุดควบคุม (100)-3	179.92	7.93	171.99
	ค่าเฉลี่ย	174.80	6.61	168.20
	SEM	3.23	0.69	2.88

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางผนวกที่ 5 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด TCr โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr (VI)] และโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr (III)] ในน้ำชะล้างจากจานรองกระถางที่ทำการปลูกต้นก้างปลา

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
30	ชุดทดลอง (0)-1	0.000	0.000	0.000
	ชุดทดลอง (0)-2	0.000	0.000	0.000
	ชุดทดลอง (0)-3	0.000	0.000	0.000
	ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.000
	SEM	0.000	0.000	0.000
30	ชุดทดลอง (100)-1	0.958	0.783	0.175
	ชุดทดลอง (100)-2	1.000	0.369	0.631
	ชุดทดลอง (100)-3	1.120	0.572	0.548
	ค่าเฉลี่ย	1.026	0.575	0.451
	SEM	0.049	0.120	0.140
60	ชุดทดลอง (0)-1	0.000	0.000	0.000
	ชุดทดลอง (0)-2	0.000	0.000	0.000
	ชุดทดลอง (0)-3	0.000	0.000	0.000
	ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.000
	SEM	0.000	0.000	0.000
60	ชุดทดลอง (100)-1	0.500	0.191	0.309
	ชุดทดลอง (100)-2	1.057	0.066	0.991
	ชุดทดลอง (100)-3	2.614	0.063	2.551
	ค่าเฉลี่ย	1.390	0.107	1.284
	SEM	0.633	0.042	0.664

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
90	ชุดทดลอง (0)-1	0.000	0.000	0.000
	ชุดทดลอง (0)-2	0.000	0.000	0.000
	ชุดทดลอง (0)-3	0.000	0.000	0.000
	ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.000
	SEM	0.000	0.000	0.000
90	ชุดทดลอง (100)-1	2.679	0.067	2.612
	ชุดทดลอง (100)-2	0.163	0.027	0.136
	ชุดทดลอง (100)-3	3.822	0.186	3.636
	ค่าเฉลี่ย	2.221	0.094	2.128
	SEM	1.081	0.048	1.039
120	ชุดทดลอง (0)-1	0.000	0.000	0.000
	ชุดทดลอง (0)-2	0.000	0.000	0.000
	ชุดทดลอง (0)-3	0.000	0.000	0.000
	ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.000
	SEM	0.000	0.000	0.000
120	ชุดทดลอง (100)-1	1.377	0.128	1.248
	ชุดทดลอง (100)-2	3.724	0.010	3.715
	ชุดทดลอง (100)-3	1.539	0.126	1.413
	ค่าเฉลี่ย	2.213	0.088	2.125
	SEM	0.757	0.039	0.796

ตารางผนวกที่ 6 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด TCr โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr (VI)] และโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr (III)] ในน้ำชะล้างจากจานรองกระถางที่ไม่มีการปลูกต้นก้างปลา

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
1	ชุดควบคุม (0)-1	0.000	0.000	0.000
	ชุดควบคุม (0)-2	0.000	0.000	0.000
	ชุดควบคุม (0)-3	0.000	0.000	0.000
	ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.000
	SEM	0.000	0.000	0.000
1	ชุดควบคุม(100)-1	340.36	290.56	49.80
	ชุดควบคุม(100)-2	405.56	310.19	95.36
	ชุดควบคุม (100)-3	376.08	312.37	63.71
	ค่าเฉลี่ย	374.00	304.37	69.62
	SEM	31.60	5.80	25.70
15	ชุดควบคุม (0)-1	0.000	0.000	0.000
	ชุดควบคุม (0)-2	0.000	0.000	0.000
	ชุดควบคุม (0)-3	0.000	0.000	0.000
	ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.000
	SEM	0.000	0.000	0.000
15	ชุดควบคุม(100)-1	66.86	66.84	0.02
	ชุดควบคุม(100)-2	87.91	85.84	2.07
	ชุดควบคุม (100)-3	81.88	74.85	7.03
	ค่าเฉลี่ย	78.88	75.84	3.04
	SEM	10.84	9.92	2.00

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
30	ชุดควบคุม (0)-1	0.000	0.000	0.000
	ชุดควบคุม (0)-2	0.000	0.000	0.000
	ชุดควบคุม (0)-3	0.000	0.000	0.000
	ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.000
	SEM	0.000	0.000	0.000
30	ชุดควบคุม(100)-1	45.36	37.02	8.34
	ชุดควบคุม(100)-2	32.26	22.31	9.95
	ชุดควบคุม (100)-3	38.81	25.16	13.65
	ค่าเฉลี่ย	38.81	28.16	10.65
	SEM	6.6	8.9	2.3
60	ชุดควบคุม (0)-1	0.000	0.000	0.000
	ชุดควบคุม (0)-2	0.000	0.000	0.000
	ชุดควบคุม (0)-3	0.000	0.000	0.000
	ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.000
	SEM	0.000	0.000	0.000
60	ชุดควบคุม(100)-1	4.13	0.57	3.56
	ชุดควบคุม(100)-2	2.86	0.41	2.45
	ชุดควบคุม (100)-3	3.94	0.53	3.41
	ค่าเฉลี่ย	3.64	0.5	3.14
	SEM	0.8	0.1	0.7

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
90	ชุดควบคุม (0)-1	0.000	0.000	0.000
	ชุดควบคุม (0)-2	0.000	0.000	0.000
	ชุดควบคุม (0)-3	0.000	0.000	0.000
	ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.000
	SEM	0.000	0.000	0.000
90	ชุดควบคุม(100)-1	3.53	1.19	2.34
	ชุดควบคุม(100)-2	2.39	1.13	1.26
	ชุดควบคุม (100)-3	3.48	1.11	2.37
	ค่าเฉลี่ย	3.13	1.14	1.99
	SEM	0.8	0.04	0.7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางผนวกที่ 7 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด TCr โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] และ โครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] ในส่วนต่างๆ ของพืชด้วยวิธีปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ตัวอย่าง	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
15 วัน	0	ราก-1	0.00	0.00	0.00
		ราก-2	0.00	0.00	0.00
		ราก-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	0.00	0.00	0.00
		SEM	0.00	0.00	0.00
15 วัน	0	ลำต้น-1	0.00	0.00	0.00
		ลำต้น-2	0.00	0.00	0.00
		ลำต้น-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	0.00	0.00	0.00
		SEM	0.00	0.00	0.00
15 วัน	0	ใบ-1	0.00	0.00	0.00
		ใบ-2	0.00	0.00	0.00
		ใบ-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	0.00	0.00	0.00
		SEM	0.00	0.00	0.00
15 วัน	5	ราก-1	578.31	62.25	516.07
		ราก-2	2500.00	618.15	1312.53
		ราก-3	1751.82	579.90	1741.25
		ค่าเฉลี่ย	1610.05	420.10	1189.95
		SEM	559.25	179.27	358.95

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ตัวอย่าง	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
15 วัน	5	ลำต้น-1	202.42	80.90	121.52
		ลำต้น-2	116.21	48.68	67.53
		ลำต้น-3	54.39	38.19	16.20
		ค่าเฉลี่ย	124.34	55.93	68.42
		SEM	42.93	12.85	30.41
15 วัน	5	ใบ-1	0.00	0.00	0.00
		ใบ-2	0.00	0.00	0.00
		ใบ-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	0.00	0.00	0.00
		SEM	0.00	0.00	0.00
15 วัน	10	ราก-1	3903.85	696.86	3206.99
		ราก-2	850.65	416.98	433.67
		ราก-3	1896.07	385.63	1510.43
		ค่าเฉลี่ย	2216.85	499.82	1717.03
		SEM	895.86	98.93	807.23
15 วัน	10	ลำต้น-1	64.04	32.33	31.71
		ลำต้น-2	70.07	51.26	18.81
		ลำต้น-3	88.80	51.91	36.90
		ค่าเฉลี่ย	74.31	45.17	29.14
		SEM	7.45	6.42	5.38

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ตัวอย่าง	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
15 วัน	5	ลำต้น-1	202.42	80.90	121.52
		ลำต้น-2	116.21	48.68	67.53
		ลำต้น-3	54.39	38.19	16.20
		ค่าเฉลี่ย	124.34	55.93	68.42
		SEM	42.93	12.85	30.41
15 วัน	5	ใบ-1	0.00	0.00	0.00
		ใบ-2	0.00	0.00	0.00
		ใบ-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	0.00	0.00	0.00
		SEM	0.00	0.00	0.00
15 วัน	10	ราก-1	3903.85	696.86	3206.99
		ราก-2	850.65	416.98	433.67
		ราก-3	1896.07	385.63	1510.43
		ค่าเฉลี่ย	2216.85	499.82	1717.03
		SEM	895.86	98.93	807.23
15 วัน	10	ลำต้น-1	64.04	32.33	31.71
		ลำต้น-2	70.07	51.26	18.81
		ลำต้น-3	88.80	51.91	36.90
		ค่าเฉลี่ย	74.31	45.17	29.14
		SEM	7.45	6.42	5.38

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ตัวอย่าง	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
15 วัน	10	ใบ-1	19.71	17.73	1.97
		ใบ-2	112.66	111.62	1.04
		ใบ-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	44.12	43.12	1.01
		SEM	34.74	34.63	0.57
15 วัน	15	ราก-1	4216.22	571.90	3644.32
		ราก-2	4623.49	487.16	4136.33
		ราก-3	3824.79	973.72	2851.06
		ค่าเฉลี่ย	4221.50	677.59	3543.91
		SEM	230.58	150.07	374.41
15 วัน	15	ลำต้น-1	48.78	47.15	1.63
		ลำต้น-2	75.51	56.84	18.66
		ลำต้น-3	40.74	38.75	1.99
		ค่าเฉลี่ย	55.01	47.58	7.43
		SEM	10.51	5.23	5.62
15 วัน	15	ใบ-1	91.26	57.31	3.95
		ใบ-2	103.60	75.58	28.02
		ใบ-3	101.88	107.58	14.30
		ค่าเฉลี่ย	95.58	80.16	15.42
		SEM	3.86	14.69	6.97

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ตัวอย่าง	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
30 วัน	0	ราก-1	0.00	0.00	0.00
		ราก-2	0.00	0.00	0.00
		ราก-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	0.00	0.00	0.00
		SEM	0.00	0.00	0.00
30 วัน	0	ลำต้น-1	0.00	0.00	0.00
		ลำต้น-2	0.00	0.00	0.00
		ลำต้น-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	0.00	0.00	0.00
		SEM	0.00	0.00	0.00
30 วัน	0	ใบ-1	0.00	0.00	0.00
		ใบ-2	0.00	0.00	0.00
		ใบ-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	0.00	0.00	0.00
		SEM	0.00	0.00	0.00
30 วัน	5	ราก-1	2793.56	440.67	2352.89
		ราก-2	3283.90	647.49	2636.41
		ราก-3	3351.35	666.84	2684.51
		ค่าเฉลี่ย	3142.94	585.00	2557.94
		SEM	175.77	72.38	103.46

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ตัวอย่าง	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
30 วัน	5	ลำต้น-1	37.02	32.85	4.17
		ลำต้น-2	15.42	14.19	1.23
		ลำต้น-3	36.22	32.08	4.13
		ค่าเฉลี่ย	29.55	26.37	3.18
		SEM	7.07	6.10	0.97
30 วัน	5	ใบ-1	0.00	0.00	0.00
		ใบ-2	0.00	0.00	0.00
		ใบ-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	0.00	0.00	0.00
		SEM	0.00	0.00	0.00
30 วัน	10	ราก-1	4586.78	827.01	3759.77
		ราก-2	3321.92	440.92	2881.00
		ราก-3	4275.86	658.94	3616.92
		ค่าเฉลี่ย	4061.52	642.29	3419.23
		SEM	380.54	111.76	272.26
30 วัน	10	ลำต้น-1	44.05	41.15	2.91
		ลำต้น-2	35.09	30.93	4.16
		ลำต้น-3	46.33	34.63	11.70
		ค่าเฉลี่ย	41.83	35.57	6.26
		SEM	3.43	2.99	2.75

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ตัวอย่าง	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
30 วัน	10	ใบ-1	28.92	25.74	3.18
		ใบ-2	0.00	0.00	0.00
		ใบ-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	9.64	8.58	1.06
		SEM	9.64	8.58	1.06
30 วัน	15	ราก-1	4268.62	638.37	3630.25
		ราก-2	5643.38	655.47	4987.91
		ราก-3	5106.95	821.44	4285.51
		ค่าเฉลี่ย	5006.32	705.09	4301.22
		SEM	400.04	58.38	392.00
30 วัน	15	ลำต้น-1	82.09	72.95	9.14
		ลำต้น-2	32.79	27.94	4.86
		ลำต้น-3	11.90	11.42	0.48
		ค่าเฉลี่ย	42.26	37.44	4.83
		SEM	20.81	18.39	2.50
30 วัน	15	ใบ-1	53.44	37.86	15.57
		ใบ-2	0.00	0.00	0.00
		ใบ-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	17.81	12.62	5.19
		SEM	17.81	12.62	5.19

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ระดับความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ตัวอย่าง	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
45 วัน	0	ราก-1	0.00	0.00	0.00
		ราก-2	0.00	0.00	0.00
		ราก-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	0.00	0.00	0.00
		SEM	0.00	0.00	0.00
45 วัน	0	ลำต้น-1	0.00	0.00	0.00
		ลำต้น-2	0.00	0.00	0.00
		ลำต้น-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	0.00	0.00	0.00
		SEM	0.00	0.00	0.00
45 วัน	0	ใบ-1	0.00	0.00	0.00
		ใบ-2	0.00	0.00	0.00
		ใบ-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	0.00	0.00	0.00
		SEM	0.00	0.00	0.00
45 วัน	5	ราก-1	2722.93	643.02	2079.91
		ราก-2	3898.18	548.42	3349.76
		ราก-3	4173.91	618.71	3555.21
		ค่าเฉลี่ย	3598.34	603.38	2994.96
		SEM	444.88	28.36	461.35

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ตัวอย่าง	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
45 วัน	5	ลำต้น-1	112.13	69.39	42.74
		ลำต้น-2	49.26	41.44	7.82
		ลำต้น-3	5.80	4.90	0.90
		ค่าเฉลี่ย	55.73	38.58	17.15
		SEM	30.86	18.67	12.95
45 วัน	5	ใบ-1	0.00	0.00	0.00
		ใบ-2	220.59	67.95	152.64
		ใบ-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	73.53	22.65	50.88
		SEM	73.53	22.65	50.88
45 วัน	10	ราก-1	4624.13	801.59	3822.53
		ราก-2	3399.12	259.70	3139.42
		ราก-3	4960.00	1029.99	3930.01
		ค่าเฉลี่ย	4327.75	697.10	3630.65
		SEM	474.33	228.42	247.57
45 วัน	10	ลำต้น-1	45.59	25.85	19.74
		ลำต้น-2	0.00	0.00	0.00
		ลำต้น-3	11.62	6.60	5.02
		ค่าเฉลี่ย	19.07	10.82	8.25
		SEM	13.68	7.75	5.92

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ตัวอย่าง	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
45 วัน	10	ใบ-1	0.00	0.00	0.00
		ใบ-2	55.44	39.11	16.33
		ใบ-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	18.48	13.04	5.44
		SEM	18.48	13.04	5.44
45 วัน	15	ราก-1	7847.72	910.62	6937.10
		ราก-2	7299.11	929.55	6369.55
		ราก-3	4638.89	579.37	4059.52
		ค่าเฉลี่ย	6595.24	806.52	5788.72
		SEM	990.91	113.70	879.99
45 วัน	15	ลำต้น-1	9.51	6.15	3.36
		ลำต้น-2	0.00	0.00	0.00
		ลำต้น-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	3.17	2.05	1.12
		SEM	3.17	2.05	1.12
45 วัน	15	ใบ-1	0.00	0.00	0.00
		ใบ-2	0.00	0.00	0.00
		ใบ-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	0.00	0.00	0.00
		SEM	0.00	0.00	0.00

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ตัวอย่าง	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
60 วัน	0	ราก-1	0.00	0.00	0.00
		ราก-2	0.00	0.00	0.00
		ราก-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	0.00	0.00	0.00
		SEM	0.00	0.00	0.00
60 วัน	0	ลำต้น-1	0.00	0.00	0.00
		ลำต้น-2	0.00	0.00	0.00
		ลำต้น-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	0.00	0.00	0.00
		SEM	0.00	0.00	0.00
60 วัน	0	ใบ-1	0.00	0.00	0.00
		ใบ-2	0.00	0.00	0.00
		ใบ-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	0.00	0.00	0.00
		SEM	0.00	0.00	0.00
60 วัน	5	ราก-1	2869.57	336.39	2533.18
		ราก-2	6343.46	849.52	5493.93
		ราก-3	1919.91	506.92	1412.99
		ค่าเฉลี่ย	3710.98	564.28	3146.70
		SEM	1344.49	150.88	1217.35

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ตัวอย่าง	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
60 วัน	5	ลำต้น-1	0.00	0.00	0.00
		ลำต้น-2	0.00	0.00	0.00
		ลำต้น-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	0.00	0.00	0.00
		SEM	0.00	0.00	0.00
60 วัน	5	ใบ-1	0.00	0.00	0.00
		ใบ-2	178.02	84.39	93.63
		ใบ-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	59.34	28.13	31.21
		SEM	59.34	28.13	31.21
60 วัน	10	ราก-1	2641.86	854.77	1787.10
		ราก-2	4721.28	588.81	4132.47
		ราก-3	5819.50	565.55	5253.95
		ค่าเฉลี่ย	4394.22	669.71	3724.51
		SEM	931.77	92.77	1021.37
60 วัน	10	ลำต้น-1	0.00	0.00	0.00
		ลำต้น-2	7.78	3.66	4.12
		ลำต้น-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	2.59	1.22	1.37
		SEM	2.59	1.22	1.37

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ตัวอย่าง	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
60 วัน	10	ใบ-1	44.21	36.82	7.39
		ใบ-2	0.00	0.00	0.00
		ใบ-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	14.74	12.27	2.46
		SEM	14.74	12.27	2.46
60 วัน	15	ราก-1	6071.43	690.07	5381.36
		ราก-2	6818.18	899.07	5919.11
		ราก-3	6958.76	889.15	6069.61
		ค่าเฉลี่ย	6616.12	826.10	5790.03
		SEM	275.35	68.07	208.90
60 วัน	15	ลำต้น-1	0.00	0.00	0.00
		ลำต้น-2	0.00	0.00	0.00
		ลำต้น-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	0.00	0.00	0.00
		SEM	0.00	0.00	0.00
60 วัน	15	ใบ-1	0.00	0.00	0.00
		ใบ-2	43.37	19.24	24.13
		ใบ-3	0.00	0.00	0.00
		ค่าเฉลี่ย	14.46	6.41	8.04
		SEM	14.46	6.41	8.04

ตารางผนวกที่ 8 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมด TCr โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] และโครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr(III)] ในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ ด้วยวิธีปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
1	ชุดควบคุม (0) -1	0.000	0.000	0.000
	ชุดควบคุม (0) -2	0.000	0.000	0.000
	ชุดควบคุม (0) -3	0.000	0.000	0.000
	ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.000
	SEM	0.00	0.00	0.00
1	ชุดควบคุม (5) -1	4.229	4.224	0.091
	ชุดควบคุม (5) -2	5.364	5.159	0.115
	ชุดควบคุม (5) -3	5.140	5.035	0.110
	ค่าเฉลี่ย	4.911	4.806	0.105
	SEM	0.35	0.29	0.11
1	ชุดควบคุม (10) -1	9.240	8.303	0.937
	ชุดควบคุม (10) -2	10.175	9.503	0.672
	ชุดควบคุม (10) -3	10.051	9.746	0.305
	ค่าเฉลี่ย	9.822	9.184	0.638
	SEM	0.29	0.45	0.18
1	ชุดควบคุม (15) -1	14.162	14.252	0.005
	ชุดควบคุม (15) -2	15.198	16.187	0.020
	ชุดควบคุม (15) -3	15.174	14.063	0.006
	ค่าเฉลี่ย	14.844	14.834	0.010
	SEM	0.34	0.68	0.00

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
1	ชุดทดลอง (0) -1	0.000	0.000	0.000
	ชุดทดลอง (0) -2	0.000	0.000	0.000
	ชุดทดลอง (0) -3	0.000	0.000	0.000
	ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.000
	SEM	0.00	0.00	0.00
1	ชุดทดลอง (5) -1	4.262	3.735	0.513
	ชุดทดลอง (5) -2	5.198	4.671	0.537
	ชุดทดลอง (5) -3	5.074	4.547	0.531
	ค่าเฉลี่ย	4.844	4.317	0.527
	SEM	0.29	0.29	0.01
1	ชุดทดลอง (10) -1	9.007	7.770	1.323
	ชุดทดลอง (10) -2	10.142	7.705	1.347
	ชุดทดลอง (10) -3	9.918	9.581	1.342
	ค่าเฉลี่ย	9.689	8.352	1.337
	SEM	0.35	0.61	0.01
1	ชุดทดลอง (15) -1	13.484	11.020	2.550
	ชุดทดลอง (15) -2	14.620	12.156	2.574
	ชุดทดลอง (15) -3	14.696	11.932	2.569
	ค่าเฉลี่ย	14.267	11.702	2.564
	SEM	0.39	0.35	0.01

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
15	ชุดควบคุม (0) -1	0.000	0.000	0.000
	ชุดควบคุม (0) -2	0.000	0.000	0.000
	ชุดควบคุม (0) -3	0.000	0.000	0.000
	ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.000
	SEM	0.00	0.00	0.00
15	ชุดควบคุม (5) -1	4.218	4.217	0.001
	ชุดควบคุม (5) -2	5.353	5.152	0.201
	ชุดควบคุม (5) -3	5.029	5.028	0.001
	ค่าเฉลี่ย	4.867	4.799	0.068
	SEM	0.34	0.29	0.07
15	ชุดควบคุม (10) -1	8.884	8.508	0.362
	ชุดควบคุม (10) -2	9.820	9.443	0.386
	ชุดควบคุม (10) -3	9.696	9.319	0.381
	ค่าเฉลี่ย	9.467	9.090	0.376
	SEM	0.29	0.29	0.01
15	ชุดควบคุม (15) -1	13.084	14.074	0.005
	ชุดควบคุม (15) -2	15.020	15.410	0.020
	ชุดควบคุม (15) -3	15.896	14.486	0.006
	ค่าเฉลี่ย	14.667	14.656	0.010
	SEM	0.83	0.39	0.00

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
15	ชุดทดลอง (0) -1	0.000	0.000	0.000
	ชุดทดลอง (0) -2	0.000	0.000	0.000
	ชุดทดลอง (0) -3	0.000	0.000	0.000
	ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.000
	SEM	0.00	0.00	0.00
15	ชุดทดลอง (5) -1	4.107	0.955	3.138
	ชุดทดลอง (5) -2	5.042	1.890	3.162
	ชุดทดลอง (5) -3	4.918	1.766	3.157
	ค่าเฉลี่ย	4.689	1.537	3.152
	SEM	0.29	0.29	0.01
15	ชุดทดลอง (10) -1	7.943	6.586	1.357
	ชุดทดลอง (10) -2	9.939	7.522	2.417
	ชุดทดลอง (10) -3	7.785	7.398	0.387
	ค่าเฉลี่ย	8.556	7.168	1.387
	SEM	0.69	0.29	0.59
15	ชุดทดลอง (15) -1	13.351	8.618	4.734
	ชุดทดลอง (15) -2	14.286	9.553	4.734
	ชุดทดลอง (15) -3	14.162	9.429	4.738
	ค่าเฉลี่ย	13.933	9.200	4.735
	SEM	0.29	0.29	0.00

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
30	ชุดควบคุม (0) -1	0.000	0.000	0.000
	ชุดควบคุม (0) -2	0.000	0.000	0.000
	ชุดควบคุม (0) -3	0.000	0.000	0.000
	ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.000
	SEM	0.00	0.00	0.00
30	ชุดควบคุม (5) -1	3.729	3.640	0.075
	ชุดควบคุม (5) -2	4.664	4.575	0.010
	ชุดควบคุม (5) -3	4.540	4.451	0.094
	ค่าเฉลี่ย	4.311	4.242	0.060
	SEM	0.29	0.29	0.03
30	ชุดควบคุม (10) -1	8.32	7.83	0.49
	ชุดควบคุม (10) -2	9.25	9.24	0.01
	ชุดควบคุม (10) -3	9.629	9.123	0.506
	ค่าเฉลี่ย	9.066	8.731	0.335
	SEM	0.39	0.27	0.16
30	ชุดควบคุม (15) -1	13.907	13.774	0.133
	ชุดควบคุม (15) -2	14.842	14.832	0.010
	ชุดควบคุม (15) -3	14.718	14.566	0.152
	ค่าเฉลี่ย	14.489	14.391	0.098
	SEM	0.29	0.29	0.04

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
30	ชุดทดลอง (0) -1	0.000	0.000	0.000
	ชุดทดลอง (0) -2	0.000	0.000	0.000
	ชุดทดลอง (0) -3	0.000	0.000	0.000
	ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.000
	SEM	0.00	0.00	0.00
30	ชุดทดลอง (5) -1	3.396	0.310	3.086
	ชุดทดลอง (5) -2	4.331	3.668	0.663
	ชุดทดลอง (5) -3	4.207	0.329	3.878
	ค่าเฉลี่ย	3.978	1.435	2.542
	SEM	0.29	1.12	0.97
30	ชุดทดลอง (10) -1	6.840	5.130	1.696
	ชุดทดลอง (10) -2	7.775	6.066	1.720
	ชุดทดลอง (10) -3	7.651	5.942	1.714
	ค่าเฉลี่ย	7.422	5.712	1.710
	SEM	0.29	0.29	0.01
30	ชุดทดลอง (15) -1	12.796	8.207	4.574
	ชุดทดลอง (15) -2	13.731	9.143	4.598
	ชุดทดลอง (15) -3	13.607	9.019	4.593
	ค่าเฉลี่ย	13.378	8.789	4.588
	SEM	0.29	0.29	0.01

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
45	ชุดควบคุม (0) -1	0.000	0.000	0.000
	ชุดควบคุม (0) -2	0.000	0.000	0.000
	ชุดควบคุม (0) -3	0.000	0.000	0.000
	ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.000
	SEM	0.00	0.00	0.00
45	ชุดควบคุม (5) -1	3.573	3.393	0.166
	ชุดควบคุม (5) -2	4.509	4.329	0.190
	ชุดควบคุม (5) -3	4.385	4.205	0.184
	ค่าเฉลี่ย	4.156	3.976	0.180
	SEM	0.29	0.29	0.01
45	ชุดควบคุม (10) -1	8.751	8.098	0.639
	ชุดควบคุม (10) -2	9.686	9.033	0.663
	ชุดควบคุม (10) -3	9.562	8.909	0.658
	ค่าเฉลี่ย	9.333	8.680	0.653
	SEM	0.29	0.29	0.01
45	ชุดควบคุม (15) -1	13.840	13.637	0.189
	ชุดควบคุม (15) -2	14.775	14.572	0.213
	ชุดควบคุม (15) -3	14.651	14.448	0.208
	ค่าเฉลี่ย	14.422	14.219	0.203
	SEM	0.29	0.29	0.01

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
45	ชุดทดลอง (0) -1	0.000	0.000	0.000
	ชุดทดลอง (0) -2	0.000	0.000	0.000
	ชุดทดลอง (0) -3	0.000	0.000	0.000
	ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.000
	SEM	0.00	0.00	0.00
45	ชุดทดลอง (5) -1	2.907	0.159	3.301
	ชุดทดลอง (5) -2	3.842	0.183	3.325
	ชุดทดลอง (5) -3	3.718	0.178	3.320
	ค่าเฉลี่ย	3.489	0.174	3.315
	SEM	0.29	0.01	0.01
45	ชุดทดลอง (10) -1	6.707	2.600	4.092
	ชุดทดลอง (10) -2	7.642	3.535	4.116
	ชุดทดลอง (10) -3	7.518	3.411	4.111
	ค่าเฉลี่ย	7.289	3.182	4.107
	SEM	0.29	0.29	0.01
45	ชุดทดลอง (15) -1	12.396	5.349	7.032
	ชุดทดลอง (15) -2	13.331	6.284	7.056
	ชุดทดลอง (15) -3	13.207	6.160	7.051
	ค่าเฉลี่ย	12.978	5.931	7.047
	SEM	0.29	0.29	0.01

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
60	ชุดควบคุม (0) -1	0.000	0.000	0.000
	ชุดควบคุม (0) -2	0.000	0.000	0.000
	ชุดควบคุม (0) -3	0.000	0.000	0.000
	ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.000
	SEM	0.00	0.00	0.00
60	ชุดควบคุม (5) -1	3.484	3.216	0.255
	ชุดควบคุม (5) -2	4.420	4.151	0.279
	ชุดควบคุม (5) -3	4.296	4.027	0.273
	ค่าเฉลี่ย	4.067	3.798	0.269
	SEM	0.29	0.29	0.01
60	ชุดควบคุม (10) -1	8.618	8.043	0.560
	ชุดควบคุม (10) -2	9.553	8.978	0.584
	ชุดควบคุม (10) -3	9.429	8.854	0.579
	ค่าเฉลี่ย	9.200	8.625	0.575
	SEM	0.29	0.29	0.01
60	ชุดควบคุม (15) -1	13.751	13.090	0.647
	ชุดควบคุม (15) -2	14.686	14.025	0.671
	ชุดควบคุม (15) -3	14.562	13.901	0.666
	ค่าเฉลี่ย	14.333	13.672	0.662
	SEM	0.29	0.29	0.01

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
60	ชุดทดลอง (0) -1	0.000	0.000	0.000
	ชุดทดลอง (0) -2	0.000	0.000	0.000
	ชุดทดลอง (0) -3	0.000	0.000	0.000
	ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.000
	SEM	0.00	0.00	0.00
60	ชุดทดลอง (5) -1	2.796	0.118	3.231
	ชุดทดลอง (5) -2	3.731	0.142	3.255
	ชุดทดลอง (5) -3	3.607	0.137	3.250
	ค่าเฉลี่ย	3.378	0.133	3.245
	SEM	0.29	0.01	0.01
60	ชุดทดลอง (10) -1	6.573	2.258	4.301
	ชุดทดลอง (10) -2	7.509	3.194	4.325
	ชุดทดลอง (10) -3	7.385	3.070	4.320
	ค่าเฉลี่ย	7.156	2.840	4.315
	SEM	0.29	0.29	0.01
60	ชุดทดลอง (15) -1	12.329	5.089	7.225
	ชุดทดลอง (15) -2	13.264	6.024	7.250
	ชุดทดลอง (15) -3	13.140	5.900	7.244
	ค่าเฉลี่ย	12.911	5.671	7.240
	SEM	0.29	0.29	0.01

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางผนวกที่ 9 คุณภาพน้ำเสียสังเคราะห์ในชุดควบคุม (ไม่มีพืช)

ระยะเวลา (วัน)	ระดับความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	คุณภาพของน้ำเสียสังเคราะห์			
		ORP (มิลลิโวลต์)	pH	EC (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	TSS (มิลลิกรัม)
1	ชุดควบคุม (0)-1	234.00	7.08	31	1.00
	ชุดควบคุม (0)-2	234.00	7.10	28.8	1.50
	ชุดควบคุม (0)-3	240.00	7.27	30.8	1.40
	ค่าเฉลี่ย	236.00	7.15	30.2	1.30
	SEM	2.00	0.06	0.7	0.15
1	ชุดควบคุม (5)-1	254.18	6.13	33.40	2.20
	ชุดควบคุม (5)-2	254.21	6.16	35.90	2.10
	ชุดควบคุม (5)-3	254.21	6.19	35.40	2.30
	ค่าเฉลี่ย	254.20	6.15	34.90	2.20
	SEM	0.01	0.02	0.76	0.06
1	ชุดควบคุม (10)-1	262.10	6.02	42.0	3.50
	ชุดควบคุม (10)-2	264.00	6.23	44.1	3.30
	ชุดควบคุม (10)-3	264.40	6.20	48.9	3.70
	ค่าเฉลี่ย	263.50	6.15	45.0	3.50
	SEM	0.71	0.07	2.0	0.12
1	ชุดควบคุม (15)-1	314.60	5.00	51.5	3.70
	ชุดควบคุม (15)-2	314.30	4.90	52.5	4.10
	ชุดควบคุม (15)-3	314.90	5.25	53.5	5.70
	ค่าเฉลี่ย	314.60	5.05	52.5	4.50
	SEM	0.17	0.10	0.58	0.61

ตารางผนวกที่ 9 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ระดับความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	คุณภาพของน้ำเสียสังเคราะห์			
		ORP (มิลลิโวลต์)	pH	EC (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	TSS (มิลลิกรัม)
15	ชุดควบคุม (0)-1	247.20	6.55	34.5	0.90
	ชุดควบคุม (0)-2	246.50	6.51	33.2	1.30
	ชุดควบคุม (0)-3	250.60	6.56	36.7	2.00
	ค่าเฉลี่ย	248.10	6.54	34.8	1.40
	SEM	1.27	0.02	1.02	0.32
15	ชุดควบคุม (5)-1	270.50	6.07	36.40	2.70
	ชุดควบคุม (5)-2	269.40	6.10	35.20	1.80
	ชุดควบคุม (5)-3	275.80	6.01	34.30	2.40
	ค่าเฉลี่ย	271.90	6.06	35.30	2.30
	SEM	1.98	0.03	0.61	0.26
15	ชุดควบคุม (10)-1	254.90	6.06	46.1	4.20
	ชุดควบคุม (10)-2	259.30	5.98	45.7	3.10
	ชุดควบคุม (10)-3	261.30	6.05	47.1	3.80
	ค่าเฉลี่ย	258.50	6.03	46.3	3.70
	SEM	1.89	0.03	0.42	0.32
15	ชุดควบคุม (15)-1	301.30	5.36	53.1	4.80
	ชุดควบคุม (15)-2	309.50	5.24	52.8	5.10
	ชุดควบคุม (15)-3	303.00	5.21	53.7	5.70
	ค่าเฉลี่ย	304.60	5.27	53.2	5.20
	SEM	2.50	0.05	0.26	0.26

ตารางผนวกที่ 9 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ระดับความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	คุณภาพของน้ำเสียสังเคราะห์			
		ORP (มิลลิโวลต์)	pH	EC (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	TSS (มิลลิกรัม)
30	ชุดควบคุม (0)-1	231.00	6.42	34.8	1.10
	ชุดควบคุม (0)-2	233.70	6.47	35.9	0.80
	ชุดควบคุม (0)-3	232.80	6.58	38.5	2.00
	ค่าเฉลี่ย	232.50	6.49	36.4	1.30
	SEM	0.79	0.05	1.1	0.36
30	ชุดควบคุม (5)-1	258.30	6.17	38.50	1.40
	ชุดควบคุม (5)-2	259.70	6.19	37.30	2.20
	ชุดควบคุม (5)-3	262.90	6.21	37.30	1.80
	ค่าเฉลี่ย	260.30	6.19	37.70	1.80
	SEM	1.36	0.01	0.40	0.23
30	ชุดควบคุม (10)-1	278.50	5.12	47.3	3.80
	ชุดควบคุม (10)-2	279.80	5.06	48.1	3.10
	ชุดควบคุม (10)-3	283.20	5.09	49.2	3.90
	ค่าเฉลี่ย	280.50	5.09	48.2	3.60
	SEM	1.40	0.02	0.55	0.25
30	ชุดควบคุม (15)-1	295.80	5.71	52.7	4.20
	ชุดควบคุม (15)-2	289.30	5.73	55.3	4.60
	ชุดควบคุม (15)-3	307.10	5.78	56.4	4.40
	ค่าเฉลี่ย	297.40	5.74	54.8	4.40
	SEM	5.20	0.02	1.1	0.12

ตารางผนวกที่ 9 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ระดับความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	คุณภาพของน้ำเสียสังเคราะห์			
		ORP (มิลลิโวลต์)	pH	EC (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	TSS (มิลลิกรัม)
45	ชุดควบคุม (0)-1	215.20	6.60	39.1	1.10
	ชุดควบคุม (0)-2	209.40	6.54	38.5	1.40
	ชุดควบคุม (0)-3	209.90	6.60	37.9	2.00
	ค่าเฉลี่ย	211.50	6.58	38.5	1.50
	SEM	1.86	0.02	0.35	0.26
45	ชุดควบคุม (5)-1	241.30	6.29	39.50	1.80
	ชุดควบคุม (5)-2	239.60	6.20	39.80	1.70
	ชุดควบคุม (5)-3	246.60	6.17	41.30	2.20
	ค่าเฉลี่ย	242.50	6.22	40.20	1.90
	SEM	2.11	0.04	0.56	0.15
45	ชุดควบคุม (10)-1	271.60	5.83	45.9	3.00
	ชุดควบคุม (10)-2	274.30	5.85	49.8	2.80
	ชุดควบคุม (10)-3	271.90	5.93	50.4	3.50
	ค่าเฉลี่ย	272.60	5.87	48.7	3.10
	SEM	0.85	0.03	1.41	0.21
45	ชุดควบคุม (15)-1	283.20	5.62	54.1	4.20
	ชุดควบคุม (15)-2	279.50	5.69	55.9	3.90
	ชุดควบคุม (15)-3	283.60	5.61	54.1	4.50
	ค่าเฉลี่ย	282.10	5.64	54.7	4.20
	SEM	1.31	0.03	0.6	0.17

ตารางผนวกที่ 9 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ระดับความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	คุณภาพของน้ำเสียสังเคราะห์			
		ORP (มิลลิโวลต์)	pH	EC (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	TSS (มิลลิกรัม)
60	ชุดควบคุม (0)-1	221.30	6.62	38.7	1.40
	ชุดควบคุม (0)-2	209.50	6.59	39.1	2.10
	ชุดควบคุม (0)-3	227.40	6.68	38.3	1.60
	ค่าเฉลี่ย	219.40	6.63	38.7	1.70
	SEM	5.25	0.03	0.23	0.21
60	ชุดควบคุม (5)-1	295.60	6.49	41.00	2.90
	ชุดควบคุม (5)-2	289.70	6.43	40.80	3.40
	ชุดควบคุม (5)-3	299.10	6.43	41.50	3.30
	ค่าเฉลี่ย	294.80	6.45	41.10	3.20
	SEM	2.74	0.02	0.21	0.15
60	ชุดควบคุม (10)-1	234.20	5.58	49.87	3.90
	ชุดควบคุม (10)-2	232.60	5.61	50.43	4.10
	ชุดควบคุม (10)-3	234.60	5.67	50.9	4.60
	ค่าเฉลี่ย	233.80	5.62	50.4	4.20
	SEM	0.61	0.03	0.3	0.21
60	ชุดควบคุม (15)-1	298.30	5.27	59.6	3.50
	ชุดควบคุม (15)-2	298.70	5.20	57.8	3.20
	ชุดควบคุม (15)-3	302.40	5.22	57.5	5.30
	ค่าเฉลี่ย	299.80	5.23	58.3	4.00
	SEM	1.31	0.02	0.66	0.66

ตารางผนวกที่ 10 คุณภาพน้ำเสียสังเคราะห์ในชุดทดลอง (ปลูกต้นก้างปลา)

ระยะเวลา (วัน)	ระดับความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	คุณภาพของน้ำเสียสังเคราะห์			
		ORP (มิลลิโวลต์)	pH	EC (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	TSS (มิลลิกรัม)
1	ชุดทดลอง(0)-1	145.60	5.69	456.00	14.00
	ชุดทดลอง(0)-2	144.70	5.73	461.00	12.30
	ชุดทดลอง(0)-3	144.10	5.71	460.00	7.30
	ค่าเฉลี่ย	144.80	5.71	459.00	11.20
	SEM	0.44	0.01	1.53	2.01
1	ชุดทดลอง(5)-1	285.10	6.18	460.00	12.50
	ชุดทดลอง(5)-2	289.60	6.14	459.00	9.80
	ชุดทดลอง(5)-3	283.66	6.19	446.00	11.90
	ค่าเฉลี่ย	286.12	6.17	455.00	11.40
	SEM	1.79	0.02	4.51	0.82
1	ชุดทดลอง(10)-1	284.30	6.15	482.00	15.00
	ชุดทดลอง(10)-2	283.10	6.17	475.00	12.00
	ชุดทดลอง(10)-3	283.10	6.01	483.00	15.00
	ค่าเฉลี่ย	283.50	6.11	480.00	14.00
	SEM	0.40	0.05	2.52	1.00
1	ชุดทดลอง(15)-1	292.30	6.04	524.00	8.50
	ชุดทดลอง(15)-2	295.60	6.10	529.00	9.50
	ชุดทดลอง(15)-3	295.00	6.01	525.00	9.30
	ค่าเฉลี่ย	294.30	6.05	526.00	9.10
	SEM	1.01	0.03	1.53	0.31

ตารางผนวกที่ 10 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ระดับความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	คุณภาพของน้ำเสียสังเคราะห์			
		ORP (มิลลิโวลต์)	pH	EC (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	TSS (มิลลิกรัม)
15	ชุดทดลอง(0)-1	185.90	6.01	1085.00	12.80
	ชุดทดลอง(0)-2	188.70	5.89	998.00	11.40
	ชุดทดลอง(0)-3	187.30	6.10	1031.00	9.70
	ค่าเฉลี่ย	187.30	6.00	1038.00	11.30
	SEM	0.81	0.06	25.36	0.90
15	ชุดทดลอง(5)-1	269.30	6.09	1526.00	15.00
	ชุดทดลอง(5)-2	265.70	6.07	1512.00	15.20
	ชุดทดลอง(5)-3	268.10	6.08	1537.00	13.30
	ค่าเฉลี่ย	267.70	6.08	1525.00	14.50
	SEM	1.06	0.01	7.23	0.60
15	ชุดทดลอง(10)-1	239.50	6.39	1396.00	22.00
	ชุดทดลอง(10)-2	235.80	6.42	1420.00	16.00
	ชุดทดลอง(10)-3	239.00	6.42	1402.00	22.00
	ค่าเฉลี่ย	238.10	6.41	1406.00	20.00
	SEM	1.16	0.01	7.21	2.00
15	ชุดทดลอง(15)-1	280.10	5.96	1145.00	24.60
	ชุดทดลอง(15)-2	278.90	5.86	1132.00	19.90
	ชุดทดลอง(15)-3	279.50	5.85	1140.00	22.10
	ค่าเฉลี่ย	279.50	5.89	1139.00	22.20
	SEM	0.35	0.04	3.79	1.36

ตารางผนวกที่ 10 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ระดับความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	คุณภาพของน้ำเสียสังเคราะห์			
		ORP (มิลลิโวลต์)	pH	EC (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	TSS (มิลลิกรัม)
30	ชุดทดลอง(0)-1	168.30	6.42	965.00	9.80
	ชุดทดลอง(0)-2	169.50	6.32	954.00	10.30
	ชุดทดลอง(0)-3	168.60	6.49	955.00	40.50
	ค่าเฉลี่ย	168.80	6.41	958.00	20.20
	SEM	0.36	0.05	3.51	10.15
30	ชุดทดลอง(5)-1	226.50	6.82	1425.00	22.50
	ชุดทดลอง(5)-2	220.90	6.89	1410.00	25.20
	ชุดทดลอง(5)-3	223.40	6.81	1422.00	21.90
	ค่าเฉลี่ย	223.60	6.84	1419.00	23.20
	SEM	1.62	0.03	4.58	1.01
30	ชุดทดลอง(10)-1	234.60	7.56	1649.00	24.00
	ชุดทดลอง(10)-2	234.50	7.62	1660.00	23.90
	ชุดทดลอง(10)-3	230.20	7.44	1647.00	21.34
	ค่าเฉลี่ย	233.10	7.54	1652.00	23.08
	SEM	1.45	0.05	4.04	0.87
30	ชุดทดลอง(15)-1	243.60	7.00	1159.00	32.10
	ชุดทดลอง(15)-2	239.90	6.98	1142.00	29.70
	ชุดทดลอง(15)-3	240.40	7.08	1158.00	30.30
	ค่าเฉลี่ย	241.30	7.02	1153.00	30.70
	SEM	1.16	0.03	5.51	0.72

ตารางผนวกที่ 10 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ระดับความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	คุณภาพของน้ำเสียสังเคราะห์			
		ORP (มิลลิโวลต์)	pH	EC (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	TSS (มิลลิกรัม)
45	ชุดทดลอง(0)-1	180.60	6.52	790.00	18.60
	ชุดทดลอง(0)-2	186.90	6.49	795.00	18.30
	ชุดทดลอง(0)-3	180.90	6.55	806.00	19.80
	ค่าเฉลี่ย	182.80	6.52	797.00	18.90
	SEM	2.05	0.02	4.73	0.46
45	ชุดทดลอง(5)-1	210.60	7.06	1652.00	25.90
	ชุดทดลอง(5)-2	219.80	7.01	1648.00	26.30
	ชุดทดลอง(5)-3	203.20	6.96	1647.00	28.20
	ค่าเฉลี่ย	211.20	7.01	1649.00	26.80
	SEM	4.80	0.03	1.53	0.71
45	ชุดทดลอง(10)-1	220.30	7.26	1591.00	21.00
	ชุดทดลอง(10)-2	221.90	7.21	1580.00	21.30
	ชุดทดลอง(10)-3	226.20	7.22	1587.00	26.94
	ค่าเฉลี่ย	222.80	7.23	1586.00	23.08
	SEM	1.76	0.02	3.21	1.93
45	ชุดทดลอง(15)-1	236.50	7.65	1452.00	43.00
	ชุดทดลอง(15)-2	234.90	7.59	1429.00	39.00
	ชุดทดลอง(15)-3	244.40	7.68	1439.00	20.30
	ค่าเฉลี่ย	238.60	7.64	1440.00	34.10
	SEM	2.94	0.03	6.66	7.00

ตารางผนวกที่ 10 (ต่อ)

ระยะเวลา (วัน)	ระดับความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	คุณภาพของน้ำเสียสังเคราะห์			
		ORP (มิลลิโวลต์)	pH	EC (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	TSS (มิลลิกรัม)
60	ชุดทดลอง(0)-1	183.20	6.72	1067.00	22.50
	ชุดทดลอง(0)-2	185.90	6.59	1089.00	23.60
	ชุดทดลอง(0)-3	181.10	7.00	1081.00	21.10
	ค่าเฉลี่ย	183.40	6.77	1079.00	22.40
	SEM	1.39	0.12	6.43	0.72
60	ชุดทดลอง(5)-1	178.90	7.35	1380.00	20.80
	ชุดทดลอง(5)-2	182.30	7.39	1389.00	19.60
	ชุดทดลอง(5)-3	183.60	7.40	1389.00	25.60
	ค่าเฉลี่ย	181.60	7.38	1386.00	22.00
	SEM	1.40	0.02	3.00	3.17
60	ชุดทดลอง(10)-1	206.30	7.98	1659.00	26.80
	ชุดทดลอง(10)-2	210.90	7.89	1668.00	16.40
	ชุดทดลอง(10)-3	210.40	7.98	1656.00	36.90
	ค่าเฉลี่ย	209.20	7.95	1661.00	26.70
	SEM	1.46	0.03	3.61	5.92
60	ชุดทดลอง(15)-1	216.90	8.56	1543.00	27.20
	ชุดทดลอง(15)-2	220.30	8.51	1539.00	37.30
	ชุดทดลอง(15)-3	216.20	8.52	1541.00	30.75
	ค่าเฉลี่ย	217.80	8.53	1541.00	31.75
	SEM	1.27	0.02	1.15	2.96

ภาคผนวก ข

รูปผนวกที่ 1 การดำเนินงานวิจัยโดยวิธีปลูกพืชในดิน (Phytoremediation)

รูปผนวกที่ 2 การดำเนินงานวิจัยโดยวิธีปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics)

รูปผนวกที่ 3 เปรียบเทียบสีของตัวอย่างน้ำชุดควบคุม และชุดทดลอง ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบพัฒนาสี (Colorimetric) เพื่อหาปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์

รูปผนวกที่ 4 เครื่องมือในการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1	2
3	4
5	6

1-5 การปลูกต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) ลงในดินเพื่อกำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนท์

6. ตัวอย่างพืชจากการปลูกพืชในดินที่ระดับความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน

รูปผนวกที่ 1 การดำเนินงานวิจัยโดยวิธีปลูกพืชในดิน (Phytoremediation)

1	2
3	4
5	6

1. ต้นก้างปลา(*Phyllanthus reticulatus*) ที่ปักชำ
2. อาหารน้ำสูตร A และ B

3-4 เตรียมการปลูกพืชโดยวิธีปลูกพืชแบบไร้ดิน (Hydroponics)

5-6 ตัวอย่างพืชจากการปลูกพืชโดยวิธีปลูกพืชแบบไร้ดิน (Hydroponics)

รูปผนวกที่ 2 การดำเนินงานวิจัยโดยวิธีปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics)

1	2
3	4
5	6

1. สีของน้ำตัวอย่างที่เก็บจากน้ำเสียสังเคราะห์ชุดควบคุม (ไม่มีพืช)
2. สีของน้ำตัวอย่างที่เก็บจากน้ำเสียสังเคราะห์ชุดทดลอง
3. C10 คือ ชุดควบคุมที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 10 คือ ชุดทดลองที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. C15 คือชุ ดควบคุมที่ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 15 คือ ชุดทดลองที่ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร
5. ส่วนของตัวอย่างพืช ราก ลำต้น และใบ จากการปลูกพืชในดินก่อนทำการวิเคราะห์แบบพัฒนาสี
6. ส่วนของตัวอย่างพืช ราก ลำต้น และใบ จากการปลูกพืชในดินหลังทำการวิเคราะห์แบบพัฒนาสี

รูปผนวกที่ 3 เปรียบเทียบสีของตัวอย่างน้ำชุดควบคุม และชุดทดลอง ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบพัฒนาสี (Colorimetric) เพื่อหาปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์

1	2
3	4

1. เครื่อง Microwave รุ่น Milestone Ethos Sel
2. เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer รุ่น Analis 800
3. เครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชั่น (X-ray Diffraction: XRD)
4. เครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชั่น (X-ray Fluorescence: XRF)

รูปผนวกที่ 4 เครื่องมือในการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุธินี วดีศิริศักดิ์ เกิดเมื่อวันที่ 17 กันยายน พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดเพชรบูรณ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปฐพีศาสตร์ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2548

การนำเสนอผลงาน

สุธินี วดีศิริศักดิ์ และพันธวัศ สัมพันธ์พานิช. (2550) การใช้ต้นก้างปลากำจัดโครเมียมเฮกซาวาเลนท์จากดินที่ปนเปื้อน. สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, วารสารวิจัยสภาวะแวดล้อม, **ปีที่ 29 เล่มที่ 2 กค.-ธค. 2550**.

Wadesirisak S. and Sampanpanish P. (2007) Comparison of Chromium Removal by Phytoremediation and Hydroponics with *Phyllanthus reticulatus* Poir. In **Proceeding at The 12th Biological Sciences Graduate Congress (BSCG 2007)**, December 17-19, 2007, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย