การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืชร่วมกับจลนศาสตร์ไฟฟ้าในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีโดยหญ้ารูซี่

นางสาวดารารัตน์ โรจนพิทยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ELECTROKINETIC-ASSISTED PHYTOREMEDIATION OF ZINC CONTAMINATED SOIL WITH RUZI GRASS (Brachiaria ruziziensis)

Miss Dararat Rojanapithayakorn

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

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 2015
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืชร่วมกับจลนศาสตร์ไฟฟ้าในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีโดยหญ้ารูซี่
โดย	นางสาวดารารัตน์ โรจนพิทยากร
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัยนันทน์ อริยกานนท์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุเนตร ชุตินธรานนท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัยนันทน์ อริยกานนท์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงแข สิทธิเจริญชัย)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัจฉราพร ขำโสภา)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ดารารัตน์ โรจนพิทยากร : การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืชร่วมกับจลนศาสตร์ไฟฟ้าในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีโดยหญ้ารูซี่ (ELECTROKINETIC-ASSISTED PHYTOREMEDIATION OF ZINC CONTAMINATED SOIL WITH RUZI GRASS (Brachiaria ruziziensis)) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.นัยนันทน์ อริยกานนท์, 188 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของหญ้ารูซี่ (*Brachiaria ruziziensis*) ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการประยุกต์ใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้า โดยการศึกษาปริมาณสังกะสีในดินที่เหมาะสมที่หญ้ารูซี่สามารถบำบัดได้ ในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 0, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ผลการศึกษาพบว่าอัตราการรอดชีวิตและมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่จะสูงเมื่อปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน และไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการปลูกหญ้ารูซี่ในดินที่ไม่มีการเติมสังกะสี ต่อมาได้ศึกษาความต่างศักย์ไฟฟ้า (0, 1, 2 และ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร) ระยะเวลา (0, 2, 4 และ 6 ชั่วโมงต่อวัน) และความหนาแน่นของพืช (0, 5, 10 และ 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง) ที่เหมาะสมที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีโดยการใช้พืช ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มสนามไฟฟ้าจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของมวลชีวภาพของพืชอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่จะส่งผลต่อปริมาณสังกะสีที่สะสมในพืชที่แตกต่างกัน ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีโดยการใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าร่วมกับการบำบัดโดยการใช้พืช คือ ที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลาการให้กระแสไฟฟ้า 2 ชั่วโมงต่อวัน และมีความหนาแน่นของพืช 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2558 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

5687118820 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE
KEYWORDS: PHYTOREMEDIATION; ELECTOKINETIC; SOIL; ZINC; RUZI GRASS

DARARAT ROJANAPITHAYAKORN: ELECTROKINETIC-ASSISTED PHYTOREMEDIATION OF ZINC CONTAMINATED SOIL WITH RUZI GRASS (Brachiaria ruziziensis). ADVISOR: ASST. PROF.NAIYANAN ARIYAKANON, Ph.D., 188 pp.

The objective of this research was to study the optimum condition for electrokinetic – phytoremendial removal of zinc contaminated soil with Ruzi grass (*Brachiaria ruzizensis*). In this experiments, Ruzi grass were transferred to experimental soil pots, which were applied with Zinc ion to 0, 300, 400, and 500 mg/kg soil. The result showed the highest survivals rate and biomass of Ruzi grass were presented at 300 mg/kg soil and this concentration was not significantly difference to that in uncontaminated soil. Subsequently determined the optimal voltage level (0, 1, 2 and 4 V/cm) and then duration of the time applied voltage (0, 2, 4 and 6 h/d) and density of plants (0, 5, 10, 15 plants/gross sectional area), respectively. The results found that increase of electric current were not significantly different for biomass of Ruzi grass. The optimum condition for electrokinetic – assisted phytoremediation of zinc contaminated soil with Ruzi grass was an applied voltage of 2 V/cm for 2 h/d and density of Ruzi grass were 5 stem/gross sectional area.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Field of Study: Environmental Science Student's Signature .....

Academic Year: 2015 Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์จากผู้มีพระคุณหลายท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัยนันทน์ อริยกานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณามอบความรู้ คำปรึกษา ความช่วยเหลือ ความห่วงใย และคอยไต่ถามความก้าวหน้าในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดจนงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี พร้อมทั้งมอบข้อคิดในการดำเนินชีวิตในอนาคตในหลายด้านตลอดจนกรุณาสละเวลาเรียบเรียงและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนเป็นวิทยานิพนธ์ที่สมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม ที่กรุณาสละเวลามาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงแข สิทธิเจริญชัย และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัจฉราพร ขำโสภา ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งให้คำแนะนำและความช่วยเหลือต่างๆ จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์วิโชค พรหมดวง อาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่กรุณาให้คำปรึกษา และอำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ รวมทั้งการใช้ห้องปฏิบัติการ

ขอกราบขอบพระคุณ คุณเกศกนก สุดปราง และคุณจันทร์เลขา ภู่ทองคำ เจ้าหน้าที่ประจำหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยอำนวยความสะดวกในการจัดทำเอกสาร และชี้แจงรายละเอียดต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณ พี่น้อง รวมทั้งเพื่อนๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจในการทำวิจัย

และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่ออัมรินทร์ และคุณแม่สมบุญ โรจนพิทยากร รวมถึงญาติพี่น้องทุกคนที่คอยให้การสนับสนุน ให้ความรัก ความห่วง และคอยเป็นกำลังใจเสมอมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฐ

สารบัญภาพ ..... ฑ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 สมมติฐานการวิจัย 2

1.4 ขอบเขตของการวิจัย 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

2.1 สังกะสี 5

2.1.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของสังกะสี 5

2.1.2 ประเภทของสังกะสี 6

2.1.3 รูปของสังกะสีและการนำไปใช้ 7

2.1.4 การปนเปื้อนสังกะสีในสิ่งแวดล้อม 8

2.1.5 ความเป็นพิษของสังกะสี 8

2.1.6 ค่ามาตรฐานของสังกะสีในสิ่งแวดล้อม 10

2.2 การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืช 10

2.2.1 นิยามของการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืช 11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

2.2.2 กระบวนการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืช 11
2.2.3 ข้อดีและข้อจำกัดของการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืช 15
2.3 การบำบัดโดยใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้า 16
2.3.1 นิยามของการบำบัดโดยใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้า 16
2.3.2 กระบวนการบำบัดโดยใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้า 17
2.3.3 ชนิดของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการบำบัด 19
2.4 การประยุกต์ใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าร่วมกับการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืช 19
2.5 หญ้ารูซี่ 20
2.5.1 ลักษณะทางพันธุศาสตร์ของหญ้ารูซี่ 20
2.5.2 การปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมของหญ้ารูซี่ 21
2.5.3 การปลูกหญ้ารูซี่ 21
2.5.4 ประโยชน์ของหญ้ารูซี่ 21
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 22
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 26
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย 26
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย 27
3.3 สถานที่ดำเนินการวิจัย 28
3.3.1 สถานที่เก็บตัวอย่างดิน 28
3.3.2 สถานที่เตรียมตัวอย่างดินและสถานที่ปลูกพืช 29
3.3.3 สถานที่วิเคราะห์ตัวอย่าง 29
3.4 ขั้นตอนการวิจัย 29
3.4.1 การเตรียมดิน 31
3.4.2 การเตรียมเมล็ดพันธุ์พืช 32

3.4.3 การเพาะพันธุ์ต้นกล้าพืช 33
3.4.4 การหาปริมาณสังกะสีในดินที่เหมาะสมที่หญ้ารูซี่สามารถบำบัดได้ 33
3.4.5 การหาความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดด้วยหญ้ารูซี่ 33
3.4.6 การหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยหญ้ารูซี่ 33
3.4.7 การหาความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่เหมาะสมที่จะบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสี 34
3.4.8 การเก็บเกี่ยวพืชและการเก็บตัวอย่างดิน 36
3.4.9 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ 36
บทที่ 4 ผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลอง 37
4.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของดินที่ใช้ในการทดลอง 37
4.2 การหาปริมาณสังกะสีในดินที่เหมาะสมที่หญ้ารูซี่สามารถบำบัดได้ 42
4.3 การหาความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดด้วยหญ้ารูซี่ 45
4.4 การหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยหญ้ารูซี่ 53
4.5 การหาความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่เหมาะสมที่จะบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสี 60
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 67
5.1 สรุปผลการทดลอง 67
5.1.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน 67
5.1.2 ปริมาณสังกะสีในดินที่เหมาะสมที่หญ้ารูซี่สามารถบำบัดได้ 67
5.1.3 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดด้วยหญ้ารูซี่ 68
5.1.4 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยหญ้ารูซี่ 68
5.1.5 ความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่เหมาะสมที่จะบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสี 69
5.2 ข้อเสนอแนะ 69

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

รายการอ้างอิง.....70

ภาคผนวก 76

ภาคผนวก ก.....77

ภาคผนวก ข.....80

ข.1 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลองทางสถิติของการหาปริมาณสังกะสีในดินที่เหมาะสมที่หญ้ารูซี่สามารถบำบัดได้.....80

ข.1.1 อัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ.....80

ข.1.2 มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ.....85

ข.1.3 ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ.....88

ข.2 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลองทางสถิติของการหาความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดด้วยหญ้ารูซี่.....93

ข.2.1 มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ.....93

ข.2.2 ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ.....96

ข.2.3 ปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ .98

ข.2.4 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ 101

ข.2.5 ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ 104

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ข.2.6 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่.....113

ข.3 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลองทางสถิติของการหาระยะเวลาการให้กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดด้วยหญ้ารูซี่.....119

ข.3.1 มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากเมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ.....119

ข.3.2 ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ.....122

ข.3.3 ปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ.....124

ข.3.4 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ 133

ข.3.5 ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ 138

ข.3.6 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ 146

ข.4 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลองทางสถิติของการหาความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่เหมาะสมที่จะบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสี.....151

ข.4.1 มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกที่ความหนาแน่นต่างๆ ในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า.....151

ข.4.2 ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า.....158

ข.4.3 ปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่ต่างกัน.....162

หน้า

ข.4.4 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่ต่างกัน 169

ข.4.5 ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ 173

ข.4.6 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ 182

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 188

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 อัตราการใช้สังกะสีในปี พ.ศ. 2552 – 2556 1

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของสังกะสี 5

ตารางที่ 3 รูปแบบของสังกะสีและการนำไปใช้ 7

ตารางที่ 4 รูปของสังกะสีและความเป็นพิษต่อมนุษย์ 9

ตารางที่ 5 ระดับเกณฑ์พื้นฐานของโลหะสังกะสีในสิ่งแวดล้อม 10

ตารางที่ 6 วิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ชนิดต่างๆ 32

ตารางที่ 7 ตำรับในการวิจัย 35

ตารางที่ 8 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของดินที่ใช้ในการทดลอง 37

ตารางที่ 9 อัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ ความเข้มข้นต่างๆ 43

ตารางที่ 10 มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ 44

ตารางที่ 11 ปริมาณสังกะสีที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสีที่ และมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ 49

ตารางที่ 12 ปริมาณสังกะสีที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสี และมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ 57

ตารางที่ 13 ปริมาณสังกะสีที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่ต่างกัน 63

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1 กลไกการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืช 11

รูปที่ 2 การสกัดโดยพืช 12

รูปที่ 3 กลไกการดูดซึมธาตุอาหาร 13

รูปที่ 4 การประยุกต์ใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าในการบำบัดสารปนเปื้อนภายในพื้นที่ 17

รูปที่ 5 กลไกการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนในการบำบัดโดยใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้า 18

รูปที่ 6 หญ้ารูซี่ 20

รูปที่ 7 ภาพรวมของขั้นตอนในการวิจัย 30

รูปที่ 8 ไดอะแกรมสามเหลี่ยมแสดงประเภทเนื้อดิน (USDA textural triangle) ของดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง 38

รูปที่ 9 มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ 46

รูปที่ 10 ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสี และมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ เป็นเวลา 15 วัน 47

รูปที่ 11 ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและขั้วแอโนดหลังจากการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ 51

รูปที่ 12 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดเมื่อมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับการบำบัดโดยหญ้ารูซี่ 52

รูปที่ 13 มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากเมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสี และมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ 54

รูปที่ 14 ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสี และมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ 55

รูปที่ 15 ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและขั้วแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ 58

หน้า

รูปที่ 16 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่.....59

รูปที่ 17 มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกที่ความหนาแน่นต่างๆ ในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า.....61

รูปที่ 18 ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ ในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า.....62

รูปที่ 19 ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและขั้วแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ.....65

รูปที่ 20 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ 66

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาการปนเปื้อนโลหะในสิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาหนึ่งที่หลายประเทศทั่วโลกต่างให้ความสนใจ สาเหตุของปัญหาดังกล่าวมักจะเกิดจากการขยายตัวของเทคโนโลยีและการพัฒนาอุตสาหกรรมเพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ ทำให้ต้องมีการทำเหมืองแร่ เพื่อนำแร่ดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ ซึ่งหากมีการจัดการที่ไม่เหมาะสมก็อาจจะทำให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนของโลหะทั้งในดิน น้ำ และอากาศ สำหรับประเทศไทยการปนเปื้อนของโลหะหนักเกิดขึ้นในพื้นที่หลายแห่ง เช่น การปนเปื้อนแคดเมียมที่ตำบลแม่ตาว จังหวัดตาก การปนเปื้อนสารหนูที่ตำบลร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช การปนเปื้อนสารตะกั่วในลำห้วยคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี การปนเปื้อนตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี ทั้งในดินและแหล่งน้ำใต้ดินที่นิคมอุตสาหกรรมลำพูน จังหวัดลำพูน จากสถานการณ์การปนเปื้อนโลหะหนักในประเทศไทย พบว่าสังกะสีเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่มีแนวโน้มที่จะเกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม เนื่องจากในระยะ 5 ปีที่ผ่านมา ประเทศไทยมีอัตราการใช้สังกะสีที่สูง (**ตารางที่ 1**) เพื่อนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น สารคลุกเมล็ดกันเชื้อรา สารป้องกันการขึ้นสนิมของเหล็กกล้า และใช้เป็นส่วนผสมของยาต่างๆ ซึ่งการใช้สังกะสีปริมาณที่สูงนี้อาจนำไปสู่การก่อให้เกิดปัญหาการกระจายของสังกะสีในสิ่งแวดล้อมจนส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตได้

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 1 อัตราการใช้สังกะสีในปี พ.ศ. 2552 – 2556

แร่	อัตราการใช้แร่ในปีต่างๆ (ตัน)					รวม
	2552	2553	2554	2555	2556	
Zinc						
Zinc alloy	24,045	30,873	36,253	34,735	32,493	158,399
Zinc metal	55,817	61,142	54,410	51,960	33,168	256,497
					รวม	414,896

ที่มา: กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ (2556)

การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมที่ปนเปื้อนโลหะหนักสามารถทำได้โดยวิธีทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ เพื่อแก้ไขปัญหาหรือลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อสิ่งมีชีวิตให้เหลือน้อยที่สุดหรือไม่เกิดผลกระทบเลย เทคโนโลยีหนึ่งที่ได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน คือ การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืช (Phytoremediation) ซึ่งข้อดีของการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืช คือ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการมีราคาถูก สามารถใช้ในการบำบัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนทั้งในและนอกพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน และกระบวนการที่ใช้ในการบำบัดเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

ผลการศึกษาของนักวิทยาศาสตร์พบว่า หญ้ารูซี่ (*Brachiaria ruziziensis*) เป็นพืชชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติเป็นพืช hyperaccumulator นอกจากนั้นหญ้ารูซี่ยังเป็นพืชที่ปลูกง่าย และเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ที่มีภูมิอากาศร้อนชื้น จึงเป็นพืชที่เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย

การใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าในการบำบัดโลหะหนักของพืชพบว่า การเพิ่มสนามไฟฟ้าจะช่วยเพิ่มความสามารถของพืชในการดูดดึงสารปนเปื้อน ดังนั้นในการศึกษาวิจัยนี้จึงมีการนำไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) มาใช้ในการบำบัดสังกะสีในดินร่วมกับหญ้ารูซี่

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1) เพื่อศึกษาความสามารถของหญ้ารูซี่ในการดูดดึงสังกะสีที่ปนเปื้อนในดิน และสะสมไว้ในส่วนเหนือดิน และส่วนราก

2) เพื่อศึกษาปริมาณสังกะสีในดินที่เหมาะสมที่หญ้ารูซี่สามารถบำบัดได้

3) เพื่อศึกษาถึงความต่างศักย์ไฟฟ้าของไฟฟ้ากระแสสลับ และระยะเวลาการให้กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยหญ้ารูซี่

4) เพื่อศึกษาความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่เหมาะสมที่จะใช้ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสี

1.3 สมมติฐานการวิจัย

1) หญ้ารูซี่มีความสามารถในการดูดดึงสังกะสีที่ปนเปื้อนในดิน และสะสมไว้ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนราก

2) การบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีโดยการให้ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ร่วมกับหญ้ารูซี่โดยมีความเข้มข้นของสังกะสี ความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาการให้กระแสไฟฟ้า และความหนาแน่นของการปลูกต้นหญ้ารูซี่ที่เหมาะสม จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนมากกว่าการใช้หญ้ารูซี่เพียงอย่างเดียว

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1) วิเคราะห์พารามิเตอร์ดินก่อนการทดลอง ได้แก่ ลักษณะเนื้อดิน (soil texture) ความชื้นในดิน (soil moisture) ความเป็นกรดด่างของดิน (pH) ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (organic matter content) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน (cation exchange capacity) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen) ปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (available phosphorus) ปริมาณโพแทสเซียมที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (available potassium) และปริมาณสังกะสีทั้งหมด (total zinc)

2) ทำการเพาะต้นกล้าของหญ้ารูซี่ (*Brachiaria ruziziensis*) เป็นเวลา 15 วัน นับจากวันที่งอก และเตรียมย้ายต้นกล้าเพื่อทดลองพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อไป

3) ทำการหาปริมาณสังกะสีในดินที่เหมาะสมที่หญ้ารูซี่สามารถบำบัดได้ โดยปลูกต้นกล้าหญ้ารูซี่จำนวน 10 ต้น ในกระถางที่มีดินที่มีการเติมสังกะสีที่แตกต่างกัน 4 ชุดการทดลอง โดยชุดการทดลองแรกไม่มีการเติมสังกะสี ชุดการทดลองที่สองเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ชุดที่สามเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน และชุดการทดลองที่สี่เติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน

4) ทำการหาความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยปลูกหญ้ารูซี่จำนวน 10 ต้น ลงในกระถางที่มีดินที่มีความเข้มข้นของสังกะสีที่หญ้ารูซี่สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุด (ผลการทดลองที่ได้จากข้อ 3) จากนั้นติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 4 ชุดการทดลอง โดยชุดการทดลองแรกไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ชุดการทดลองที่สองให้กระแสไฟฟ้าที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ชุดที่สามให้กระแสไฟฟ้าที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และชุดการทดลองที่สี่ให้กระแสไฟฟ้าที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร

5) ทำการหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยหญ้ารูซี่ โดยย้ายต้นกล้าหญ้ารูซี่จำนวน 10 ต้น ไปปลูกลงในกระถางที่มีดินที่มีความเข้มข้นของสังกะสีที่หญ้ารูซี่สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุด (ผลการทดลองที่ได้จากข้อ 3) และติดตั้งสนามไฟฟ้าที่ค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสม (ผลการทดลองที่ได้จากข้อ 4) โดยจะให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาที่แตกต่างกัน 4 ชุดการทดลอง โดยชุดการทดลองแรกไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ชุดการทดลองที่สองให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน ชุดที่สามให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน และชุดการทดลองที่สี่ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน

6) ทำการหาความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่เหมาะสมที่จะบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสี โดยปลูกต้นกล้าหญ้ารูซี่ในดินที่มีความเข้มข้นของสังกะสีที่หญ้ารูซี่สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุด (ผลการทดลองที่ได้จากข้อ 3) ในกระถางที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่มีค่าความต่างศักย์และระยะเวลาที่เหมาะสม (ผลการทดลองที่ได้จากข้อ 4 และ 5 ตามลำดับ) โดยปลูกต้นกล้าที่ความหนาแน่นที่แตกต่างกัน 4 ชุดการทดลอง โดยชุดการทดลองแรกไม่มีการปลูกพืช (ให้กระแสไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว) ชุดการทดลองที่สองปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ชุดที่สามปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และชุดการทดลองที่สี่ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

7) เก็บเกี่ยวตัวอย่างพืชและดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัด และทำการวิเคราะห์ปริมาณสังกะสีทั้งหมด โดยสกัดพืชและดินตามวิธีการของ EPA method 3052 แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณสังกะสีทั้งหมดด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบสภาวะที่เหมาะสมที่จะใช้หญ้ารูซี่ในการบำบัดดินที่มีการปนเปื้อนสังกะสี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สังกะสี

สังกะสีเป็นโลหะชนิดหนึ่งที่มีการผลิตและนำมาใช้ประโยชน์มาอย่างยาวนาน ในช่วงแรกมีการใช้มากในแถบประเทศอินเดียและจีนเท่านั้น แต่ในปัจจุบันมีการใช้สังกะสีอย่างแพร่หลาย และสังกะสียังกลายเป็นโลหะที่มีปริมาณการใช้มากเป็นลำดับที่สี่ รองจากเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง ตามลำดับ (กิตติพันธุ์ บางยี่ขัน, 2551)

2.1.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของสังกะสี

สังกะสี (Zinc) เป็นธาตุที่มีเลขอะตอม 30 สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Zn และเป็นธาตุที่จัดอยู่ในลำดับที่ 1 หมู่ IIB ในตารางธาตุ (periodic table of element) มีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 65.409 กรัมต่อโมล เป็นโลหะชนิดหนึ่งที่มีสีเงินขาว มีลักษณะมันเงา ละลายได้ดีในสภาพที่เป็นกรดอ่อนหรือด่างแก่ และสังกะสีจะไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศที่ชื้น ซึ่งสมบัติทางกายภาพและเคมีของสังกะสีแสดงดัง**ตารางที่ 2**

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของสังกะสี

สมบัติ	ลักษณะของสังกะสี
สถานะ	ของแข็ง
ความถ่วงจำเพาะ	7.14
จุดหลอมเหลว	419.53 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	907 องศาเซลเซียส
ความดันไอ ที่ 100 องศาเซลเซียส	1,023 P/Pa
ที่ 1000 องศาเซลเซียส	1,125 P/Pa
โครงสร้างผลึก	หกเหลี่ยม

ที่มา: International Zinc Association (2011)

2.1.2 ประเภทของสังกะสี

แร่สังกะสีที่พบในแหล่งต่างๆ บนโลก จำแนกตามสภาพการเกิดทางธรณีวิทยาได้ 2 ประเภท คือ

1) แร่สังกะสีปฐมภูมิ (primary zinc) หมายถึง แร่สังกะสีที่ยังไม่ผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติ แร่สังกะสีประเภทนี้ยกตัวอย่าง เช่น แร่สฟาเลอไรต์ (sphalerite) และแร่สังกะสีซิงไคท์ (zincite) โดยแร่สังกะสีชนิดแรกเป็นแร่สังกะสีซัลไฟด์ (sulphide) ส่วนแร่สังกะสีชนิดหลังเป็นแร่สังกะสีออกไซด์ (oxide) ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับแร่ทั้งสองชนิดมีดังนี้ (สุธรรม แย้มนิยม และงามพิศ แย้มนิยม, 2519)

- แร่สฟาเลอไรต์ (sphalerite) หรือแร่ซิงค์เบลนด์ (zincblende) หรืออาจเรียกว่า black jact เป็นแร่สังกะสีปฐมภูมิที่มีซัลไฟด์ (sulphide) เป็นองค์ประกอบ มีสูตรทางเคมี คือ ZnS โดยมีอัตราส่วนระหว่าง Zn และ S เท่ากับ 76 ต่อ 33 เปอร์เซ็นต์ มีระบบผลึกเป็น isometric (4, 3, m - hextetrahedral) มักพบเป็นสีเหลือง น้ำตาล หรือดำ เนื่องจากมีเหล็กเจือปน แต่ถ้าเป็นแร่สฟาเลอไรต์ที่บริสุทธิ์จะมีสีขาว ลักษณะเด่นของแร่ชนิดนี้ คือ มีลักษณะวาว

- แร่สังกะสีซิงไคท์ (zincite) เป็นแร่สังกะสีปฐมภูมิชนิดที่มีออกไซด์ (oxide) เป็นองค์ประกอบ ซึ่งมีสูตรทางเคมี คือ ZnO มีอัตราส่วนระหว่าง Zn และ O เท่ากับ 80.3 และ 19.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ บางครั้งอาจมีแมงกานีสร่วมด้วย ระบบผลึกเป็นแบบ hexagonal (6, m, m – dihexagonal - pyramidal) โดยแร่บริสุทธิ์จะมีสีขาว แต่หากมีแมงกานีสอยู่ด้วยแร่จะมีสีส้มเหลือง สีผงแร่เป็นสีส้มเหลือง ลักษณะเด่นของแร่สังกะสีซิงไคท์ คือ สีแร่และสีผงแร่ และแร่ชนิดนี้จะละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริก (HCl) (ผาแดงอินดัสทรี, 2557)

2) แร่สังกะสีทุติยภูมิ (secondary zinc) หมายถึง แร่สังกะสีที่ได้ผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติมาแล้ว สำหรับแร่สังกะสีประเภทนี้ยกตัวอย่าง เช่น แร่เฮมิมอร์ไฟต์ (hemimorphite) และแร่สมิทซอไนต์ (smithsonite) โดยสังกะสีชนิดแรกเป็นแร่สังกะสีซิลิเกต (silicate) ส่วนแร่สมิทซอไนต์ (smithsonite) จะเป็นแร่สังกะสีคาร์บอเนต (carbonate)

- แร่เฮมิมอร์ไฟต์ (hemimorphite) หรือแร่คาลาไมน์ (calamine) เป็นแร่สังกะสีทุติยภูมิชนิดที่มีซิลิเกต (silicate) เป็นองค์ประกอบ สูตรทางเคมีของแร่ชนิดนี้ คือ $Zn_4(Si_2O_7)(OH)_2 \bullet H_2O$ มีอัตราส่วนระหว่าง ZnO, Si_2O_7 และ H_2O เท่ากับ 67.5, 25.0 และ 7.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ระบบผลึกเป็นแบบ orthorhombic (m, m, 2 - pyramidal) มักพบเป็นสีขาว ลักษณะเด่น คือ มีลักษณะวาว โปร่งแสง เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะมีสมบัติในการก่อให้เกิดประจุไฟฟ้าในระบบผลึก

- แร่สมิทซอไนต์ (smithsonite) เป็นแร่สังกะสีคาร์บอเนต (carbonate) ที่มีสูตรทางเคมี คือ $ZnCO_3$ มีอัตราส่วนระหว่าง ZnO และ CO_2 เท่ากับ 64.8 และ 35.2 เปอร์เซ็นต์

ตามลำดับ บางครั้งอาจมีเหล็ก แมงกานีส แคดเมียม แมกนีเซียม ทองแดง โคบอลท์ และตะกั่ว ประกอบอยู่ในผลึกซึ่งแทนที่ในส่วนของสังกะสี เนื่องจากเป็นธาตุที่มีประจุเป็น divalent เหมือนกัน ระบบผลึกของแร่เป็นแบบ hexagonal -R (3, ^{2}/m – hexagonal - scalenhedral) มีหลายสีขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของธาตุที่มีอยู่ในแร่ เช่น สีขาว สีน้ำตาล สีชมพู หรือใสไม่มีสี สำหรับสีผงแร่ของแร่สมิทซอไนต์จะมีสีขาว ลักษณะเด่นของแร่ คือ มีความแข็งแรงมาก น้ำหนักสูง และเกิดฟองเมื่อทำปฏิกิริยาเคมีกับกรดไฮโดรคลอริกเย็น สำหรับประเทศไทยจะพบแร่ชนิดนี้ได้ที่อำเภอศรีสวัสดิ์ จังหวัดกาญจนบุรี และอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

2.1.3 รูปของสังกะสีและการนำไปใช้

สังกะสีในสิ่งแวดล้อมมีหลายรูปแบบ แต่ละรูปแบบจะมีการนำไปใช้ที่แตกต่างกัน ดัง **ตารางที่ 3**

ตารางที่ 3 รูปแบบของสังกะสีและการนำไปใช้

รูปของสังกะสี	การนำไปใช้
ซิงค์อะซิเตต ($Zn(C_2H_3O_2)_2$)	ใช้ทำยาป้องกันรักษาเนื้อไม้ ใช้ทำเป็นสีย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นสารเคลือบเซรามิค
ซิงค์อาเซเนต ($Zn_3(AsO_4)_2$)	ใช้ทำยาป้องกันรักษาเนื้อไม้ เป็นยาฆ่าแมลง
ซิงค์บอเรต (ZnB_4O_7)	ใช้ทำสิ่งทอที่มีลักษณะทนไฟ เป็นสารกันเชื้อรา
ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)	ใช้ในการผลิตแบตเตอรี่ ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้ในการผลิตยาสีฟันและใช้ในการกำจัดกลิ่นและควัน
ซิงค์ฟลูออโรซิลิเกต ($ZnSiF_6$)	ใช้ทำสารป้องกันมอด ใช้เป็นตัวช่วยทำให้คอนกรีตแข็ง
ซิงค์ไดไฮโดรซัลไนต์ (ZnS_2O_4)	ใช้เป็นสารฟอกขาวสำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอ
ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	ใช้ทำสังกะสี และอัลลอยด์ของโลหะ ใช้ในการผลิตยาง ใช้เติมในสีเพื่อเป็นสารป้องกันเชื้อรา ใช้ในการผลิตเครื่องถ่ายสำเนา การผลิตแก้ว เซรามิค สิ่งทอ และพลาสติก
ซิงค์ฟอสไฟด์ (Zn_3P_2)	สารเคมีจัดหนู
ซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4$)	ใช้ในการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ ผลิตภัณฑ์ควบคุมอาหาร อาหารสัตว์ สีย้อม สารถนอมอาหาร และสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์

ที่มา: International Zinc Association (2011)

2.1.4 การปนเปื้อนสังกะสีในสิ่งแวดล้อม

การนำสังกะสีมาใช้ประโยชน์จะต้องนำแร่สังกะสีมาผ่านกระบวนการต่างๆ หากไม่มีการจัดการที่ดีก็จะทำให้สังกะสีเกิดการปนเปื้อนและเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งการปนเปื้อนของสังกะสีในสิ่งแวดล้อมสามารถจำแนกตามกระบวนการเกิดได้ 2 ชนิด คือ เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และเกิดจากการกระทำของมนุษย์

1) การปนเปื้อนสังกะสีที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เกิดขึ้นจากการผุพังตามธรรมชาติของหินและแร่ จากการกระทำของลมและน้ำ การระเบิด (ปะทุ) ของภูเขาไฟ ไฟไหม้ป่า และการรวมตัวของละอองฝุ่นในอากาศเหนือน้ำทะเล ซึ่งการกระทำเหล่านี้เป็นสาเหตุให้วัฏจักรของสังกะสีและระดับของสังกะสีทั้งในดิน น้ำ และอากาศ เกิดการเปลี่ยนแปลงไป การปนเปื้อนประเภทนี้มักเป็นเกิดส่วนน้อยเมื่อเทียบกับการปนเปื้อนของสังกะสีที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์

2) การปนเปื้อนสังกะสีที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ เป็นสาเหตุหลักของการเกิดการปนเปื้อนของสังกะสีในสิ่งแวดล้อม โดยการกระทำที่เป็นสาเหตุของปัญหาดังกล่าว เช่น การทำเหมืองแร่ การถลุงแร่ การเผาแร่ และการใช้กากตะกอนน้ำเสียที่มีปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีเกินค่ามาตรฐานมาใช้ในการทำเกษตรกรรม (ณัฐกาญจน์ ตันติธีรศักดิ์, 2553)

2.1.5 ความเป็นพิษของสังกะสี

1) ความเป็นพิษต่อมนุษย์

โดยทั่วไปสังกะสีถือเป็นธาตุที่สำคัญ และมีความจำเป็นต่อร่างกายและชีวิตของมนุษย์ แต่หากมนุษย์ได้รับสังกะสีเข้าสู่ร่างกายในปริมาณที่มากเกินไป ทั้งจากการรับประทาน และจากการหายใจสังกะสีก็อาจจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์ได้ สังกะสีที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมมีอยู่หลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละรูปแบบก็ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์แตกต่างกัน สำหรับตัวอย่างความเป็นพิษของสังกะสีต่อมนุษย์ ดังแสดง**ตารางที่ 4**

ตารางที่ 4 รูปของสังกะสีและความเป็นพิษต่อมนุษย์

รูปของสังกะสี	อาการ
ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ผิวหนัง และตา หากกินหรือกลืนเข้าไปอาจเกิดอาการหนาวสั่น เป็นไข้ ท้องร่วง อาเจียน และอ่อนเพลีย
ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)	เกิดการระคายเคืองอย่างรุนแรงต่อผิวหนัง หลอดลม เยื่อบุจมูก และเยื่อบุตา คลื่นไส้อาเจียน ถ่ายเป็นเลือด และอาจหมดสติได้ หากสตรีมีครรภ์ได้รับสัมผัสเป็นระยะเวลานานจะเสี่ยงต่อการเจริญเติบโตที่ผิดปกติของทารกในครรภ์
ซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4$)	เกิดการระคายเคืองต่อจมูกและทางเดินหายใจ หายใจติดขัด เกิดปอดบวมและอาจทำให้เสียชีวิตได้ หากสัมผัสถูกผนังจะเกิดการระคายเคือง และผื่นแดง และหากกลืนหรือกินเข้าไปอาจก่อให้เกิดอาการท้องร่วงและอาเจียนได้
ซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS)	เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ผิวหนัง และตา หากกินหรือกลืนเข้าไปอาจก่อให้เกิดอันตรายและมีความเป็นพิษมากขึ้น เช่น มีอาการหนาวสั่น เป็นไข้ ท้องร่วง อาเจียน และอ่อนเพลีย

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2557)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2) ความเป็นพิษต่อสัตว์

สำหรับความเป็นพิษของสังกะสีต่อสัตว์นั้น สุรกาญจน์ ไพชำนาญ และคณะ (2554) ได้ทำการทดสอบความเป็นพิษของสังกะสีออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ณ เวลาต่างๆ ผลการทดลองพบว่า ปลานิลแดงจะมีอัตราการตายมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำเพิ่มขึ้น เช่น เมื่อเวลาผ่านไป 96 ชั่วโมง ปลานิลแดงมีอัตราการตาย 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับความเข้มข้นของสังกะสีเท่ากับ 5.20 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัตราการตายของปลานิลแดงจะเพิ่มขึ้นเป็น 90 เปอร์เซ็นต์เมื่อในน้ำมีระดับความเข้มข้นของสังกะสีเพิ่มขึ้น

3) ความเป็นพิษต่อพืช

สังกะสีจัดเป็นธาตุอาหารจุลภาค หรือเป็นธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณที่น้อยเพื่อใช้การเจริญเติบโตของพืช (ยงยุทธ โอสถสภา, 2546) โดยสังกะสีจะช่วยในการสังเคราะห์ฮอร์โมนออกซิน คลอโรฟิลล์ และแป้ง (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) ดังนั้นหากพืชได้รับ

สังกะสีไปในปริมาณที่มากจนเกินไป สังกะสีนี้จะมีผลในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเมล็ดพืช ราก พืช และก่อให้เกิดอาการเป็นพิษต่อพืช ซึ่งค่าปกติของสังกะสีที่จะสะสมในพืชจะอยู่ที่ 1 – 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักแห้งของพืช (Mukhopadhyay และ Maiti, 2010)

2.1.6 ค่ามาตรฐานของสังกะสีในสิ่งแวดล้อม

จากปัญหาการปนเปื้อนของสังกะสีในสิ่งแวดล้อม ทำให้ต้องมีการกำหนดระดับเกณฑ์พื้นฐานของสังกะสีในสิ่งแวดล้อม เพื่อที่จะได้มีการป้องกันและการจัดการเพื่อลดปัญหาหรือผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม ซึ่งระดับเกณฑ์และค่ามาตรฐานดังกล่าว แสดงดัง **ตารางที่ 5**

ตารางที่ 5 ระดับเกณฑ์พื้นฐานของโลหะสังกะสีในสิ่งแวดล้อม

ตัวกลางที่ปนเปื้อน	ระดับเกณฑ์พื้นฐานของสังกะสี
ในดิน	3 – 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน
กากตะกอนที่จะนำไปใช้ในการเกษตร	3,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของกากตะกอน
น้ำเพื่อการบริโภค	ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
น้ำใต้ดิน	ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม	ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
น้ำทิ้งลงบ่อบาดาล	ไม่เกิน 15 มิลลิกรัมต่อลิตร
ในฝุ่นที่ปนอยู่ในอากาศ	ไม่เกิน 5000 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ที่มา: กัณฑรีย์ ศรีพงศ์พันธุ์ (2549), กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ (2549) และ Mukhopadhyay และ Maiti (2010)

2.2 การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืช

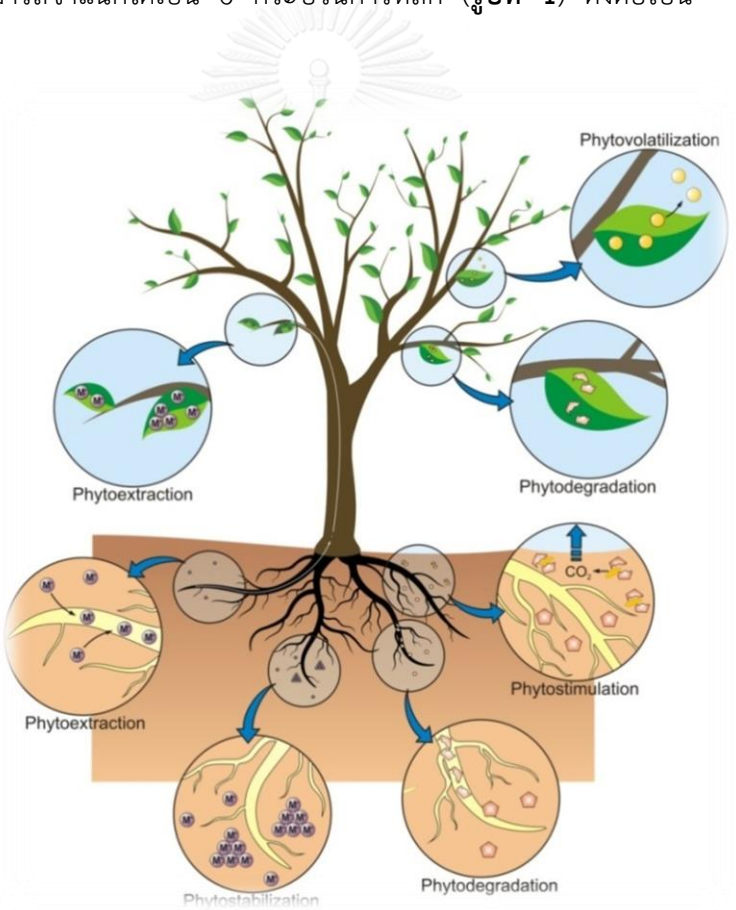
การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืช หรือ phytoremediation เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ในปัจจุบันเป็นที่นิยมมาก เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ช่วยในการบำบัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนและตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีราคาถูก สะดวก ไม่ซับซ้อนสามารถใช้ในการบำบัดสารทั้งในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน (in situ) และนอกพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน (ex situ) อีกทั้งเทคโนโลยีดังกล่าวยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ซึ่งรายละเอียดต่างๆ เกี่ยวกับการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืช มีดังต่อไปนี้

2.2.1 นิยามของการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืช

การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืช (phytoremediation) เป็นกระบวนการใช้พืชสีเขียวในการกำจัดความเป็นพิษของสารที่ปนเปื้อนและตกค้างในตัวกลางสิ่งแวดล้อม ทั้งดิน น้ำ และอากาศ สำหรับกลไกของพืชที่ใช้ในการกำจัดสารดังกล่าวมีทั้งทางตรงและทางอ้อม กลไกทางตรงของพืช คือ พืชจะย่อยสลายสารมลพิษที่ปนเปื้อนในตัวกลาง ส่วนกลไกทางอ้อม คือ พืชจะดูดซึมสารมลพิษปนเปื้อนในตัวกลางผ่านทางรากพืช สารเหล่านั้นจะเกิดการเคลื่อนที่เข้าสู่พืช และสะสมไว้ในส่วนต่างๆ ของพืช (อลิสา วังใน, 2552)

2.2.2 กระบวนการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืช

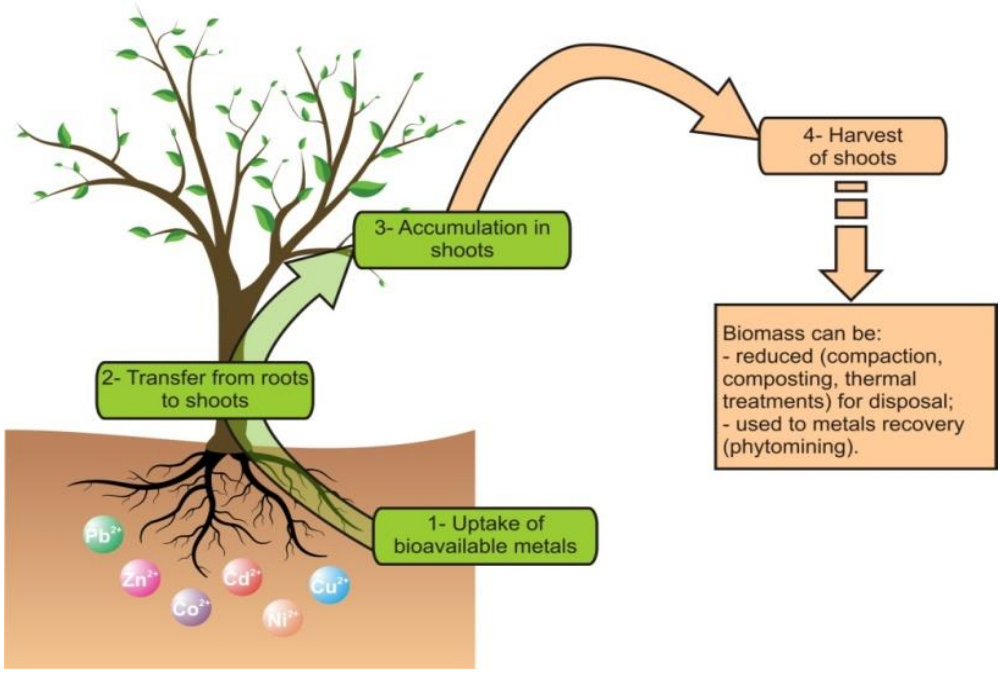
กระบวนการในการใช้พืชกำจัดความเป็นพิษของสารมลพิษที่ปนเปื้อนในตัวกลางสิ่งแวดล้อม สามารถจำแนกได้เป็น 6 กระบวนการหลัก (**รูปที่ 1**) ดังต่อไปนี้



รูปที่ 1 กลไกการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืช

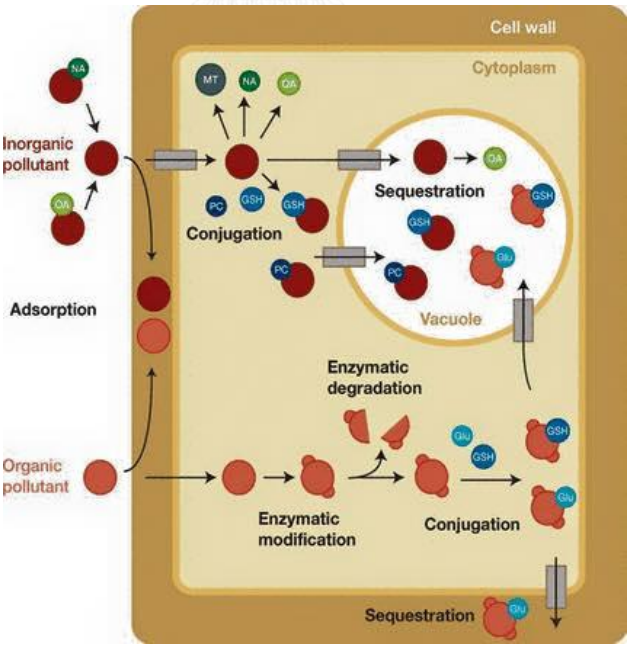
ที่มา: Favas และคณะ (2014)

1) การสกัดโดยพืช (phytoaccumulation หรือ phytosequestration หรือ phytoabsorbtion) คือ การที่พืชดูดดึงสารมลพิษที่ปนเปื้อนในตัวกลางดินหรือน้ำ ผ่านทางราก สารปนเปื้อนเหล่านั้นจะเคลื่อนที่จากราก ไปยังส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน และสะสมไว้ในส่วนต่างๆ ของพืช Hazrat และคณะ (2013) หลังจากการบำบัด พืชเหล่านั้นจะถูกเก็บเกี่ยวออกไปจากพื้นที่ที่ได้ทำการบำบัดสารปนเปื้อน และนำไปจัดการอย่างเหมาะสมต่อไป (**รูปที่ 2**) สารมลพิษที่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการนี้ ได้แก่ นิวไคลด์กัมมันตรังสี (radionuclides) เช่น ยูเรเนียม และโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว นิกเกิล สังกะสี คอปเปอร์ แคดเมียม และโคบอล สำหรับพืชที่นำมาใช้ในการบำบัดสารมลพิษด้วยกระบวนการสกัดโดยพืช เรียกว่า hyperaccumulator ซึ่งพืช hyperaccumulator เป็นพืชที่สามารถสะสมโลหะได้ในระดับที่สูง หรือสามารถสะสมโลหะได้มากกว่าพืชชนิดอื่นที่ปลูกในดินชนิดเดียวกันถึง 100 เท่า หรือมากกว่า 0.1 - 1 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้งของพืช (Meagher, 2000) ตัวอย่างพืชที่เป็น hyperaccumulator เช่น *Cucurbita pepo*, *Medicago sativa, Sedum alfredii* และ *Thlaspi caerulescens* (Aggarwal และ Goyal, 2007)



รูปที่ 2 การสกัดโดยใช้พืช
ที่มา: Favas และคณะ (2014)

กลไกของกระบวนการสกัดโดยพืช (**รูปที่ 3**) สามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ การดูดซึม (adsorption) การลำเลียง (transport) และการเคลื่อนย้าย (translocation) (อลิสา วังใน, 2552) เริ่มจากรากพืชจะดูดซึมสารมลพิษที่ละลายอยู่ในดินเข้าสู่พืชผ่านทางขนราก (root hair) และเอพิเดอร์มิส (epidermis) ของพืช จากนั้นสารมลพิษจะเคลื่อนย้ายเข้าไปยังเนื้อเยื่อพืชในส่วนต่างๆ โดยพืชจะมีตัวขนส่งโลหะ (transporter) ที่มีหน้าที่จะลำเลียง (Transport) โลหะหนัก ยกตัวอย่างเช่น สังกะสี (จุลธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืช) จะมีโปรตีนชนิดหนึ่งที่ช่วยเคลื่อนย้ายสังกะสีที่อยู่ในรูป Zn^{2+} เข้าสู่ส่วนต่างๆ ของพืช ซึ่งโปรตีนดังกล่าวมีชื่อว่า ZIP (zinc transporter proteins) เมื่อสารมลพิษเข้าสู่เนื้อเยื่อพืชจะเคลื่อนย้ายผ่านช่องว่างระหว่างผนังเซลล์ในชั้นคอร์เทกซ์ (cortex) และเมื่อสังกะสีเคลื่อนที่มายังเอนโดเดอร์มิส (endodemis) จะมีแถบแคสพาเรียน (casparian strip) ที่กั้นอยู่ที่ผนังเซลล์ ทำให้สังกะสีไม่สามารถผ่านไปได้ จึงต้องผ่านไปทางไซโทพลาสซึม (cytoplasm) ของเอนโดเดอร์มิสแล้วจึงเข้าสู่สตีล (stele) และไปยังไซเลม (xylem) จากนั้นสังกะสีจะเคลื่อนที่จากส่วนรากไปยังส่วนเหนือพื้นดินกระจายไปยังส่วนต่างๆ และพืชจะเก็บโลหะไว้ในส่วนที่ไม่เป็นอันตรายต่อพืช (นัยนันทน์ อริยกานนท์, 2558)



รูปที่ 3 กลไกการดูดซึมธาตุอาหาร
ที่มา: Forster และคณะ (2007)

2) การกรองโดยรากพืช (rhizofiltration) คือ การกำจัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนโดยการดูดซับ และการตกตะกอนในตัวกลางที่เป็นน้ำ เช่น น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดิน โดยรากพืช การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืชด้วยกระบวนการนี้พืชจะดูดติดสารมลพิษในตัวกลางที่เป็นของเหลว และสารดังกล่าวจะเกิดการเคลื่อนที่จากตัวกลางผ่านเข้าสู่รากพืชซึ่งจะคล้ายกับการสกัดโดยพืช แต่การกรองโดยรากพืชจะไม่มีการส่งต่อสารมลพิษที่ปนเปื้อนไปยังส่วนของพืชที่อยู่เหนือพื้นดิน หรือสารพิษพิษจะเกิดการสะสมอยู่แค่ในส่วนรากพืชเท่านั้น (Dushenkov และคณะ, 1995) กระบวนการนี้สามารถใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์และโลหะหนัก เช่น แคดเมียม ตะกั่ว นิกเกิล สังกะสี โครเมียม และทองแดง (Lee และ Yang, 2010) สำหรับตัวอย่างพืชที่ใช้ในการบำบัดด้วยกระบวนการกรองโดยรากพืช เช่น *Nicotiana tabacum L.* และ *Chenopodium amaranticolor*

3) การตรึงโดยพืช (phytostabillization หรือ phytoimmobilization คือ การทำให้สารมลพิษที่ปนเปื้อนในตัวกลางเกิดการคงตัว และไม่เคลื่อนที่ หรือเป็นการเปลี่ยนรูปสารมลพิษที่ปนเปื้อนให้ลดความเป็นพิษลง เช่น โครเมียม (6^+) เป็นโครเมียม (3^+) ซึ่งเป็นรูปที่ละลายน้ำได้น้อยลง (Mendez และ Maier, 2008) โดยอาศัยกลไกการดูดซับและการสะสมสารปนเปื้อนเหล่านั้นโดยรากพืช หรือการดูดซับไปยังรากพืช หรือการตกตะกอนภายในบริเวณรากพืช แต่กระบวนการนี้สามารถใช้ได้ผลเพียงชั่วคราวเท่านั้น เนื่องจากการควบคุมโลหะหนักให้มีความคงตัวและไม่เกิดการเคลื่อนที่นั้นทำได้ยาก กระบวนการบำบัดโดยวิธีนี้สามารถใช้ในการบำบัดสารปนเปื้อน เช่น นิวไคลด์กัมมันตรังสี และโลหะ เช่น ตะกั่ว สังกะสี และทองแดง สำหรับพืชที่นิยมใช้ในการบำบัดด้วยกระบวนการตรึงโดยพืชจะเป็นไม้ยืนต้น เช่น *Populas* spp., *Schinus molle* L. และ *Salix babylonica* L.

4) การย่อยสลายโดยพืช (phytodegradation หรือ phytotransformation) คือ การที่พืชปล่อยเอมไซม์ออกมาเพื่อทำปฏิกิริยาทางเคมีและย่อยสลายสารปนเปื้อนที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์ เช่น สารฆ่าวัชพืช จากโมเลกุลใหญ่ให้มีขนาดโมเลกุลที่เล็กลง หรือเกิดการเปลี่ยนรูปของสารไป ซึ่งกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นหลังจากที่สารมลพิษถูกดูดซึมและลำเลียงมายังรากพืช สำหรับเอมไซม์ที่พืชปล่อยออกมาเพื่อทำปฏิกิริยาดังกล่าว เช่น dehalogenase และ oxygenase (Vishnoi และ Srivastava, 2007) สำหรับกระบวนการย่อยสลายโดยพืช จะไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับกิจกรรมของจุลินทรีย์ จึงสามารถเกิดขึ้นในดินที่ปลอดเชื้อได้ (sterile soil) ซึ่งพืชที่นิยมใช้ในการบำบัดด้วยกระบวนการย่อยสลายโดยพืช เช่น *Poplar* spp., *Myriophyllum aquaticum* และ *Salix babylonica* L.

5) การย่อยสลายโดยรากพืช (rhizodegradation) เป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อน เช่น พอลิไซคลิกแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) โดยจุลินทรีย์ที่อยู่ใน

เขตรากพืช (Mukhopadhyay และ Maiti, 2010) กระบวนการนี้เริ่มจากพืชจะปล่อยเอมไซม์บางอย่างที่มีผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่อาศัยในดินผ่านทางรากพืช (EPA, 2000) จากนั้นจุลินทรีย์จะทำการย่อยสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในดิน และเปลี่ยนรูปเป็นสารอนินทรีย์ซึ่งอยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (อลิสา วังใน, 2552) กระบวนการย่อยสลายโดยรากพืชอาจเรียกได้อีกอย่างว่า phytostimulation เนื่องจากพืชไม่ได้ย่อยสารปนเปื้อนโดยตรง แต่จะทำหน้าที่ในการปล่อยเอมไซม์ที่มีสมบัติเป็นสารอาหารของจุลินทรีย์ สำหรับพืชที่นิยมใช้ในการบำบัดด้วยกระบวนการย่อยสลายโดยพืช เช่น *Poplar* spp.*, Myriophyllum aquaticum* และ *Salixbabylonica* L.

6) การทำให้ระเหยโดยพืช (phytovolotilization) คือ การที่พืชดูดดึงสารอินทรีย์และโลหะหนักบางชนิด เช่น ปรอท และซีลีเนียม ที่ปนเปื้อนอยู่ในตัวกลางดินหรือน้ำ และเปลี่ยนรูปสารดังกล่าวให้อยู่ในรูปที่สามารถระเหยได้ และมีความเป็นพิษน้อยลง จากนั้นจึงปล่อยออกสู่บรรยากาศผ่านทางใบพืช (Padmavathiamma และ Li, 2007) สำหรับตัวอย่างพืชที่ใช้ในการบำบัดด้วยกระบวนการระเหยโดยพืช เช่น *Brassica juncea* และ *Brassica napus* (Banuelos และคณะ, 1997)

2.2.3 ข้อดีและข้อจำกัดของการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืช

การบำบัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมสามารถทำได้โดยใช้เทคโนโลยีในการบำบัดมากมาย ทั้งทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ความเข้มข้นของสารมลพิษ ความเหมาะสมของพื้นที่ ประสิทธิภาพของวิธีการ ระยะเวลา ค่าใช้จ่ายของวิธีการบำบัด และการยอมรับของประชาชน โดยแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อจำกัดของกระบวนการที่แตกต่างกันออกไป สำหรับการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืช หรือ phytoremediation ก็เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีทางชีวภาพที่ได้รับความนิยมอย่างมาก ซึ่งข้อดีและข้อจำกัดของการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืชมีดังต่อไปนี้

1) ข้อดีของการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืช

1.1) เป็นเทคโนโลยีทางชีวภาพเทคโนโลยีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการนำมาบำบัดพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนสารมลพิษที่มีบริเวณกว้าง เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่ำเมื่อเทียบกับการบำบัดด้วยเทคโนโลยีอื่นๆ เช่น soil washing, soil flushing, chemical oxidation, ion exchange, biofilter และ bioventing เป็นต้น

1.2) เป็นเทคโนโลยีที่ส่วนใหญ่จะใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นหลัก (อัจฉราพร ขำโสภา, 2552) และเป็นที่ยอมรับของสาธารณะ เนื่องจากมีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมน้อย หรืออาจไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเลย ดังนั้นการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืช จึงเป็นเทคโนโลยีที่มีความยั่งยืนวิธีหนึ่ง

1.3) ในกระบวนการบำบัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนในตัวกลางดินหรือน้ำโดยการสกัดด้วยพืช (phytoaccumulation) พืชที่ใช้ในกระบวนการบำบัดนี้จะเป็นพืช hyperaccumulator ซึ่งพืชเหล่านั้นสามารถสะสมสารมลพิษไว้ในส่วนต่างๆ ของพืช และสามารถนำสารปนเปื้อนที่ได้สะสมอยู่นั้นไปทำการสกัดเพื่อนำมาหมุนเวียนหรือใช้ประโยชน์ใหม่ได้ (ณัฐกาญจน์ ตันติธีรศักดิ์, 2553)

1.4) เป็นกระบวนการที่สามารถประยุกต์เพื่อใช้ในการบำบัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น ตัวทำละลายที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ สารอินทรีย์ระเหย (VOCs) น้ำมันดิบ สารกลุ่มโพลีคลอริเนตเตตไบเฟนนิล (PCBs) สารฆ่าศัตรูพืช และสารประกอบกลุ่มโพลีอะโรมาติคไฮโดรคาร์บอน (PAHs) และสามารถใช้ในการบำบัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนที่เป็นสารอนินทรีย์ เช่น นิวไคลด์กัมมันตรังสี (radionuclides) และโลหะ

1.5) ในกระบวนการบำบัดโดยการย่อยสลายทั้งการย่อยสลายโดยพืชและการย่อยสลายโดยรากพืช เป็นวิธีการบำบัดอย่างถาวร เนื่องจากสารมลพิษที่ปนเปื้อนในตัวกลางจะถูกย่อยสลาย และพืชสามารถนำสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการย่อยสลายนี้ไปใช้ในการเจริญเติบโตของพืชได้ (อลิสา วังใน, 2552)

2) ข้อจำกัดของการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืช

2.1) ใช้ระยะเวลาในการบำบัดนาน เนื่องจากขึ้นอยู่กับความสามารถและชนิดของพืช และการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืชในกระบวนสกัดด้วยพืช พืชที่ใช้ในการบำบัดจะต้องเป็นพืชที่มีคุณสมบัติเป็นพืช hyperaccumulator เท่านั้น และพืช hyperaccumulator หลายชนิดเจริญเติบโตช้า ซึ่งอาจส่งผลให้ระยะเวลาในการบำบัดนานไปด้วย (Hazrat และคณะ, 2013)

2.2) สามารถบำบัดได้เฉพาะในเขตที่รากพืชสามารถไปได้ถึงเท่านั้น เนื่องจากกลไกต่างๆ ที่พืชใช้ในกระบวนการบำบัด จะต้องใช้รากพืชเป็นตัวขับเคลื่อนกลไก (ณัฐกาญจน์ ตันติธีรศักดิ์, 2553)

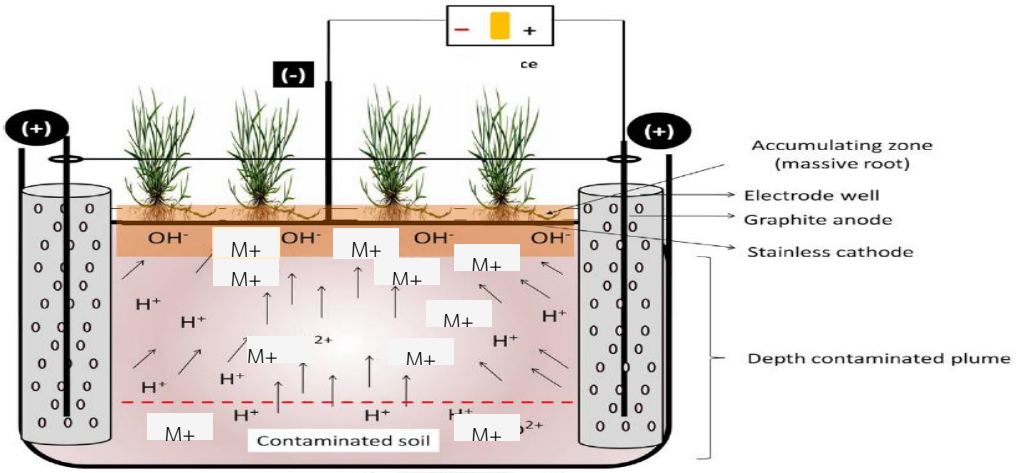
2.3) ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้บำบัดพื้นที่ที่มีสารมลพิษที่ระดับความเข้มข้นสูงๆ เนื่องจากอาจทำให้พืชตายได้ และหากไม่มีการจัดการที่เหมาะสมในการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืชอาจทำให้เกิดความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนของสารมลพิษในห่วงโซ่อาหารได้ (Ali และคณะ, 2013)

2.3 การบำบัดโดยใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้า

2.3.1 นิยามของการบำบัดโดยใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้า

การบำบัดโดยใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้า (electroreclamation หรือ electrokinetic soil processing หรือ electrokinetic remediation หรือ electrochemical decontaminant)

เป็นกระบวนการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อม ซึ่งออกแบบมาเพื่อบำบัดสารปนเปื้อนในดิน ตะกอน และกากตะกอน (Reddy และคณะ, 2009) โดยในกระบวนการบำบัดนี้ได้มีการประยุกต์ศักย์ไฟฟ้าผ่านอนุกรมอิเล็กโทรดที่มีขั้วแคโทด และขั้วแอโนด สนามไฟฟ้าที่เติมลงไปจะมีค่าความต่างศักย์ที่ต่ำแต่จะไปชักนำให้เกิดปฏิกิริยาในดิน และสารปนเปื้อนเกิดการเคลื่อนที่ไปทางขั้วแคโทดหรือขั้วแอโนด จากนั้นจึงทำการกำจัดสารปนเปื้อนออกในภายหลัง ซึ่งแสดงดัง**รูปที่ 4**



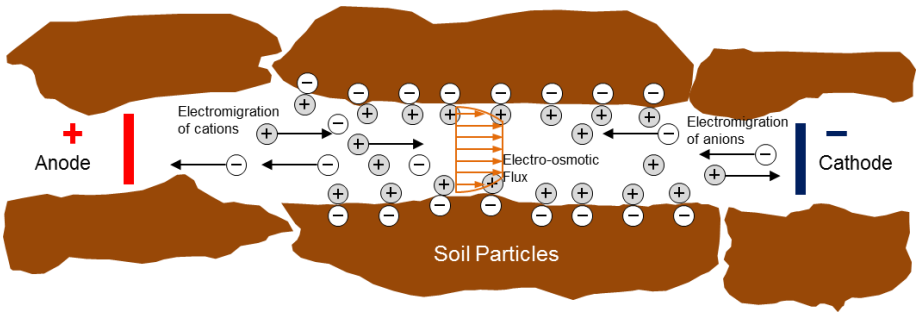
รูปที่ 4 การประยุกต์ใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าในการบำบัดสารปนเปื้อนภายในพื้นที่

ที่มา: ดัดแปลงมาจาก Putra และคณะ (2013)

Chulalongkorn University

2.3.2 กระบวนการบำบัดโดยใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้า

กระบวนการบำบัดโดยใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าจะต้องอาศัยกลไกในการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อน ดังต่อไปนี้ (**รูปที่ 5**)



รูปที่ 5 กลไกการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนในการบำบัดโดยใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้า

ที่มา: Cameselle และคณะ (2013)

1) electromigration คือ การเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายที่อยู่ล้อมรอบเซลล์ (interstitial fluid) ในดินจากอิเล็กโทรดหนึ่งไปยังอิเล็กโทรดหนึ่งที่มีประจุตรงกันข้าม ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า โดยไอออนที่มีประจุบวกจะเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโทรดที่มีประจุลบ (ขั้วแคโทด) และไอออนที่มีประจุลบจะเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโทรดที่มีประจุบวก (ขั้วแอโนด) ซึ่งการเคลื่อนที่ของไอออน หรือ electromigration จะขึ้นอยู่กับขนาดของไอออน ประจุของไอออน และความต้านทานของสนามไฟฟ้า

2) electro - osmosis คือ อัตราการไหลสุทธิของน้ำหรือที่ของเหลวอยู่ล้อมรอบเซลล์ (interstitial fluid) ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า โดย electro - osmosis เป็นกลไกการเคลื่อนย้ายที่ค่อนข้างจะซับซ้อน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของสนามไฟฟ้าของผิวดิน คุณสมบัติของของเหลวที่อยู่ล้อมรอบเซลล์และปฏิกิริยาระหว่างผิวดิน และส่วนประกอบในสารละลาย การไหลของ electro - osmosis จะไหลผ่านช่องว่างของโครงสร้างดิน ซึ่งปกติอนุภาคดินและตะกอนดินจะมีประจุเป็นลบ ดังนั้นการไหลของ electro - osmosis จึงไหลไปยังขั้วแอโนด

3) electrophoresis คือ การเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุของขนาดคอลลอยด์ภายในบริเวณที่มีการปนเปื้อน โดยมีการประยุกต์ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าเทียบกับช่องของเหลวที่คงที่ ซึ่งหากเปรียบเทียบกลไกในการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนระหว่างกลไก electrophoresis และกลไก electro - osmosis จะพบว่าการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนด้วยกลไก electrophoresis จะไม่สามารถเคลื่อนย้ายอนุภาคในดินที่มีลักษณะเป็นอนุภาคละเอียดหรือในดินเหนียวได้ อย่างไรก็ตามเคลื่อนย้ายด้วยกลไกนี้อาจจะเป็นกลไกที่สำคัญที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในระบบแขวนลอยดิน และใช้ในการเคลื่อนที่ของคอลลอยด์ (รวมทั้งแบคทีเรีย) และไมเซลล์ (micelle) ด้วย

4) diffusion หรือ การแพร่ คือ การเคลื่อนที่ของอนุภาคสารจากบริเวณที่มีความหนาแน่นสูงไปยังบริเวณที่มีความหนาแน่นของสารต่ำ หรือบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารต่ำ โดยอาศัยพลังงานจลน์ของสารเอง ไม่ขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าซึ่งจะแตกต่างกับกลไกการเคลื่อนที่แบบ electromigration แบบ electro-osmosis และแบบ electrophoresis และกลไกการเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบนี้มักไม่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการบำบัด เนื่องจากมีอัตราเร็วในการแพร่ต่ำ เมื่อเทียบกับกลไกอื่นๆ ดังที่กล่าวไปแล้ว

2.3.3 ชนิดของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการบำบัด

กระแสไฟฟ้า (electric current) เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในตัวกลางหรือตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ภายใต้การเคลื่อนอิทธิพลของสนามไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสามารถจำแนกได้ 2 ชนิด คือ ไฟฟ้ากระแสตรง (direct current หรือ DC) และไฟฟ้ากระแสสลับ (alternating current หรือ AC) ซึ่งรายละเอียดของแต่ละชนิดมีดังต่อไปนี้

1) ไฟฟ้ากระแสตรง (direct current หรือ DC) คือ การเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับทิศทางของอิเล็กตรอนในตัวนำ ซึ่งอิเล็กตรอนจะมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันและไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่มีกระแสไฟฟ้าแบบนี้ เช่นแบตเตอรี่ (battery) ถ่านไฟฉายเซลล์สุริยะ และไดนาโมกระแสตรง

2) ไฟฟ้ากระแสสลับ (alternating current หรือ AC) คือ กระแสไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับเวลาและอิเล็กตรอนจะมีการเคลื่อนที่ไปมาตลอดเวลามีทิศทางการเคลื่อนที่สลับกัน

2.4 การประยุกต์ใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าร่วมกับการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืช

Chulalongkorn University

Bi และคณะ (2010) ได้การศึกษาอิทธิพลของไฟฟ้าต่อการเจริญเติบโตของต้นผักกาดหอม (*Lactuca sativa*) ที่ปลูกในสารละลายที่มีและไม่มีการปนเปื้อนของแคดเมียม โดยผู้วิจัยได้ทำการเพาะเมล็ดผักกาดหอม และเติมไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ที่มีค่าความต่างศักย์เท่ากับ 10 และ 50 โวลต์ต่อเซนติเมตร หลังจากนั้น 60 วัน จึงทำการเก็บเกี่ยวต้นพืช ผลการทดลองพบว่ามวลชีวภาพของพืชที่เจริญเติบโตในตัวกลางที่ไม่ปนเปื้อนแคดเมียมและการเติมไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ที่มีค่าความต่างศักย์เท่ากับ 10 และ 50 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีปริมาณที่สูงกว่ามวลชีวภาพของพืชที่เจริญเติบโตในตัวกลางที่ไม่ปนเปื้อนแคดเมียมและไม่มีการเติมกระแสไฟฟ้า แม้ว่ามวลชีวภาพของพืชจะลดลงเมื่อปลูกในตัวกลางที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมและการเติมไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) แต่ก็มีปริมาณที่สูงกว่ามวลชีวภาพของพืชที่เจริญเติบโตในตัวกลางที่ไม่ปนเปื้อนแคดเมียมและไม่มีการเติมกระแสไฟฟ้าไป ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ากระแสไฟฟ้ามีส่วนทำให้มวลชีวภาพของพืชเพิ่มขึ้น

2.5 หญ้ารูซี่

หญ้ารูซี่ (ruzi grass) เป็นหญ้าพื้นเมืองของประเทศคองโก มีการนำเข้ามาในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2511 โดยฟาร์มโคนมไทยเดนมาร์ค ได้นำเข้าหญ้าชนิดนี้มาจากประเทศออสเตรเลีย ซึ่งหญ้ารูซี่เป็นหญ้าต่างประเทศที่สามารถปรับตัวได้ดี ติดเมล็ดดี และขยายพันธุ์ได้ง่าย ซึ่งลักษณะทางกายภาพของหญ้ารูซี่แสดง**ดังรูปที่ 6**

รูปที่ 6 หญ้ารูซี่
ที่มา: กรมปศุสัตว์ (2554)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.5.1 ลักษณะทางพันธุศาสตร์ของหญ้ารูซี่

หญ้ารูซี่ มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Brachiaria ruziziensis* วงศ์ Poaceac หญ้ารูซี่เป็นหญ้าที่มีอายุหลายปี ลักษณะการเจริญเติบโตเป็นแบบกึ่งเลื้อยกึ่งตั้งสูง ซึ่งลำต้นจะสูงประมาณ 60 – 100 เซนติเมตร ลำต้นมีลักษณะกลมเล็กและเรียว บริเวณลำต้นไม่มีขน ซึ่งต่างกับบริเวณใบที่จะมีขนเล็กๆ ที่มีลักษณะละเอียดปกคลุมทั้งด้านหน้าและด้านหลังของใบ ใบของหญ้ารูซี่จะมีสีเขียวอ่อนยาวประมาณ 13 -15 เซนติเมตร กว้างประมาณ 0.2 – 0.8 เซนติเมตร ส่วนรากจะมีลักษณะที่แตกแขนง มีช่อดอกแบบ raceam หรือเป็นช่อดอกที่มีดอกย่อยๆ แยกออกจากแกนกลาง กลุ่มดอกจะมีขนปกคลุม และมี lower glume ที่สั้น (ยาวไม่เกินครึ่งหนึ่งของดอก) (กรมปศุสัตว์, 2554)

2.5.2 การปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมของหญ้ารูซี่

หญ้ารูซี่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ภูมิอากาศเขตร้อนชื้นที่มีปริมาณฝนเฉลี่ยมากกว่า 1000 มิลลิเมตร สำหรับดินที่ใช้ในการปลูกหญ้ารูซี่จะต้องเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์สูง หากเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ซึ่งได้แก่ ดินร่วนปนทราย หรือดินที่มีลักษณะเป็นดินเหนียว แต่มีการระบายน้ำที่ดีหญ้ารูซี่ก็สามารถเจริญเติบโตได้เช่นกัน หญ้ารูซี่จะไม่ทนต่อสภาพที่มีน้ำขังเป็นระยะเวลายาวนาน หรือเจริญเติบโตได้ดีในบริเวณที่มีลักษณะเป็นที่ดอน ในช่วงที่มีสภาพภูมิอากาศแห้งแล้งหญ้ารูซี่จะสามารถอยู่รอดได้ แต่จะไม่ให้ผลผลิต ค่า pH ของดินที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของหญ้ารูซี่จะอยู่ในช่วง 5.0 - 6.8 และหญ้ารูซี่จะไม่ทนต่อดินที่มีสภาพเป็นกรด ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของหญ้ารูซี่จะอยู่ในช่วง 28 – 30 องศาเซลเซียล (สายัณห์ ทัดศรี, 2547)

2.5.3 การปลูกหญ้ารูซี่

หญ้ารูซี่สามารถขยายพันธุ์ได้ทั้งการใช้หน่อพันธุ์และการใช้เมล็ดพันธุ์ แต่จะนิยมใช้เมล็ดมากกว่า เนื่องจากสะดวกกว่า สำหรับการปลูกโดยการใช้เมล็ด จะใช้อัตราของเมล็ดพันธุ์หญ้ารูซี่เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อไร่ จากนั้นทำการหว่านหรือโรยเป็นแถวๆ แต่ละแถวห่างกัน 50 เซนติเมตร โดยก่อนปลูกจะมีการใส่ปุ๋ยรองพื้นสูตร 15 – 15 - 15 หรือ 16 – 16 - 8 ในอัตรา 50 - 100 กิโลกรัมต่อไร่ และอาจมีการใส่ปุ๋ยคอกร่วมด้วยก็ได้ จากนั้นหลังการตัดทุกครั้งควรใส่ปุ๋ยยูเรีย (46 – 0 - 0) ในอัตรา 10 - 20 กิโลกรัมต่อไร่ และมีการกำจัดวัชพืชหลังปลูกหญ้าทุก 2 - 4 สัปดาห์ (กรมปศุสัตว์, 2554)

2.5.4 ประโยชน์ของหญ้ารูซี่

หญ้ารูซี่นิยมนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ โดยอาจจะตัดมาให้สัตว์กินสดๆ (zero grazing หรือ green cut) ในกรงหรือคอกเลี้ยงสัตว์ หรือปล่อยให้สัตว์แทะเล็ม (grazing) ในแปลงปลูก หรือหากผลผลิตมีมากก็อาจตัดไปทำหญ้าแห้ง (hay) โดยเริ่มจากตัดหญ้าและนำไปตากแดดจนแห้ง จากนั้นอัดเป็นฟ่อน หรืออาจตัดไปทำหญ้าหมัก (silage) ก็ได้ (กรมปศุสัตว์, 2554) นอกจากนี้ (ประยงค์ ศรีไพรสนท์, 2548) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการบำบัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน และศึกษาผลของตะกั่วต่อการเจริญเติบโตด้านความสูง น้ำหนักแห้งของใบและรากของพืชรวมทั้งศึกษาการตกค้างของตะกั่วในดินแต่ละชนิด สำหรับพืชที่นำมาใช้ในการศึกษามี 4 ชนิด ได้แก่ หญ้าแฝกโสนอัฟริกัน หญ้ารูซี่ และถั่วพุ่มดำ ส่วนดินที่นำมาใช้ในการศึกษามี 3 ชนิด ได้แก่ ดินชุดท่าเรือ (ค่า CEC สูง) ดินชุดอุตรดิตถ์ (ค่า CEC ปานกลาง) และดินชุดอุบล (ค่า CEC ต่ำ) โดยทำการปลูกพืชแต่ละชนิดนาน 120 วัน ในดินที่มีความเข้มข้นของตะกั่วไนเตรท ($Pb(NO_3)_2$) 3 ความเข้มข้น คือ 0, 10 และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณการดูดซึมตะกั่วในใบและรากของหญ้าแฝกมีค่าเท่ากับ 0.480 และ

0.260 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้งรวม ในหญ้ารูซี่เท่ากับ 0.230 และ 0.268 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้งรวม ในโสนอัฟริกันเท่ากับ 0.180 และ 0.094 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้งรวม และในถั่วพุ่มดำเท่ากับ 0.230 และ 0.135 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้งรวม และความเข้มข้นของตะกั่วทั้ง 3 ระดับไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตด้านความสูงและน้ำหนักแห้งของหญ้าแฝก และโสนอัฟริกัน แต่สำหรับน้ำหนักใบแห้งของหญ้ารูซี่และน้ำหนักแห้งรากถั่วพุ่มดำมีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ และยังพบอีกว่าพืชส่วนใหญ่ที่ปลูกในดินชุดอุบลจะมีน้ำหนักแห้งมาก สำหรับชุดดินท่าเรือสามารถดูดซับตะกั่วไว้ได้มากที่สุด ซึ่งทำให้ปริมาณตะกั่วเหลืออยู่ในดินมากกว่าดินชุดอุตรดิตถ์และดินชุดอุบลและจากการศึกษานี้ทำให้ทราบว่าหญ้ารูซี่ก็มีประสิทธิภาพในการบำบัดตะกั่ว หรือเป็นพืชที่มีคุณสมบัติเป็นพืช hyperaccumulator ด้วย

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืชเป็นเทคโนโลยีที่มีอย่างยาวนาน ข้อจำกัดในการการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืชมีหลายข้อซึ่งหนึ่งในนั้นคือ คือพืชไม่สามารถบำบัดสารปนเปื้อนที่มีความเข้มข้นสูงๆ ได้เนื่องจากอาจก่อให้เกิดอาการพิษต่อพืชและทำให้พืชตาย แม้ว่าสารปนเปื้อนบางชนิดมีความจำเป็นสำหรับพืช แต่หากพืชได้รับสารเหล่านั้นในปริมาณที่สูงเกินไปก็ย่อมส่งผลเสียต่อพืช เช่น ในกรณีของสังกะสี ซึ่งเป็นจุลธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช และพบอาการพิษของสังกะสีต่อพืชน้อยมาก แต่จากการศึกษาของ Broadly และคณะ (2011) พบว่าความเป็นพิษของสังกะสีต่อพืชก็สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อปลูกพืชนั้นในดินที่มีความเป็นกรด ดังนั้นหากต้องการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีความเป็นกรดสูงก็ควรเลือกพืชที่มีความคงทนต่อความเป็นกรดมาใช้ในการบำบัด

ปัจจุบันมีการคิดค้นวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดโดยการใช้พืชหลายวิธี เช่น การเติมปุ๋ย การเติมแบคทีเรีย และการเติมสารปรับปรุงดิน ซึ่งวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืชที่ได้รับความสนใจเมื่อไม่นานมานี้ คือการใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้า ซึ่งนอกจากวิธีนี้จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืชแล้ว การนำจลนศาสตร์ไฟฟ้ามาใช้ยังสามารถเลี่ยงข้อจำกัดบางอย่างที่ไม่สามารถใช้การบำบัดโดยการใช้พืชร่วมกับวิธีอื่นได้ โดย Lamstrom (1994) ได้สนับสนุนการนำจลนศาสตร์ไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ร่วมกับการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืช โดยกล่าวว่าการบำบัดดินหรือน้ำโดยใช้พืชร่วมกับจลนศาสตร์ไฟฟ้าจะช่วยเพิ่มผลผลิตของพืช โดยสนามไฟฟ้าจะทำให้สารปนเปื้อนเกิดการเคลื่อนที่ไปยังรากพืช ซึ่งจะส่งเสริมความสามารถของพืชในดูดดึงสารปนเปื้อน และยังกระตุ้นกระบวนการเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ในดินให้เกิดการย่อยสารปนเปื้อนที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ด้วย เช่นเดียวกับ Denvir (2000) ที่ได้เสนอให้มีการ

เพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดดิน น้ำ และตัวกลางที่มีรูพรุน ที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์โดยการใช้พืชร่วมกับการใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าเช่นกัน โดยข้อสมมติฐานของ Denvir คือ สนามไฟฟ้าจะเป็นตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนทั้งที่มีประจุและไม่มีประจุที่อยู่บริเวณรากพืช และนำพาสารปนเปื้อนจากบริเวณดินชั้นดินลึกไปยังบริเวณรากพืช และนอกจากนั้นกระแสไฟฟ้ายังช่วยป้องกันการกลายเป็นกรดแก่และเบสแก่ของดินด้วย

ต่อมา Aboughalma และคณะ (2008) ได้ศึกษาความสามารถของมันฝรั่งในการบำบัดโลหะ (สังกะสี ทองแดง ตะกั่ว และแคดเมียม) ในดิน โดยการปลูกพืชในกระถางทดลองเป็นเวลา 30 วัน จากนั้นติดตั้งสนามไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 500 มิลลิแอมแปร์ เป็นเวลา 60 วัน แล้วจึงทำการเก็บเกี่ยวพืชเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณการดูดดึงโลหะของมันฝรั่ง ผลการศึกษาพบว่าการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนโดยพืชร่วมกับการให้ไฟฟ้ากระแสตรง อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดังกล่าวจะทำให้ค่า pH ของดินบริเวณขั้วแอโนดลดลง ส่วนค่า pH ของดินบริเวณขั้วแคโทดเพิ่มขึ้น แสดงว่าโลหะที่อยู่ในดินมีการเคลื่อนที่จากบริเวณขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด แต่เมื่อให้ไฟฟ้ากระแสสลับ พบว่ากระแสไฟฟ้าจะส่งเสริมการเจริญเติบโตของมันฝรั่ง และทำให้มวลชีวภาพของมันฝรั่งเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมันฝรั่งในชุดที่ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า นอกจากนั้นการบำบัดโดยการให้ไฟฟ้ากระแสสลับพบว่ามันฝรั่งสามารถสะสมโลหะทั้งในส่วนเหนือดินและส่วนรากมากกว่าการบำบัดโดยไม่มีการใช้กระแสไฟฟ้า หรือให้ไฟฟ้ากระแสตรง

ต่อมา Bi และคณะ (2011) ได้ศึกษาอิทธิพลของสนามไฟฟ้า (AC และ DC) ที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะด้วยต้นผักกาดก้านขาว (*Brassica napas*) และต้นยาสูบ (*Nicotiana tabacum*) สำหรับดินที่ใช้ในการทดลองมาจากแหล่งที่ต่างกัน 3 แหล่ง คือ ดินจากพื้นที่ป่าที่ไม่มีการปนเปื้อน ดินจากพื้นที่ป่าที่ปนเปื้อนแคดเมียมที่ความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน และดินจากพื้นที่อุตสาหกรรมที่ปนเปื้อนแคดเมียม สังกะสี และตะกั่ว จากนั้นติดตั้งสนามไฟฟ้ากระแสสลับและสนามไฟฟ้ากระแสตรงที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร เป็นเวลา 3 ชั่วโมงต่อวัน โดยจะให้กระแสไฟฟ้าให้แก่ต้นผักกาดก้านขาว เป็นเวลา 30 วัน และให้กระแสไฟฟ้าแก่ต้นยาสูบเป็นเวลา 90 วัน ผลการศึกษาพบว่าภายใต้สนามไฟฟ้าที่แตกต่างกันพืชจะตอบสนองต่างกัน โดยการให้ไฟฟ้ากระแสสลับต่อต้นผักกาดก้านขาว จะส่งผลให้มวลชีวภาพและอัตราการดูดดึงโลหะในส่วนเหนือพื้นดินพืชเพิ่มขึ้น ซึ่งต่างกับต้นยาสูบที่การให้กระแสไฟฟ้าสลับจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของมวลชีวภาพ สำหรับการให้ไฟฟ้ากระแสตรงจะส่งผลให้มวลชีวภาพของยาสูบลดลง และส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลง pH ของดิน จากการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่าการบำบัดโลหะหนักโดยต้นผักกาดก้านขาวและต้นยาสูบร่วมกับการใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีกว่าภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง

Cang และคณะ (2012) ได้ศึกษาอิทธิพลของจลนศาสตร์ไฟฟ้าที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนัก (แคดเมียม ทองแดง สังกะสี และตะกั่ว) ในดิน ด้วยต้นผักกาดเขียวปลี (*Brassica juncea*) โดยทำการเพาะเมล็ดผักกาดเขียวปลี (*Brassica juncea*) เป็นเวลา 35 วัน จากนั้นให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ความต่างศักย์ 0, 1, 2 และ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร เป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อวัน นาน 16 วัน และสกัดโลหะที่คงเหลือในดินด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่าการให้ไฟฟ้ากระแสตรงจะส่งผลให้ pH ของดิน และค่าการนำไฟฟ้าของดินบริเวณขั้วแคโทดเพิ่มขึ้น แต่ค่า pH ของดินที่บริเวณขั้วแอโนดลงลง และให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่ำๆ จะส่งเสริมความสามารถในการสะสมโลหะสารปนเปื้อนในพืชได้มากกว่าที่ความต่างศักย์สูงๆ หรือการบำบัดโดยการใช้พืชเพียงอย่างเดียว ซึ่งการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร จะทำให้ต้นผักกาดเขียวปลีสามารถดูดดึงโลหะได้สูงที่สุด และจากการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่าการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับการบำบัดโดยการใช้พืชเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดดึงสารปนเปื้อนเข้าสู่เนื้อเยื่อพืชได้ ซึ่งประเภทของสนามไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า และชนิดของพืชเป็นอีกปัจจัยที่ควรคำนึงถึง

นอกจากนี้ Lim และคณะ (2004) ได้ศึกษาความสามารถในการบำบัดตะกั่วในดินโดยการใช้ผักกาดเขียวปลีร่วมกับการเติมอีดีทีเอ และการให้กระแสไฟฟ้า โดยปลูกต้นผักกาดเขียวปลีในดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว เป็นเวลา 12 สัปดาห์ (รดน้ำทุกวัน และใส่ปุ๋ยสัปดาห์ละครั้ง) และสัปดาห์ที่ 13 ทำการเติมคีเลตอีดีทีเอที่ความเข้มข้นต่างๆ เป็นเวลา 1 สัปดาห์ แล้วจึงเก็บเกี่ยวพืช เพื่อวิเคราะห์ปริมาณของตะกั่วที่สะสมในผักกาดเขียวปลี เมื่อบำบัดโดยการเติมคีเลตเพียงอย่างเดียว และเมื่อบำบัดโดยการเติมคีเลตร่วมกับและการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 0, 10 และ 30 โวลต์ ที่ระยะเวลาต่างๆ (0, 0.5 และ 1 ชั่วโมงต่อวัน) ผลการทดลองพบว่าการเติมคีเลตร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้าในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ช่วยเพิ่มความสามารถในการสะสมตะกั่วในส่วนเหนือพื้นดินของต้นผักกาดเขียวปลีได้มากกว่าการเติมคีเลตเพียงอย่างเดียว และปริมาณตะกั่วในส่วนเหนือพื้นดินของต้นผักกาดเขียวปลีจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อมีการให้กระแสไฟฟ้าเป็นเวลา 1 ชั่วโมงต่อวัน ร่วมกับการเติมคีเลต นาน 9 วัน และ Zhou และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดดึงคอปเปอร์และสังกะสีของ Ryegrass และศึกษาการโยกย้ายของโลหะหนักในคอลัมน์ดิน เมื่อมีการเติมคีเลตอีดีทีเอและอีดีดีเอส (EDTA/EDDS) พร้อมด้วยการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ความต่างศักย์ 1.0 โวลต์ต่อเซนติเมตร (6 ชั่วโมงต่อวัน) เป็นเวลา 1 สัปดาห์ ผลการทดลองพบว่าการเติมคีเลตจะทำให้ Ryegrass สามารถในการดูดดึงโลหะได้เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่เติมคีเลต และเมื่อมีการให้กระแสไฟฟ้าร่วมด้วยพบว่า กระแสไฟฟ้าจะช่วยส่งเสริมให้คอปเปอร์และสังกะสีเกิดการเคลื่อนจากส่วนรากไปยังส่วนเหนือพื้นดินและเกิดการสะสมอยู่ในส่วนดังกล่าว นอกจากนี้ผู้วิจัยยังพบอีกว่าแม้การเติมคีเลต จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการ

ฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืช แต่ก็อาจจะทำให้เกิดการปนเปื้อนของคีเลตสู่น้ำใต้ดินได้ ซึ่งการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับการเติมคีเลตนอกจากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดแล้วยังช่วยลดความเสี่ยงที่จะเกิดการปนเปื้อนของคีเลตในสิ่งแวดล้อมด้วย

Putra และคณะ (2013) ศึกษาของการใช้กระแสไฟฟ้าร่วมกับการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืชในการบำบัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินทราย โดยใช้ Kentucky bluegrass (*Poa pratensis L.)* เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดโดยใช้อิเล็กโทรด 2 มิติในระบบไฟฟ้า โดยในตัวกลางที่เป็นวุ้น (agar media) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับการทดลองในดินเป็นเวลา 15 วัน และศึกษาความสามารถในการดูดดึงตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินโดยการใช้กระแสไฟฟ้าร่วมกับการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืชเปรียบเทียบกับการใช้พืชในการบำบัดเพียงอย่างเดียว เป็นเวลา 30 วัน ผลการทดลองพบว่า พืชมีการตอบสนองต่อตะกั่วแตกต่างกัน ซึ่งความแตกต่างดังกล่าวขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการเจริญเติบโตของพืชและพารามิเตอร์ในการดูดดึงตะกั่วของพืช เช่น bioaccumulation coefficient (BC value) translocation factor (TF) การกระจายของตะกั่วทั้งส่วนรากและส่วนเหนือพื้นดิน และ pH ของดิน และสำหรับงานวิจัยนี้ Putra และคณะได้นำยูเรียมาใช้ในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชในระหว่างที่พืชได้รับความเครียดจากปริมาณตะกั่วในดิน และการใช้กระแสไฟฟ้าร่วมกับการใช้พืชในการบำบัดตะกั่ว ผลการทดลองพบว่าพืชที่เจริญเติบโตในดินที่มีการใช้การใช้กระแสไฟฟ้าร่วมกับการใช้พืช จะมีการสะสมตะกั่วในส่วนรากและส่วนเหนือพื้นดิน ค่า TF และค่า BC มากกว่าการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืชเพียงอย่างเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพืชนั้นมีการดูดดึงตะกั่วในส่วนรากในปริมาณมาก ดังนั้นจึงเกิดการตกตะกอนในส่วนเหนือพื้นดินของพืช ส่วนการเติมยูเรีย พบว่าจะทำให้ปริมาณน้ำในพืช มวลชีวภาพ และปริมาณคลอโรฟิลล์ในพืช เป็นบวกซึ่งแสดงให้เห็นว่า Kentucky bluegrass สามารถทนต่อความเครียดที่เกิดขึ้นจากการมีตะกั่วในดินได้

Chirakkara และคณะ (2015) ได้ศึกษาอิทธิพลของจลนศาสตร์ไฟฟ้าในการแก้ไขปัญหาดินที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ (naphthalene และ phenanthrene) และโลหะหนัก (ตะกั่ว แคดเมียม และโครเมียม) ร่วมกับการใช้พืชสองชนิด ซึ่งได้แก่ โอ๊ค และทานตะวัน โดยพืชที่มีอายุ 30 วัน จะถูกปลูกในกระถางทดลองและให้ไฟฟ้ากระแสสลับที่ความต่างศักย์ 25 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมงต่อวัน นาน 30 วัน ผลการทดลองพบว่าการประยุกต์ใช้กระแสไฟฟ้าร่วมกับการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืชจะส่งผลให้มวลชีวภาพของพืชเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่สามารถลดปริมาณโลหะหนักและสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในดินได้มากเมื่อเปรียบเทียบกับการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืชเพียงอย่างเดียว

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1) เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (balance for accurate weighing): Mettler Toledo รุ่น MS204S Model, Switzerland สำหรับชั่งน้ำหนักตัวอย่าง และชั่งน้ำหนักสารเคมี

2) เครื่องชั่งหยาบทศนิยม 2 ตำแหน่ง (balance for approximate weighing) สำหรับวิเคราะห์เนื้อดิน

3) เครื่องแก้วชนิดต่างๆ เช่น ขวดรูปชมพู่ (erlenmeyer flask) กรวยกรอง (funnel) กระบอกตวง (cylinder) บีกเกอร์ (beaker) ฯลฯ

4) ตะแกรงร่อนดิน (sieve) ที่มีขนาดของช่องตะแกรงเท่ากับ 0.5 และ 2 มิลลิเมตร

5) แผ่นพาราฟิล์ม (parafilm)

6) เครื่องเขย่า (shaker): LAB – LINE ORBIT ENVIRON – SHAKER, Texas, United States of America

7) ไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer) สำหรับวัดความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่นของของเหลว

8) เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer)

9) เครื่องวัดพีเอช (pH meter)

10) ถ้วยกระเบื้อง (crucible)

11) ตู้อบ (oven)

12) โถแก้วดูดความชื้น (desicator)

13) ตู้ดูดควัน (fume hood): Science Technology

14) กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42

15) ขวดพลาสติกใส่สารสกัด

16) กระบะตากดิน

17) กระถางแก้วทดลอง ขนาดพื้นที่หน้าตัด 8 X 8 ตารางเซนติเมตร

18) เครื่องย่อยไนโตรเจน (nitrogen digester): Buchi Digestion Unit K – 435 และ Buchi Unit Control B – 436

19) เครื่องดักจับไอกรด (scrubber unit): Buchi Scrubber B – 414

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

20) เครื่องกลั่นอัตโนมัติ (distillation unit): Buchi Distillation unit 339

21) เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS): Agilent รุ่น SpectrAA, USA

22) เครื่องไมโครเวฟ (microwave digestion): Ethos one รุ่น ACT36 – Rev01 – 03/06 Model, Italy

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1) สารละลายแคลกอน (calgon) เข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร

2) สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมท (potassium dichromate, $K_2Cr_2O_7$) ความเข้มข้น 1.0 นอร์มัล

3) กรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc. sulfuric acid, Conc. H_2SO_4)

4) สารละลายเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต (ferrous ammonium sulfate, FAS) ความเข้มข้น 0.5 นอร์มัล

5) สารละลายออร์โทฟีแนนโทรลีน อินดิเคเตอร์ ซึ่งเป็นสารบ่งชี้จุดยุติ (indicator) ละลาย 1,10-phenanthroline 0.75 กรัม และ $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.37 กรัมในน้ำ 50 มิลลิลิตร

6) สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตท (ammonium acetate, NH_4OAc) ความเข้มข้น 1.0 นอร์มัล

7) เอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol, EtOH) 95 เปอร์เซ็นต์

8) สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (ammonium chloride, NH_4Cl) ความเข้มข้น 1.0 นอร์มัล

9) สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (ammonium chloride, NH_4Cl) ความเข้มข้น 0.25 นอร์มัล

10) สารละลายแอมโมเนียมออกซาเลต (ammonium oxalate, $(NH_4)_2C_2O_4 \cdot H_2O$) ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์

11) สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ammonium hydroxide, NH_4OH) ความเข้มข้น 1:1

12) สารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (silver nitrate, $AgNO_3$) ความเข้มข้น 0.10 นอร์มัล

13) สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (sodium chloride, NaCl) ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ acidified

14) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์

15) สารละลายบ่งบอกจุดยุติ (mixed indicator solution)

16) สารละลายกรดบอริก (boric acid, H_3BO_3) ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์

18) สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate, Na_2CO_3) ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล

19) โพแทสเซียมซัลเฟต (potassium sulfate, K_2SO_4)

21) คอปเปอร์ซัลเฟต (copper sulfate, $CuSO_4 \cdot 7H_2O$)

22) ซิลิเนียม (Se)

23) สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก (sulfuric acid, H_2SO_4) ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล

24) สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

25) สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเข้มข้น 0, 2, 4 และ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร

26) สารละลายสกัด (extracting solution, Mehlich 1)

27) สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต (ammonium molybdate, $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$)

28) สารละลายแอนติโมนีโพแทสเซียมตาร์เตรท (antimony potassium tartrate, $KSbO \cdot C_4H_4O_6$)

29) กรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid)

30) รีเอเจนผสม (mixed reagent) ระหว่างสารละลายแอนติโมนีโพแทสเซียมตาร์เตรท (antimony potassium tartrate, $KSbO \cdot C_4H_4O_6$) และกรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid)

31) สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (potassium dihydrogen phosphate, KH_2PO_4) ที่มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเท่ากับ 2 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

32) สารละลายซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$)

33) กรดไนตริก (nitric acid, HNO_3) เข้มข้น

3.3 สถานที่ดำเนินการวิจัย

3.3.1 สถานที่เก็บตัวอย่างดิน

ดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้เก็บมาจากสวนผลไม้ ในตำบลท่าชัย อำเภอเมือง จังหวัดชัยนาท

3.3.2 สถานที่เตรียมตัวอย่างดินและสถานที่ปลูกพืช

งานวิจัยนี้ทำการเตรียมตัวอย่างดินและปลูกพืชในห้องทดลองที่ชั้น 3 ตึกวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

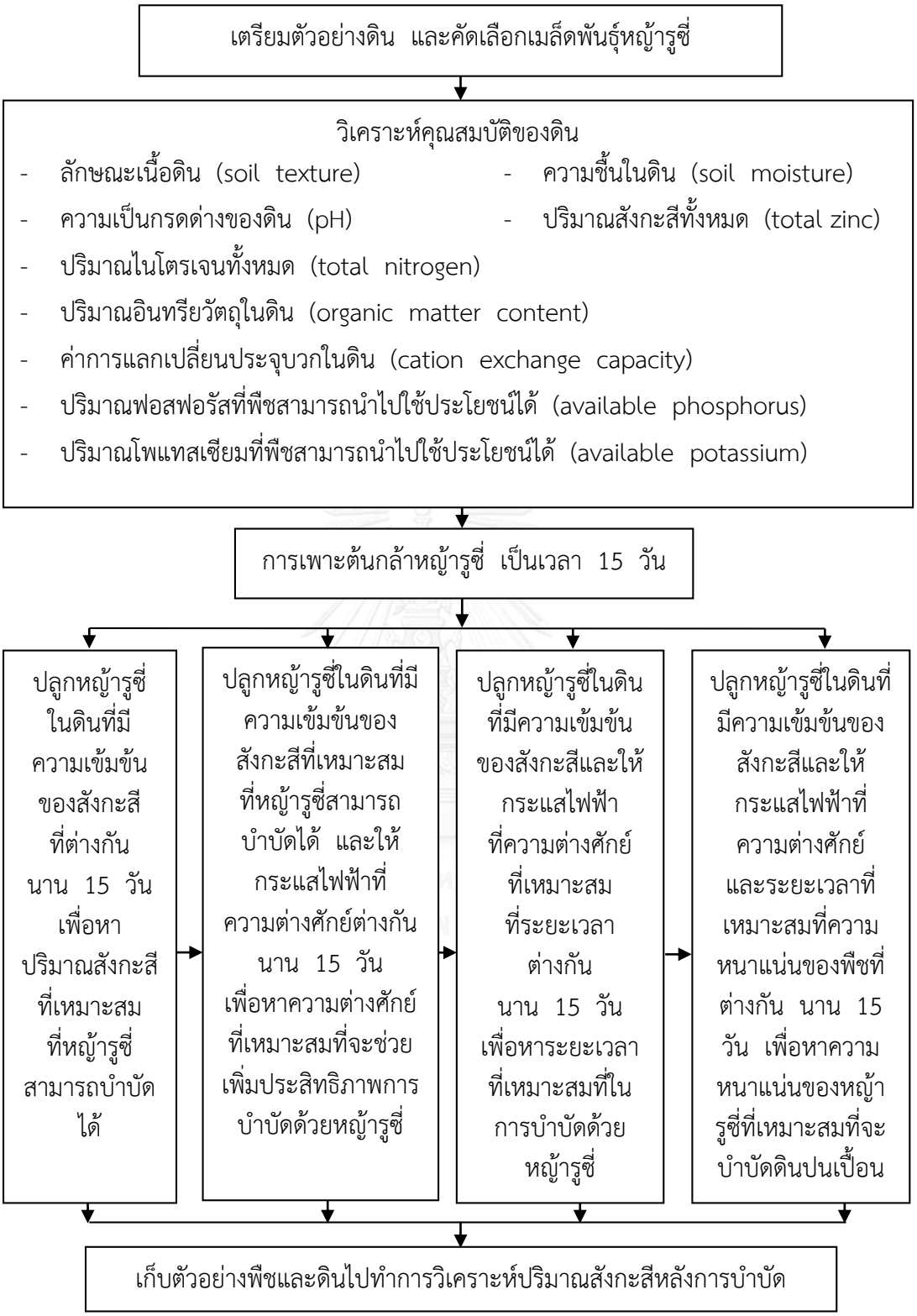
3.3.3 สถานที่วิเคราะห์ตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ห้องปฏิบัติการชั้น 4 ตึกวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 ขั้นตอนการวิจัย

ภาพรวมของขั้นตอนในการวิจัยแสดงดัง**รูปที่ 7**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 7 ภาพรวมของขั้นตอนในการวิจัย

3.4.1 การเตรียมดิน

1) ดินที่ใช้ในการเพาะต้นกล้า

นำดินมาแยกเศษไม้ หรือเศษวัสดุที่ไม่ต้องการออกไป จากนั้นผสมคลุกเคล้าดินให้เป็นเนื้อเดียวกันและผึ่งในที่ร่ม

2) ดินที่ใช้ในการปลูกพืช

นำดินมาผสมกับสารละลายซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน จากนั้นคลุกให้เป็นเนื้อเดียวกัน และผึ่งดินในที่ร่ม เป็นระยะเวลา 15 วัน เพื่อรอการทดลองต่อไป

3) ดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างดินเบื้องต้น

นำดินมาผึ่งดินในที่ร่ม จนกระทั่งดินแห้งสนิท จากนั้น นำดินไปบดและร่อนผ่านตะแกรงร่อนดินขนาด 0.5 และ 2 มิลลิเมตร นำตัวอย่างดินไปทำการวิเคราะห์สมบัติของดินก่อนการทดลอง ซึ่งได้แก่ ลักษณะเนื้อดิน (soil texture) ความชื้นในดิน (soil moisture) ความเป็นกรดด่างของดิน (pH) ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (organic matter content) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน (cation exchange capacity) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen) ปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (available phosphorus) ปริมาณโพแทสเซียมที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (available potassium) และปริมาณสังกะสีทั้งหมด (total zinc) ซึ่งวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์แต่ละชนิด แสดงดัง **ตารางที่ 6**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 6 วิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ชนิดต่างๆ

พารามิเตอร์	วิธีการทดลอง	อ้างอิง
ลักษณะเนื้อดิน (soil texture)	Hydrometer Method	Tan (2005)
ความชื้นในดิน (soil moisture)	Gravimetric Method	Tan (2005)
ความเป็นกรดด่างของดิน (pH)	Potentiometric Method (อัตราส่วนดิน:น้ำ = 1:2.5)	Tan (2005)
ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (organic matter content)	Walkley and Black Method	Walkley and Black (1934)
ค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน (cation exchange capacity)	Ammonium acetate Method	Chapman (1965)
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen)	Kjeldahl Method	Tan (2005)
ปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (available phosphorus)	Mehlich 's No. 1 method	Mehlich (1978)
ปริมาณโพแทสเซียมที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (available potassium)	Ammonium acetate Method	Tan (2005)
ปริมาณสังกะสีทั้งหมด (total zinc)	Atomic Absorption Spectrophotometer	USEPA (1995)

3.4.2 การเตรียมเมล็ดพันธุ์พืช

เมล็ดพันธุ์พืชที่ใช้ในการวิจัย คือเมล็ดพันธุ์หญ้ารูซี่ (*Brachiaria ruziziensis*) ซึ่งเป็นพันธุ์พืชที่มีคุณสมบัติเป็นพืช hyperaccumulator ปลูกง่าย และเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ที่มีภูมิอากาศร้อนชื้น โดยเลือกเมล็ดพันธุ์หญ้ารูซี่ที่มีความสมบูรณ์ มีขนาดเท่าๆ กัน นำไปแช่น้ำเป็นเวลาอย่างน้อย 6 ชั่วโมง แต่ไม่ควรเกิน 24 ชั่วโมงเพราะอาจทำให้เมล็ดเน่าได้ จากนั้นเลือกเฉพาะเมล็ดพันธุ์ที่จมน้ำมาทำการวิจัย

3.4.3 การเพาะพันธุ์ต้นกล้าพืช

การเพาะเมล็ดพันธุ์หญ้ารูซี่ ทำได้โดยการนำเมล็ดพันธุ์ที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมเมล็ดพันธุ์พืชไปเพาะในกระถางที่มีดินบรรจุอยู่ จนต้นกล้าสูงประมาณ 15 - 20 เซนติเมตร หรือระยะเวลาประมาณ 15 วัน ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ต้นกล้ามีความแข็งแรงแล้ว

3.4.4 การหาปริมาณสังกะสีในดินที่เหมาะสมที่หญ้ารูซี่สามารถบำบัดได้

ปลูกต้นกล้าหญ้ารูซี่จำนวน 10 ต้น (ทำอย่างระมัดระวัง เพราะอาจทำให้รากของต้นกล้าเสียหายได้) ในกระถางที่มีดินที่เติมสังกะสีในปริมาณที่แตกต่างกัน 4 ชุดการทดลอง โดยชุดการทดลองแรกไม่มีการเติมสังกะสี ชุดการทดลองที่สองเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ชุดที่สามเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน และชุดการทดลองที่สี่เติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน และปลูกพืชเป็นเวลา 15 วัน เมื่อครบกำหนดจะเก็บตัวอย่างพืชเพื่อนำไปวิเคราะห์อัตราการรอดชีวิตและมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ และเลือกปริมาณการเติมสังกะสีในดินที่เหมาะสมที่หญ้ารูซี่มีสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุด (มีอัตราการรอดชีวิตและมวลชีวภาพที่สูงที่สุด) ไปทำการหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อไป

3.4.5 การหาความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดด้วยหญ้ารูซี่

ปลูกต้นกล้าหญ้ารูซี่จำนวน 10 ต้น ลงในกระถางที่มีดินที่มีความเข้มข้นของสังกะสีที่หญ้ารูซี่สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุด (ผลการทดลองที่ได้จากข้อ 3.4.4) ติดตั้งสนามไฟฟ้าที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 4 ชุดการทดลอง โดยชุดการทดลองแรกไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ชุดการทดลองที่สองให้กระแสไฟฟ้าที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ชุดที่สามให้กระแสไฟฟ้าที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และชุดการทดลองที่สี่ให้กระแสไฟฟ้าที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับการบำบัดด้วยพืชเป็นระยะเวลา 15 วัน (ให้กระแสไฟฟ้า 2 ชั่วโมงต่อวัน) จากนั้นเก็บเกี่ยวพืชและเก็บดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองไปทำการวิเคราะห์มวลชีวภาพของพืช ปริมาณสังกะสีที่สะสมในพืช และปริมาณสังกะสีที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรด เพื่อหาความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดของหญ้ารูซี่ไปทำการหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับการใช้พืชต่อไป

3.4.6 การหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยหญ้ารูซี่

ปลูกต้นกล้าหญ้ารูซี่จำนวน 10 ต้น ในกระถางที่มีดินที่มีความเข้มข้นของสังกะสีที่หญ้ารูซี่สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุด (ผลการทดลองที่ได้จากข้อ 3.4.4) และติดตั้งสนามไฟฟ้าที่มี

ค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสม (ผลการทดลองที่ได้จากข้อ 3.4.5) โดยให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาที่แตกต่างกัน 4 ชุดการทดลอง โดยชุดการทดลองแรกไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ชุดการทดลองที่สองให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน ชุดที่สามให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน และชุดการทดลองที่สี่ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน ติดต่อกันเป็นระยะเวลา 15 วัน จากนั้นเก็บเกี่ยวพืชและเก็บดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองไปทำการวิเคราะห์มวลชีวภาพของพืช ปริมาณสังกะสีที่สะสมในพืช และปริมาณสังกะสีที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรด เพื่อเลือกระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยหญ้ารูซี่ไปทำการความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่เหมาะสมที่จะบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีต่อไป

3.4.7 การหาความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่เหมาะสมที่จะบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสี

ปลูกต้นกล้าหญ้ารูซี่ในดินที่มีความเข้มข้นของสังกะสีที่หญ้ารูซี่สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุด (ผลการทดลองที่ได้จากข้อ 3.4.4) ในกระถางที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่มีค่าความต่างศักย์และระยะเวลาที่เหมาะสม (ผลการทดลองที่ได้จากข้อ 3.4.5 และ 3.4.6 ตามลำดับ) โดยปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นที่แตกต่างกัน 4 ชุดการทดลอง โดยชุดการทดลองแรกไม่มีการปลูกพืช (ให้กระแสไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว) ชุดการทดลองที่สองปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ชุดที่สามปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และชุดการทดลองที่สี่ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง (พื้นที่หน้าตัดกระถางเท่ากับ 8 X 8 ตารางเซนติเมตร) เป็นเวลา 15 วัน จากนั้นเก็บเกี่ยวพืชและเก็บดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองไปทำการวิเคราะห์มวลชีวภาพของพืช ปริมาณสังกะสีที่สะสมในพืช และปริมาณสังกะสีที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตำรับในการวิจัย แสดงดัง**ตารางที่ 7**

ตารางที่ 7 ตำรับในการวิจัย

การทดลอง	ความเข้มข้นของสังกะสีในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์ต่อเซนติเมตร)	ระยะเวลาการให้กระแสไฟฟ้า (ชั่วโมงต่อวัน)	ความหนาแน่นของพืช (ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง)	ระยะเวลาการบำบัด (วัน)
การหาปริมาณสังกะสีในดินที่เหมาะสมที่หญ้ารูซี่สามารถบำบัดได้	0 300 400 500	0	0	10	15
การหาความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดด้วยหญ้ารูซี่	ความเข้มข้นของสังกะสีที่หญ้ารูซี่สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุด	0 1 2 4	2	10	15
การหาระยะเวลาที่เหมาะสม	ความเข้มข้นของสังกะสีที่หญ้ารูซี่สามารถทนอยู่ได้ดีที่สุด	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม	0 2 4 6	10	15
การหาความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่เหมาะสม	ความเข้มข้นของสังกะสีที่หญ้ารูซี่สามารถทนอยู่ได้ดีที่สุด	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม	ระยะเวลาที่เหมาะสม	0 5 10 15	15

หมายเหตุ พื้นที่หน้าตัดของกระถางเท่ากับ 8 x 8 ตารางเซนติเมตร

3.4.8 การเก็บเกี่ยวพืชและการเก็บตัวอย่างดิน

การเก็บเกี่ยวต้นพืชทำได้โดยแยกดินออกจากรากพืช ต่อมานำพืชไปล้างด้วยน้ำเปล่าและน้ำปราศจากไอออน (de - ionized water) จากนั้นแยกส่วนเหนือดินและส่วนรากออกจากกัน ชั่งน้ำหนักสด อบ และชั่งน้ำหนักแห้ง แล้วนำแต่ละส่วนไปบด และสกัดตามวิธีการของ EPA method 3052 แล้วนำสารละลายไปวิเคราะห์ปริมาณสังกะสีทั้งหมดด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

ส่วนการเก็บตัวอย่างดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณสังกะสีทั้งหมด โดยนำตัวอย่างดินที่อยู่ในกระถางปลูกไปผึ่งดินในที่ร่มจนกระทั่งดินแห้งสนิท สกัดดินตามวิธีการของ EPA method 3052 แล้วนำสารละลายไปวิเคราะห์ปริมาณสังกะสีทั้งหมดด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

3.4.9 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ทางสถิติ (ข้อมูลอัตราการรอดชีวิต มวลชีวภาพ และปริมาณสังกะสีที่สะสมในหญ้ารูซี่ และปริมาณสังกะสีที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรด) เมื่อมีการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ ระยะเวลา และความหนาแน่นของต้นพืชแตกต่างกัน โดยใช้สถิติ SPSS เวอร์ชั่น 22 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4

ผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลอง

4.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของดินที่ใช้ในการทดลอง

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของดินที่ใช้ในการทดลองที่เก็บมาจากสวนผลไม้ ในตำบลท่าชัย อำเภอเมือง จังหวัดชัยนาท (**ตารางที่ 8**) ซึ่งจัดเป็นตัวอย่างดินในกลุ่มชุดดินที่ 4 ที่มีลักษณะเป็นดินเหนียวที่เกิดจากตะกอนลำน้ำที่มีอายุยังน้อย มีปฏิกิริยาในดินเป็นกลางถึงเป็นด่าง มีการระบายน้ำค่อนข้างต่ำ และมีความอุดมสมบูรณ์ปานกลาง (กรมพัฒนาที่ดิน, 2548)

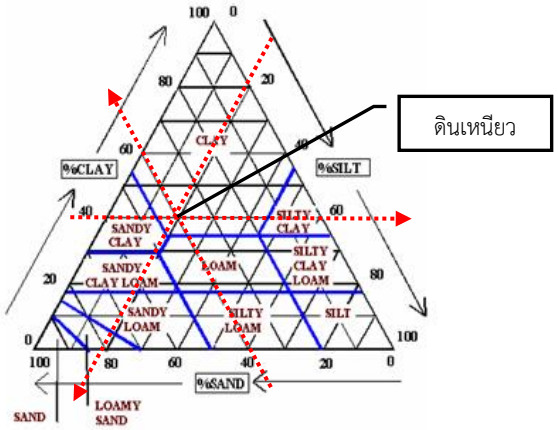
ตารางที่ 8 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของดินที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์ดิน	ผลการวิเคราะห์	หน่วย
ลักษณะเนื้อดิน	ดินเหนียว	-
การกระจายตัวของเนื้อดิน	39 : 19 : 42	เปอร์เซ็นต์
(ทราย : ทรายแป้ง : ดินเหนียว)		เปอร์เซ็นต์
ความชื้นในดิน	44.5 ± 2.30	
ความเป็นกรดด่างของดิน	5.9 ± 0.09	-
ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน	3.79 ± 0.07	เปอร์เซ็นต์
ค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน	36.4 ± 1.90	เซนติโมลต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	0.8 ± 0.16	เปอร์เซ็นต์
ปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้	0.3 ± 0.01	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน
ปริมาณโพแทสเซียมที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้	2.4 ± 0.03	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน
ปริมาณสังกะสีทั้งหมด	71.3 ± 10.8	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน

ลักษณะทางกายภาพและเคมีของดินที่ใช้ในการทดลองมีดังต่อไปนี้

1) ลักษณะเนื้อดิน

การวิเคราะห์ลักษณะดินที่ใช้ในการทดลองโดยวิธี Hydrometer Method พบว่าดินมีสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์ของ ทราย (sand) : ทรายแป้ง (silt) : ดินเหนียว (clay) เท่ากับ 39 : 19 : 42 และเมื่อนำสัดส่วนของดินที่ได้จากการวิเคราะห์ไปตรวจสอบประเภทเนื้อดินกับไดอะแกรมสามเหลี่ยมแสดงประเภทเนื้อดิน (USDA textural triangle) พบว่าดินชนิดนี้เป็นดินเหนียว (clay) (**รูปที่ 8**) ซึ่งเป็นกลุ่มดินที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุด เมื่อแห้งอนุภาคของดินจะเกาะตัวกันแน่น แต่เมื่อเปียกอนุภาคของดินจะเกาะยึดกับสารอื่นได้ดี และเนื่องจากดินเหนียวมีอนุภาคขนาดเล็กเมื่อเรียงตัวกันจะเกิดช่องว่างเล็กๆ ระหว่างอนุภาคที่สามารถอุ้มน้ำได้มาก แต่การระบายน้ำและอากาศจะน้อย และรากพืชจะดูดน้ำได้น้อย เนื่องจากมีแรงดึงน้ำที่สูง สามารถดูดซับธาตุอาหารพืชได้ดี จึงเหมาะที่จะใช้ในการทำการเกษตรหรือการปลูกพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวฟ่าง มะละกอ และฝรั่ง (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)



รูปที่ 8 ไดอะแกรมสามเหลี่ยมแสดงประเภทเนื้อดิน (USDA textural triangle) ของดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

2) ความชื้นในดิน

ความชื้นในดิน คือสัดส่วนระหว่างปริมาณของน้ำกับปริมาณของดินที่น้ำนั้นบรรจุอยู่ น้ำในดินเป็นปัจจัยที่สำคัญที่จุลินทรีย์ในดินใช้ในการเจริญเติบโต เป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ดิน และช่วยละลายธาตุอาหารในดิน การวิเคราะห์ค่าความชื้นในดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง พบว่ามีค่าความชื้นในดินเท่ากับ 44.5 ± 2.30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งค่อนข้างสูง สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อดิน เนื่องจากลักษณะเนื้อดินเป็นดินเหนียวจะมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูง (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

3) ความเป็นกรดด่างของดิน

ความเป็นกรดด่างของดินมีความสำคัญต่อพืชเป็นอย่างมาก เนื่องจากค่าความเป็นกรดด่างของดินจะสัมพันธ์กับระดับของธาตุอาหารในดินที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของพืช สำหรับการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดด่างของดินที่ใช้ในการทดลองโดยการวัดพีเอชในน้ำ ในอัตราส่วนดิน : น้ำ = 1 : 2.5 สามารถวัดค่าพีเอชได้เท่ากับ 5.9 ± 0.09 และเมื่อนำค่าที่ได้ไปเทียบกับตารางการแปลผลค่าพีเอชของดินในน้ำของกรมพัฒนาที่ดิน (2553) (ภาคผนวก ก - 1) พบว่าดินชนิดนี้มีเป็นดินที่มีระดับความเป็นกรดปานกลาง และค่าพีเอชที่อยู่ในช่วง 6 - 7 ซึ่งเป็นช่วงที่สังกะสีในดินละลายออกมามากและพืชจะเจริญเติบโตได้ดี และเป็นช่วงพีเอชที่เหมาะสมกับการปลูกหญ้ารูซี่ ดังนั้นดินที่ใช้ในการทดลองนี้จึงเหมาะสมที่จะใช้ในการศึกษาความสามารถของหญ้ารูซี่ในการดูดดึงสังกะสีเมื่อมีการติดตั้งสนามไฟฟ้าร่วมด้วย

4) ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน

อินทรียวัตถุในดิน หมายถึง อินทรียสารทุกชนิดที่มีอยู่ในดิน ครอบคลุมตั้งแต่ส่วนของซากพืช ซากสัตว์ และสิ่งมีชีวิตต่างๆ ที่เกิดจากการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดิน จากการหลั่งหรือการปลดปล่อยสารอินทรีย์ของสิ่งมีชีวิต (วิไลภรณ์ บุญญกิจจินดา, 2556) อินทรียวัตถุในดินมีบทบาทและความสำคัญต่อการปลูกพืชหลายด้าน เช่น ต้านทานความเป็นกรดเป็นด่างของดิน เป็นแหล่งธาตุอาหารของพืช และดูดซับธาตุอาหารพืชไม่ให้ถูกชะล้างได้โดยง่าย (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) การทราบปริมาณอินทรียวัตถุในดินจะช่วยให้เกษตรกรสามารถประเมินความอุดมสมบูรณ์ของดินอย่างคร่าวๆ ได้ สำหรับการวิเคราะห์ค่าอินทรียวัตถุในดินที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธี Walkley and Black ซึ่งอาศัยหลักการออกซิไดซ์อินทรีย์คาร์บอนในดินด้วย $K_2Cr_2O_7$ ในสภาวะเป็นกรด และหาปริมาณ $K_2Cr_2O_7$ ที่เหลือ โดยไตเตรทกับ $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$ พบว่าดินตัวอย่างมีค่าอินทรีย์คาร์บอนในดินเท่ากับ 2.20 ± 0.07 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำค่าที่ได้ไปเทียบกับตารางการแปลผลปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินโดยวิธี Walkley and Black (ภาคผนวก ก - 2.) (Landon, 1996) พบว่าดินชนิดนี้มีปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในระดับต่ำ และเมื่อนำค่าอินทรีย์คาร์บอนไปคูณด้วย 1.724 ซึ่งเป็นค่า conversion factor ที่นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการในประเทศไทย พบว่าปริมาณอินทรียวัตถุในดินเท่ากับ 3.79 เมื่อนำค่าที่ได้ไปเทียบกับตารางการแปลผลปริมาณอินทรียวัตถุในดินเพื่อประเมินความอุดมสมบูรณ์และการจำแนกดิน (ตารางที่ ก – 3) กรมพัฒนาที่ดิน (2515) และ Land Classification and FAO Project Staff (1973) พบว่าดินชนิดนี้มีปริมาณอินทรียวัตถุในระดับสูง ซึ่งเพียงพอและเหมาะสมต่อการปลูกพืช

5) ค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน

ค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน คือ ความสามารถในการดูดยึดและการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน Tan (2009) การแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินมีบทบาทที่สำคัญต่อการนำ

ธาตุอาหารไปใช้ของพืช เนื่องจากธาตุอาหารประจุบวกที่ถูกดูดยึดไว้จะอยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ สำหรับการวิเคราะห์ค่าความการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินที่ใช้ในการทดลองโดยการทำให้ดินอิ่มตัวด้วยสารละลาย NH_4OAc ความเข้มข้น 1.0 นอร์มัล ที่พีเอชเท่ากับ 7 พบว่าดินตัวอย่างมีค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินเท่ากับ 36.4 ± 1.90 เซนติโมลต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน และเมื่อนำค่าที่นี้ได้ไปเทียบกับตารางการแปลผลระดับปริมาณความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดินของกรมพัฒนาที่ดิน (2553) (ตารางที่ ก – 4) พบว่าดินชนิดนี้มีเป็นดินที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกระดับสูง ซึ่งค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 ข้อ ได้แก่ ชนิดของคอลลอยด์ดิน เช่น ฮิวมัส และมอนต์มอริลโลไนต์ โดยทั้งสองชนิดนี้เป็นคอนลอยด์ดินเหมือนกันแต่ต่างชนิดกัน ทำให้มีค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินต่างกัน สำหรับปริมาณของดินเหนียวที่มีอยู่ในดินก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน ซึ่งดินที่มีปริมาณดินเหนียวสูงจะส่งผลให้ดินนั้นมีค่าการแลกเปลี่ยนประจุสูงไปด้วย เนื่องจากดินเหนียวส่วนใหญ่เป็นคอลลอยด์และจะมีประจุลบจึงมีความสามารถในการดูดยึดกับประจุบวก เช่น K^+, Na^+, Ca^{2+} และ Mg^{2+} ได้ดี และปัจจัยสุดท้ายที่ส่งผลต่อค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน คือปริมาณของอินทรียวัตถุในดิน ซึ่งค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกจะสูง ถ้าดินนั้นมีปริมาณของอินทรียวัตถุสูง หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกนั้นจะแปรผันตามปริมาณของอินทรียวัตถุในดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

6) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด

ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารหลักที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช และพืชต้องการเป็นปริมาณมาก เนื่องจากไนโตรเจนเป็นธาตุที่ช่วยให้พืชสร้างโปรตีน ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของโพรโทรพลาซึม (protoplasm) และไนโตรเจนยังเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของกรดอะมิโนด้วย (นัยนันทน์ อริยกานนท์, 2558) หากพืชได้รับปริมาณไนโตรเจนอย่างเหมาะสม จะทำให้พืชมีใบเขียว ส่งเสริมการเจริญเติบโตของใบและรากพืช และช่วยเพิ่มผลผลิตของพืชอีกด้วย ตรงกันข้ามหากพืชได้รับไนโตรเจนอย่างไม่เหมาะสมก็อาจทำให้พืชนั้นมีความต้านทานต่อโรคพืชน้อยลง ใบเหลือง และไม่เจริญเติบโตหรือเจริญเติบโตช้ามาก (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) โดยปกติปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินจะอยู่ในช่วง < 0.02 เปอร์เซ็นต์ ในดินชั้นล่าง จนถึง > 2.5 เปอร์เซ็นต์ ในดินพีท ส่วนดินชั้นบนที่ใช้ทำการเกษตรจะมีไนโตรเจนทั้งหมดระหว่าง 0.06 ถึง 0.5 เปอร์เซ็นต์ (Bremner, 1996) สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของดินที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งเป็นดินชั้นบน พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.8 ± 0.16 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเพียงพอต่อความต้องการของพืชที่ใช้ไนโตรเจนในการเจริญเติบโต

7) ปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารธาตุหนึ่งที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช แต่โดยเฉลี่ยแล้วจะพบว่าฟอสฟอรัสในดินมีต่ำมาก หรือประมาณ 0.6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งฟอสฟอรัสที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้นั้นจะอยู่ในรูปของไอออนลบฟอสเฟตอิสระ ($H_2PO_4^-$ และ $H_2PO_4^{2-}$) บทบาทของฟอสฟอรัสต่อพืช เช่น ควบคุมระดับความความเป็นกรดด่างภายในพืชให้คงที่ เป็นองค์ประกอบของนิวคลีอิกแอซิด (nucleic acid) นิวคลิโอโปรตีน (nucleoprotein) และเป็นองค์ประกอบของสารฟอสเฟตที่มีหน้าที่ถ่ายทอดพลังงานระหว่างสารต่างๆ ของระบบต่างๆ ภายในเซลล์พืช (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) หากพืชขาดฟอสฟอรัสจะมีอาการ เช่น แคระแกรน สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสในดินตัวอย่างที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ที่ พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.3 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ซึ่งเมื่อเทียบค่าที่วิเคราะห์ได้กับตารางการแปลผลระดับฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (ตารางที่ ก – 5) พบว่าปริมาณฟอสฟอรัสในดินตัวอย่างอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งไม่เพียงต่อความต้องการของพืช ดังนั้นหากต้องการใช้ดินนี้เพื่อการทำเกษตรกรรมควรมีการจัดการดิน เช่น การปรับค่าพีเอชในดินให้อยู่ในช่วงที่ปุ๋ยฟอสเฟตสามารถละลายได้ดีที่สุด (pH 6 - 7) และเพิ่มปริมาณอินทรียวัตถุในดิน

8) ปริมาณโพแทสเซียมที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

โพแทสเซียมเป็นอีกหนึ่งในธาตุหลักที่มีความสำคัญต่อพืชเช่นเดียวกับไนโตรเจนและฟอสฟอรัส สำหรับอิทธิพลของโพแทสเซียมต่อพืช เช่น มีผลต่อกระบวนการสร้างและเคลื่อนย้ายน้ำตาลและแป้งของพืช ผลต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงและการหายใจของพืช และผลต่อความต้านทานโรคของพืช พืชที่ขาดโพแทสเซียมจะมีอาการขอบใบซีด (chlorosis) เมล็ดลีบ ลำต้นอ่อนแอ และล้มได้ง่าย (Jones และ Jacobsen, 2005) โดยปริมาณของโพแทสเซียมในดินจะแตกต่างกันไปตามชนิดของดิน ค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน ระยะเวลาของการกัดกร่อน และการชะล้างดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553) การวิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียม (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) รูปของโพแทสเซียมที่รากพืชสามารถดูดได้จะอยู่ในรูปของ K^+ ที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในดินตัวอย่าง พบว่ามีค่าเท่ากับ 2.4 ± 0.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน และเมื่อเปรียบเทียบกับตารางการแปลผลระดับโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (ตารางที่ ก – 6) แล้วพบว่าดินตัวอย่างมีปริมาณโพแทสเซียมในระดับที่ต่ำมาก จึงต้องมีการปรับปรุงดินให้มีปริมาณโพแทสเซียมที่เหมาะสมและเพียงพอต่อพืชก่อนที่จะใช้ประโยชน์พื้นที่นี้ในการปลูกพืช

9) ปริมาณสังกะสีทั้งหมด

สังกะสีเป็นจุลธาตุอาหารธาตุหนึ่งที่พืชต้องการในปริมาณน้อย (100 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งของพืช) แต่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช (วิไลภรณ์ บุญญกิจจินดา, 2556) โดยสังกะสีที่รากพืชสามารถดูดได้จะอยู่ในรูปของ Zn^{2+} บทบาทของสังกะสีที่มีต่อการเจริญเติบโต

ของพืช เช่น มีบทบาททางอ้อมต่อการสร้างคลอโรฟิลล์ มีส่วนในการขยายพันธุ์พืชหลายชนิด และเป็น activator ของเอมไซม์หลายชนิด ความเป็นพิษของสังกะสีต่อพืชนั้นพบได้น้อยมาก ตรงกันข้ามกับการขาดสังกะสีพืชสามารถพบได้ทั่วไป เช่น มีใบแคบเล็ก ปล้องสั้น ยืดต้นช้า และไม่ออกผล (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) สำหรับดินที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้พบว่ามีปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินเท่ากับ 71.3 ± 10.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ซึ่งค่ามาตรฐานของสังกะสีในดินมีค่าเท่ากับ 3 – 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน (Mukhopadhyay และ Maiti, 2010) ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่มีอยู่ในดินนี้มีปริมาณสังกะสีในระดับมาตรฐาน และไม่เป็นพิษต่อพืช

4.2 การหาปริมาณสังกะสีในดินที่เหมาะสมที่หญ้ารูซี่สามารถบำบัดได้

การหาปริมาณสังกะสีที่สูงที่สุดหญ้ารูซี่สามารถบำบัดได้ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเติมสารละลายสังกะสีและหาปริมาณสังกะสีที่เหมาะสมที่หญ้ารูซี่สามารถบำบัดได้โดยการพิจารณาอัตราการรอดชีวิต และมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ เมื่อปลูกในชุดการทดลองที่ต่างกัน 4 ชุดการทดลอง คือ ชุดที่ไม่มีการเติมสังกะสี (ชุดควบคุม) ชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน และชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน เป็นเวลา 15 วัน

จากผลการทดลองพบว่าอัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ (**ตารางที่ 9**) จะสูงที่สุด (93 เปอร์เซ็นต์) เมื่อปลูกในชุดที่ไม่มีการเติมสังกะสี (ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดิน 71.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน) รองลงมาคือชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน (ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดิน 371.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน) คือมีอัตราการรอดชีวิตเท่ากับ 83 เปอร์เซ็นต์ ส่วนชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน (ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดิน 471.3 และ 571.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ตามลำดับ) มีอัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่เท่ากับ 76 และ 66 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเมื่อใช้สถิติ One - way ANOVA มาช่วยในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของอัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในชุดการทดลองต่างๆ พบว่าอัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในชุดที่ไม่มีการเติมสังกะสีและชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แต่หญ้ารูซี่ที่ปลูกในชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 400 และ 500 มิลลิกรัม

ต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดินนั้นมีความแตกต่างกับหญ้ารูซี่ที่ปลูกในชุดที่ไม่มีการเติมสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และเมื่อเปรียบเทียบอัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน พบว่าทั้งสองชุดนี้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งจากผลการทดลองนี้พบว่าอัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่จะมีค่าใกล้เคียงกัน หรืออยู่ในช่วง 66 – 93 เปอร์เซ็นต์ แต่เพื่อยืนยันผลการทดลอง จึงควรพิจารณามวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ร่วมด้วย

ตารางที่ 9 อัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ

ปริมาณการเติมสังกะสี (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน)	ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน)	อัตราการรอดชีวิตของหญ้า (เปอร์เซ็นต์)
ไม่เติมสังกะสี	71.3	93[a]
300	371.3	83[a]
400	471.3	76[b]
500	571.3	66[c]

หมายเหตุ ตัวอักษร a, b และ c ที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันในแต่ละชุดการทดลองแสดงถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้สถิติ One - way ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

มวลชีวภาพเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณสังกะสีที่เหมาะสมที่หญ้ารูซี่สามารถบำบัดได้ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ (**ตารางที่ 10**) พบว่ามวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ส่วนเหนือพื้นดินและส่วนราก ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แม้ว่าจะปลูกในชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างกัน จากนั้นจึงพิจารณาผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ และพบว่าผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่จะสูงที่สุดเมื่อปลูกในชุดที่ไม่มีการเติมสังกะสี รองลงมาคือหญ้ารูซี่ที่ปลูกในชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ซึ่งมีมวลชีวภาพรวมของหญ้ารูซี่เท่ากับ 0.30 ± 0.024, 0.25 ± 0.014, 0.21 ± 0.010 และ 0.17 ± 0.011 กรัมน้ำหนักแห้งของพืช ตามลำดับ เมื่อใช้สถิติมาช่วยในการเปรียบเทียบความแตกต่างของผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ พบว่าผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ ให้ผลการทดลองไปในทำนองเดียวกับผลการทดลองการหาอัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ใน

ข้างต้น คือผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ไม่มีการเติมสังกะสี และชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดินไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แต่ในชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน นั้นมีมวลชีวภาพรวมของหญ้ารูซี่แตกต่างกับหญ้ารูซี่ที่ปลูกในชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ไม่มีการเติมสังกะสี และชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และมวลชีวภาพรวมของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ยังมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ด้วย

ตารางที่ 10 มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ

ปริมาณการเติมสังกะสี (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน)	มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ (กรัมน้ำหนักแห้งของพืช)		
	ส่วนเหนือพื้นดิน	ส่วนราก	รวม
ไม่เติมสังกะสี	0.16 ± 0.008^{a}	0.14 ± 0.012^{a}	0.30 ± 0.024^{a}
300	0.14 ± 0.008^{a}	0.11 ± 0.003^{a}	0.25 ± 0.014^{a}
400	0.11 ± 0.009^{a}	0.10 ± 0.005^{a}	0.21 ± 0.010^{b}
500	0.09 ± 0.006^{a}	0.08 ± 0.005^{a}	0.17 ± 0.011^{c}

หมายเหตุ ตัวอักษร a, b และ c ที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันในแต่ละตำรับการทดลองแสดงถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้สถิติ One - way ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล

จากผลการทดลองการหาปริมาณสังกะสีในดินที่เหมาะสมที่หญ้ารูซี่สามารถบำบัดได้ จะเห็นว่าว่าอัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่และมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่แปรผกผันกับปริมาณการเติมสังกะสี หรืออาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสังกะสีในดินส่งผลให้อัตราการรอดชีวิตและมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Broadly และคณะ (2011) ที่พบว่าความเป็นพิษของสังกะสีต่อพืชสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อปลูกพืชนั้นในดินที่มีความเป็นกรด สำหรับดินที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้มีค่าความเป็นกรดปานกลางการเติมสารละลายสังกะสีที่มากจนเกินไปก็อาจจะก่อให้เกิดอาการพิษต่อพืชได้ ซึ่งหญ้ารูซี่จึงแสดงออกด้วยการมีอัตราการรอดชีวิตและมวลชีวภาพที่

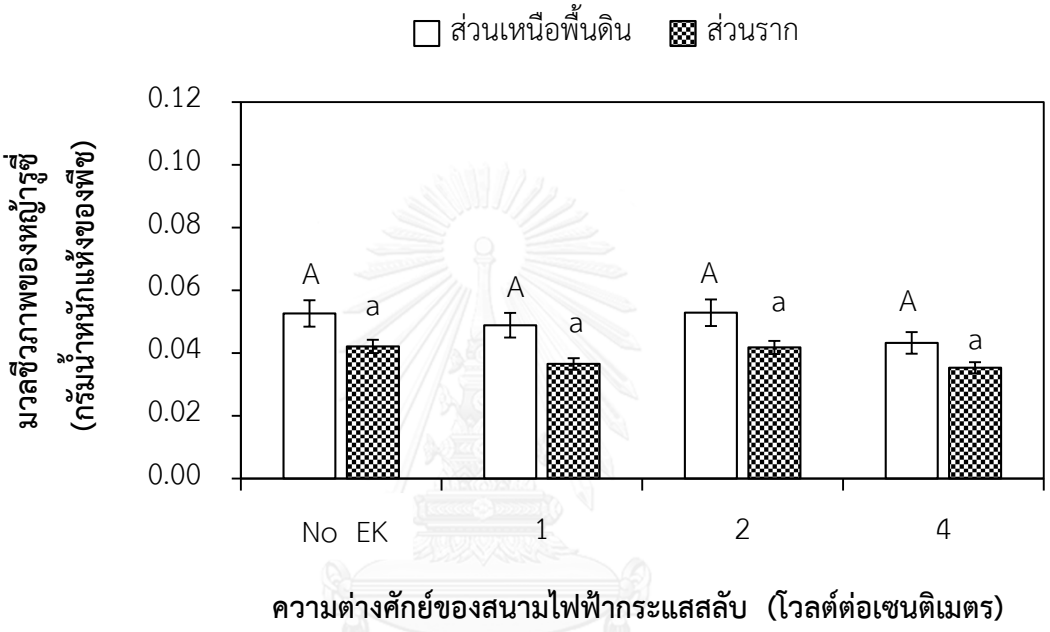
ลดลงนั่นเอง ส่วนการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน หรือปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่ปนเปื้อนในดินที่ความเข้มข้น 371.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน จะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราการรอดชีวิตและมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นการเติมสังกะสีในดินที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน จึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้ศึกษาความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะเวลาการให้กระแสไฟฟ้า และความหนาแน่นของพืชที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดโดยหญ้ารูซี่ต่อไป

4.3 การหาความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดด้วยหญ้ารูซี่

การทดลองการหาความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดด้วยหญ้ารูซี่ งานวิจัยนี้ได้ทำการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน (เป็นความเข้มข้นที่ได้จากผลการทดลองในข้อ 4.2) ในดิน (ปริมาณสังกะสีในดินเดิม 71.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน) จากนั้นผสมให้เข้ากัน (ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดิน 371.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน) และปลูกหญ้ารูซี่ลงในกระถางทดลอง แล้วติดตั้งสนามไฟฟ้าภายในกระถางทดลอง และให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ที่แตกต่างกัน โดยชุดการทดลองแรกจะไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ชุดการทดลองที่สองจะให้กระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ชุดการทดลองที่สามให้กระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และชุดการทดลองที่สี่ให้กระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้า 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร (ให้กระแสไฟฟ้า 2 ชั่วโมงต่อวัน) เมื่อเวลาผ่านไป 15 วัน จึงเก็บเกี่ยวพืชไปวิเคราะห์มวลชีวภาพ และปริมาณสังกะสีที่สะสมในพืช สำหรับดินที่ได้ผ่านการบำบัดโดยการใช้กระแสไฟฟ้าร่วมกับการใช้พืชจะเก็บตัวอย่างบริเวณขั้วอิเล็กโทรดทั้งสี่ขั้ว เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณสังกะสีที่คงเหลือในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรด

สำหรับพืชที่ถูกเก็บเกี่ยวจะถูกนำไปล้าง แยกส่วนเหนือพื้นดินและส่วนราก อบจนแห้ง และนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหามวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกในดินที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ (**รูปที่ 9**) ซึ่งพบว่ามวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินจะมากกว่ามวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนรากทุกชุดการทดลอง โดยมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินมีมากที่สุดในชุดที่ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า (0.05 ± 0.003 กรัมน้ำหนักแห้งของพืช) ส่วนชุดที่มีมวลชีวภาพในส่วนเหนือพื้นดินน้อยที่สุดคือชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร (0.04 ± 0.002 กรัมน้ำหนักแห้งของพืช) สำหรับมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนรากจะมีมากที่สุดเมื่อปลูกในชุดที่ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า

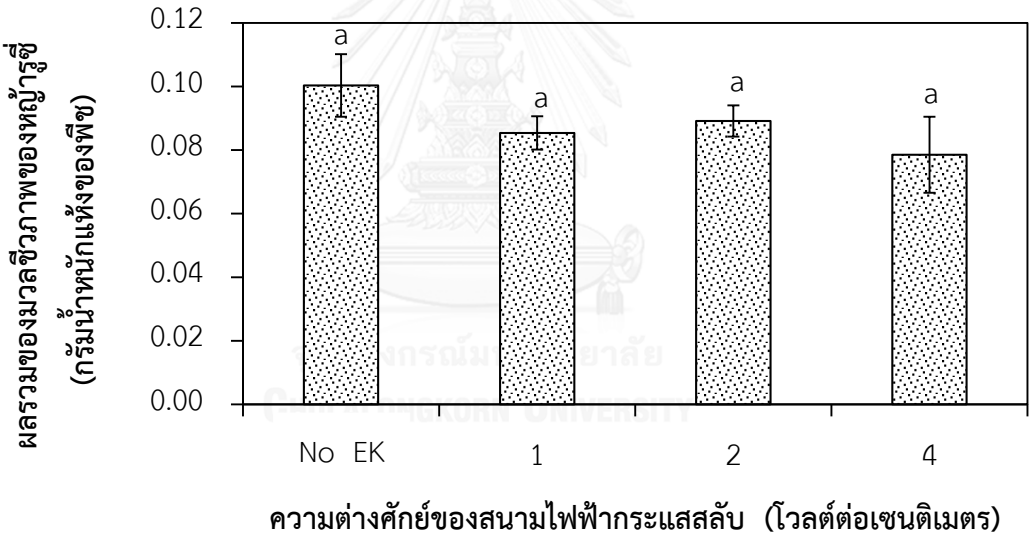
(0.04 ± 0.003 กรัมน้ำหนักแห้งของพืช) ส่วนชุดที่มีมวลชีวภาพน้อยที่สุดคือ ชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร (0.03 ± 0.003 กรัมน้ำหนักแห้งของพืช) และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติโดยใช้สถิติ One - way ANOVA ของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในทุกชุดการทดลอง พบว่าการให้กระแสไฟฟ้านั้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของมวลชีวภาพของพืชทั้งส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



รูปที่ 9 มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ซึ่งตัวอักษร A และ a ที่เหมือนกันแสดงถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ตามลำดับ โดยใช้สถิติ One - way ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล

จากนั้นจึงทำการพิจารณาผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ (**รูปที่ 10**) พบว่าผลรวมของมวลชีวภาพของพืชจะสูงที่สุดในชุดที่ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า รองลงมาคือในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2, 1 และ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งมีผลรวมของมวลชีวภาพเท่ากับ 0.10 ± 0.001, 0.09 ± 0.005, 0.09 ± 0.005 และ 0.08 ± 0.012 กรัมน้ำหนักแห้งของพืช ตามลำดับ และเมื่อมีการเปรียบเทียบทางสถิติโดยใช้สถิติ One – way ANOVA แล้วไม่พบความแตกต่างระหว่างการทดลองในชุดที่มี

การให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1, 2 และ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร กับชุดที่ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หรืออาจกล่าวได้ว่าการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับการใช้พืชในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีกับการบำบัดโดยการใช้พืชเพียงอย่างเดียวไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีโดยใช้กระแสไฟฟ้าร่วมกับการใช้พืชไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 นั่นเอง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Aboughalma และคณะ (2008) ที่พบว่าการเติมกระแสไฟฟ้า DC ร่วมกับการบำบัดโดยใช้พืช อิทธิพลของกระแสไฟฟ้า DC จะทำให้ค่า pH ของดินเปลี่ยนแปลง แต่การเติมกระแสไฟฟ้า AC ลงไปร่วมกับการบำบัดโดยใช้พืชจะส่งเสริมการเจริญเติบโตของมันฝรั่ง และกระแสไฟฟ้า AC จะส่งเสริมความสามารถมันฝรั่งของในการสะสมโลหะทั้งในส่วนเหนือดินและส่วนรากมากกว่าการบำบัดโดยไม่มีการใช้กระแสไฟฟ้า



รูปที่ 10 ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ เป็นเวลา 15 วัน ซึ่งตัวอักษร a ที่เหมือนกันแสดงถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้สถิติ One - way ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ (**ตารางที่ 11**) พบว่าปริมาณสังกะสี

ที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินของหญ้ารูซี่มีค่าสูงที่สุดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร รองลงมาคือชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ชุดที่ไม่มีการติดตั้งกระแสไฟฟ้า และชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ (953.00 ± 64.80, 822.96 ± 48.56, 802.79 ± 40.14 และ 691.45 ± 29.73 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของพืช) ซึ่งเมื่อพิจารณาโดยใช้สถิติ One – way ANOVA พบว่าปริมาณสังกะสีในส่วนเหนือพื้นดินของหญ้ารูซี่ในทุกชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สำหรับปริมาณสังกะสีในส่วนรากของหญ้ารูซี่ จะมีค่าสูงที่สุดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตรเช่นเดียวกับปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินของหญ้ารูซี่ รองลงมาคือชุดที่ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร และชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1466.97 ± 114.42, 1245.33 ± 102.12, 1213.55 ± 87.38 และ 1042.86 ± 78.21 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของพืช ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบทางสถิติโดยใช้สถิติ One - way ANOVA แล้วพบว่าปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนรากในทุกชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จากนั้นจึงพิจารณาปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกชุดการทดลองเช่นเดียวกับผลการทดลองปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แม้ว่าผลรวมของปริมาณสังกะสีที่สะสมในหญ้ารูซี่จะมีความแตกต่างกัน โดยในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร จะมีปริมาณสังกะสีสะสมอยู่ในพืชมากที่สุด รองลงมาคือชุดที่ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร และชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2419.97 ± 175.10, 2048.12 ± 138.24, 2036.51 ± 156.14 และ 1734.31 ± 110.11 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของพืช ตามลำดับ

จากการทดลองนี้จะเห็นได้ว่าการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีโดยพืชร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้าจะทำให้พืชสามารถดูดดึงสังกะสีในดินมาสู่รากและลำเลียงสู่ส่วนเหนือพื้นดินได้เพิ่มขึ้น ซึ่งกลไกที่อาจเกิดขึ้นระหว่างไฟฟ้ากระแสสลับที่เติมลงไปกับพืชมี 3 กลไก คือ กลไกที่เกิดจากอิทธิพลของน้ำในดิน โดยการให้กระแสไฟฟ้าภายในกระถางทดลองจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำในดินค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับการที่ไม่ให้กระแสไฟฟ้า ซึ่งการเคลื่อนที่ของน้ำในดินนี้อาจพาไอออนสังกะสีที่ละลายน้ำไปยังรากพืช ทำให้พืชดูดดึงสังกะสีได้ดีขึ้น กลไกที่สองคือกลไกที่เกิดจากอิทธิพลของรากพืช ซึ่งโดยปกติที่เยื่อหุ้มเซลล์รากของพืชจะมีประจุเป็นลบ (- 100 มิลลิโวลต์ ถึง -200 มิลลิโวลต์) การบำบัดดินที่ปนเปื้อนโดยการให้กระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้า

บริเวณรากพืช เกิดช่วงที่รากพืชมีประจุสลับกับไม่มีประจุ ทำให้เกิดการเปิด – ปิดของประตูไอออน (ion channel) ที่เซลล์รากพืช และไอออนสามารถเข้า – ออกได้ง่าย ซึ่งเป็นไปได้ที่โลหะไอออนขนาดต่างๆ เกิดพืชดูดดึงเข้าสู่รากพืชได้เพิ่มขึ้น และกลไกสุดท้ายคือกลไกที่เกิดจากอิทธิพลของการเมแทบอลิซึม โดยกระแสไฟฟ้าที่เติมลงไปอาจมีอิทธิพลต่อกิจกรรมของไอออนในเซลล์พืชทั้งภายในและภายนอกเซลล์ ซึ่งอาจส่งผลต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและกระบวนการสลายโมเลกุลของพืช และจากผลการทดลองนี้จะเห็นได้อีกว่าการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ที่สูงขึ้น หญ้ารูซี่มีแนวโน้มดูดดึงสังกะสีได้ในปริมาณที่ลดลง ซึ่งเกิดจากกระแสไฟฟ้าที่สูงไปทำลายเซลล์ และลดการแบ่งตัวของเซลล์รากพืชอีกทั้งยังมีผลต่อกระบวนการขนส่งเคลื่อนย้ายน้ำและธาตุอาหารของเซลล์รากพืช จึงทำให้พืชสะสมสังกะสีซึ่งเป็นจุลธาตุอาหารแก่พืชได้น้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับ Cang และคณะ (2011) ที่พบว่าการประยุกต์ใช้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่ำๆ จะทำให้พืชสามารถดูดดึงโลหะได้เพิ่มขึ้น และเพิ่มความสามารถในการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งตรงกันข้ามกับที่ความต่างศักย์สูงๆ ที่พืชจะมีแนวโน้มในการดูดดึงสังกะสีที่ลดลง

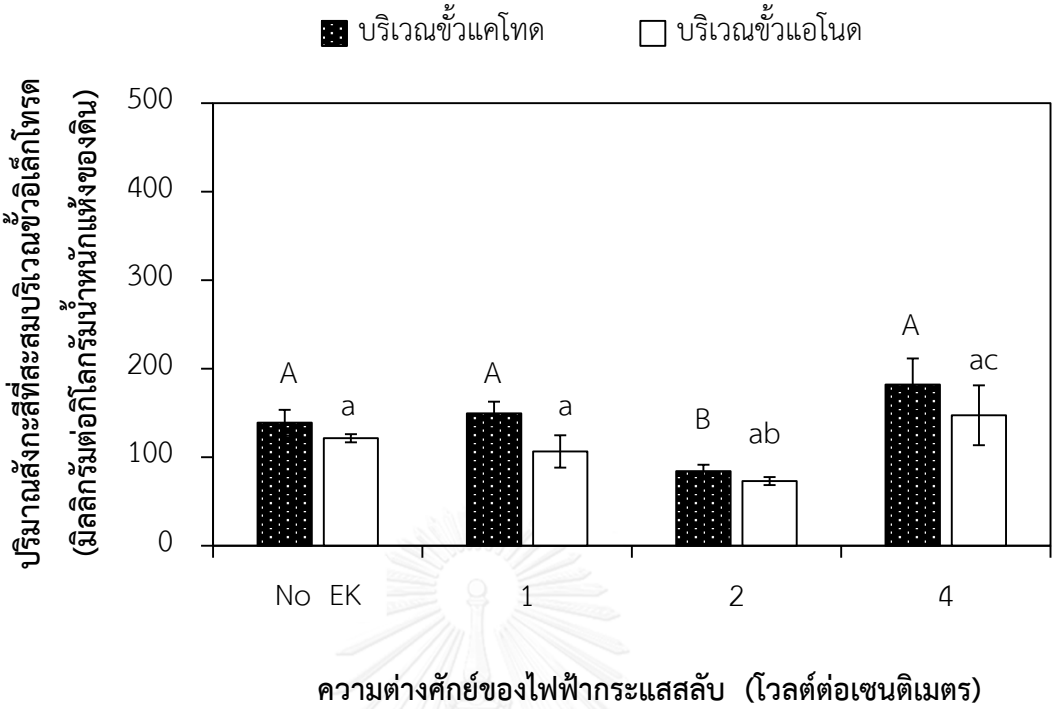
ตารางที่ 11 ปริมาณสังกะสีทั้งที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ

ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์ต่อเซนติเมตร)	ปริมาณสังกะสี (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของพืช)		
	ส่วนเหนือพื้นดิน	ส่วนราก	รวม
ไม่ติดตั้งสนามไฟฟ้า	802.79 ± 40.14[a]	1245.33 ± 102.12[a]	2048.12 ± 138.24 [a]
1	822.96 ± 48.56[a]	1213.55 ± 87.38[a]	2036.51 ± 156.14 [a]
2	953.00 ± 64.80[a]	1466.97 ± 114.42[a]	2419.97 ± 175.10[a]
4	691.45 ± 29.73[a]	1042.86 ± 78.21[a]	1734.31 ± 110.11[a]

หมายเหตุ ตัวอักษร a ที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันในแต่ละชุดการทดลองแสดงถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้สถิติ One - way ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล

ต่อมาปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ (**รูปที่ 11**) โดยเก็บตัวอย่างดินที่ผ่านการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับการใช้พืชทั้งบริเวณขั้วแคโทด (ขั้วลบ) และบริเวณขั้วแอโนด (ขั้วบวก) ภายในบริเวณที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า จากนั้นอบจนน้ำหนักคงที่ แล้วย่อยด้วยกรด

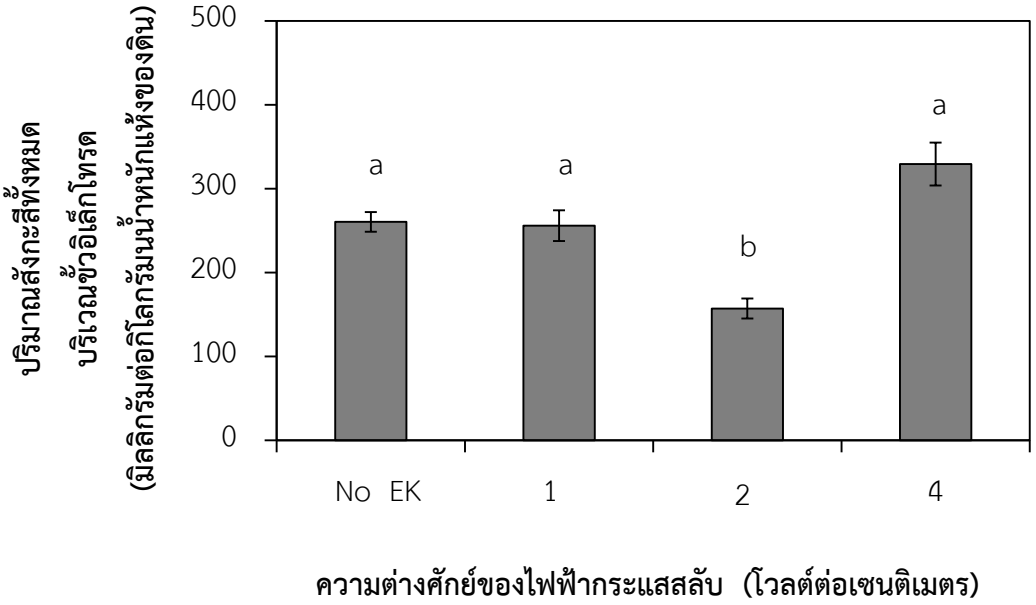
ไนตริกเข้มข้นโดยใช้เครื่อง microwave digester และวัดปริมาณสังกะสีในดินโดยเครื่อง AAS ผลการทดลองพบว่าปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินทั้งบริเวณขั้วแคโทดและบริเวณขั้วแอโนดในแต่ละชุดการทดลองมีความแตกต่างกัน โดยในดินบริเวณขั้วแคโทดจะมีสังกะสีสะสมน้อยที่สุดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และเพิ่มขึ้นตามลำดับในชุดที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้า ชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร และชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งปริมาณสังกะสีที่วัดค่าได้เท่ากับ 84.12 ± 7.39, 139.14 ± 14.48, 149.37 ± 13.29 และ 182.04 ± 29.58 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติของปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดโดยใช้สถิติ One - way ANOVA พบว่าชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 กับชุดการทดลองอื่น ส่วนบริเวณขั้วแอโนดจะมีสังกะสีในดินจะน้อยที่สุดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตรเช่นเดียวกับบริเวณขั้วแคโทด และเพิ่มขึ้นตามลำดับในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ชุดที่ไม่มีการให้ติดตั้งสนามไฟฟ้า และชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งปริมาณสังกะสีที่วัดได้จากตัวอย่างดินบริเวณขั้วแอโนดมีค่าเท่ากับ 73.05 ± 4.58, 106.53 ± 18.27, 121.44 ± 4.62 และ 147.39 ± 33.88 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติของปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดเมื่อมีการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับการใช้พืช โดยใช้สถิติ One - way ANOVA พบว่าปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1, 2 และ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 กับปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดในชุดการทดลองที่ไม่มีการให้ติดตั้งสนามไฟฟ้า แต่ชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 และ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร พบว่าปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



รูปที่ 11 ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ ซึ่งตัวอักษร A, B ที่ต่างกันแสดงถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของสังกะสีบริเวณขั้วแคโทด และตัวอักษร a, b ที่ต่างกันแสดงถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของสังกะสีบริเวณบริเวณขั้วแอโนดที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ตามลำดับ โดยใช้สถิติ One - way ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล

เมื่อพิจารณาปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ (**รูปที่ 12**) พบว่าปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินน้อยที่สุดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และสูงขึ้นตามลำดับในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ชุดที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้า และชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ 157.17 ± 11.97, 255.89 ± 18.30, 260.44 ± 11.66 และ 329.43 ± 25.50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่คงเหลือในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดโดยใช้สถิติ One - way ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูลจะให้ผลการทดลองในทำนองเดียวกับการผลการทดลองปริมาณสังกะสีในดินในบริเวณขั้วแคโทด โดยในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีความ

แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 กับชุดการทดลองอื่น จากผลการทดลองนี้พบว่าลักษณะดินที่ใช้ในการทดลองเป็นดินเหนียว ซึ่งมีลักษณะเนื้อดินละเอียดทำให้รากพืชไชชอนได้ยากจึงสามารถบำบัดดินได้เฉพาะในบริเวณที่รากพืชสามารถไปได้ถึงเท่านั้น นอกจากนี้ดินเหนียวยังมีประจุมีประจุที่ผิวอนุภาคดินเป็นลบ ไอออนที่เป็นบวกจึงสามารถดูดติดกับอนุภาคดินได้ดี (ค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดินสูง) ซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสารปนเปื้อนในดินเมื่อมีการใช้พืชเพียงอย่างเดียว การบำบัดดินที่ปนเปื้อนโดยพืชร่วมกับกระแสไฟฟ้า อิทธิพลของสนามไฟฟ้าจะไปส่งเสริมให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำและไอออนภายในดินทำให้ไอออนสามารถเคลื่อนที่ไปยังรากพืชได้ดีขึ้น สอดคล้องกับการการศึกษาของ Chirakkara และคณะ (2015) ที่พบว่าการเพิ่มสนามไฟฟ้าร่วมการบำบัดด้วยพืช สนามไฟฟ้านั้นจะไปส่งเสริมให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำและไอออนในมวลดิน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อพืช และมีผลต่อเยื่อหุ้มเซลล์ของรากพืช (มีประจุลบ) ให้สามารถเกาะจับกับสารปนเปื้อนได้ดียิ่งขึ้นทำให้ปริมาณสารปนเปื้อนที่อยู่ในดินมีค่าน้อยลง



รูปที่ 12 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรด เมื่อมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับการบำบัดโดยหญ้ารูซี่ ซึ่งตัวอักษร a และ b ที่ต่างกันแสดงถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้สถิติ One - way ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล

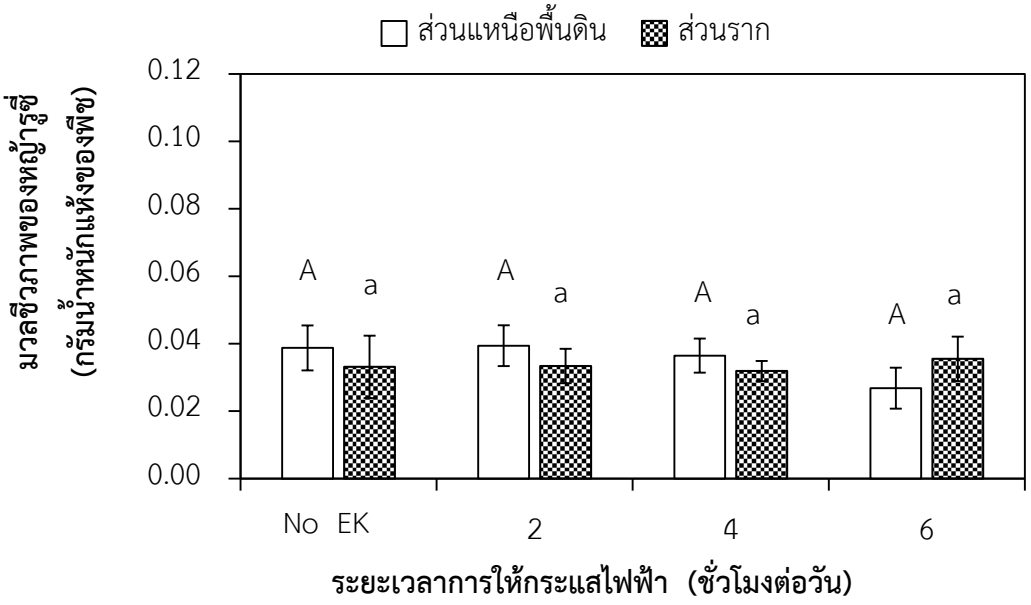
ผลการวิเคราะห์มวลชีวภาพปริมาณสังกะสีที่สะสมในพืช และปริมาณสังกะสีที่คงเหลือในดิน เมื่อมีการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับการใช้พืช สามารถสรุปได้ว่าการใช้กระแสไฟฟ้าร่วมกับการบำบัดโดยการใช้พืช กระแสไฟฟ้าที่เพิ่มลงไปจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของมวลชีวภาพของพืชอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่มีผลต่อความสามารถของการดูดดึงสังกะสีของหญ้ารูซี่ที่แตกต่างกัน ซึ่งการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ร่วมกับการบำบัดโดยใช้หญ้ารูซี่ เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสี

4.4 การหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยหญ้ารูซี่

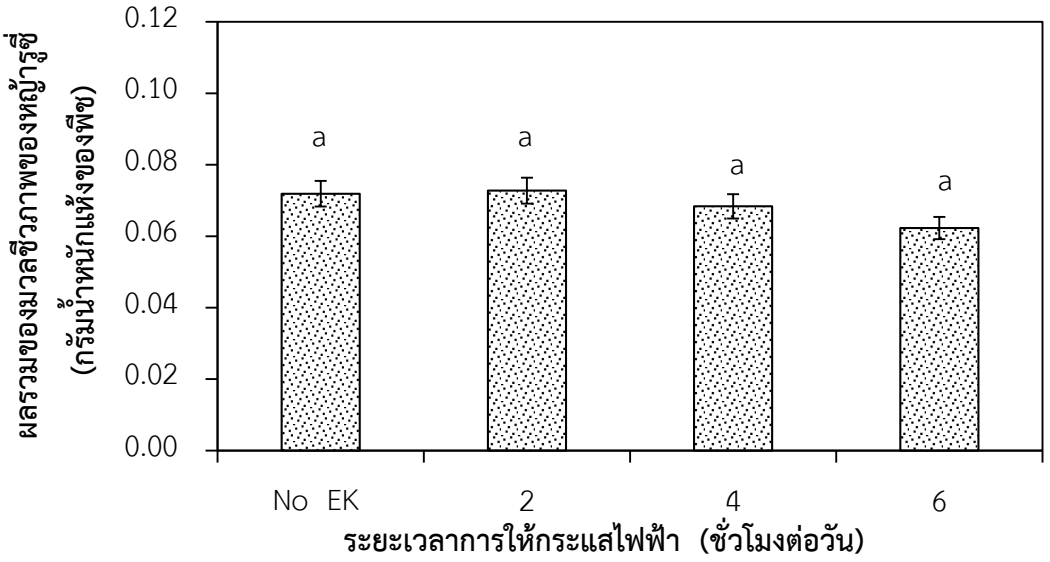
การทดลองหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีด้วยหญ้ารูซี่ เริ่มจากติดตั้งสนามไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร (ผลการทดลอง 4.3) ภายในกระถางปลูกที่มีดินที่ปนเปื้อนสังกะสี 371.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน (ผลการทดลอง 4.2) และให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาที่ต่างกัน 4 ชุดการทดลอง คือ ชุดแรกไม่ให้กระแสไฟฟ้า ชุดที่สองให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน ชุดที่สามให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน และชุดสุดท้ายให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน ทำเช่นนี้ติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน 15 วัน จากนั้นจึงได้เก็บเกี่ยวไปวิเคราะห์มวลชีวภาพ และปริมาณสังกะสีที่สะสมในหญ้ารูซี่ ส่วนดินที่ผ่านการบำบัดจะนำไปวิเคราะห์ปริมาณสังกะสีที่คงเหลือในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรด

พืชที่ผ่านการบำบัดจะนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหามวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในแต่ละส่วน ซึ่งผลการทดลองมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากเมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ แสดงดัง**รูปที่ 13** โดยพบว่ามวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินจะมีค่าสูงกว่ามวลชีวภาพส่วนรากในทุกชุดการทดลอง ยกเว้นชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน พบว่ามีมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนรากมากกว่าส่วนเหนือพื้นดิน แต่เมื่อเปรียบเทียบทางสถิติโดยใช้สถิติ One – way ANOVA แล้ว ไม่พบความแตกต่างกันระหว่างมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากเมื่อการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาที่แตกต่างกันนั้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของมวลชีวภาพของพืชทั้งสองส่วน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการหาความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดด้วยหญ้ารูซี่ (ข้อ 4.3) จากนั้นจึงพิจารณาผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ (**รูปที่ 14**) พบว่าผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่จะสูงที่สุดในชุด

ที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์เท่ากับ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน รองลงมาคือชุดที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้า และชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 และ 6 ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งมีผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่เท่ากับ 0.073 ± 0.01, 0.072 ± 0.01, 0.068 ± 0.00 และ 0.062 ± 0.01 กรัมน้ำหนักแห้งของพืช ตามลำดับ แต่เมื่อเปรียบเทียบทางสถิติของผลการทดลองในแต่ละชุดโดยใช้สถิติ One – way ANOVA แล้วพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งเป็นการยืนยันผลการทดลองว่าการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลาที่แตกต่างกันจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่



รูปที่ 13 มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากเมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสี และมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ซึ่งตัวอักษร A และ a ที่เหมือนกันแสดงถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของในมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนราก โดยใช้สถิติ One - way ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ตามลำดับ



รูปที่ 14 ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ซึ่งตัวอักษร a ที่เหมือนกันแสดงถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของในมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ตามลำดับ โดยใช้สถิติ One - way ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล

จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณสังกะสีที่สะสมในหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ (**ตารางที่ 12**) พบว่าปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินของหญ้ารูซี่มีค่าสูงที่สุดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน รองลงมาคือชุดที่มีให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน ชุดที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้า และชุดที่มีให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน :ซึ่งปริมาณสังกะสีที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 929.75 ± 66.94, 895.27 ±, 58.28, 872.13 ± 33.61 และ 700.30 ± 38.24 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของพืชตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณสังกะสีที่สะสมอยู่ในส่วนเหนือพื้นดินของหญ้ารูซี่ โดยใช้สถิติ One - way ANOVA มาเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าปริมาณสังกะสีที่สะสมในหญ้ารูซี่ส่วนเหนือพื้นดินในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ไม่มีความแตกต่างกับชุดที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้า อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เช่นเดียวกับปริมาณสังกะสีที่สะสมในรากของหญ้ารูซี่ที่พบว่าจะมีค่าสูงที่สุดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน รองลงมาคือชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน ชุดที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้า และชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน โดยปริมาณสังกะสีที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 1551.50 ± 67.49, 1178.84 ± 78.86, 1100.87 ±

43.49 และ 595.05 ± 38.26 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของพืช ตามลำดับ ซึ่งปริมาณสังกะสีที่สะสมในหญ้ารูซี่ในส่วนรากในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน มีความแตกต่างอย่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 กับชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน โดยใช้สถิติ One - way ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล และเมื่อพิจารณาปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ จะพบความแตกต่างของปริมาณสังกะสีที่สะสมในหญ้ารูซี่อย่างชัดเจนขึ้น โดยจะเห็นว่าการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน จะส่งเสริมความสามารถของหญ้ารูซี่ในการดูดดึงสังกะสีได้อย่างโดดเด่นกว่าที่ระยะเวลาอื่น ซึ่งปริมาณสังกะสีที่วัดได้มีค่าสูงถึง 2481.25 ± 119.60 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของพืช รองลงมาคือชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน ชุดที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้า และชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งปริมาณสังกะสีที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 2074.10 ± 126.93, 1973.00 ± 77.19 และ 1294.35 ± 61.22 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของพืช ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบทางสถิติโดยใช้สถิติ One - way ANOVA พบว่าชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน มีความความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในเชิงลบกับชุดการทดลองที่ระยะเวลาอื่นๆ หรืออาจกล่าวได้ว่าการให้กระแสไฟฟ้าในระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นจะทำให้พืชมีแนวโน้มที่จะสะสมสังกะสีที่ในส่วนรากลดลง ดังนั้นระยะเวลาการให้กระแสไฟฟ้าจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Lim และคณะ (2004) ที่ได้ทำการบำบัดตะกั่วโดยการใช้ผักกาดเขียวปลีร่วมกับการเติมอีดีทีเอ และการให้กระแสไฟฟ้าเป็นเวลา 1 สัปดาห์ ที่ระยะเวลา 0, 0.5 และ 1 ชั่วโมงต่อวัน การทดลองพบว่าการเติมคีเลตร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้าจะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดดึงตะกั่วของพืชมากกว่าการเติมคีเลตเพียงอย่างเดียว และปริมาณตะกั่วในต้นผักกาดเขียวปลีจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อมีการให้กระแสไฟฟ้าเป็นเวลา 1 ชั่วโมงต่อวันร่วมกับการเติมคีเลต นาน 9 วัน และการทดลองของ Zhou และคณะ (2007) ที่ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดดึงคอปเปอร์และสังกะสีของ Ryegrass และมีการเติมคีเลตพร้อมกับการเติมสนามไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ที่ค่าความต่างศักย์ 1.0 โวลต์ต่อเซนติเมตร เป็นเวลา 1 สัปดาห์ (6 ชั่วโมงต่อวัน) ผลการทดลองพบว่าการเติมคีเลตอีดีทีเอและอีดีดีเอสจะทำให้ความสามารถในการดูดดึงคอปเปอร์และสังกะสีของ Ryegrass เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการที่ไม่มีการเติมคีเลต และการใช้กระแสไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกับการเติมคีเลต พบว่ากระแสไฟฟ้าจะช่วยส่งเสริมความสามารถในการดูดดึงคอปเปอร์และสังกะสีได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับชุดควบคุม

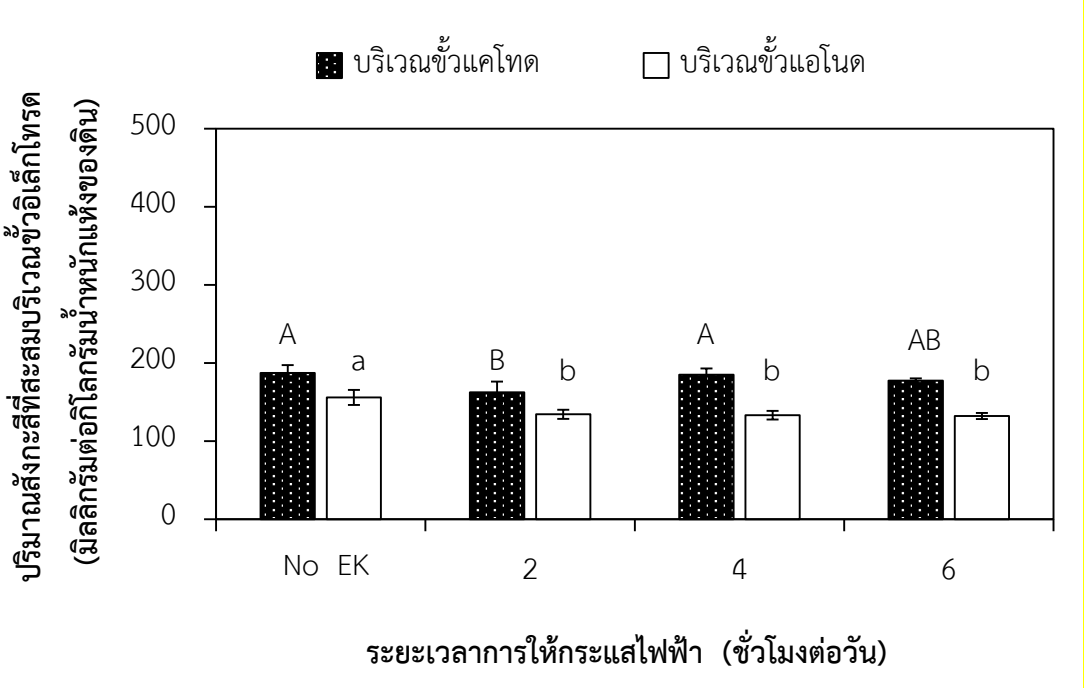
ตารางที่ 12 ปริมาณสังกะสีที่สะสมในหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ

ระยะเวลาการให้กระแสไฟฟ้า (ชั่วโมงต่อวัน)	ความเข้มข้นของสังกะสี (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของของพืช)		
	ส่วนเหนือพื้นดิน	ส่วนราก	รวม
ไม่มีติดตั้งสนามไฟฟ้า	872.13 ± 33.61[a]	1100.87 ± 43.49[a]	1973.00 ± 77.19[a]
2	929.75 ± 66.94[a]	1551.50 ± 67.49[ab]	2481.25 ± 119.60[b]
4	895.27 ± 58.28[a]	1178.84 ± 78.86[a]	2074.10 ± 126.93[a]
6	700.30 ± 38.24[a]	595.05 ± 38.26[ac]	1294.35 ± 61.22[c]

หมายเหตุ ตัวอักษร a, b และ c ที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันในแต่ละชุดการทดลองแสดงถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้สถิติ One - way ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล

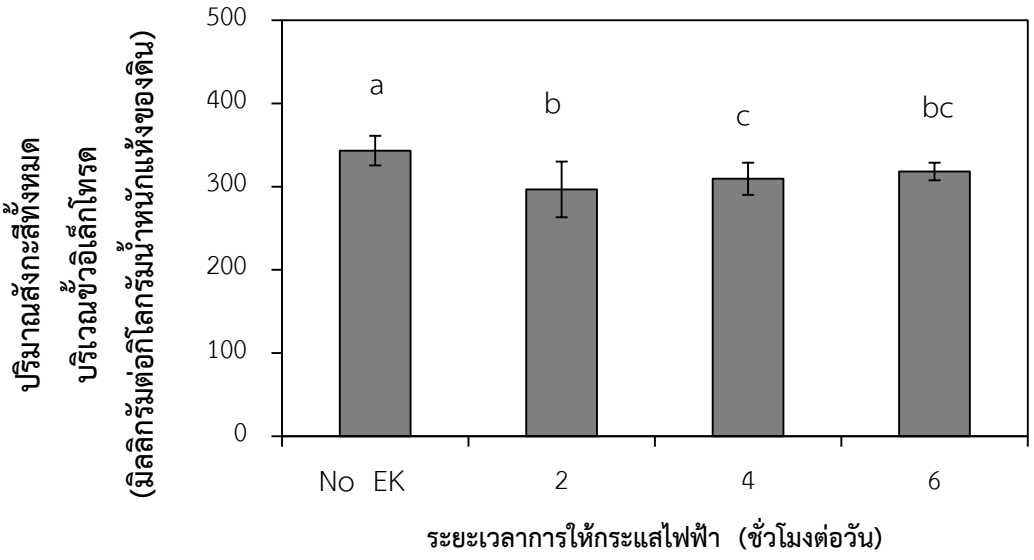
ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและขั้วแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลาที่แตกต่างกันร่วมกับการปลูกหญ้ารูซี่ (**รูปที่ 15**) พบว่าการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาที่แตกต่างกันมีผลต่อปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและขั้วแอโนดแตกต่างกัน โดยสังกะสีส่วนใหญ่จะสะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดมากกว่าบริเวณขั้วแอโนดทุกระยะเวลาการให้กระแสไฟฟ้า ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Aboughalma และคณะ (2008) ที่พบว่าการเติมกระแสไฟฟ้าร่วมกับการบำบัดโดยใช้พืช จะส่งเสริมการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน และโลหะที่อยู่ในรูปของไอออนอิสระจะเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดและเกิดการสะสมในบริเวณดังกล่าว ทำให้ปริมาณดินที่สะสมบริเวณขั้วแคโทดจึงมีมากกว่าขั้วแอโนด ซึ่งเมื่อพิจารณาบริเวณขั้วแคโทด พบว่าชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดจะมีค่าน้อยที่สุด (162.33 ± 10.02 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน) รองลงมาคือชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน 4 ชั่วโมงต่อวัน และชุดที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้า ซึ่งปริมาณสังกะสีที่วัดได้เท่ากับ 177.33 ± 9.90, 184.98 ± 9.90 และ 187.27 ± 5.82 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติของปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดโดยใช้สถิติ One - way ANOVA พบว่าที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 กับชุดที่ไม่มีการให้

กระแสไฟฟ้าและชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ส่วนปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดจะมีน้อยที่สุดเมื่อมีการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับการบำบัดโดยการใช้พืชที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งปริมาณสังกะสีที่วัดได้เท่ากับ 132.15 ± 12.84 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน รองลงมาคือ ชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4, 2 ชั่วโมงต่อวัน และชุดที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้า โดยปริมาณสังกะสีที่วัดได้จากตัวอย่างดินบริเวณนี้มีค่าเท่ากับ 133.23 ± 11.41, 134.36 ± 10.16 และ 155.99 ± 18.57 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติของปริมาณสังกะสีที่สะสมในบริเวณนี้เมื่อมีการประยุกต์ใช้กระแสไฟฟ้าร่วมกับการใช้พืช โดยใช้สถิติ One - way ANOVA พบว่าปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดในชุดที่ชุดที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมงต่อวัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



รูปที่ 15 ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ ซึ่งตัวอักษร A, B และ a, b ที่แตกต่างกันแสดงถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของปริมาณสังกะสีที่สะสมบริเวณขั้วแคโทดและขั้วแอโนดที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้สถิติ One - way ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าระยะเวลาแตกต่างกันร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ (**รูปที่ 16**) พบว่าปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดจะคงเหลือน้อยที่สุดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน รองลงมาคือชุดการทดลองที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 และ 6 ชั่วโมงต่อวัน ตามลำดับ สำหรับในชุดที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้าพบว่ามีปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดมากที่สุดเมื่อเทียบกับชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาอื่น ซึ่งปริมาณสังกะสีที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 296.69 ± 33.46, 309.48 ± 19.26, 318.21 ± 10.60 และ 343.26 ± 17.79 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติโดยใช้สถิติ One - way ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าการให้กระแสไฟฟ้ามีผลต่อปริมาณสังกะสีที่คงเหลือในดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้าในทุกระยะเวลาการให้กระแสไฟฟ้า



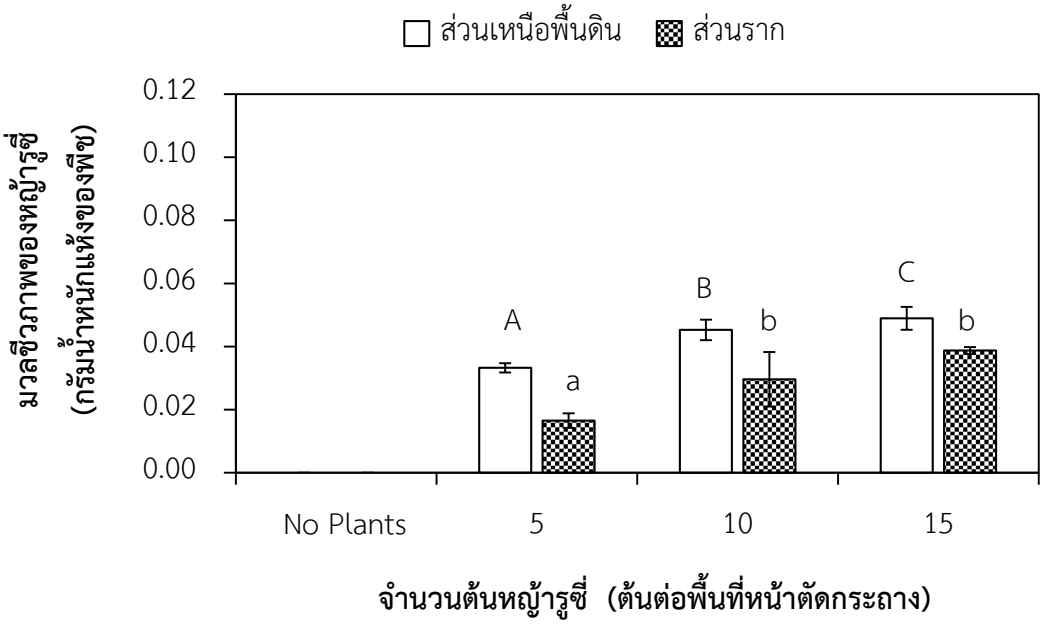
รูปที่ 16 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ ซึ่งตัวอักษร a, b และ c ที่แตกต่างกันแสดงถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้สถิติ One - way ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล

ดังนั้นจากผลการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่าการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสี 371.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน โดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ร่วมกับการบำบัดโดยการใช้พืช และให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาที่แตกต่างกันจะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แต่จะมีผลต่อความสามารถของการดูดดึงสังกะสีในดินของหญ้ารูซี่ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งระยะเวลาการให้กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมและจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดดินร่วมกับหญ้ารูซี่ คือระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน

4.5 การหาความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่เหมาะสมที่จะบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสี

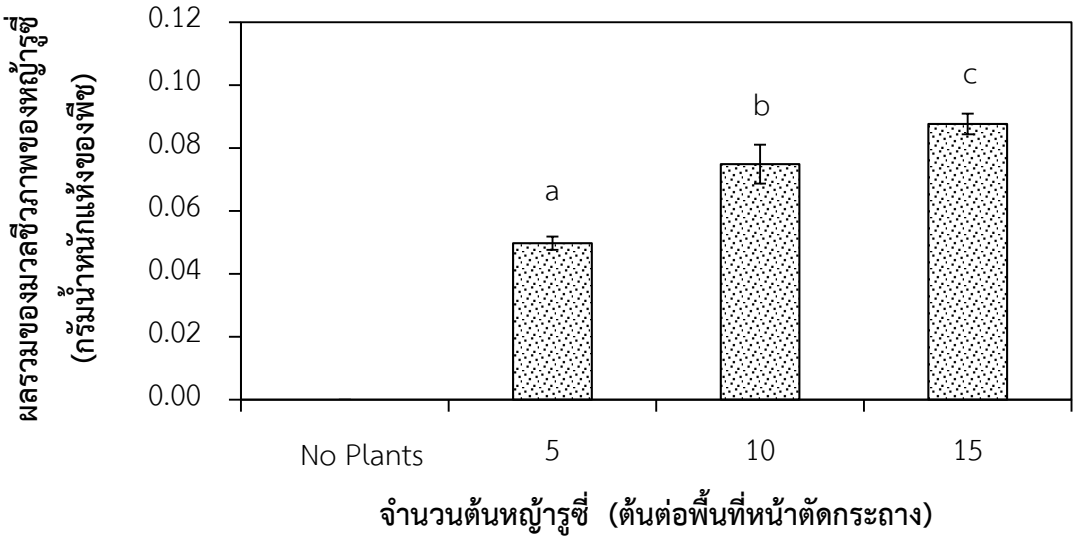
ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองหาความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่เหมาะสมที่จะบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสี โดยการปลูกต้นกล้าหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นที่แตกต่างกัน 4 ชุดการทดลอง โดยชุดการทดลองแรกไม่ปลูกพืช ชุดที่สองปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดของกระถาง ชุดที่สามปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดของกระถาง และชุดที่สี่ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดของกระถาง (พื้นที่หน้าตัดของกระถางเท่ากับ 8 x 8 ตารางเซนติเมตร) ในดินที่ปนเปื้อนสังกะสี 371.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน พร้อมทั้งติดตั้งสนามไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน นาน 15 วัน จากนั้นจึงเก็บเกี่ยวตัวอย่างพืชและดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดเพื่อนำไปวิเคราะห์มวลชีวภาพของพืชและปริมาณสังกะสีในพืชและดิน

ผลการวิเคราะห์มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนราก (**รูปที่ 17**) พบว่ามวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินมีมากกว่ามวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนรากทุกชุดการทดลอง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของมวลชีวภาพหญ้ารูซี่โดยใช้สถิติ One - way ANOVA พบว่ามวลชีวภาพในส่วนเหนือพื้นดินของชุดที่มีความหนาแน่นของพืชเท่ากับ 5, 10 และ 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดของกระถาง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สำหรับมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนรากของชุดที่มีความหนาแน่นของพืชเท่ากับ 10 และ 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดของกระถาง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 กับชุดที่มีความหนาแน่นของพืช 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดของกระถาง



รูปที่ 17 มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกที่ความหนาแน่นต่างๆ ในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า ซึ่งตัวอักษร A, B, C และ a, b ที่ต่างกันแสดงถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ที่ ระดับนัยสำคัญ 0.05 ตามลำดับ ใช้สถิติ One - way ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล

เมื่อเปรียบเทียบผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ (**รูปที่ 18**) พบว่าหญ้ารูซี่ในชุดที่มีความหนาแน่นของพืชเท่ากับ 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดของกระถาง จะมีผลรวมของมวลชีวภาพสูงที่สุด รองลงมาคือหญ้ารูซี่ในชุดที่มีความหนาแน่นของพืชเท่ากับ 10 และ 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดของกระถาง ตามลำดับ (0.09 ± 0.003, 0.07 ± 0.006 และ 0.05 ± 0.002 กรัมน้ำหนักแห้งของพืชตามลำดับ) ซึ่งก็สอดคล้องกับความหนาแน่นของพืช โดยชุดการทดลองที่มีความหนาแน่นของพืชมากก็จะมีผลรวมของมวลชีวภาพของพืชมีสูงไปด้วย



รูปที่ 18 ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกที่ความหนาแน่นต่างๆ ในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า ซึ่งตัวอักษร a, b และ c ที่ต่างกันแสดงถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของมวลชีวภาพรวมของหญ้ารูซี่ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ตามลำดับ ใช้สถิติ One - way ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ปริมาณสังกะสีที่สะสมในหญ้ารูซี่ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่ต่างกัน (**ตารางที่ 13**) พบว่าปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินของหญ้ารูซี่มีจะค่าสูงที่สุดในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง รองลงมาคือชุดที่มีความหนาแน่นของพืช 10 และ 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ซึ่งปริมาณสังกะสีที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 13.000 ± 2.74, 12.63 ± 2.33 และ 9.49 ± 1.25 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ สำหรับปริมาณสังกะสีที่สะสมอยู่ในส่วนราก พบว่าชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง มีปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนรากสูงที่สุด รองลงมาคือชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่นเท่ากับ 10 และ 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง เช่นเดียวกับปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินของหญ้ารูซี่ โดยปริมาณสังกะสีที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 17.27 ± 3.76, 16.68 ± 3.08 และ 11.40 ± 1.58 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบปริมาณสังกะสีที่สะสมในหญ้ารูซี่ทั้งสองส่วนโดยใช้สถิติ One - way ANOVA ไม่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และเมื่อพิจารณาปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่ พบว่าชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่นเท่ากับ 5 และ 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ไม่พบความแตกต่างอย่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ระหว่างสองชุดการทดลองนี้ แต่การปลูกพืชที่ความหนาแน่นเท่ากับ 5 และ 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง มีความแตกต่างของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่ จากผลการทดลองนี้จะเห็นว่าความหนาแน่นของต้นพืชมีผลต่อปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมพืช โดยความหนาแน่นของพืชที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้พืชมีแนวโน้มที่จะดูดดึงสังกะสีได้น้อยลง ซึ่งอาจเกิดจากอิทธิพลของความหนาแน่นของพืช ทำให้พืชเกิดการแก่งแย่งแหล่งอาหารและที่ว่างของพืช ซึ่งส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโต และพื้นที่ผิวของพืชลดลง อีกทั้งพืชก็ดูดดึงอาหารได้น้อยลงด้วย สำหรับชุดการทดลองที่ไม่มีการปลูกพืช จะไม่สามารถวัดปริมาณสังกะสีที่พืชดูดดึงได้ แต่สามารถใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีระหว่างการใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าร่วมกับการบำบัดโดยการใช้พืช และการบำบัดโดยการใช้จลนศาสตร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวได้ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ได้จากการวัดปริมาณสังกะสีที่คงเหลือในดิน (**รูปที่ 19 และ 20**)

ตารางที่ 13 ปริมาณสังกะสีที่สะสมในหญ้ารูซี่ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่ต่างกัน

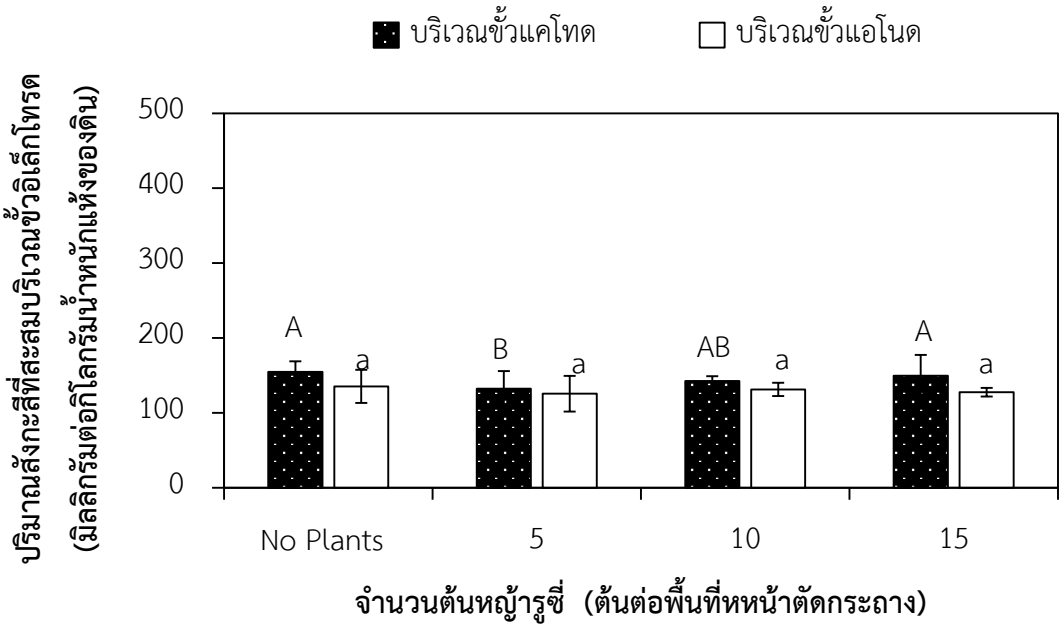
ความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ (ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดของกระถาง)	ความเข้มข้นของสังกะสี (ไมโครกรัมต่อลิตร)		
	ส่วนเหนือพื้นดิน	ส่วนราก	รวม
0	-	-	-
5	13.00 ± 2.74[a]	17.27 ± 3.76[a]	30.27 ± 4.17[a]
10	12.63 ± 2.33[a]	16.68 ± 3.08[a]	29.31 ± 4.32[ab]
15	9.49 ± 1.25[a]	11.40 ± 1.58[a]	20.88 ± 1.83[b]

หมายเหตุ ตัวอักษร a และ b ที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันในแต่ละชุดการทดลองแสดงถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ใช้สถิติ One - way ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล

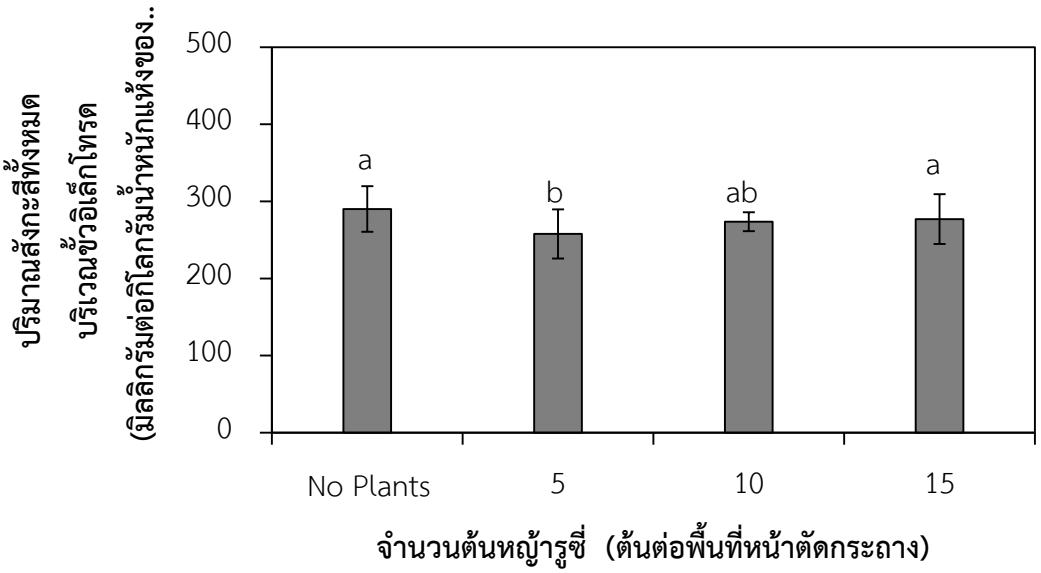
ผลการวิเคราะห์ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและขั้วแอโนด หลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ (**รูปที่ 19**) พบว่าสังกะสีส่วนใหญ่จะสะสมในบริเวณขั้วแคโทดมากกว่าบริเวณขั้วแอโนดทุกชุดการทดลอง เช่นเดียวกับผลการทดลอง 4.4 และ 4.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทด พบว่าชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง มีปริมาณสังกะสีที่สะสมในบริเวณขั้วแคโทดน้อย

ที่สุด ซึ่งสามารถวัดปริมาณสังกะสีได้เท่ากับ 132.11 ± 23.79 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน รองลงมาคือชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อกระถางพื้นที่หน้าตัดกระถาง ซึ่งมีปริมาณสังกะสี 142.36 ± 6.66 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ส่วนชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง มีปริมาณสังกะสีเท่ากับ 149.48 ± 27.97 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน และชุดที่ไม่มีการปลูกพืช (มีเพียงกระแสไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว) ปริมาณสังกะสีที่สะสมเท่ากับ 154.72 ± 14.14 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ซึ่งปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินของชุดที่ไม่มีการปลูกพืชมีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่นต่างๆ และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติของปริมาณสังกะสีที่คงเหลือในดินบริเวณขั้วแคโทดโดยใช้สถิติ One - way ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่นเท่ากับ 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 กับชุดที่ไม่มีการปลูกพืชและชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่นเท่ากับ 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง แต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 กับชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่นเท่ากับ 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ส่วนบริเวณขั้วแอโนดพบว่าปริมาณสังกะสีจะสะสมบริเวณขั้วดังกล่าวน้อยที่สุดในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง (125.67 ± 23.80 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน) รองลงมาคือชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ซึ่งมีปริมาณสังกะสีมีค่าเท่ากับ 127.57 ± 5.72 และ 131.35 ± 8.88 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ตามลำดับ ส่วนในชุดที่ไม่มีการปลูกพืช มีปริมาณสังกะสี 154.72 ± 14.14 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน แต่เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติโดยใช้สถิติ One - way ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดในทุกชุดการทดลองจะไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ต่อมาเมื่อพิจารณาปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ (**รูปที่ 20**) พบว่าชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง จะมีปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรดน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่นอื่น ซึ่งปริมาณสังกะสีวัดได้มีค่าเท่ากับ 257.76 ± 31.84 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน รองลงมาคือชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ซึ่งมีปริมาณสังกะสีเท่ากับ 273.70 ± 12.23 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน สำหรับชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง พบว่ามีปริมาณสังกะสี 277.04 ± 29.61 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ส่วนในชุดที่ไม่มีการปลูกพืชจะมีปริมาณสังกะสีที่สะสมบริเวณขั้วสูงที่สุด (290.12 ± 32.21 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบทางสถิติของผลการ

ทดลองใช้สถิติ One - way ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูลแล้วพบว่าชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง มีความแตกต่างกับชุดที่ไม่มีการปลูกพืช และชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แต่ชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 กับชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง จากผลการทดลองนี้จะเห็นว่าความหนาแน่นของต้นพืชมีผลต่อปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรด โดยความหนาแน่นของพืชที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้พืชมีแนวโน้มที่จะดูดดึงสังกะสีได้น้อยลงและปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชุดการทดลองที่มีความหนาแน่นของพืชที่ต่ำ



รูปที่ 19 ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและขั้วแอโนด หลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ ซึ่งตัวอักษร a และ b ที่ต่างกันแสดงถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ตามลำดับ ใช้สถิติ One - way ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล



รูปที่ 20 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ ซึ่งตัวอักษร a และ b ที่ต่างกันแสดงถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ตามลำดับ ใช้สถิติ One - way ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล

จากผลการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่าการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสี โดยการใช้พืชร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน ความหนาแน่นของต้นพืชที่ใช้ในการบำบัด จะมีผลต่อความสามารถของการดูดดึงสังกะสีในดินของหญ้ารูซี่ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งความหนาแน่นของต้นพืชที่เหมาะสมและสามารถบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีที่ 371.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดินร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด คือ ความหนาแน่นของต้นพืชเท่ากับ 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน

ดินที่เก็บมาจากสวนผลไม้ ในตำบลท่าชัย อำเภอเมือง จังหวัดชัยนาท มีลักษณะเนื้อดินเป็นดินเหนียว ที่มีสัดส่วนของ ทราย (sand) : ทรายแป้ง (silt) : ดินเหนียว (clay) เท่ากับ 39 : 19 : 42 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความชื้นในดินเท่ากับ 44.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ระดับความเป็นกรดปานกลาง ปริมาณอินทรียวัตถุอยู่ในระดับสูง ซึ่งส่งผลให้มีค่าแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินสูงไปด้วย (36.4 เซนติโมลต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของดินมีค่าเท่ากับ 0.8 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มีค่าเท่ากับ 0.3 และ 2.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ตามลำดับ และสำหรับปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดิน (ปริมาณสังกะสีเริ่มต้น) มีค่าเท่ากับ 71.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน

5.1.2 ปริมาณสังกะสีในดินที่เหมาะสมที่หญ้ารูซี่สามารถบำบัดได้

การวิเคราะห์ปริมาณสังกะสีที่เหมาะสมที่หญ้ารูซี่สามารถบำบัดได้โดยการพิจารณาอัตราการรอดชีวิต และมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินในชุดที่ไม่มีการเติมสังกะสี เติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน เป็นเวลา 15 วัน พบว่าอัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่จะสูงที่สุดเมื่อปลูกในดินที่ไม่มีการเติมสังกะสี รองลงมาคือการปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ตามลำดับ ซึ่งไม่พบความแตกต่างระหว่างอัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน (ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดิน 371.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน) และหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ไม่มีการเติมสังกะสี (ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดิน 71.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ให้ผลการทดลองในทำนองเดียวกันกับอัตราการรอดชีวิตของพืช คือ ไม่พบความแตกต่างระหว่างมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน (ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดิน 371.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน)) และหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ไม่มีการเติมสังกะสี (ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดิน 71.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นการเติมสังกะสีในดิน

ความเข้มข้นของสังกะสีที่ 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน หรือปริมาณสังกะสีที่ปนเปื้อนในดิน 371.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ หญ้ารูซี่สามารถบำบัดได้

5.1.3 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดด้วยหญ้ารูซี่

การหาความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดด้วยหญ้ารูซี่ในดินปนเปื้อนสังกะสี 371.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน และให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์คือ ไม่มีการติดตั้งกระแสไฟฟ้า ติดตั้งกระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1, 2 และ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร พบว่ามวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในทุกความต่างศักย์ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สำหรับปริมาณสังกะสีที่สะสมในหญ้ารูซี่จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และปริมาณสังกะสีสะสมในดินบริเวณขั้วแคโทด (ขั้วลบ) มากกว่าบริเวณขั้วแอโนด (ขั้วบวก) ในทุกความต่างศักย์ ซึ่งการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร จะทำให้ปริมาณสังกะสีสะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรดน้อยที่สุด จากผลการทดลองนี้จึงสามารถสรุปได้ว่าการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีโดยการใช้หญ้ารูซี่ร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่เติมลงไปจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของมวลชีวภาพของพืช และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดด้วยหญ้ารูซี่ คือที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร

5.1.4 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยหญ้ารูซี่

การหาระยะเวลาการให้กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในบำบัดด้วยหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสี 371.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน และติดตั้งสนามไฟฟ้าที่ความต่างศักย์เท่ากับ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร โดยให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาที่ต่างกันคือ ไม่ให้กระแสไฟฟ้า (ปลูกพืชเพียงอย่างเดียว) และให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมงต่อวัน พบว่าส่วนใหญ่มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินมากกว่าส่วนราก ซึ่งการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน จะทำให้หญ้ารูซี่จะมีมวลชีวภาพ และมีความสามารถในการสะสมสังกะสีทั้งในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับที่ระยะเวลาอื่น ส่วนปริมาณสังกะสีที่สะสมบริเวณขั้วแคโทดจะมีมากกว่าบริเวณขั้วแอโนดในทุกระยะเวลาการให้กระแสไฟฟ้า และปริมาณสังกะสีในดินจะสะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรดน้อยที่สุดเมื่อมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน ดังนั้นจากผลการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่าระยะเวลาการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ร่วมกับหญ้ารูซี่ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสี 371.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน คือระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน

5.1.5 ความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่เหมาะสมที่จะบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสี

การหาความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่เหมาะสมที่จะบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสี โดยการปลูกหญ้ารูซี่ลงในดินที่ปนเปื้อนสังกะสี 371.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ที่ความหนาแน่นของพืชแตกต่างกัน คือ ไม่ปลูกพืช ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5, 10 และ 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน นาน 15 วัน พบว่ามวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ (ยกเว้นชุดการทดลองที่ไม่มีการปลูกพืช) ในส่วนเหนือพื้นดินมากกว่าส่วนรากในทุกความหนาแน่น และมวลชีวภาพของพืชจะสูงที่สุดในชุดที่มีความหนาแน่นของพืชมากที่สุด การสะสมของสังกะสีในส่วนรากจะมีปริมาณสูงกว่าส่วนเหนือพื้นดินในทุกความหนาแน่น ซึ่งการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง พืชจะมีความสามารถในการดูดดึงสังกะสีได้สูงที่สุด ส่วนปริมาณสังกะสีจะสะสมในบริเวณขั้วแคโทดมากกว่าบริเวณขั้วแอโนดในทุกความหนาแน่นเช่นเดียวกับผลการทดลองอื่นที่มีการให้กระแสไฟฟ้าดังที่ได้กล่าวไปในข้างต้น และปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ จะสะสมน้อยที่สุดเมื่อมีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถางอีกด้วย

ดังนั้นการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน ร่วมกับการปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่จะใช้หญ้ารูซี่ในการบำบัดดินปนเปื้อนสังกะสี 371.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้เลือกต้นกล้าหญ้ารูซี่ที่มีอายุ 15 วัน มาเป็นพืชในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการใช้กระแสไฟฟ้า สำหรับงานวิจัยในอนาคตหากมีการเพิ่มอายุของต้นกล้าของหญ้ารูซี่ที่นำมาใช้ในงานวิจัย การเพิ่มระยะเวลาในการบำบัด หรือการใช้พืชชนิดอื่น อาจทำให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืชร่วมกับจลนศาสตร์ไฟฟ้าที่ครอบคลุมมากขึ้น

รายการอ้างอิง

Aboughalma, H., Bi, R., and Schlaak, M. 2008. Electrokinetic enhancement on phytoremediation in Zn, Pb, Cu and Cd contaminated soil using potato plants. *Journal of Environmental Science and Health Part a-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering.* 43(8): 926-933.

Aggarwal, H., and Goyal, D. 2007. Phytoremediation of some heavy metals by agronomic crops. *Developments in environmental science.* 5: 79-98.

Ali, H., Khan, E., and Sajad, M. A. 2013. Phytoremediation of heavy metals--concepts and applications. *Chemosphere.* 91(7): 869-881.

Banuelos, G. S., Ajwa, H. A., Mackey, B., Wu, L., Cook, C., Akohoue, S., and Zambruzuski, S. 1997. Evaluation of different plant species used for phytoremediation of high soil selenium. *Journal of Environmental Quality.* 26(3): 639-646.

Bi, R., Schlaak, M., Siefert, E., Lord, R., and Connolly, H. 2011. Influence of electrical fields (AC and DC) on phytoremediation of metal polluted soils with rapeseed (Brassica napus) and tobacco (Nicotianatabacum). *Chemosphere.* 83*:* 318-326.

Bi, R., Schlaak, M., Siefert, E., Lord, R., and Connolly, H. 2010. Alternating current electrical field effects on lettuce (Lactuca sativa) growing in hydroponic culture with and without cadmium contamination. *Journal of applied electrochemistry.* 40(6): 1217-1223.

Bremner, J. 1996. Nitrogen-total. *Methods of soil analysis. Part* 3. Chemical Method-SSSA Book series no. 5. Chapter 37. 1085-1121.

Broadly, M. R., White, P. J., Hammond, J. P, Zelko, I., and Lux, A. Zinc in plant. New Phytologist 2011; 173: 677-702.

Cameselle, C., Belhadj, B., Akretche, D. E., and Gouveia, S. 2013. Advances in electrokinetic remediation for the removal of organic contaminants in soils. *Organic Pollutions-Monitoring*, Risk and treatment.

Cameselle, C., Chirakkara, A. R., and Reddy, R. R. 2013. Electrokinetic-enhanced phytoremediation of soil: Status and opportunities. Chemosphere. 93: 626-636.

Cang, L., Wang, Q. Y., Zhou, D. M., and Xu, H. 2011. Effects of electrokinetic-assisted phytoremediation of a multiple-metal contaminated soil on soil metal bioavailability and uptake by Indian mustard. Separation and Purification Technology. 79: 246-253.

Cang, L., Zhou, D. M., Wang, Q. Y., and Fan, G. P. 2012. Impact of electrokinetic-assisted phytoremediation of heavy metal contaminated soil on its physicochemical properties, enzymatic and microbial activities. *Electrochimica Acta.* 86: 41-48.

Chapman, H. D. 1965. *Cation-exchange capacity. C.A. Black (Ed.). Methods in soil analysis*. Wisconson: American Society of Agronomy.

Chirakkara, R. A., Reddy, K. R., and Cameselle, C. 2015. Electrokinetic Amendment in Phytoremediation of Mixed Contaminated Soil. *Electrochimica Acta*. 1-13.

Denvir, A., Hodko, D., Van Hyfte, J., and Magnuson, J. W. 2000. *U.S. Patent No.* 6. Washington, D.C: U.S. Patent and Treatmark Office.

Dushenkov, V., Kumar, P. N., Motto, H., and Raskin, I. 1995. Rhizofiltration: the use of plants to remove heavy metals from aqueous streams. *Environmental Science & Technology*. 29(5): 1239-1245.

EPA, U. (2000). Introduction to Phytoremediation, in: EPA/600/R-99/107. Cincinnati. OH. USA.

Favas, P. J. C., Pratas, J., Varun, M., D'Souza, R., and Paul, M. S. 2014. Phytoremediation of soils contaminated with metals and metalloids at mining areas: potential of native flora. *Environmental Risk Assessment of soil Contamination.* 485-517.

Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D. W., . . . Myhre, G. (2007). Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. Chapter 2 *Climate Change* 2007. *The Physical Science Basis*.

Hazrat, A., Ezzat, K., and Muhammad, A. S. 2013. Phytoremediation of heavy metals-Concepta and applications. *Chemosphere.* 91: 869-881.

International Zinc Association. 2011. Zinc Basics. [online]. Available from: http://www.zinc .org /basics. [16 October 2014].

Jones, C., and Jacobsen, J. 2005. Plant nutrition and soil fertility. *Nutrient management module.* 2: 11.

Lamstrom, S. 1994. *Electricity in agriculture and horticulture*: The Electrician Printing&Publishing Company, Limited.

Land Classification and FAO Project Staff. 1973. *Soil Interpretation Handbook of Thailand*. Bangkok, Thailand: Department of Land Development, Ministry of Agriculture and Cooperatives.

Landon, J. R. 1996. *Booker Tropical Soil Manual Longman*. London, UK.

Lee, M., and Yang, M. 2010. Rhizofiltration using sunflower (Helianthus annuus L.) and bean (Phaseolus vulgaris L. var. vulgaris) to remediate uranium contaminated groundwater. *Journal of hazardous materials.* 173(1): 589-596.

Lim, J. M., Salido, A. L., and Butcher, D. J. 2004. Phytoremediation of lead using Indian mustard (Brassica juncea) with EDTA and electrodics. *Microchemical Journal.* 76(1): 3-9.

Meagher, R. B. 2000. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants. *Current opinion in plant biology.* 3(2): 153-162.

Mehlich, A. 1978. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc 1. *Communications in Soil Science & Plant Analysis.* 9(6): 477-492.

Mendez, M. O., and Maier, R. M. 2008. Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments-an emerging remediation technology. *Environmental Health Perspectives.* 116(3): 278.

Mukhopadhyay, S., and Maiti, S. 2010. Phytoremediation of metal enriched mine waste: a review. *Global Journal of Environmental Research.* 4(3): 135-150.

Padmavathiamma, P. K., and Li, L. Y. 2007. Phytoremediation technology: hyper-accumulation metals in plants. *Water, Air, and Soil Pollution.* 184*:* 105-126.

Putra, R. S., Ohkawa, Y., and Tanaka, S. 2013. Application of EAPR system on the removal of lead from sandy soil and uptake by Kentucky bluegrass (Poa pratensis L.). *Separation and Purification Technology.* 102: 34-42.

Reddy, K. R., and Cameselle, C. 2009. Electrochemical remediation technologies for polluted soil, sediments and groundwater. Wiley, New York. USA.

Taiz, L and Zeigler, E. 2006. Plant physiology. 4thed. Sinauer Associates. Sunderland, Massachusetts.

Tan, K. H. 2005. *Soil sampling, preparation, and analysis*. 2nd ed. New York: Taylor & Francis Group.

Tan, K. H. 2009. *Environmental Soil Sciece*. 3rd ed. New York: Taylor&Francis Group.

USEPA, E. 1995. Method 3052: Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices. *Test Methods for Evaluating Solid Waste*.

Vishnoi, S. R., and Srivastava, P. 2007. *Phytoremediation-green for environmental clean.* Paper presented at the Proceedings of Taal: the 12th World lake conference.

Walkley, A., and Black, I. A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science.* 37(1): 29-38.

Zhou, D.-M., Chen, H.-F., Cang, L., and Wang, Y. J. 2007. Ryegrass uptake of soil Cu/Zn induced by EDTA/EDDS together with a vertical direct-current electrical field. *Chemospher.* 67(8): 1671-1676.

กรมควบคุมมลพิษ. 2557. เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ (MSDS). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://msd.pcd.go.th/searchName.asp?vID=222. [14 ตุลาคม 2557].

กรมปศุสัตว์. 2554. หญ้ารูซี่. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2553. คู่มือการปฏิบัติงานกระบวนการวิเคราะห์ตรวจสอบดินทางเคมี. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.ldd.go.th/PMQA/2553/Manual/OSD-03.pdf. [22 กันยายน 2558].

กรมพัฒนาที่ดิน. 2515. ชุดแผนที่สำรวจดินระดับจังหวัด. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2548. กลุ่มชุดดินในพื้นที่ลุ่ม กลุ่มชุดดินที่ 4. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://oss101.ldd.go.th/thaisoils_museum/62_soilgroup/sgr_lowland/sgr_04.htm. [27 กันยายน 2558]

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. 2549. กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่กำหนดมาตรฐานมลพิษและการจัดการสิ่งแวดล้อมสำหรับอุตสาหกรรมเหมืองแร่และโลหกรรม ชนิดแร่สังกะสี. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.dpim.go.th/pr/article?catid=102&articleid=50. [10 ตุลาคม 2557].

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. 2556. ข้อมูลการใช้แร่ของประเทศ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www7.dpim.go.th/stat/consumption.php. [5 กันยายน 2557].

กัณฑรีย์ ศรีพงศ์พันธุ์. 2549. มลพิษทางน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 4. นครปฐม: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร.

กิตติพันธุ์ บางยี่ขัน. 2551. โลหะกับการพัฒนาประเทศ. กรุงเทพมหานคร: กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. .

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ณัฐกาญจน์ ตันติธีรศักดิ์. 2553. ผลของอีดีทีเอต่อการดูดดึงแคดเมียมและสังกะสีของอ้อยที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, บัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย., กรุงเทพฯ.

นัยนันทน์ อริยกานนท์. 2558. การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมด้วยพืช. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ประยงค์ ศรีไพรสนท์. 2548. การบำบัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินโดยใช้พืช. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยนเรศวร.พิษณุโลก.

ผาแดงอินดัสทรี. 2557. สังกะสีคืออะไร. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.zincinfothailand.com/index.php?lay=show&ac=article&Ntype=3. [14 ตุลาคม 2557].

ยงยุทธ โอสถสภา. 2546. ธาตุอาหารพืช. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิไลภรณ์ บุญญกิจจินดา. 2556. สรีรวิทยาของพืช. นครปฐม: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร.

สายัณห์ ทัดศรี. 2547. พืชอาหารสัตว์เขตร้อน กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุธรรม แย้มนิยม และงามพิศ แย้มนิยม. 2519. ตะกั่ว-สังกะสี. กรุงเทพมหานคร: กองเศรษฐกธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี.

สุรกาญจน์ ไพชำนาญ, ยุพดีชัย สุขสันต์, วรรณชไม การถนัด และบุญส่ง ไกรศรพรสรร. 2554. พิษเฉียบพลันของสังกะสีออกไซด์ต่อปลานิลแดง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 19, (มกราคม-มีนาคม 2554): 19-26.

อลิสา วังใน. 2552. การบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพ. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อัจฉราพร ขำโสภา. 2552. เทคโนโลยีการฟื้นฟูชีวภาพ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://etm.sc.mahidol.ac.th/ac.th/a.shtml. [16 ตุลาคม 2557].

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก.

ตารางแปลผลคุณสมบัติทางเคมีของดิน

ตารางที่ ก - 1 การแปลผลค่าพีเอชของดินในน้ำ

ระดับ	ช่วงพีเอช (pH) ในน้ำ
กรดจัดมาก	< 4.5
กรดจัด	4.6 – 5.5
กรดปานกลาง	5.6 – 6.5
เป็นกลาง	6.6 – 7.3
ด่างอ่อน	7.4 – 7.8
ด่างปานกลาง	7.9 – 8.4
ด่างจัด	8.5 – 9.0
ด่างจัดมาก	> 9

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน (2553)

ตารางที่ ก - 2 การแปลผลปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินโดยวิธี Walkley and Black

ระดับอินทรีย์คาร์บอน	อินทรีย์คาร์บอน (เปอร์เซ็นต์)
ต่ำมาก	< 2
ต่ำ	2 - 4
ปานกลาง	4 – 10
สูง	10 – 20
สูงมาก	> 20

ที่มา: Landon (1996)

ตารางที่ ก – 3 การแปลผลปริมาณอินทรียวัตถุในดินเพื่อประเมินความอุดมสมบูรณ์และการจำแนกดิน

ระดับอินทรียวัตถุ	อินทรียวัตถุ (กรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน)	อินทรียวัตถุ (เปอร์เซ็นต์)
ต่ำมาก	< 5	< 0.5
ต่ำ	5 – 10	0.5 – 1.0
ค่อนข้างต่ำ	10 – 15	1.0 – 1.5
ปานกลาง	15 – 25	1.5 – 2.5
ค่อนข้างสูง	25 – 35	2.5 – 3.5
สูง	35 – 45	3.5 – 4.5
สูงมาก	> 45	> 4.5

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน (2515) และ Land Classification and FAO Project Staff (1973)

ตารางที่ ก – 4 การแปลผลระดับปริมาณความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน

ระดับ	ค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน (เซนติโมลต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน)
ต่ำมาก	< 5
ต่ำ	5 – 15
ปานกลาง	15 – 25
สูง	25 – 40
สูงมาก	> 40

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน (2553)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก – 5 การแปลผลระดับฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช

ระดับ	ปริมาณฟอสฟอรัสในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน)
ต่ำมาก	< 6
ต่ำ	6 – 12
ปานกลาง	13 – 25
สูง	26 – 50
สูงมาก	> 50

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน (2553)

ตารางที่ ก – 6 การแปลผลระดับโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืช

ระดับ	ปริมาณโพแทสเซียมในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน)
ต่ำมาก	< 16
ต่ำ	16 – 30
ปานกลาง	31 – 60
สูง	61 – 120
สูงมาก	> 120

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน (2553)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข.

การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลองทางสถิติ

ข.1 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลองทางสถิติของการหาปริมาณสังกะสีในดินที่เหมาะสมที่หญ้ารูซี่สามารถบำบัดได้

ข.1.1 อัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ (**ตารางที่ 9**)

ขั้นที่ 1 การตรวจสอบเงื่อนไข

1. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ตัวแปรตามของแต่ละกลุ่มย่อยมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: อัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ มีการแจกแจงแบบปกติ

H_1: อัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ ไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Shapiro - Wilk

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ ข – 1 การทดสอบการแจกแจงแบบปกติของอัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ

	Kolmogorov - Smirnov[a]			Shapiro - Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
อัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่	0.193	12	0.200*	0.934	12	0.421

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

เนื่องจากกำหนดระดับความเชื่อมั่นไว้ 95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Sig. ของ Shapiro – Wilk = 0.421 ซึ่งมากกว่า 0.05 (**ตารางที่ ข – 1**) จึงยอมรับ H_0 และสรุปได้ว่า อัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ มีการแจกแจงแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ค่าแปรปรวนของตัวแปรตามของทุกกลุ่มแตกต่างกันหรือไม่สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\sigma_a^2 = \sigma_b^2 = \sigma_c^2 = \sigma_d^2$

H_1: $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Levene Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ σ_i^2 แทน อัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินแปรปรวนของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการเติมสังกะสี เติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน เติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน และเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน

a แทน ชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมสังกะสี

b แทน ชุดการทดลองที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน

c แทน ชุดการทดลองที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน

d แทน ชุดการทดลองที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน

ตารางที่ ข – 2 การทดสอบความเท่ากันของค่าการแปรปรวนของอัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
0.000	3	8	1.000

จาก**ตารางที่ ข – 2** ได้ค่า Levene = 0.000 และ Sig. = 1.000 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นในขั้นที่ 2 จะใช้สถิติทดสอบ F

ขั้นที่ 2 การหาสาเหตุหรือการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\mu_a = \mu_b = \mu_c = \mu_d$

H_1: $\mu_i = \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$; i, j =

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ F Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ μ_i แทน ค่าเฉลี่ยของอัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการเติมสังกะสี เติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน เติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน และเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน

ตารางที่ ข – 3 การทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของอัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	12.250	3	4.083	12.250	0.002
Within Groups	2.667	8	0.333		
Total	14.917	11			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จาก**ตารางที่ ข – 3** ได้ค่า F = 12.250 และ Sig. = 0.002 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 สรุปได้ว่าอัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ มีอย่างน้อยหนึ่งคู่ที่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อนต่อในขั้นที่ 3

ขั้นที่ 3 การเปรียบเทียบเชิงซ้อน

ตารางที่ ข – 4 การทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนของอัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ

						95% Confidence Interval	
	(I) Conc.	(J) Conc.	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	SRC0	SRC300	10.00000	4.71405	0.225	-5.0960	25.0960
		SRC400	16.66667*	4.71405	0.031	1.5706	31.7627
		SRC500	30.00000*	4.71405	0.001	14.9040	45.0960
	SRC300	SRC0	-10.00000	4.71405	0.225	-25.0960	5.0960
		SRC400	6.66667	4.71405	0.025	-8.4294	21.7627
		SRC500	20.00000*	4.71405	0.012	4.9040	35.0960
	SRC400	SRC0	-16.66667*	4.71405	0.031	-31.7627	-1.5706
		SRC300	-6.66667	4.71405	0.025	-21.7627	8.4294
		SRC500	13.33333	4.71405	0.035	-1.7627	28.4294
	SRC500	SRC0	-30.00000*	4.71405	0.001	-45.0960	-14.9040
		SRC300	-20.00000*	4.71405	0.012	-35.0960	-4.9040
		SRC400	-13.33333	4.71405	0.035	-28.4294	1.7627

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

โดยที่ SRC0, SRC300, SRC400 และ SRC500 แทน อัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินในชุดการทดลองที่แตกต่างกัน คือ ชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมสังกะสี ชุดการทดลองที่เติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ชุดการทดลองที่เติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน และชุดการทดลองที่เติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ตามลำดับ

สมมติฐานของการทดสอบ มี 6 คู่ โดยจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 1 H_0: $\mu_{SRC0} = \mu_{SRC300}$

H_1: $\mu_{SRC0} \neq \mu_{SRC300}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 1 **ตารางที่ ข – 4** ได้ค่า Sig. = 0.225 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นอัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินในชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมสังกะสีและชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 2 H_0: $\mu_{SRC0} = \mu_{SRC400}$

H_1: $\mu_{SRC0} \neq \mu_{SRC400}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 2 **ตารางที่ ข – 4** ได้ค่า Sig. = 0.031 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นอัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินในชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมสังกะสีและชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 3 H_0: $\mu_{SRC0} = \mu_{SRC500}$

H_1: $\mu_{SRC0} \neq \mu_{SRC500}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 3 **ตารางที่ ข – 4** ได้ค่า Sig. = 0.001 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นอัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินในชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมสังกะสีและชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 4 H_0: $\mu_{SRC300} = \mu_{SRC400}$

H_1: $\mu_{SRC300} \neq \mu_{SRC400}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 5 **ตารางที่ ข – 4** ได้ค่า Sig. = 0.025 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นอัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินในชุดการทดลองที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน และชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 5 H_0: $\mu_{SRC300} = \mu_{SRC500}$

H_1: $\mu_{SRC300} \neq \mu_{SRC500}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 6 **ตารางที่ ข – 4** ได้ค่า Sig. = 0.012 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นอัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินในชุดการทดลองที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน และชุดที่มีการเติมสังกะสีที่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 6 H_0: $\mu_{SRC400} = \mu_{SRC500}$

H_1: $\mu_{SRC400} \neq \mu_{SRC500}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 9 **ตารางที่ ข – 4** ได้ค่า Sig. = 0.035 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นอัตราการรอดชีวิตของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินในชุดการทดลองที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน และชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ข.1.2 มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ (**ตารางที่ 10**)

ขั้นที่ 1 การตรวจสอบเงื่อนไข

1. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ตัวแปรตามของแต่ละกลุ่มย่อยมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ มีการแจกแจงแบบปกติ

H_1: มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ ไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Shapiro - Wilk

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ ข – 5 การทดสอบการแจกแจงแบบปกติของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ

	Kolmogorov - Smirnov[a]			Shapiro - Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนราก	0.120	24	0.200*	0.961	24	0.454

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

เนื่องจากกำหนดระดับความเชื่อมั่นไว้ 95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Sig. ของ Shapiro – Wilk = 0.454 ซึ่งมากกว่า 0.05 (**ตารางที่ ข – 5**) จึงยอมรับ H_0 และสรุปได้ว่า มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ มีการแจกแจงแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ค่าแปรปรวนของตัวแปรตามของทุกกลุ่มแตกต่างกันหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\sigma_a^2 = \sigma_b^2 = \sigma_c^2 = \sigma_d^2$

H_1: $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; i ≠ j

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Levene Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ σ_i^2 แทน มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกในดินแปรปรวนของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการเติมสังกะสี เติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน เติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน และเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน

a แทน ชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมสังกะสี

b แทน ชุดการทดลองที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน

c แทน ชุดการทดลองที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน

d แทน ชุดการทดลองที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน

ตารางที่ ข – 6 การทดสอบความเท่ากันของค่าการแปรปรวนของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
2.046	7	16	0.112

จาก**ตารางที่ ข – 6** ได้ค่า Levene = 2.046 และ Sig. = 0.112 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นในขั้นที่ 2 จะใช้สถิติทดสอบ F

ขั้นที่ 2 การหาสาเหตุหรือการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\mu_a = \mu_b = \mu_c = \mu_d$

H_1: $\mu_i = \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่; i ≠ j ; i, j =

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ F Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ μ_i แทน ค่าเฉลี่ยของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกในดินของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการเติมสังกะสี เติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน เติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน และเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน

ตารางที่ ข – 7 การทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	0.000	7	0.000	1.494	0.238
Within Groups	0.001	16	0.000		
Total	0.001	23			

จาก**ตารางที่ ข – 7** ได้ค่า F = 1.494 และ Sig. = 0.238 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 และไม่ต้องทำขั้นที่ 3 โดยสรุปได้ว่ามวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ ไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ข.1.3 ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ (**ตารางที่ 10**)

ขั้นที่ 1 การตรวจสอบเงื่อนไข

1. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ตัวแปรตามของแต่ละกลุ่มย่อยมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ มีการแจกแจงแบบปกติ

H_1: ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ ไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Shapiro - Wilk

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข – 8 การทดสอบการแจกแจงของผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ

	Kolmogorov - Smirnov[a]			Shapiro – Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่	0.102	12	0.200*	0.983	12	0.994

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

เนื่องจากกำหนดระดับความเชื่อมั่นไว้ 95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Sig. ของ Shapiro – Wilk = 0.994 ซึ่งมากกว่า 0.05 (**ตารางที่ ข – 8**) จึงยอมรับ H_0 และสรุปได้ว่า ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ มีการแจกแจงแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ค่าแปรปรวนของตัวแปรตามของทุกกลุ่มแตกต่างกันหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\sigma_a^2 = \sigma_b^2 = \sigma_c^2 = \sigma_d^2$

H_1: $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Levene Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ σ_i^2 แทน ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่แปรปรวนของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการเติมสังกะสี เติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน เติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน และเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน

a แทน ชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมสังกะสี

b แทน ชุดการทดลองที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน

c แทน ชุดการทดลองที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน

d แทน ชุดการทดลองที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน

ตารางที่ ข – 9 การทดสอบความเท่ากันของค่าการแปรปรวนของผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
0.287	3	8	0.834

จาก**ตารางที่ ข – 9** ได้ค่า Levene = 0.287 และ Sig. = 0.834 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นในขั้นที่ 2 จะใช้สถิติทดสอบ F

ขั้นที่ 2 การหาสาเหตุหรือการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\mu_a = \mu_b = \mu_c = \mu_d$

H_1: $\mu_i = \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$; $i, j =$

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ F Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ μ_i แทน ค่าเฉลี่ยของผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการเติมสังกะสี เติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน เติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน เติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน

ตารางที่ ข – 10 การทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	0.028	3	0.009	12.830	0.002
Within Groups	0.006	8	0.001		
Total	0.033	11			

จาก**ตารางที่ ข – 10** ได้ค่า F = 12.830 และ Sig. = 0.002 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 สรุปได้ว่าการปลูกหญ้ารูซี่ในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างกันจะส่งผลต่อผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 อย่างน้อย 1 คู่ จึงต้องทำขั้นที่ 3 ต่อไป

ขั้นที่ 3 การเปรียบเทียบเชิงซ้อน

ตารางที่ ข – 11 การทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนของผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ

						95%Confidence Interval	
	(I) Conc.	(J) Conc.	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	BC0	BC300	0.04803	0.02190	0.205	-0.0221	0.1182
		BC400	0.09357*	0.02190	0.012	0.0234	0.1637
		BC500	0.12763*	0.02190	0.002	0.0575	0.1978
	BC300	BC0	-0.04803	0.02190	0.205	-0.1182	0.0221
		BC400	0.04553	0.02190	0.038	-0.0246	0.1157
		BC500	0.07960*	0.02190	0.027	0.0095	0.1497
	BC400	BC0	-0.09357*	0.02190	0.012	-0.1637	-0.0234
		BC300	-0.04553	0.02190	0.038	-0.1157	0.0246
		BC500	0.03407	0.02190	0.039	-0.0361	0.1042
	BC500	BC0	-0.12763*	0.02190	0.002	-0.1978	-0.0575
		BC300	-0.07960*	0.02190	0.027	-0.1497	-0.0095
		BC400	-0.03407	0.02190	0.039	-0.1042	0.0361

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

โดยที่ BC0, BC300, BC400 และ BC500 แทน ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินในชุดการทดลองที่แตกต่างกัน คือ ชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมสังกะสี ชุดการทดลองที่เติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ชุดการทดลองที่เติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน และชุดการทดลองที่เติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ตามลำดับ

สมมติฐานของการทดสอบ มี 6 คู่ โดยจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 1 H_0: $\mu_{BC0} = \mu_{BC300}$

H_1: $\mu_{BC0} \neq \mu_{BC300}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 1 **ตารางที่ ข – 11** ได้ค่า Sig. = 0.205 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินในชุดที่ไม่มีการเติมสังกะสี และชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 2 H_0: $\mu_{BC0} = \mu_{BC400}$

H_1: $\mu_{BC0} \neq \mu_{BSC400}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 2 **ตารางที่ ข – 11** ได้ค่า Sig. = 0.012 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินในชุดที่ไม่มีการเติมสังกะสี และชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 3 H_0: $\mu_{BC0} = \mu_{BC500}$

H_1: $\mu_{BC0} \neq \mu_{BC500}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 3 **ตารางที่ ข – 11** ได้ค่า Sig. = 0.002 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินในชุดที่ไม่มีการเติมสังกะสี และชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 4 H_0: $\mu_{BC300} = \mu_{BC400}$

H_1: $\mu_{BC300} \neq \mu_{BC400}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 5 **ตารางที่ ข – 11** ได้ค่า Sig. = 0.038 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินในชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน และชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 5 H_0: $\mu_{BC300} = \mu_{BC500}$

H_1: $\mu_{BC300} \neq \mu_{BC500}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 6 **ตารางที่ ข – 11** ได้ค่า Sig. = 0.027 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินในชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน และชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 6 H_0: $\mu_{BC400} = \mu_{BC500}$

H_1: $\mu_{BC400} \neq \mu_{BC500}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 9 **ตารางที่ ข – 11** ได้ค่า Sig. = 0.039 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินในชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน และชุดที่มีการเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ข.2 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลองทางสถิติของการหาความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดด้วยหญ้ารูซี่

ข.2.1 มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ (**รูปที่ 9**)

ขั้นที่ 1 การตรวจสอบเงื่อนไข

1. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ตัวแปรตามของแต่ละกลุ่มย่อยมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ มีการแจกแจงแบบปกติ

H_1: มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Shapiro - Wilk

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ ข – 12 การทดสอบการแจกแจงแบบปกติของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ

	Kolmogorov - Smirnov[a]			Shapiro - Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
มวลชีวภาพในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่	0.128	24	0.200*	0.957	24	0.381

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

เนื่องจากกำหนดระดับความเชื่อมั่นไว้ 95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Sig. ของ Shapiro – Wilk = 0.381 ซึ่งมากกว่า 0.05 (**ตารางที่ ข – 12**) จึงยอมรับ H_0 และสรุปได้ว่ามวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ มีการแจกแจงแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ค่าแปรปรวนของตัวแปรตามของทุกกลุ่มแตกต่างกันหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\sigma_a^2 = \sigma_b^2 = \sigma_c^2 = \sigma_d^2$

H_1: $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; i ≠ j

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Levene Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ σ_i^2 แทน มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากเมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและติดตั้งกระแสไฟฟ้าแปรปรวนของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร

a แทน ชุดการทดลองที่ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า

b แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร

c แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร

d แทน ชุดการทดลองที่มีการการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร

ตารางที่ ข – 13 การทดสอบความเท่ากันของค่าการแปรปรวนของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
2.039	7	16	0.113

จาก**ตารางที่ ข – 13** ได้ค่า Levene = 2.039 และ Sig. = 0.113 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นในขั้นที่ 2 จะใช้สถิติทดสอบ F

ขั้นที่ 2 การหาสาเหตุหรือการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\mu_a = \mu_b = \mu_c = \mu_d$

H_1: $\mu_i = \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$; i, j =

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ F Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ μ_i แทน ค่าเฉลี่ยของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากเมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและติดตั้งกระแสไฟฟ้าของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร

ตารางที่ ข – 14 การทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	0.001	7	0.000	1.487	0.241
Within Groups	0.001	16	0.000		
Total	0.200	23			

จาก**ตารางที่ ข – 14** ได้ค่า F = 1.487 และ Sig. = 0.241 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 จึงไม่ต้องทำขั้นที่ 3 สรุปได้ว่าการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีโดยหญ้ารูซี่ร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างกันจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ข.2.2 ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ (**รูปที่ 10**)

ขั้นที่ 1 การตรวจสอบเงื่อนไข

1. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ตัวแปรตามของแต่ละกลุ่มย่อยมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ มีการแจกแจงแบบปกติ

H_1: ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Shapiro - Wilk

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข – 15 การทดสอบการแจกแจงแบบปกติของผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ

	Kolmogorov - Smirnov[a]			Shapiro - Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่	0.119	12	0.200*	0.982	12	0.991

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

เนื่องจากกำหนดระดับความเชื่อมั่นไว้ 95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Sig. ของ Shapiro – Wilk = 0.991 ซึ่งมากกว่า 0.05 (**ตารางที่ ข – 15**) จึงยอมรับ H_0 และสรุปได้ว่าผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ มีการแจกแจงแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ค่าแปรปรวนของตัวแปรตามของทุกกลุ่มแตกต่างกันหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\sigma_a^2 = \sigma_b^2 = \sigma_c^2 = \sigma_d^2$

H_1: $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Levene Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ σ_i^2 แทน ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าแปรปรวนของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร

a แทน ชุดการทดลองที่ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า

b แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร

c แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร

d แทน ชุดการทดลองที่มีการการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร

ตารางที่ ข – 16 การทดสอบความเท่ากันของค่าการแปรปรวนของผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.823	3	8	0.221

จาก**ตารางที่ ข – 16** ได้ค่า Levene = 1.823 และ Sig. = 0.221 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นในขั้นที่ 2 จะใช้สถิติทดสอบ F

ขั้นที่ 2 การหาสาเหตุหรือการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\mu_a = \mu_b = \mu_c = \mu_d$

H_1: $\mu_i = \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$; i, j =

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ F Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ μ_i แทน ค่าเฉลี่ยของผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร

ตารางที่ ข – 17 การทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	0.000	3	0.000	1.902	0.208
Within Groups	0.001	8	0.000		
Total	0.001	11			

จาก**ตารางที่ ข – 17** ได้ค่า F = 1.902 และ Sig. = 0.208 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 จึงไม่ต้องทำขั้นที่ 3 สรุปได้ว่าการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีโดยหญ้ารูซี่ร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างกันจะไม่ส่งผลต่อความแตกต่างของผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ข.2.3 ปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ (**ตารางที่ 11)**

ขั้นที่ 1 การตรวจสอบเงื่อนไข

1. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ตัวแปรตามของแต่ละกลุ่มย่อยมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: ปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ มีการแจกแจงแบบปกติ

H_1: ปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Shapiro - Wilk

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ ข – 18 การทดสอบการแจกแจงแบบปกติของปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ

	Kolmogorov - Smirnov[a]			Shapiro - Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่	0.144	24	0.200*	0.940	24	0.164

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

เนื่องจากกำหนดระดับความเชื่อมั่นไว้ 95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Sig. ของ Shapiro – Wilk = 0.164 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 (**ตารางที่ ข – 18**) จึงยอมรับ H_0 และสรุปได้ว่าปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ มีการแจกแจงแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ค่าแปรปรวนของตัวแปรตามของทุกกลุ่มแตกต่างกันหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\sigma_a^2 = \sigma_b^2 = \sigma_c^2 = \sigma_d^2$

H_1: $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; i ≠ j

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Levene Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ σ_i^2 แทน ปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าแปรปรวนของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร

a แทน ชุดการทดลองที่ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า

b แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร

c แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร

d แทน ชุดการทดลองที่มีการการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข – 19 การทดสอบความเท่ากันของค่าการแปรปรวนของปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.435	7	16	0.259

จาก**ตารางที่ ข – 19** ได้ค่า Levene = 1.435 และ Sig. = 0.259 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นในขั้นที่ 2 จะใช้สถิติทดสอบ F

<u>ขั้นที่ 2</u> การหาสาเหตุหรือการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\mu_a = \mu_b = \mu_c = \mu_d$

H_1: $\mu_i = \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$; i, j =

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ F Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ μ_i แทน ค่าเฉลี่ยของปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร

ตารางที่ ข – 20 การทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1458614.949	7	208373.564	2.622	0.052
Within Groups	1271608.246	16	79475.515		
Total	2730223.196	23			

จาก**ตารางที่ ข – 20** ได้ค่า F = 2.622 และ Sig. = 0.052 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 จึงไม่ต้องทำขั้นที่ 3 สรุปได้ว่าการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีโดยหญ้ารูซี่ร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างกันจะไม่ส่งผลต่อความแตกต่างของปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ข.2.4 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ (**ตารางที่ 11**)

ขั้นที่ 1 การตรวจสอบเงื่อนไข

1. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ตัวแปรตามของแต่ละกลุ่มย่อยมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ มีการแจกแจงแบบปกติ

H_1: ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Shapiro - Wilk

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ ข – 21 การทดสอบการแจกแจงของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ

	Kolmogorov - Smirnov[a]			Shapiro - Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่	0.214	12	0.136	0.935	12	0.435

a. Lilliefors Significance Correction

เนื่องจากกำหนดระดับความเชื่อมั่นไว้ 95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Sig. ของ Shapiro – Wilk = 0.435 ซึ่งมากกว่า 0.05 (**ตารางที่ ข – 21**) จึงยอมรับ H_0 และสรุปได้ว่าปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ มีการแจกแจงแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ค่าแปรปรวนของตัวแปรตามของทุกกลุ่มแตกต่างกันหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\sigma_a^2 = \sigma_b^2 = \sigma_c^2 = \sigma_d^2$

H_1: $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Levene Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ σ_i^2 แทน ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าแปรปรวนของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร

a แทน ชุดการทดลองที่ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า

b แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร

c แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร

d แทน ชุดการทดลองที่มีการการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร

ตารางที่ ข – 22 การทดสอบความเท่ากันของค่าการแปรปรวนของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.354	3	8	0.328

จาก**ตารางที่ ข – 22** ได้ค่า Levene = 1.354 และ Sig. = 0.328 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นในขั้นที่ 2 จะใช้สถิติทดสอบ F

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>ขั้นที่ 2</u> การหาสาเหตุหรือการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\mu_a = \mu_b = \mu_c = \mu_d$

H_1: $\mu_i = \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$; $i, j =$

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ F Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ μ_i แทน ค่าเฉลี่ยของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้า ของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร

ตารางที่ ข – 23 การทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	709039.515	3	236346.505	0.591	0.638
Within Groups	3197393.100	8	399674.138		
Total	3906432.615	11			

จาก**ตารางที่ ข – 23** ได้ค่า F = 0.591 และ Sig. = 0.638 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 จึงไม่ต้องทำขั้นที่ 3 สรุปได้ว่าการปลูกหญ้ารูซี่ในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ที่ต่างกันจะไม่ส่งผลต่อความแตกต่างของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ข.2.5 ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ (**รูปที่ 11**)

ขั้นที่ 1 การตรวจสอบเงื่อนไข

1. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ตัวแปรตามของแต่ละกลุ่มย่อยมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ มีการแจกแจงแบบปกติ

H_1: ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ ไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Shapiro - Wilk

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ ข – 24 การทดสอบการแจกแจงของปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่

	Kolmogorov - Smirnov[a]			Shapiro - Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนด	0.091	24	0.200*	0.959	24	0.424

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

เนื่องจากกำหนดระดับความเชื่อมั่นไว้ 95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Sig. ของ Shapiro – Wilk = 0.424 ซึ่งมากกว่า 0.05 (**ตารางที่ ข – 24**) จึงยอมรับ H_0 และสรุปได้ว่า ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ มีการแจกแจงแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ค่าแปรปรวนของตัวแปรตามของทุกกลุ่มแตกต่างกันหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\sigma_a^2 = \sigma_b^2 = \sigma_c^2 = \sigma_d^2$

H_1: $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Levene Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ σ_i^2 แทน ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์แปรปรวนของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร

a แทน ชุดการทดลองที่ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า

b แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร

c แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร

d แทน ชุดการทดลองที่มีการการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร

ตารางที่ ข – 25 การทดสอบความเท่ากันของค่าการแปรปรวนของปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
4.548	7	16	0.006

จาก**ตารางที่ ข – 25** ได้ค่า Levene = 4.548 และ Sig. = 0.006 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นในขั้นที่ 2 จะใช้สถิติทดสอบ Welch

<u>ขั้นที่ 2</u> การหาสาเหตุหรือการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\mu_a = \mu_b = \mu_c = \mu_d$

H_1: $\mu_i = \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$; $i, j =$

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Welch

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ μ_i แทน ค่าเฉลี่ยของปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร

ตารางที่ ข – 26 การทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่

	Statistic[a]	df1	df2	Sig.
Welch	24.527	7	6.671	0.000

a. Asymptotically F distributed

จาก**ตารางที่ ข – 26** ได้ค่า Welch = 24.527 และ Sig. = 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 สรุปได้การบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีโดยหญ้ารูซี่ร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ที่ต่างกันจะส่งผลต่อปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังจากการบำบัดที่ต่างกันอย่างน้อยหนึ่งคู่ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อนต่อในขั้นที่ 3

ขั้นที่ 3 การเปรียบเทียบเชิงซ้อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข – 27 การทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนของปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่

						95% Confidence Interval	
	(I) Voltage	(J) Voltage	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	CV0	AV0	17.56900	15.38313	0.937	-35.6897	70.8277
		CV1	-10.36157	15.38313	0.997	-63.6203	42.8971
		AV1	32.48057	15.38313	0.448	-20.7781	85.7393
		CV2	54.88663*	15.38313	0.041	1.6279	108.1453
		AV2	65.95183*	15.38313	0.010	12.6931	119.2105
		CV4	-43.03110	15.38313	0.164	-96.2898	10.2276
		AV4	-8.38237	15.38313	0.999	-61.6411	44.8763
	AV0	CV0	-17.56900	15.38313	0.937	-70.8277	35.6897
		CV1	-27.93057	15.38313	0.619	-81.1893	25.3281
		AV1	14.91157	15.38313	0.973	-38.3471	68.1703
		CV2	37.31763	15.38313	0.293	-15.9411	90.5763
		AV2	48.38283	15.38313	0.089	-4.8759	101.6415
		CV4	-60.60010*	15.38313	0.020	-113.8588	-7.3414
		AV4	-25.95137	15.38313	0.695	-79.2101	27.3073
	CV1	CV0	10.36157	15.38313	0.997	-42.8971	63.6203
		AV0	27.93057	15.38313	0.619	-25.3281	81.1893
		AV1	42.84213	15.38313	0.167	-10.4166	96.1008
		CV2	65.24820*	15.38313	0.011	11.9895	118.5069
		AV2	76.31340*	15.38313	0.003	23.0547	129.5721
		CV4	-32.66953	15.38313	0.441	-85.9282	20.5892
		AV4	1.97920	15.38313	1.000	-51.2795	55.2379

ตารางที่ ข – 27 การทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนของปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ (ต่อ)

						95% Confidence Interval	
	(I) Voltage	(J) Voltage	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	AV1	CV0	-32.48057	15.38313	0.448	-85.7393	20.7781
		AV0	-14.91157	15.38313	0.973	-68.1703	38.3471
		CV1	-42.84213	15.38313	0.167	-96.1008	10.4166
		CV2	22.40607	15.38313	0.818	-30.8526	75.6648
		AV2	33.47127	15.38313	0.413	-19.7874	86.7300
		CV4	-75.51167*	15.38313	0.003	-128.7704	-22.2530
		AV4	-40.86293	15.38313	0.206	-94.1216	12.3958
	CV2	CV0	-54.88663*	15.38313	0.041	-108.1453	-1.6279
		AV0	-37.31763	15.38313	0.293	-90.5763	15.9411
		CV1	-65.24820*	15.38313	0.011	-118.5069	-11.9895
		AV1	-22.40607	15.38313	0.818	-75.6648	30.8526
		AV2	11.06520	15.38313	0.995	-42.1935	64.3239
		CV4	-97.91773*	15.38313	0.000	-151.1764	-44.6590
		AV4	-63.26900*	15.38313	0.014	-116.5277	-10.0103
	AV2	CV0	-65.95183*	15.38313	0.010	-119.2105	-12.6931
		AV0	-48.38283	15.38313	0.089	-101.6415	4.8759
		CV1	-76.31340*	15.38313	0.003	-129.5721	-23.0547
		AV1	-33.47127	15.38313	0.413	-86.7300	19.7874
		CV2	-11.06520	15.38313	0.995	-64.3239	42.1935
		CV4	-108.98293*	15.38313	0.000	-162.2416	-55.7242
		AV4	-74.33420*	15.38313	0.004	-127.5929	-21.0755

ตารางที่ ข – 27 การทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนของปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ (ต่อ)

						95% Confidence Interval	
	(I) Voltage	(J) Voltage	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	CV4	CV0	43.03110	15.38313	0.164	-10.2276	96.2898
		AV0	60.60010*	15.38313	0.020	7.3414	113.8588
		CV1	32.66953	15.38313	0.441	-20.5892	85.9282
		AV1	75.51167*	15.38313	0.003	22.2530	128.7704
		CV2	97.91773*	15.38313	0.000	44.6590	151.1764
		AV2	108.98293*	15.38313	0.000	55.7242	162.2416
		AV4	34.64873	15.38313	0.374	-18.6100	87.9074
	AV4	CV0	8.38237	15.38313	0.999	-44.8763	61.6411
		AV0	25.95137	15.38313	0.695	-27.3073	79.2101
		CV1	-1.97920	15.38313	1.000	-55.2379	51.2795
		AV1	40.86293	15.38313	0.206	-12.3958	94.1216
		CV2	63.26900*	15.38313	0.014	10.0103	116.5277
		AV2	74.33420*	15.38313	0.004	21.0755	127.5929
		CV4	-34.64873	15.38313	0.374	-87.9074	18.6100

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

โดยที่ CV0, CV1, CV2 และ CV4 แทน ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่ไม่มีการติดตั้งกระแสไฟฟ้า (การบำบัดโดยพืช) และในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1, 2 และ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ และ AV0, AV1, AV2, AV3 และ AV4 แทน ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดในชุดที่ไม่มีการติดตั้งกระแสไฟฟ้า (การบำบัดโดยพืช) และในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1, 2 และ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ

สมมติฐานของการทดสอบ มี 12 คู่ และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 1 H_0: $\mu_{CV0} = \mu_{CV1}$

H_1: $\mu_{CV0} \neq \mu_{CV1}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 2 **ตารางที่ ข – 27** ได้ค่า Sig. = 0.997 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่ไม่มีการติดตั้งกระแสไฟฟ้าและปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 2 H_0: $\mu_{CV0} = \mu_{CV2}$

H_1: $\mu_{CV0} \neq \mu_{CV2}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 4 **ตารางที่ ข – 27** ได้ค่า Sig. = 0.041 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่ไม่มีการติดตั้งกระแสไฟฟ้าและปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 3 H_0: $\mu_{CV0} = \mu_{CV4}$

H_1: $\mu_{CV0} \neq \mu_{CV4}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 6 **ตารางที่ ข – 27** ได้ค่า Sig. = 0.164 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่ไม่มีการติดตั้งกระแสไฟฟ้าและปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 4 H_0: $\mu_{CV1} = \mu_{CV2}$

H_1: $\mu_{CV1} \neq \mu_{CV2}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 18 **ตาราง ข – 27** ได้ค่า Sig. = 0.011 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร และปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 5 H_0: $\mu_{CV1} = \mu_{CV4}$

H_1: $\mu_{CV1} \neq \mu_{CV4}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 20 **ตารางที่ ข – 27** ได้ค่า Sig. = 0.441 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร และปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 6 H_0: $\mu_{CV2} = \mu_{CV4}$

H_1: $\mu_{CV2} \neq \mu_{CV4}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 34 **ตารางที่ ข – 27** ได้ค่า Sig. = 0.000 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 ต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 7 H_0: $\mu_{AV0} = \mu_{AV1}$

H_1: $\mu_{AV0} \neq \mu_{AV1}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 10 **ตารางที่ ข – 27** ได้ค่า Sig. = 0.973 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดในชุดที่ไม่มีการติดตั้งกระแสไฟฟ้าและปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

คู่ที่ 8 H_0: $\mu_{AV0} = \mu_{AV2}$

H_1: $\mu_{AV0} \neq \mu_{AV2}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 12 **ตารางที่ ข – 27** ได้ค่า Sig. = 0.089 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดในชุดที่ไม่มีการติดตั้งกระแสไฟฟ้าและปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 9 H_0: $\mu_{AV0} = \mu_{AV4}$

H_1: $\mu_{AV0} \neq \mu_{AV4}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 14 **ตารางที่ ข – 27** ได้ค่า Sig. = 0.695 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดในชุดที่ไม่มี

การติดตั้งกระแสไฟฟ้าและปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 10 H_0: $\mu_{AV1} = \mu_{AV2}$

H_1: $\mu_{AV1} \neq \mu_{AV2}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 26 **ตารางที่ ข – 27** ได้ค่า Sig. = 0.413 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร และปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 11 H_0: $\mu_{AV1} = \mu_{AV4}$

H_1: $\mu_{AV1} \neq \mu_{AV4}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 28 **ตารางที่ ข – 27** ได้ค่า Sig. = 0.206 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร และปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 12 H_0: $\mu_{AV2} = \mu_{AV4}$

H_1: $\mu_{AV2} \neq \mu_{AV4}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 42 ตารางที่ **ข – 27** ได้ค่า Sig. = 0.004 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ข.2.6 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ (**รูปที่ 12**)

ขั้นที่ 1 การตรวจสอบเงื่อนไข

1. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ตัวแปรตามของแต่ละกลุ่มย่อยมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ มีการแจกแจงแบบปกติ

H_1: ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ ไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Shapiro - Wilk

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ ข – 28 การทดสอบการแจกแจงของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่

	Kolmogorov - Smirnov[a]			Shapiro - Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรด	0.173	12	0.200*	0.936	12	0.452

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

เนื่องจากกำหนดระดับความเชื่อมั่นไว้ 95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Sig. ของ Shapiro – Wilk = 0.452 ซึ่งมากกว่า 0.05 (**ตารางที่ ข – 28**) จึงยอมรับ H_0 และสรุปได้ว่าปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ มีการแจกแจงแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ค่าแปรปรวนของตัวแปรตามของทุกกลุ่มแตกต่างกันหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\sigma_a^2 = \sigma_b^2 = \sigma_c^2 = \sigma_d^2$

H_1: $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; i ≠ j

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Levene Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ σ_i^2 แทน ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าแปรปรวนของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร

a แทน ชุดการทดลองที่ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า

b แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร

c แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร

d แทน ชุดการทดลองที่มีการการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร

ตารางที่ ข – 29 การทดสอบความเท่ากันของค่าการแปรปรวนของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.905	3	8	0.207

จาก**ตารางที่ ข – 29** ได้ค่า Levene = 1.905 และ Sig. = 0.207 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นในขั้นที่ 2 จะใช้สถิติทดสอบ F test

<u>ขั้นที่ 2</u> การหาสาเหตุหรือการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\mu_a = \mu_b = \mu_c = \mu_d$

H_1: $\mu_i = \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่; i ≠ j ; i, j =

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ F test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ μ_i แทน ค่าเฉลี่ยของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร

ตารางที่ ข – 30 การทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	45200.365	3	15066.788	18.705	0.001
Within Groups	6443.856	8	805.482		
Total	51644.222	11			

จาก**ตารางที่ ข – 30** ได้ค่า F = 18.705 และ Sig. = 0.001 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 สรุปได้ว่าการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีโดยหญ้ารูซี่ร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ที่ต่างกันจะส่งผลต่อปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดที่ต่างกันอย่างน้อยหนึ่งคู่ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อนต่อในขั้นที่ 3

ขั้นที่ 3 การเปรียบเทียบเชิงซ้อน

ตารางที่ ข – 31 การทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่

						95% Confidence Interval	
	(I) Voltage	(J) Voltage	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	SV0	SV1	4.55003	23.17300	0.997	-69.6581	78.7581
		SV2	103.26950*	23.17300	0.009	29.0614	177.4776
		SV4	-68.98243	23.17300	0.069	-143.1905	5.2257
	SV1	SV0	-4.55003	23.17300	0.997	-78.7581	69.6581
		SV2	98.71947*	23.17300	0.012	24.5114	172.9276
		SV4	-73.53247	23.17300	0.052	-147.7406	0.6756
	SV2	SV0	-103.26950*	23.17300	0.009	-177.4776	-29.0614
		SV1	-98.71947*	23.17300	0.012	-172.9276	-24.5114
		SV4	-172.25193*	23.17300	0.000	-246.4600	-98.0438
	SV4	SV0	68.98243	23.17300	0.069	-5.2257	143.1905
		SV1	73.53247	23.17300	0.052	-0.6756	147.7406
		SV2	172.25193*	23.17300	0.000	98.0438	246.4600

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

โดยที่ SV0, SV1, SV2 และ SV4 แทน ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีในชุดที่ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า และให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ

สมมติฐานของการทดสอบ มี 6 คู่ และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 1 H_0: $\mu_{SV0} = \mu_{SV1}$

H_1: $\mu_{SV0} \neq \mu_{SV1}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 1 **ตารางที่ ข – 31** ได้ค่า Sig. = 0.997 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินในชุดที่ไม่มีการติดตั้งกระแสไฟฟ้าและปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 2 H_0: $\mu_{SV0} = \mu_{SV2}$

H_1: $\mu_{SV0} \neq \mu_{SV2}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 2 **ตารางที่ ข – 31** ได้ค่า Sig. = 0.009 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินในชุดที่ไม่มีการติดตั้งกระแสไฟฟ้าและปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 3 H_0: $\mu_{SV0} = \mu_{SV4}$

H_1: $\mu_{SV0} \neq \mu_{SV4}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 3 **ตารางที่ ข – 31** ได้ค่า Sig. = 0.069 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินในชุดที่ไม่มีการติดตั้งกระแสไฟฟ้าและปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

คู่ที่ 4 H_0: $\mu_{SV1} = \mu_{SV2}$

H_1: $\mu_{SV1} \neq \mu_{SV2}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 5 **ตารางที่ ข – 31** ได้ค่า Sig. = 0.012 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร และชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 5 H_0: $\mu_{SV1} = \mu_{SV4}$

H_1: $\mu_{SV1} \neq \mu_{SV4}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 6 **ตารางที่ ข – 31** ได้ค่า Sig. = 0.052 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดในชุดที่มีการให้

กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร และชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 6 H_0: $\mu_{SV2} = \mu_{SV4}$

H_1: $\mu_{SV2} \neq \mu_{SV4}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 9 **ตารางที่ ข – 31** ได้ค่า Sig. = 0.000 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ข.3 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลองทางสถิติของการหาระยะเวลาการให้กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดด้วยหญ้ารูซี่

ข.3.1 มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากเมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ (**รูปที่ 13**)

ขั้นที่ 1 การตรวจสอบเงื่อนไข

1. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ตัวแปรตามของแต่ละกลุ่มย่อยมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากเมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ มีการแจกแจงแบบปกติ

H_1: มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากเมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Shapiro - Wilk

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ ข – 32 การทดสอบการแจกแจงแบบปกติของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากเมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ

	Kolmogorov - Smirnov[a]			Shapiro - Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
มวลชีวภาพในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่	0.094	24	0.200*	0.956	24	0.357

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

เนื่องจากกำหนดระดับความเชื่อมั่นไว้ 95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Sig. ของ Shapiro – Wilk = 0.357 ซึ่งมากกว่า 0.05 (**ตารางที่ ข – 32**) จึงยอมรับ H_0 และสรุปได้ว่า มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากเมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ มีการแจกแจงแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ค่าแปรปรวนของตัวแปรตามของทุกกลุ่มแตกต่างกันหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\sigma_a^2 = \sigma_b^2 = \sigma_c^2 = \sigma_d^2$

H_1: $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; i ≠ j

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Levene Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ σ_i^2 แทน มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากเมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาแปรปรวนของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน และให้กระแสไฟฟ้าที่ที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน

a แทน ชุดการทดลองที่ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า

b แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน

c แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน

d แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน

ตารางที่ ข – 33 การทดสอบความเท่ากันของค่าการแปรปรวนของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากเมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.779	7	16	0.161

จาก**ตารางที่ ข – 33** ได้ค่า Levene = 1.779 และ Sig. = 0.161 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นในขั้นที่ 2 จะใช้สถิติทดสอบ F

<u>ขั้นที่ 2</u> การหาสาเหตุหรือการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\mu_a = \mu_b = \mu_c = \mu_d$

H_1: $\mu_i = \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$; $i, j =$

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ F Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ μ_i แทน ค่าเฉลี่ยของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากเมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาที่ i = ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน และให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน

ตารางที่ ข – 34 การทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากเมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	0.000	7	0.000	0.751	0.634
Within Groups	0.001	16	0.000		
Total	0.001	23			

จาก**ตารางที่ ข – 34** ได้ค่า F = 0.751 และ Sig. = 0.634 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 จึงไม่ต้องทำขั้นที่ 3 ซึ่งสรุปได้ว่าการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีโดยหญ้ารูซี่ร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาที่ต่างกันจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ข.3.2 ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ (**รูปที่ 14**)

ขั้นที่ 1 การตรวจสอบเงื่อนไข

1. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ตัวแปรตามของแต่ละกลุ่มย่อยมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ มีการแจกแจงแบบปกติ

H_1: ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Shapiro - Wilk

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข – 35 การทดสอบการแจกแจงแบบปกติของผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ

	Kolmogorov - Smirnov[a]			Shapiro - Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่	0.117	12	0.200*	0.905	12	0.182

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

เนื่องจากกำหนดระดับความเชื่อมั่นไว้ 95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Sig. ของ Shapiro – Wilk = 0.182 ซึ่งมากกว่า 0.05 (**ตารางที่ ข – 35**) จึงยอมรับ H_0 และสรุปได้ว่าผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ แบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ค่าแปรปรวนของตัวแปรตามของทุกกลุ่มแตกต่างกันหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\sigma_a^2 = \sigma_b^2 = \sigma_c^2 = \sigma_d^2$

H_1: $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Levene Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ σ_i^2 แทน ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาแปรปรวนของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน และให้กระแสไฟฟ้าที่ที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน

a แทน ชุดการทดลองที่ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า

b แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน

c แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน

d แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน

ตารางที่ ข – 36 การทดสอบความเท่ากันของค่าการแปรปรวนของผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
2.630	3	8	0.122

จาก**ตารางที่ ข – 36** ได้ค่า Levene = 2.630 และ Sig. = 0.122 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นในขั้นที่ 2 จะใช้สถิติทดสอบ F

ขั้นที่ 2 การหาสาเหตุหรือการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\mu_a = \mu_b = \mu_c = \mu_d$

H_1: $\mu_i = \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$; $i, j =$

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ F Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ μ_i แทน ค่าเฉลี่ยของผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาที่ i = ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน และให้กระแสไฟฟ้าที่ที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน

ตารางที่ ข – 37 การทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	0.000	3	0.000	0.588	0.640
Within Groups	0.001	7	0.000		
Total	0.001	11			

จาก**ตารางที่ ข – 37** ได้ค่า F = 0.588 และ Sig. = 0.640 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 จึงไม่ต้องทำขั้นที่ 3 สรุปได้ว่าการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีโดยหญ้ารูซี่ร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาที่ต่างกันจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากในทุกชุดการทดลองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ข.3.3 ปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ (**ตารางที่ 12**)

ขั้นที่ 1 การตรวจสอบเงื่อนไข

1. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ตัวแปรตามของแต่ละกลุ่มย่อยมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: ปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ มีการแจกแจงแบบปกติ

H_1: ปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Shapiro - Wilk

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ ข – 38 การทดสอบการแจกแจงของปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ

	Kolmogorov - Smirnov[a]			Shapiro - Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่	0.121	24	0.200*	0.933	24	0.112

* This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

เนื่องจากกำหนดระดับความเชื่อมั่นไว้ 95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Sig. ของ Shapiro – Wilk = 0.112 ซึ่งมากกว่า 0.05 (**ตารางที่ ข – 38**) จึงยอมรับ H_0 และสรุปได้ว่าปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ มีการแจกแจงแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ค่าแปรปรวนของตัวแปรตามของทุกกลุ่มแตกต่างกันหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\sigma_a^2 = \sigma_b^2 = \sigma_c^2 = \sigma_d^2$

H_1: $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; i ≠ j

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Levene Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ σ_i^2 แทน ปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาแปรปรวนของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน และให้กระแสไฟฟ้าที่ที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน

a แทน ชุดการทดลองที่ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า

b แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน

c แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน

d แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน

ตารางที่ ข – 39 การทดสอบความเท่ากันของค่าการแปรปรวนของปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
2.181	7	16	0.093

จาก**ตารางที่ ข – 39** ได้ค่า Levene = 2.181 และ Sig. = 0.093 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นในขั้นที่ 2 จะใช้สถิติทดสอบ F

<u>ขั้นที่ 2</u> การหาสาเหตุหรือการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\mu_a = \mu_b = \mu_c = \mu_d$

H_1: $\mu_i = \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่; i ≠ j ; i, j =

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ F Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ μ_i แทน ค่าเฉลี่ยของปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาที่ i = ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน และให้กระแสไฟฟ้าที่ที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน

ตารางที่ ข – 40 การทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1837640.958	7	262520.137	2.932	0.035
Within Groups	1432801.226	16	8955.077		
Total	3270442.187	23			

จาก**ตารางที่ ข – 40** ได้ค่า F = 2.932 และ Sig. = 0.035 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 สรุปได้ว่าการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีโดยหญ้ารูซี่ร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาที่ต่างกันจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 อย่างน้อยหนึ่งคู่ ดังนั้นจึงต้องทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อนต่อในขั้นที่ 3

ขั้นที่ 3 การเปรียบเทียบเชิงซ้อน

ตารางที่ ข – 41 การทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนของปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ

						95% Confidence Interval	
	(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	ZST0	ZRT0	-62.07267	244.33594	1.000	-908.0005	783.8552
		ZST2	-57.62120	244.33594	1.000	-903.5490	788.3066
		ZRT2	-679.36907	244.33594	0.168	-1525.2969	166.5588
		ZST4	-23.13393	244.33594	1.000	-869.0618	822.7939
		ZRT4	-306.70373	244.33594	0.902	-1152.6316	539.2241
		ZST6	171.83413	244.33594	0.996	-674.0937	1017.7620
		ZRT6	278.08200	244.33594	0.938	-567.8458	1124.0098
	ZRT0	ZST0	62.07267	244.33594	1.000	-783.8552	908.0005
		ZST2	4.45147	244.33594	1.000	-841.4764	850.3793
		ZRT2	-617.29640	244.33594	0.252	-1463.2242	228.6314
		ZST4	38.93873	244.33594	1.000	-806.9891	884.8666
		ZRT4	-244.63107	244.33594	0.968	-1090.5589	601.2968
		ZST6	233.90680	244.33594	0.974	-612.0210	1079.8346
		ZRT6	340.15467	244.33594	0.848	-505.7732	1186.0825
	ZST2	ZST0	57.62120	244.33594	1.000	-788.3066	903.5490
		ZRT0	-4.45147	244.33594	1.000	-850.3793	841.4764
		ZRT2	-621.74787	244.33594	0.245	-1467.6757	224.1800
		ZST4	34.48727	244.33594	1.000	-811.4406	880.4151
		ZRT4	-249.08253	244.33594	0.964	-1095.0104	596.8453
		ZST6	229.45533	244.33594	0.977	-616.4725	1075.3832
		ZRT6	335.70320	244.33594	0.856	-510.2246	1181.6310

ตารางที่ ข – 41 การทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนของปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ (ต่อ)

						95% Confidence Interval	
	(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	ZRT2	ZST0	679.36907	244.33594	0.168	-166.5588	1525.2969
		ZRT0	617.29640	244.33594	0.252	-228.6314	1463.2242
		ZST2	621.74787	244.33594	0.245	-224.1800	1467.6757
		ZST4	656.23513	244.33594	0.196	-189.6927	1502.1630
		ZRT4	372.66533	244.33594	0.784	-473.2625	1218.5932
		ZST6	851.20320*	244.33594	0.048	5.2754	1697.1310
		ZRT6	957.45107*	244.33594	0.021	111.5232	1803.3789
	ZST4	ZST0	23.13393	244.33594	1.000	-822.7939	869.0618
		ZRT0	-38.93873	244.33594	1.000	-884.8666	806.9891
		ZST2	-34.48727	244.33594	1.000	-880.4151	811.4406
		ZRT2	-656.23513	244.33594	0.196	-1502.1630	189.6927
		ZRT4	-283.56980	244.33594	0.932	-1129.4976	562.3580
		ZST6	194.96807	244.33594	0.991	-650.9598	1040.8959
		ZRT6	301.21593	244.33594	0.910	-544.7119	1147.1438
	ZRT4	ZST0	306.70373	244.33594	0.902	-539.2241	1152.6316
		ZRT0	244.63107	244.33594	0.968	-601.2968	1090.5589
		ZST2	249.08253	244.33594	0.964	-596.8453	1095.0104
		ZRT2	-372.66533	244.33594	0.784	-1218.5932	473.2625
		ZST4	283.56980	244.33594	0.932	-562.3580	1129.4976
		ZST6	478.53787	244.33594	0.535	-367.3900	1324.4657
		ZRT6	584.78573	244.33594	0.307	-261.1421	1430.7136

ตารางที่ ข – 41 การทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนของปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ (ต่อ)

						95% Confidence Interval	
	(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	ZST6	ZST0	-171.83413	244.33594	0.996	-1017.7620	674.0937
		ZRT0	-233.90680	244.33594	0.974	-1079.8346	612.0210
		ZST2	-229.45533	244.33594	0.977	-1075.3832	616.4725
		ZRT2	-851.20320*	244.33594	0.048	-1697.1310	-5.2754
		ZST4	-194.96807	244.33594	0.991	-1040.8959	650.9598
		ZRT4	-478.53787	244.33594	0.535	-1324.4657	367.3900
		ZRT6	106.24787	244.33594	1.000	-739.6800	952.1757
	ZRT6	ZST0	-278.08200	244.33594	0.938	-1124.0098	567.8458
		ZRT0	-340.15467	244.33594	0.848	-1186.0825	505.7732
		ZST2	-335.70320	244.33594	0.856	-1181.6310	510.2246
		ZRT2	-957.45107*	244.33594	0.021	-1803.3789	-111.5232
		ZST4	-301.21593	244.33594	0.910	-1147.1438	544.7119
		ZRT4	-584.78573	244.33594	0.307	-1430.7136	261.1421
		ZST6	-106.24787	244.33594	1.000	-952.1757	739.6800

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

โดยที่ ZST0, ZST2, ZST4 และ ZST6 แทน ปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินของหญ้ารูซี่ที่ในชุดที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้า และให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมงต่อวัน ตามลำดับ และ ZRT0, ZRT2, ZRT4 และ ZRT6 แทน ปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนรากของหญ้ารูซี่ในชุดที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้า และให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมงต่อวัน ตามลำดับ

สมมติฐานของการทดสอบ มี 12 คู่ และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 1 H_0: $\mu_{ZST0} = \mu_{ZST2}$

H_1: $\mu_{ZST0} \neq \mu_{ZST2}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 2 **ตารางที่ ข – 41** ได้ค่า Sig. = 1.000 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินของหญ้ารูซี่ในชุดที่ไม่มีการติดตั้งกระแสไฟฟ้าและในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 2 H_0: $\mu_{ZST0} = \mu_{ZST4}$

H_1: $\mu_{ZST0} \neq \mu_{ZST4}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 4 **ตารางที่ ข – 41** ได้ค่า Sig. = 1.000 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินของหญ้ารูซี่ในชุดที่ไม่มีการติดตั้งกระแสไฟฟ้าและชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 3 H_0: $\mu_{ZST0} = \mu_{ZST6}$

H_1: $\mu_{ZST0} \neq \mu_{ZST6}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 6 **ตารางที่ ข – 41** ได้ค่า Sig. = 0.996 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินของหญ้ารูซี่ในชุดที่ไม่มีการติดตั้งกระแสไฟฟ้าและชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 4 H_0: $\mu_{ZST2} = \mu_{ZST4}$

H_1: $\mu_{ZST2} \neq \mu_{ZST4}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 18 **ตารางที่ ข – 41** ได้ค่า Sig. = 1.000 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินของหญ้ารูซี่ในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวันและ=ชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 5 H_0: $\mu_{ZST2} = \mu_{ZST6}$

H_1: $\mu_{ZST2} \neq \mu_{ZST6}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 20 **ตารางที่ ข – 41** ได้ค่า Sig. = 0.971 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินของหญ้ารูซี่ในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวันและชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

คู่ที่ 6 H_0: $\mu_{ZST4} = \mu_{ZST6}$

H_1: $\mu_{ZST4} \neq \mu_{ZST6}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 34 **ตารางที่ ข – 41** ได้ค่า Sig. = 0.991 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินของหญ้ารูซี่ในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวันและที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 7 H_0: $\mu_{ZRT0} = \mu_{ZRT2}$

H_1: $\mu_{ZRT0} \neq \mu_{ZRT2}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 10 **ตารางที่ ข – 41** ได้ค่า Sig. = 0.252 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนรากของหญ้ารูซี่ในชุดที่ไม่มีการติดตั้งกระแสไฟฟ้าและชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 8 H_0: $\mu_{ZRT0} = \mu_{ZRT4}$

H_1: $\mu_{ZRT0} \neq \mu_{ZRT4}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 12 **ตารางที่ ข – 41** ได้ค่า Sig. = 0.968 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนรากของหญ้ารูซี่ในชุดที่ไม่มีการติดตั้งกระแสไฟฟ้าและชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 9 H_0: $\mu_{ZRT0} = \mu_{ZRT6}$

H_1: $\mu_{ZRT0} \neq \mu_{ZRT6}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 14 **ตารางที่ ข – 41** ได้ค่า Sig. = 0.848 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนรากของหญ้ารูซี่ในชุดที่ไม่มีการติดตั้งกระแสไฟฟ้าและชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 10 H_0: $\mu_{ZRT2} = \mu_{ZRT4}$

H_1: $\mu_{ZRT2} \neq \mu_{ZRT4}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 26 **ตารางที่ ข – 41** ได้ค่า Sig. = 0.784 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนรากของหญ้ารูซี่ในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน และชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

คู่ที่ 11 H_0: $\mu_{ZRT2} = \mu_{ZRT6}$

H_1: $\mu_{ZRT2} \neq \mu_{ZRT6}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 28 **ตารางที่ ข – 41** ได้ค่า Sig. = 0.021 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนรากของหญ้ารูซี่ในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน และชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 12 H_0: $\mu_{ZRT4} = \mu_{ZRT6}$

H_1: $\mu_{ZRT4} \neq \mu_{ZRT6}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 35 **ตารางที่ ข – 41** ได้ค่า Sig. = 0.307 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนรากของหญ้ารูซี่ในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน และชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ข.3.4 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ (**ตารางที่ 12**)

<u>ขั้นที่ 1</u> การตรวจสอบเงื่อนไข

1. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ตัวแปรตามของแต่ละกลุ่มย่อยมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ มีการแจกแจงแบบปกติ

H_1: ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Shapiro - Wilk

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ ข – 42 การทดสอบการแจกแจงของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ

	Kolmogorov - Smirnov[a]			Shapiro - Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่	0.181	12	0.200*	0.916	12	0.254

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

เนื่องจากกำหนดระดับความเชื่อมั่นไว้ 95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Sig. ของ Shapiro – Wilk = 0.254 ซึ่งมากกว่า 0.05 (**ตารางที่ ข – 42**) จึงยอมรับ H_0 และสรุปได้ว่า ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ มีการแจกแจงแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ค่าแปรปรวนของตัวแปรตามของทุกกลุ่มแตกต่างกันหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\sigma_a^2 = \sigma_b^2 = \sigma_c^2 = \sigma_d^2$

H_1: $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; i ≠ j

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Levene Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ σ_i^2 แทน ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาแปรปรวนของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน และให้กระแสไฟฟ้าที่ที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน

a แทน ชุดการทดลองที่ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า

b แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน

c แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน

d แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน

ตารางที่ ข – 43 การทดสอบความเท่ากันของค่าการแปรปรวนของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
4.729	3	8	0.035

จาก**ตารางที่ ข – 43** ได้ค่า Levene = 4.729 และ Sig. = 0.035 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นในขั้นที่ 2 จะใช้สถิติทดสอบ Welch

<u>ขั้นที่ 2</u> การหาสาเหตุหรือการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\mu_a = \mu_b = \mu_c = \mu_d$

H_1: $\mu_i = \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$; $i, j =$

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Welch

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ μ_i แทน ค่าเฉลี่ยของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาที่ i = ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน และให้กระแสไฟฟ้าที่ที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน

ตารางที่ ข – 44 การทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ

	Statistic[a]	df1	df2	Sig.
Welch	87.848	3	4.489	0.001

a. Asymptotically F distributed

จาก**ตารางที่ ข – 44** ได้ค่า Welch = 24.527 และ Sig. = 0.001 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 สรุปได้ว่าการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีโดยหญ้ารูซี่ร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาที่ต่างกันจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 อย่างน้อยหนึ่งคู่ ดังนั้นจึงต้องทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อนต่อในขั้นที่ 3

ขั้นที่ 3 การเปรียบเทียบเชิงซ้อน

ตารางที่ ข – 45 การทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ

			Mean			95% Confidence Interval	
	(I) Time	(J) Time	Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	ZT0	ZT2	-474.91726*	99.24420	0.006	-792.7321	-157.1024
		ZT4	-101.09814	99.24420	0.744	-418.9130	216.7167
		ZT6	645.32223*	99.24420	0.001	327.5074	963.1371
	ZT2	ZT0	474.91726*	99.24420	0.006	157.1024	792.7321
		ZT4	373.81912*	99.24420	0.023	56.0043	691.6340
		ZT6	1120.23950*	99.24420	0.000	802.4246	1438.0543
	ZT4	ZT0	101.09814	99.24420	0.744	-216.7167	418.9130
		ZT2	-373.81912*	99.24420	0.023	-691.6340	-56.0043
		ZT6	746.42037*	99.24420	0.000	428.6055	1064.2352
	ZT6	ZT0	-645.32223*	99.24420	0.001	-963.1371	-327.5074
		ZT2	-1120.23950*	99.24420	0.000	-1438.0543	-802.4246
		ZT4	-746.42037*	99.24420	0.000	-1064.2352	-428.6055

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

โดยที่ ZT0, ZT1, ZT2 และ ZT4 แทน ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีและไม่มีการให้กระแสไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมงต่อวัน ตามลำดับ

สมมติฐานของการทดสอบ มี 6 คู่ และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 1 H_0: $\mu_{ZT0} = \mu_{ZT2}$

H_1: $\mu_{ZT0} \neq \mu_{ZT2}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 1 **ตารางที่ ข – 45** ได้ค่า Sig. = 0.006 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่ในชุดที่ไม่มีการติดตั้งกระแสไฟฟ้าและในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 2 H_0: $\mu_{ZT0} = \mu_{ZT4}$

H_1: $\mu_{ZT0} \neq \mu_{ZT4}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 2 **ตารางที่ ข – 45** ได้ค่า Sig. = 0.774 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่ในชุดที่ไม่มีการติดตั้งกระแสไฟฟ้าและในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 3 H_0: $\mu_{ZT0} = \mu_{ZT6}$

H_1: $\mu_{ZT0} \neq \mu_{ZT6}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 3 **ตารางที่ ข – 45** ได้ค่า Sig. = 0.001 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่ในชุดที่ไม่มีการติดตั้งกระแสไฟฟ้าและในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 4 H_0: $\mu_{ZT2} = \mu_{ZT4}$

H_1: $\mu_{ZT2} \neq \mu_{ZT4}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 5 **ตารางที่ ข – 45** ได้ค่า Sig. = 0.023 ต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่ในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน และในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 5 H_0: $\mu_{ZT2} = \mu_{ZT6}$

H_1: $\mu_{ZT2} \neq \mu_{ZT6}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 6 **ตารางที่ ข – 45** ได้ค่า Sig. = 0.000 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดในชุดที่มีการให้

กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 6 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 6 H_0: $\mu_{ZT4} = \mu_{ZT6}$

H_1: $\mu_{ZT4} \neq \mu_{ZT6}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 9 **ตารางที่ ข – 45** ได้ค่า Sig. = 0.000 ต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่ในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน และในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ข.3.5 ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ (**รูปที่ 15**)

ขั้นที่ 1 การตรวจสอบเงื่อนไข

1. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ตัวแปรตามของแต่ละกลุ่มย่อยมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ มีการแจกแจงแบบปกติ

H_1: ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ ไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Shapiro - Wilk

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ ข – 46 การทดสอบการแจกแจงของปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่

	Kolmogorov - Smirnov[a]			Shapiro - Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่	0.185	24	0.032	0.887	24	0.110

a. Lilliefors Significance Correction

เนื่องจากกำหนดระดับความเชื่อมั่นไว้ 95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Sig. ของ Shapiro – Wilk = 0.110 ซึ่งมากกว่า 0.05 (**ตารางที่ ข – 46**) จึงยอมรับ H_0 และสรุปได้ว่า ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ มีการแจกแจงแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ค่าแปรปรวนของตัวแปรตามของทุกกลุ่มแตกต่างกันหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\sigma_a^2 = \sigma_b^2 = \sigma_c^2 = \sigma_d^2$

H_1: $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; i ≠ j

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Levene Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ σ_i^2 แทน ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาแปรปรวนของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน และให้กระแสไฟฟ้าที่ที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน

a แทน ชุดการทดลองที่ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า

b แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน

c แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน

d แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน

ตารางที่ ข – 47 การทดสอบความเท่ากันของค่าการแปรปรวนของปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
2.923	7	16	0.036

จาก**ตารางที่ ข – 47** ได้ค่า Levene = 2.923 และ Sig. = 0.036 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นในขั้นที่ 2 จะใช้สถิติทดสอบ Welch

ขั้นที่ 2 การหาสาเหตุหรือการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\mu_a = \mu_b = \mu_c = \mu_d$

H_1: $\mu_i = \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$; $i, j =$

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Welch

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ μ_i แทน ค่าเฉลี่ยของปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาที่ i = ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน และให้กระแสไฟฟ้าที่ที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน

ตารางที่ ข – 48 การทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่

	Statistic[a]	df1	df2	Sig.
Welch	208.433	7	6.224	0.000

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

a. Asymptotically F distributed

จาก**ตารางที่ ข – 48** ได้ค่า Welch = 208.433 และ Sig. = 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 สรุปได้ว่าการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีโดยหญ้ารูซี่ร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาที่ต่างกันจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 อย่างน้อยหนึ่งคู่ ดังนั้นจึงต้องทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อนต่อในขั้นที่ 3

ขั้นที่ 3 การเปรียบเทียบเชิงซ้อน

ตารางที่ ข – 49 การทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนของปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่

						95% Confidence Interval	
	(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	CT0	AT0	31.28298*	4.53111	0.000	15.5956	46.9704
		CT2	24.94594*	4.53111	0.001	9.2586	40.6333
		AT2	52.91013*	4.53111	0.000	37.2228	68.5975
		CT4	2.28999	4.53111	0.999	-13.3974	17.9774
		AT4	54.04807*	4.53111	0.000	38.3607	69.7354
		CT6	9.94133	4.53111	0.403	-5.7460	25.6287
		AT6	55.12592*	4.53111	0.000	39.4385	70.8133
	AT0	CT0	-31.28298*	4.53111	0.000	-46.9704	-15.5956
		CT2	-6.33704	4.53111	0.845	-22.0244	9.3503
		AT2	21.62716*	4.53111	0.004	5.9398	37.3145
		CT4	-28.99299*	4.53111	0.000	-44.6804	-13.3056
		AT4	22.76509*	4.53111	0.002	7.0777	38.4525
		CT6	-21.34165*	4.53111	0.004	-37.0290	-5.6543
		AT6	23.84295*	4.53111	0.002	8.1556	39.5303
	CT2	CT0	-24.94594*	4.53111	0.001	-40.6333	-9.2586
		AT0	6.33704	4.53111	0.845	-9.3503	22.0244
		AT2	27.96419*	4.53111	0.000	12.2768	43.6516
		CT4	-22.65595*	4.53111	0.003	-38.3433	-6.9686
		AT4	29.10213*	4.53111	0.000	13.4147	44.7895
		CT6	-15.00461	4.53111	0.066	-30.6920	0.6828
		AT6	30.17998*	4.53111	0.000	14.4926	45.8674

ตารางที่ ข – 49 การทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนของปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ (ต่อ)

						95% Confidence Interval	
	(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	AT2	CT0	-52.91013*	4.53111	0.000	-68.5975	-37.2228
		AT0	-21.62716*	4.53111	0.004	-37.3145	-5.9398
		CT2	-27.96419*	4.53111	0.000	-43.6516	-12.2768
		CT4	-50.62015*	4.53111	0.000	-66.3075	-34.9328
		AT4	1.13793	4.53111	1.000	-14.5494	16.8253
		CT6	-42.96880*	4.53111	0.000	-58.6562	-27.2814
		AT6	2.21579	4.53111	1.000	-13.4716	17.9032
	CT4	CT0	-2.28999	4.53111	0.999	-17.9774	13.3974
		AT0	28.99299*	4.53111	0.000	13.3056	44.6804
		CT2	22.65595*	4.53111	0.003	6.9686	38.3433
		AT2	50.62015*	4.53111	0.000	34.9328	66.3075
		AT4	51.75808*	4.53111	0.000	36.0707	67.4455
		CT6	7.65134	4.53111	0.694	-8.0360	23.3387
		AT6	52.83594*	4.53111	0.000	37.1486	68.5233
	AT4	CT0	-54.04807*	4.53111	0.000	-69.7354	-38.3607
		AT0	-22.76509*	4.53111	0.002	-38.4525	-7.0777
		CT2	-29.10213*	4.53111	0.000	-44.7895	-13.4147
		AT2	-1.13793	4.53111	1.000	-16.8253	14.5494
		CT4	-51.75808*	4.53111	0.000	-67.4455	-36.0707
		CT6	-44.10674*	4.53111	0.000	-59.7941	-28.4194
		AT6	1.07786	4.53111	1.000	-14.6095	16.7652

ตารางที่ ข – 49 การทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนของปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ (ต่อ)

						95% Confidence Interval	
	(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	CT6	CT0	-9.94133	4.53111	0.403	-25.6287	5.7460
		AT0	21.34165*	4.53111	0.004	5.6543	37.0290
		CT2	15.00461	4.53111	0.066	-0.6828	30.6920
		AT2	42.96880*	4.53111	0.000	27.2814	58.6562
		CT4	-7.65134	4.53111	0.694	-23.3387	8.0360
		AT4	44.10674*	4.53111	0.000	28.4194	59.7941
		AT6	45.18459*	4.53111	0.000	29.4972	60.8720
	AT6	CT0	-55.12592*	4.53111	0.000	-70.8133	-39.4385
		AT0	-23.84295*	4.53111	0.002	-39.5303	-8.1556
		CT2	-30.17998*	4.53111	0.000	-45.8674	-14.4926
		AT2	-2.21579	4.53111	1.000	-17.9032	13.4716
		CT4	-52.83594*	4.53111	0.000	-68.5233	-37.1486
		AT4	-1.07786	4.53111	1.000	-16.7652	14.6095
		CT6	-45.18459*	4.53111	0.000	-60.8720	-29.4972

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

โดยที่ CT0, CT2, CT4 และ CT6 แทน ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้า และให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมงต่อวัน ตามลำดับ และ AT0, AT2, AT4 และ AT6 แทน ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดในชุดที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้า และให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมงต่อวัน ตามลำดับ

สมมติฐานของการทดสอบ มี 12 คู่ และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 1 H_0: $\mu_{CT0} = \mu_{CT2}$

H_1: $\mu_{CT0} \neq \mu_{CT2}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 2 **ตารางที่ ข – 49** ได้ค่า Sig. = 0.001 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้าและในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 2 H_0: $\mu_{CT0} = \mu_{CT4}$

H_1: $\mu_{CT0} \neq \mu_{CT4}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 4 **ตารางที่ ข – 49** ได้ค่า Sig. = 0.999 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้าและชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 3 H_0: $\mu_{CT0} = \mu_{CT6}$

H_1: $\mu_{CT0} \neq \mu_{CT6}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 6 **ตารางที่ ข – 49** ได้ค่า Sig. = 0.403 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้าและชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 4 H_0: $\mu_{CT2} = \mu_{CT4}$

H_1: $\mu_{CT2} \neq \mu_{CT4}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 18 **ตารางที่ ข – 49** ได้ค่า Sig. = 0.003 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวันและชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 5 H_0: $\mu_{CT2} = \mu_{CT6}$

H_1: $\mu_{CT2} \neq \mu_{CT6}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 20 **ตารางที่ ข – 49** ได้ค่า Sig. = 0.066 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวันและชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

คู่ที่ 6 H_0: $\mu_{CT4} = \mu_{CT6}$

H_1: $\mu_{CT4} \neq \mu_{CT6}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 34 **ตารางที่ ข – 49** ได้ค่า Sig. = 0.694 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวันและชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 7 H_0: $\mu_{AT0} = \mu_{AT2}$

H_1: $\mu_{AT0} \neq \mu_{AT2}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 10 **ตารางที่ ข – 49** ได้ค่า Sig. = 0.004 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดในชุดที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้าและชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 8 H_0: $\mu_{AT0} = \mu_{AT4}$

H_1: $\mu_{AT0} \neq \mu_{AT4}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 12 **ตารางที่ ข – 49** ได้ค่า Sig. = 0.002 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดในชุดที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้าและชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 9 H_0: $\mu_{AT0} = \mu_{AT6}$

H_1: $\mu_{AT0} \neq \mu_{AT6}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 14 **ตารางที่ ข – 49** ได้ค่า Sig. = 0.004 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดในชุดที่ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้าและในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 10 H_0: $\mu_{AT2} = \mu_{AT4}$

H_1: $\mu_{AT2} \neq \mu_{AT4}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 26 **ตารางที่ ข – 49** ได้ค่า Sig. = 1.000 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน และชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

คู่ที่ 11 H_0: $\mu_{AT2} = \mu_{AT6}$

H_1: $\mu_{AT2} \neq \mu_{AT6}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 28 **ตารางที่ ข – 49** ได้ค่า Sig. = 1.000 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน และชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 12 H_0: $\mu_{AT4} = \mu_{AT6}$

H_1: $\mu_{AT4} \neq \mu_{AT6}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 42 **ตารางที่ ข – 49** ได้ค่า Sig. = 1.000 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน และชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ข.3.6 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ (**รูปที่ 15**)

<u>ขั้นที่ 1</u> การตรวจสอบเงื่อนไข

1. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ตัวแปรตามของแต่ละกลุ่มย่อยมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ มีการแจกแจงแบบปกติ

H_1: ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ ไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Shapiro - Wilk

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ ข – 50 การทดสอบการแจกแจงของปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่

	Kolmogorov - Smirnov[a]			Shapiro - Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรด	0.167	12	0.200*	0.942	12	0.527

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

เนื่องจากกำหนดระดับความเชื่อมั่นไว้ 95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Sig. ของ Shapiro – Wilk = 0.527 ซึ่งมากกว่า 0.05 (**ตารางที่ ข – 50**) จึงยอมรับ H_0 และสรุปได้ว่า ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ มีการแจกแจงแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ค่าแปรปรวนของตัวแปรตามของทุกกลุ่มแตกต่างกันหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\sigma_a^2 = \sigma_b^2 = \sigma_c^2 = \sigma_d^2$

H_1: $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; i ≠ j

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Levene Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ σ_i^2 แทน ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาแปรปรวนของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน และให้กระแสไฟฟ้าที่ที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน

a แทน ชุดการทดลองที่ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า

b แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน

c แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน

d แทน ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้าและให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน

ตารางที่ ข – 51 การทดสอบความเท่ากันของค่าการแปรปรวนของปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
2.289	3	8	0.155

จาก**ตารางที่ ข – 51** ได้ค่า Levene = 2.289 และ Sig. = 0.155 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นในขั้นที่ 2 จะใช้สถิติทดสอบ F

<u>ขั้นที่ 2</u> การหาสาเหตุหรือการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\mu_a = \mu_b = \mu_c = \mu_d$

H_1: $\mu_i = \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$; $i, j =$

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ F Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ μ_i แทน ค่าเฉลี่ยของปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาที่ i = ไม่มีการติดตั้งสนามไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน และให้กระแสไฟฟ้าที่ที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน

ตารางที่ ข – 52 การวิเคราะห์การแปรปรวนของปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	3480.724	3	1160.241	38.693	0.000
Within Groups	293.890	8	29.986		
Total	3720.614	11			

จาก**ตารางที่ ข – 52** ได้ค่า F = 38.693 และ Sig. = 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 สรุปได้ว่าการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสีโดยหญ้ารูซี่ร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาที่ต่างกันจะส่งผลต่อการปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 อย่างน้อยหนึ่งคู่ ดังนั้นจึงต้องทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อนต่อในขั้นที่ 3

ขั้นที่ 3 การเปรียบเทียบเชิงซ้อน

ตารางที่ ข – 53 การทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนของปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่

						95% Confidence Interval	
	(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	ST0	ST2	46.57310*	4.47111	0.000	32.2550	60.8912
		ST4	25.05508*	4.47111	0.002	10.7370	39.3731
		ST6	33.78428*	4.47111	0.000	19.4662	48.1023
	ST2	ST0	-46.57310*	4.47111	0.000	-60.8912	-32.2550
		ST4	-21.51802*	4.47111	0.006	-35.8361	-7.2000
		ST6	-12.78882	4.47111	0.081	-27.1069	1.5292
	ST4	ST0	-25.05508*	4.47111	0.002	-39.3731	-10.7370
		ST2	21.51802*	4.47111	0.006	7.2000	35.8361
		ST6	8.72920	4.47111	0.281	-5.5889	23.0473
	ST6	ST0	-33.78428*	4.47111	0.000	-48.1023	-19.4662
		ST2	12.78882	4.47111	0.081	-1.5292	27.1069
		ST4	-8.72920	4.47111	0.281	-23.0473	5.5889

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

โดยที่ ST0, ST1, ST2 และ ST4 แทน ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรดเมื่อไม่มีการให้กระแสไฟฟ้า ให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมงต่อวัน ตามลำดับ

สมมติฐานของการทดสอบ มี 6 คู่ และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 1 H_0: $\mu_{ST0} = \mu_{ST2}$

H_1: $\mu_{ST0} \neq \mu_{ST2}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 1 **ตารางที่ ข – 53** ได้ค่า Sig. = 0.000 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรดในชุดที่ไม่มีการติดตั้งกระแสไฟฟ้าและในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 2 H_0: $\mu_{ST0} = \mu_{ST4}$

H_1: $\mu_{ST0} \neq \mu_{ST4}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 2 **ตารางที่ ข – 53** ได้ค่า Sig. = 0.002 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรดในชุดที่ไม่มีการติดตั้งกระแสไฟฟ้าและในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 3 H_0: $\mu_{ST0} = \mu_{ST6}$

H_1: $\mu_{ST0} \neq \mu_{ST6}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 3 **ตารางที่ ข – 53** ได้ค่า Sig. = 0.000 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรดในชุดที่ไม่มีการติดตั้งกระแสไฟฟ้าและในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 4 H_0: $\mu_{ST2} = \mu_{ST4}$

H_1: $\mu_{ST2} \neq \mu_{ST4}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 5 **ตารางที่ ข – 53** ได้ค่า Sig. = 0.006 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน และในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 5 H_0: $\mu_{ST2} = \mu_{ST6}$

H_1: $\mu_{ST2} \neq \mu_{ST6}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 6 **ตารางที่ ข – 53** ได้ค่า Sig. = 0.081 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 2 โวลต์ต่อเซนติเมตร และชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 6 โวลต์ต่อเซนติเมตร ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 6 H_0: $\mu_{ST4} = \mu_{ST6}$

H_1: $\mu_{ST4} \neq \mu_{ST6}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 9 **ตารางที่ ข – 53** ได้ค่า Sig. = 0.281 ต่ำซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินที่สะสมบริเวณขั้วอิเล็กโทรดในชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ต่อเซนติเมตร และชุดที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 6 โวลต์ต่อเซนติเมตร ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ข.4 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลองทางสถิติของการหาความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่เหมาะสมที่จะบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสี

ข.4.1 มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกที่ความหนาแน่นต่างๆ ในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า (**รูปที่ 17**)

ขั้นที่ 1 การตรวจสอบเงื่อนไข

1. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ตัวแปรตามของแต่ละกลุ่มย่อยมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกที่ความหนาแน่นต่างๆ ในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า มีการแจกแจงแบบปกติ

H_1: มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกที่ความหนาแน่นต่างๆ ในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า ไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Shapiro - Wilk

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ ข – 54 การทดสอบการแจกแจงแบบปกติของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกที่ความหนาแน่นต่างๆ ในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า

	Kolmogorov - Smirnov[a]			Shapiro - Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
มวลชีวภาพในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่	0.095	18	0.200*	0.974	18	0.866

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

เนื่องจากกำหนดระดับความเชื่อมั่นไว้ 95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Sig. ของ Shapiro – Wilk = 0.866 ซึ่งมากกว่า 0.05 (**ตารางที่ ข – 54**) จึงยอมรับ H_0 และสรุปได้ว่ามวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกที่ความหนาแน่นต่างๆ ในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า มีการแจกแจงแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ค่าแปรปรวนของตัวแปรตามของทุกกลุ่มแตกต่างกันหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\sigma_b^2 = \sigma_c^2 = \sigma_d^2$

H_1: $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Levene Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ σ_i^2 แทน มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกที่ความหนาแน่นแปรปรวนของชุดการทดลองที่ i = ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

b แทน ชุดการทดลองที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

c แทน ชุดการทดลองที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

d แทน ชุดการทดลองที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

ตารางที่ ข – 55 การทดสอบความเท่ากันของค่าการแปรปรวนของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกที่ความหนาแน่นต่างๆ ในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
2.956	5	12	0.058

จาก**ตารางที่ ข – 55** ได้ค่า Levene = 2.039 และ Sig. = 0.058 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นในขั้นที่ 2 จะใช้สถิติทดสอบ F

<u>ขั้นที่ 2</u> การหาสาเหตุหรือการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\mu_b = \mu_c = \mu_d$

H_1: $\mu_i = \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$; $i, j =$

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ F Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ μ_i แทน ค่าเฉลี่ยของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกที่ความหนาแน่นที่ i = ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

ตารางที่ ข – 56 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกที่ความหนาแน่นต่างๆ ในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	0.002	5	0.000	48.403	0.000
Within Groups	0.000	12	0.000		
Total	0.002	17			

จาก**ตารางที่ ข – 56** ได้ค่า F = 48.403 และ Sig. = 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 สรุปได้ว่าการปลูกหญ้ารูซี่ในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า ที่ความหนาแน่นของหญ้าแตกต่างกันจะส่งผลให้มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติอย่างน้อย 1 คู่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนในขั้นที่ 3 ต่อไป

ขั้นที่ 3 การเปรียบเทียบเชิงซ้อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข – 57 การทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกที่ความหนาแน่นต่างๆ ในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า

						95% Confidence Interval	
	(I) Plants	(J) Plants	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	BSP5	BRP5	-0.01340*	0.00216	0.001	-0.0207	-0.0061
		BSP10	-0.01023*	0.00216	0.005	-0.0175	-0.0030
		BRP10	-0.02543*	0.00216	0.000	-0.0327	-0.0182
		BSP15	-0.01890*	0.00216	0.000	-0.0262	-0.0116
		BRP15	-0.02910*	0.00216	0.000	-0.0364	-0.0218
	BRP5	BSP5	0.01340*	0.00216	0.001	0.0061	0.0207
		BSP10	0.00317	0.00216	0.690	-0.0041	0.0104
		BRP10	-0.01203*	0.00216	0.001	-0.0193	-0.0048
		BSP15	-0.00550	0.00216	0.185	-0.0128	0.0018
		BRP15	-0.01570*	0.00216	0.000	-0.0230	-0.0084
	BSP10	BSP5	0.01023*	0.00216	0.005	0.0030	0.0175
		BRP5	-0.00317	0.00216	0.690	-0.0104	0.0041
		BRP10	-0.01520*	0.00216	0.000	-0.0225	-0.0079
		BSP15	-0.00867*	0.00216	0.017	-0.0159	-0.0014
		BRP15	-0.01887*	0.00216	0.000	-0.0261	-0.0116
	BRP10	BSP5	0.02543*	0.00216	0.000	0.0182	0.0327
		BRP5	0.01203*	0.00216	0.001	0.0048	0.0193
		BSP10	0.01520*	0.00216	0.000	0.0079	0.0225
		BSP15	0.00653	0.00216	0.087	-0.0007	0.0138
		BRP15	-0.00367	0.00216	0.558	-0.0109	0.0036

ตารางที่ ข – 57 การทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากที่ปลูกที่ความหนาแน่นต่างๆ ในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า (ต่อ)

						95% Confidence Interval	
	(I) tree	(J) tree	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	BSP15	BSP5	0.01890*	0.00216	0.000	0.0116	0.0262
		BRP5	0.00550	0.00216	0.185	-0.0018	0.0128
		BSP10	0.00867*	0.00216	0.017	0.0014	0.0159
		BRP10	-0.00653	0.00216	0.087	-0.0138	0.0007
		BRP15	-0.01020*	0.00216	0.005	-0.0175	-0.0029
	BRP15	BSP5	0.02910*	0.00216	0.000	0.0218	0.0364
		BRP5	0.01570*	0.00216	0.000	0.0084	0.0230
		BSP10	0.01887*	0.00216	0.000	0.0116	0.0261
		BRP10	0.00367	0.00216	0.558	-0.0036	0.0109
		BSP15	0.01020*	0.00216	0.005	0.0029	0.0175

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

Chulalongkorn University

โดยที่ BSP5, BSP10 และ BSP15 แทน มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5, 10 และ 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และ BRP5, BRP10 และ BRP15 แทน มวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนรากในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5, 10 และ 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ตามลำดับ

สมมติฐานของการทดสอบ มี 6 คู่ และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 1 H_0: $\mu_{BSP5} = \mu_{BSP10}$

H_1: $\mu_{BSP5} \neq \mu_{BSP10}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 2 **ตารางที่ ข – 57** ได้ค่า Sig. = 0.005 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความ

หนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 2 H_0: $\boldsymbol{\mu_{BSP5} = \mu_{BSP15}}$

H_1: $\boldsymbol{\mu_{BSP5} \neq \mu_{BSP15}}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 4 **ตารางที่ ข – 57** ได้ค่า Sig. = 0.000 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 3 H_0: $\boldsymbol{\mu_{BSP10} = \mu_{BSP15}}$

H_1: $\boldsymbol{\mu_{BSP10} \neq \mu_{BSP15}}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 14 **ตารางที่ ข – 57** ได้ค่า Sig. = 0.017 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 4 H_0: $\boldsymbol{\mu_{BRP5} = \mu_{BRP10}}$

H_1: $\boldsymbol{\mu_{BRP5} \neq \mu_{BRP10}}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 8 **ตารางที่ ข – 57** ได้ค่า Sig. = 0.001 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนรากในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 5 H_0: $\boldsymbol{\mu_{BRP5} = \mu_{BRP15}}$

H_1: $\boldsymbol{\mu_{BRP5} \neq \mu_{BRP15}}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 10 **ตารางที่ ข – 57** ได้ค่า Sig. = 0.000 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนรากในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 6 H_0: $\boldsymbol{\mu_{BRP10} = \mu_{BRP15}}$

H_1: $\boldsymbol{\mu_{BRP10} \neq \mu_{BRP15}}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 20 **ตารางที่ ข – 57** ได้ค่า Sig. = 0.558 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนรากในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น

10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ข.4.2 ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า (**รูปที่ 18**)

ขั้นที่ 1 การตรวจสอบเงื่อนไข

1. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ตัวแปรตามของแต่ละกลุ่มย่อยมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า มีการแจกแจงแบบปกติ

H_1: ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า ไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Shapiro - Wilk

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ ข – 58 การทดสอบการแจกแจงแบบปกติของผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า

	Kolmogorov - Smirnov[a]			Shapiro - Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่	0.203	9	0.200*	0.880	9	0.158

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

เนื่องจากกำหนดระดับความเชื่อมั่นไว้ 95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Sig. ของ Shapiro – Wilk = 0.158 ซึ่งมากกว่า 0.05 (**ตารางที่ ข – 58**) จึงยอมรับ H_0 และสรุปได้ว่า

ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า

2. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ค่าแปรปรวนของตัวแปรตามของทุกกลุ่มแตกต่างกันหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\sigma_b^2 = \sigma_c^2 = \sigma_d^2$

H_1: $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; i ≠ j

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Levene Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ σ_i^2 แทน ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากแปรปรวนของชุดการทดลองที่ i = ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

b แทน ชุดการทดลองที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

c แทน ชุดการทดลองที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

d แทน ชุดการทดลองที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

ตารางที่ ข – 59 การทดสอบความเท่ากันของค่าการแปรปรวนของผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
2.930	2	6	0.129

จาก**ตารางที่ ข – 16** ได้ค่า Levene = 2.230 และ Sig. = 0.129 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นในขั้นที่ 2 จะใช้สถิติทดสอบ F

ขั้นที่ 2 การหาสาเหตุหรือการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\mu_b = \mu_c = \mu_d$

H_1: $\mu_i = \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$; i, j =

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ F Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ μ_i แทน ค่าเฉลี่ยของผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ของชุดการทดลองที่ i = ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

ตารางที่ ข – 60 การทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ปลูกในดินที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	0.002	2	0.001	67.707	0.000
Within Groups	0.000	6	0.000		
Total	0.002	8			

จาก**ตารางที่ ข – 60** ได้ค่า F = 67.707 และ Sig. = 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 สรุปได้การปลูกหญ้ารูซี่ในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้าโดยมีความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่แตกต่างกันจะส่งผลให้ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติอย่างน้อย 1 คู่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนในขั้นที่ 3 ต่อไป

ขั้นที่ 3 การเปรียบเทียบเชิงซ้อน

ตารางที่ ข – 61 การทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนของผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า

						95% Confidence Interval	
	(I) Plants	(J) Plants	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	BP5	BP10	-0.02513*	0.00345	0.001	-0.0357	-0.0146
		BP15	-0.03793*	0.00345	0.000	-0.0485	-0.0274
	BP10	BP5	0.02513*	0.00345	0.001	0.0146	0.0357
		BP15	-0.01280*	0.00345	0.023	-0.0234	-0.0022
	BP15	BP5	0.03793*	0.00345	0.000	0.0274	0.0485
		BP10	0.01280*	0.00345	0.023	0.0022	0.0234

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

โดยที่ BP5, BP10 และ BP15 แทน ผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5, 10 และ 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ตามลำดับ

สมมติฐานของการทดสอบ มี 3 คู่ และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 1 H_0: $\boldsymbol{\mu_{BP5} = \mu_{BP10}}$

H_1: $\boldsymbol{\mu_{BP5} \neq \mu_{BP10}}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 1 **ตารางที่ ข – 61** ได้ค่า Sig. = 0.001 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 2 H_0: $\boldsymbol{\mu_{BP5} = \mu_{BP15}}$

H_1: $\boldsymbol{\mu_{BP5} \neq \mu_{BP15}}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 2 **ตารางที่ ข – 61** ได้ค่า Sig. = 0.000 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น

5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 3 H_0: $\boldsymbol{\mu_{BP10} = \mu_{BP15}}$

H_1: $\boldsymbol{\mu_{BP10} \neq \mu_{BP15}}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 4 **ตารางที่ ข – 61** ได้ค่า Sig. = 0.023 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นผลรวมของมวลชีวภาพของหญ้ารูซี่ในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ข.4.3 ปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่ต่างกัน (**ตารางที่ 11)**

<u>ขั้นที่ 1</u> การตรวจสอบเงื่อนไข

1. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ตัวแปรตามของแต่ละกลุ่มย่อยมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: ปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่ต่างกัน มีการแจกแจงแบบปกติ

H_1: ปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่ต่างกัน ไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Shapiro - Wilk

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ ข – 62 การทดสอบการแจกแจงแบบปกติของปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่ต่างกัน

	Kolmogorov - Smirnov[a]			Shapiro - Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่	0.110	18	0.200*	0.933	18	0.219

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

เนื่องจากกำหนดระดับความเชื่อมั่นไว้ 95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Sig. ของ Shapiro – Wilk = 0.219 ซึ่งมากกว่า 0.05 (**ตารางที่ ข – 62**) จึงยอมรับ H_0 และสรุปได้ว่า ปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่ต่างกัน มีการแจกแจงแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ค่าแปรปรวนของตัวแปรตามของทุกกลุ่มแตกต่างกันหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\sigma_b^2 = \sigma_c^2 = \sigma_d^2$

H_1: $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Levene Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ σ_i^2 แทน ปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นแปรปรวนของชุดการทดลองที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ที่ i = ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

b แทน ชุดการทดลองที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

c แทน ชุดการทดลองที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

d แทน ชุดการทดลองที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

ตารางที่ ข – 63 การทดสอบความเท่ากันของค่าการแปรปรวนของปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่ต่างกัน

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.175	5	12	0.376

จาก**ตารางที่ ข – 63** ได้ค่า Levene = 1.175 และ Sig. = 0.376 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นในขั้นที่ 2 จะใช้สถิติทดสอบ F

<u>ขั้นที่ 2</u> การหาสาเหตุหรือการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\mu_b = \mu_c = \mu_d$

H_1: $\mu_i = \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$; i, j =

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ F Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ μ_i แทน ค่าเฉลี่ยของปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นที่ i = ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

ตารางที่ ข – 64 การวิเคราะห์การแปรปรวนของปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่ต่างกัน

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	137.483	5	27.497	4.060	0.022
Within Groups	81.262	12	6.772		
Total	218.744	17			

จาก**ตารางที่ ข – 64** ได้ค่า F = 4.060 และ Sig. = 0.022 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 สรุปได้ว่าการปลูกหญ้ารูซี่ในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้าโดยมีความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่ต่างกันจะส่งผลให้ปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติอย่างน้อย 1 คู่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนในขั้นที่ 3 ต่อไป

ขั้นที่ 3 การเปรียบเทียบเชิงซ้อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข – 65 การทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนของปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่ต่างกัน

						95% Confidence Interval	
	(I) Plants	(J) Plants	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	ZSP5	ZRP5	-1.91264	2.12474	0.939	-9.0495	5.2242
		ZSP10	-3.14125	2.12474	0.683	-10.2781	3.9956
		ZRP10	-7.19805*	2.12474	0.048	-14.3349	-0.0612
		ZSP15	-3.51497	2.12474	0.582	-10.6518	3.6219
		ZRP15	-7.78209*	2.12474	0.030	-14.9189	-0.6452
	ZRP5	ZSP5	1.91264	2.12474	0.939	-5.2242	9.0495
		ZSP10	-1.22861	2.12474	0.991	-8.3655	5.9082
		ZRP10	-5.28541	2.12474	0.202	-12.4223	1.8514
		ZSP15	-1.60233	2.12474	0.970	-8.7392	5.5345
		ZRP15	-5.86945	2.12474	0.133	-13.0063	1.2674
	ZSP10	ZSP5	3.14125	2.12474	0.683	-3.9956	10.2781
		ZRP5	1.22861	2.12474	0.991	-5.9082	8.3655
		ZRP10	-4.05680	2.12474	0.441	-11.1936	3.0800
		ZSP15	-0.37372	2.12474	1.000	-7.5106	6.7631
		ZRP15	-4.64084	2.12474	0.311	-11.7777	2.4960
	ZRP10	ZSP5	7.19805*	2.12474	0.048	0.0612	14.3349
		ZRP5	5.28541	2.12474	0.202	-1.8514	12.4223
		ZSP10	4.05680	2.12474	0.441	-3.0800	11.1936
		ZSP15	3.68308	2.12474	0.537	-3.4538	10.8199
		ZRP15	-0.58404	2.12474	1.000	-7.7209	6.5528

ตารางที่ ข – 65 การทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนของปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินและส่วนรากของหญ้ารูซี่ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่ต่างกัน (ต่อ)

			Mean Difference			95% Confidence Interval	
	(I) tree	(J) tree	(I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	ZSP15	ZSP5	3.51497	2.12474	0.582	-3.6219	10.6518
		ZRP5	1.60233	2.12474	0.970	-5.5345	8.7392
		ZSP10	0.37372	2.12474	1.000	-6.7631	7.5106
		ZRP10	-3.68308	2.12474	0.537	-10.8199	3.4538
		ZRP15	-4.26712	2.12474	0.391	-11.4040	2.8697
	ZRP15	ZSP5	7.78209*	2.12474	0.030	0.6452	14.9189
		ZRP5	5.86945	2.12474	0.133	-1.2674	13.0063
		ZSP10	4.64084	2.12474	0.311	-2.4960	11.7777
		ZRP10	0.58404	2.12474	1.000	-6.5528	7.7209
		ZSP15	4.26712	2.12474	0.391	-2.8697	11.4040

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

โดยที่ ZSP5, ZSP10 และ ZP15 แทน ปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินในชุดที่ไม่มีการปลูกพืช และการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5, 10 และ 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ตามลำดับ และ ZRP5, ZRP10 และ ZRP15 แทน ปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนรากในชุดที่ไม่มีการปลูกพืช และการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5, 10 และ 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ตามลำดับ

สมมติฐานของการทดสอบ มี 6 คู่ และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 1 H_0: $\mu_{ZSP5} = \mu_{ZSP10}$

H_1: $\mu_{ZSP5} \neq \mu_{ZSP10}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 2 **ตารางที่ ข – 65** ได้ค่า Sig. = 0.683 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 2 H_0: $\mu_{ZSP5} = \mu_{ZSP15}$

H_1: $\mu_{ZSP5} \neq \mu_{ZSP15}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 4 **ตารางที่ ข – 65** ได้ค่า Sig. = 0.582 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 3 H_0: $\mu_{ZSP10} = \mu_{ZSP15}$

H_1: $\mu_{ZSP10} \neq \mu_{ZSP15}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 14 **ตารางที่ ข – 65** ได้ค่า Sig. = 0.311 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนเหนือพื้นดินในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 4 H_0: $\mu_{ZRP5} = \mu_{ZRP10}$

H_1: $\mu_{ZRP5} \neq \mu_{ZRP10}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 8 **ตารางที่ ข – 65** ได้ค่า Sig. = 0.202 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนรากในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 5 H_0: $\mu_{ZRP5} = \mu_{ZRP15}$

H_1: $\mu_{ZRP5} \neq \mu_{ZRP15}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 10 **ตารางที่ ข – 65** ได้ค่า Sig. = 0.133 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนรากในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 6 H_0: $\mu_{ZRP10} = \mu_{ZRP15}$

H_1: $\mu_{ZRP10} \neq \mu_{ZRP15}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 20 **ตารางที่ ข – 65** ได้ค่า Sig. = 0.100 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในส่วนรากในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ข.4.4 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่ต่างกัน (**ตารางที่ 11**)

ขั้นที่ 1 การตรวจสอบเงื่อนไข

1. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ตัวแปรตามของแต่ละกลุ่มย่อยมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่ต่างกัน มีการแจกแจงแบบปกติ

H_1: ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่ต่างกัน ไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Shapiro - Wilk

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ ข – 66 การทดสอบการแจกแจงของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่ต่างกัน

	Kolmogorov - Smirnov[a]			Shapiro - Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่	0.157	9	0.200*	0.935	9	0.528

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

เนื่องจากกำหนดระดับความเชื่อมั่นไว้ 95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Sig. ของ Shapiro – Wilk = 0.528 ซึ่งมากกว่า 0.05 (**ตารางที่ ข – 66**) จึงยอมรับ H_0 และสรุปได้ว่า ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่ต่างกัน มีการแจกแจงแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ค่าแปรปรวนของตัวแปรตามของทุกกลุ่มแตกต่างกันหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\sigma_b^2 = \sigma_c^2 = \sigma_d^2$

H_1: $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; i ≠ j

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Levene Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ σ_i^2 แทน ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นแปรปรวนของชุดการทดลองที่มีการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ที่ i = ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

b แทน ชุดการทดลองที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

c แทน ชุดการทดลองที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

d แทน ชุดการทดลองที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข – 67 การทดสอบความเท่ากันของค่าการแปรปรวนของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่ต่างกัน

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
2.052	2	6	0.209

จาก**ตารางที่ ข – 67** ได้ค่า Levene = 2.052 และ Sig. = 0.209 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นในขั้นที่ 2 จะใช้สถิติทดสอบ F

ขั้นที่ 2 การหาสาเหตุหรือการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\mu_b = \mu_c = \mu_d$

H_1: $\mu_i = \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$; $i, j =$

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ F Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ μ_i แทน ค่าเฉลี่ยของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นที่ i = ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข – 68 การวิเคราะห์การแปรปรวนของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่ เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่ต่างกัน

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	159.993	2	79.997	6.086	0.036
Within Groups	78.862	6	13.144		
Total	238.855	8			

จาก**ตารางที่ ข – 68** ได้ค่า F = 6.086 และ Sig. = 0.036 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 สรุปได้การปลูกหญ้ารูซี่ในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่แตกต่างกันจะส่งผลให้ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่มีความ

แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติอย่างน้อย 1 คู่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนในขั้นที่ 3 ต่อไป

ขั้นที่ 3 การเปรียบเทียบเชิงซ้อน

ตารางที่ ข – 69 การทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสีร่วมกับการให้กระแสไฟฟ้า โดยมีความหนาแน่นของหญ้ารูซี่ที่ต่างกัน

						95% Confidence Interval	
	(I) Plants	(J) Plants	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	ZP5	ZP10	0.95775	2.96014	0.944	-8.1248	10.0403
		ZP15	9.38442*	2.96014	0.044	0.3019	18.4670
	ZP10	ZP5	-0.95775	2.96014	0.944	-10.0403	8.1248
		ZP15	8.42667	2.96014	0.066	-0.6559	17.5092
	ZP15	ZP5	-9.38442*	2.96014	0.044	-18.4670	-0.3019
		ZP10	-8.42667	2.96014	0.066	-17.5092	0.6559

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โดยที่ ZP5, ZP10 และ ZP15 แทน ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่ ในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5, 10 และ 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ตามลำดับ

สมมติฐานของการทดสอบ มี 3 คู่ และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 1 H_0: $\mu_{ZP5} = \mu_{ZP10}$

H_1: $\mu_{ZP5} \neq \mu_{ZP10}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 1 **ตารางที่ ข – 69** ได้ค่า Sig. = 0.944 ซึ่งสูงกว่ากว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่ ในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 2 H_0: $\mu_{ZP5} = \mu_{ZP15}$

H_1: $\mu_{ZP5} \neq \mu_{ZP15}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 2 **ตารางที่ ข – 69** ได้ค่า Sig. = 0.044 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่ ในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 3 H_0: $\mu_{ZP10} = \mu_{ZP15}$

H_1: $\mu_{ZP10} \neq \mu_{ZP15}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 4 **ตารางที่ ข – 69** ได้ค่า Sig. = 0.066 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในหญ้ารูซี่ ในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ข.4.5 ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ (**รูปที่ 19**)

ขั้นที่ 1 การตรวจสอบเงื่อนไข

1. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ตัวแปรตามของแต่ละกลุ่มย่อยมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ มีการแจกแจงแบบปกติ

H_1: ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ ไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Shapiro - Wilk

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ ข – 70 การทดสอบการแจกแจงของปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ

	Kolmogorov - Smirnov[a]			Shapiro - Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนด	0.157	24	0.128	0.937	24	0.143

a. Lilliefors Significance Correction

เนื่องจากกำหนดระดับความเชื่อมั่นไว้ 95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Sig. ของ Shapiro – Wilk = 0.143 ซึ่งมากกว่า 0.05 (**ตารางที่ ข – 70**) จึงยอมรับ H_0 และสรุปได้ว่า ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ มีการแจกแจงแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ค่าแปรปรวนของตัวแปรตามของทุกกลุ่มแตกต่างกันหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\sigma_a^2 = \sigma_b^2 = \sigma_c^2 = \sigma_d^2$

H_1: $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Levene Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ σ_i^2 แทน ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นแปรปรวนของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการปลูกพืช ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

a แทน ชุดการทดลองที่ไม่มีการปลูกพืช

b แทน ชุดการทดลองที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

c แทน ชุดการทดลองที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

d แทน ชุดการทดลองที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

ตารางที่ ข – 71 การทดสอบความเท่ากันของค่าการแปรปรวนของปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.585	7	16	0.210

จาก**ตารางที่ ข – 71** ได้ค่า Levene = 4.548 และ Sig. = 0.006 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นในขั้นที่ 2 จะใช้สถิติทดสอบ F test

<u>ขั้นที่ 2</u> การหาสาเหตุหรือการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\mu_a = \mu_b = \mu_c = \mu_d$

H_1: $\mu_i = \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$; i, j =

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ F test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ μ_i แทน ค่าเฉลี่ยของปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นที่ i = ไม่มีการปลูกพืช ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

ตารางที่ ข – 72 การวิเคราะห์การแปรปรวนของปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	2320.342	7	331.477	15.365	0.000
Within Groups	345.182	16	21.537		
Total	2665.525	23			

จาก**ตารางที่ ข – 72** ได้ค่า F = 24.527 และ Sig. = 0.000 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 สรุปได้ว่าปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ มีอย่างน้อยหนึ่งคู่ที่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อนต่อในขั้นที่ 3

ขั้นที่ 3 การเปรียบเทียบเชิงซ้อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข – 73 การเปรียบเทียบเชิงซ้อนของปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ

						95% Confidence Interval	
	(I) Voltage	(J) Voltage	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	CP0	AP0	19.31492*	3.79244	0.002	6.1849	32.4449
		CP5	22.60743*	3.79244	0.000	9.4774	35.7374
		AP5	29.05414*	3.79244	0.000	15.9242	42.1841
		CP10	12.36016	3.79244	0.073	-0.7698	25.4901
		AP10	23.37273*	3.79244	0.000	10.2427	36.5027
		CP15	5.23950	3.79244	0.853	-7.8905	18.3695
		AP15	27.15367*	3.79244	0.000	14.0237	40.2837
	AP0	CP0	-19.31492*	3.79244	0.002	-32.4449	-6.1849
		CP5	3.29251	3.79244	0.985	-9.8375	16.4225
		AP5	9.73922	3.79244	0.236	-3.3908	22.8692
		CP10	-6.95477	3.79244	0.609	-20.0848	6.1752
		AP10	4.05781	3.79244	0.954	-9.0722	17.1878
		CP15	-14.07542*	3.79244	0.031	-27.2054	-0.9454
		AP15	7.83875	3.79244	0.472	-5.2912	20.9687
	CP5	CP0	-22.60743*	3.79244	0.000	-35.7374	-9.4774
		AP0	-3.29251	3.79244	0.985	-16.4225	9.8375
		AP5	6.44671	3.79244	0.688	-6.6833	19.5767
		CP10	-10.24728	3.79244	0.191	-23.3773	2.8827
		AP10	0.76530	3.79244	1.000	-12.3647	13.8953
		CP15	-17.36793*	3.79244	0.006	-30.4979	-4.2379
		AP15	4.54624	3.79244	0.921	-8.5837	17.6762

ตารางที่ ข – 73 การเปรียบเทียบเชิงซ้อนของปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ (ต่อ)

						95% Confidence Interval	
	(I) Voltage	(J) Voltage	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	AP5	CP0	-29.05414*	3.79244	0.000	-42.1841	-15.9242
		AP0	-9.73922	3.79244	0.236	-22.8692	3.3908
		CP5	-6.44671	3.79244	0.688	-19.5767	6.6833
		CP10	-16.69399*	3.79244	0.008	-29.8240	-3.5640
		AP10	-5.68141	3.79244	0.798	-18.8114	7.4486
		CP15	-23.81464*	3.79244	0.000	-36.9446	-10.6846
		AP15	-1.90047	3.79244	0.999	-15.0305	11.2295
	CP10	CP0	-12.36016	3.79244	0.073	-25.4901	0.7698
		AP0	6.95477	3.79244	0.609	-6.1752	20.0848
		CP5	10.24728	3.79244	0.191	-2.8827	23.3773
		AP5	16.69399*	3.79244	0.008	3.5640	29.8240
		AP10	11.01258	3.79244	0.137	-2.1174	24.1426
		CP15	-7.12065	3.79244	0.583	-20.2506	6.0093
		AP15	14.79352*	3.79244	0.022	1.6635	27.9235
	AP10	CP0	-23.37273*	3.79244	0.000	-36.5027	-10.2427
		AP0	-4.05781	3.79244	0.954	-17.1878	9.0722
		CP5	-0.76530	3.79244	1.000	-13.8953	12.3647
		AP5	5.68141	3.79244	0.798	-7.4486	18.8114
		CP10	-11.01258	3.79244	0.137	-24.1426	2.1174
		CP15	-18.13323*	3.79244	0.004	-31.2632	-5.0032
		AP15	3.78094	3.79244	0.968	-9.3490	16.9109

ตารางที่ ข – 73 การเปรียบเทียบเชิงซ้อนของปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ (ต่อ)

						95% Confidence Interval	
	(I) Voltage	(J) Voltage	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	CP15	CP0	-5.23950	3.79244	0.853	-18.3695	7.8905
		AP0	14.07542*	3.79244	0.031	0.9454	27.2054
		CP5	17.36793*	3.79244	0.006	4.2379	30.4979
		AP5	23.81464*	3.79244	0.000	10.6846	36.9446
		CP10	7.12065	3.79244	0.583	-6.0093	20.2506
		AP10	18.13323*	3.79244	0.004	5.0032	31.2632
		AP15	21.91417*	3.79244	0.001	8.7842	35.0442
	AP15	CP0	-27.15367*	3.79244	0.000	-40.2837	-14.0237
		AP0	-7.83875	3.79244	0.472	-20.9687	5.2912
		CP5	-4.54624	3.79244	0.921	-17.6762	8.5837
		AP5	1.90047	3.79244	0.999	-11.2295	15.0305
		CP10	-14.79352*	3.79244	0.022	-27.9235	-1.6635
		AP10	-3.78094	3.79244	0.968	-16.9109	9.3490
		CP15	-21.91417*	3.79244	0.001	-35.0442	-8.7842

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

โดยที่ CP0, CP5, CP10 และ CP15 แทน ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดและแอโนดในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5, 10 และ 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และ AP0, AP5, AP10, AP15 และ AV4 แทน ปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5, 10 และ 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ตามลำดับ

สมมติฐานของการทดสอบ มี 12 คู่ และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 1 H_0: $\mu_{CP0} = \mu_{CP5}$

H_1: $\mu_{CP0} \neq \mu_{CP5}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 2 **ตารางที่ ข – 73** ได้ค่า Sig. = 0.000 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่ไม่มีการปลูกพืชและในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 2 H_0: $\mu_{CP0} = \mu_{CP10}$

H_1: $\mu_{CP0} \neq \mu_{CP10}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 4 **ตารางที่ ข – 73** ได้ค่า Sig. = 0.073 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่ไม่มีการปลูกพืชและในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 3 H_0: $\mu_{CP0} = \mu_{CP15}$

H_1: $\mu_{CP0} \neq \mu_{CP15}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 6 **ตารางที่ ข – 73** ได้ค่า Sig. = 0.853 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่ไม่มีการปลูกพืชและในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 4 H_0: $\mu_{CP5} = \mu_{CP10}$

H_1: $\mu_{CP5} \neq \mu_{CP10}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 18 **ตาราง ข – 73** ได้ค่า Sig. = 0.191 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 5 H_0: $\mu_{CP5} = \mu_{CP15}$

H_1: $\mu_{CP5} \neq \mu_{CP15}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 20 **ตารางที่ ข – 73** ได้ค่า Sig. = 0.006 ต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

คู่ที่ 6 H_0: $\mu_{CP10} = \mu_{CP15}$

H_1: $\mu_{CP10} \neq \mu_{CP15}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 34 **ตารางที่ ข – 73** ได้ค่า Sig. = 0.583 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแคโทดในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 7 H_0: $\mu_{AP0} = \mu_{AP5}$

H_1: $\mu_{AP0} \neq \mu_{AP5}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 10 **ตารางที่ ข – 73** ได้ค่า Sig. = 0.236 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดในชุดที่ไม่มีการปลูกพืช และในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 8 H_0: $\mu_{AP0} = \mu_{AP10}$

H_1: $\mu_{AP0} \neq \mu_{AP10}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 12 **ตารางที่ ข – 73** ได้ค่า Sig. = 0.954 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดในชุดที่ไม่มีการปลูกพืช และในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 9 H_0: $\mu_{AP0} = \mu_{AP15}$

H_1: $\mu_{AP0} \neq \mu_{AP15}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 14 **ตารางที่ ข – 73** ได้ค่า Sig. = 0.472 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดในชุดที่ไม่มีการปลูกพืช และในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 10 H_0: $\mu_{AP5} = \mu_{AP10}$

H_1: $\mu_{AP5} \neq \mu_{AP10}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 26 **ตารางที่ ข – 73** ได้ค่า Sig. = 0.798 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 11 H_0: $\mu_{AP5} = \mu_{AP15}$

H_1: $\mu_{AP5} \neq \mu_{AP15}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 28 **ตารางที่ ข – 73** ได้ค่า Sig. = 0.999 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 12 H_0: $\mu_{AP10} = \mu_{AP15}$

H_1: $\mu_{AP10} \neq \mu_{AP15}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 42 ตารางที่ **ข – 73** ได้ค่า Sig. = 0.968 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีที่สะสมในดินบริเวณขั้วแอโนดในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ข.4.6 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ (**รูปที่ 20**)

<u>ขั้นที่ 1</u> การตรวจสอบเงื่อนไข

1. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ตัวแปรตามของแต่ละกลุ่มย่อยมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ มีการแจกแจงแบบปกติ

H_1: ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ ไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Shapiro - Wilk

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ ข – 74 การทดสอบการแจกแจงของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ

	Kolmogorov - Smirnov[a]			Shapiro - Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรด	0.128	12	0.200*	0.992	12	1.000

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

เนื่องจากกำหนดระดับความเชื่อมั่นไว้ 95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Sig. ของ Shapiro – Wilk = 1.000 ซึ่งมากกว่า 0.05 (**ตารางที่ ข – 74**) จึงยอมรับ H_0 และสรุปได้ว่า ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่างๆ ร่วมกับหญ้ารูซี่ มีการแจกแจงแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ค่าแปรปรวนของตัวแปรตามของทุกกลุ่มแตกต่างกันหรือไม่

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\sigma_a^2 = \sigma_b^2 = \sigma_c^2 = \sigma_d^2$

H_1: $\sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ อย่างน้อย 1 คู่; i ≠ j

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Levene Test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ σ_i^2 แทน ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดแปรปรวนของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการปลูกพืช ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

a แทน ชุดการทดลองที่ไม่มีการปลูกพืช

b แทน ชุดการทดลองที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

c แทน ชุดการทดลองที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

d แทน ชุดการทดลองที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

ตารางที่ ข – 75 การทดสอบความเท่ากันของค่าการแปรปรวนของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
0.774	3	8	0.541

จาก**ตารางที่ ข – 75** ได้ค่า Levene = 0.774 และ Sig. = 0.541 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นในขั้นที่ 2 จะใช้สถิติทดสอบ F test

<u>ขั้นที่ 2</u> การหาสาเหตุหรือการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย

สมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0: $\mu_a = \mu_b = \mu_c = \mu_d$

H_1: $\mu_i = \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่; i ≠ j ; i, j =

สถิติที่ใช้ทดสอบ คือ F test

และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

โดยที่ μ_i แทน ค่าเฉลี่ยของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดแปรปรวนของชุดการทดลองที่ i = ไม่มีการปลูกพืช ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข – 76 การทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1592.283	3	530.761	11.039	0.003
Within Groups	384.642	8	48.080		
Total	1976.928	11			

จาก**ตารางที่ ข – 76** ได้ค่า F = 11.039 และ Sig. = 0.003 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 สรุปได้ว่าปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ มีอย่างน้อยหนึ่งคู่ที่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อนต่อในขั้นที่ 3

ขั้นที่ 3 การเปรียบเทียบเชิงซ้อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข – 77 การทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนของปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดหลังการบำบัดโดยการให้กระแสไฟฟ้าร่วมกับปลูกหญ้ารูซี่ที่ความหนาแน่นต่างๆ

						95% Confidence Interval	
	(I) Plants	(J) Plants	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	SP0	SP5	32.34665*	5.66158	0.002	14.2163	50.4770
		SP10	16.41797	5.66158	0.077	-1.7124	34.5484
		SP15	13.07826	5.66158	0.175	-5.0521	31.2086
	SP5	SP0	-32.34665*	5.66158	0.002	-50.4770	-14.2163
		SP10	-15.92869	5.66158	0.087	-34.0591	2.2017
		SP15	-19.26840*	5.66158	0.038	-37.3988	-1.1380
	SP10	SP0	-16.41797	5.66158	0.077	-34.5484	1.7124
		SP5	15.92869	5.66158	0.087	-2.2017	34.0591
		SP15	-3.33971	5.66158	0.932	-21.4701	14.7907
	SP15	SP0	-13.07826	5.66158	0.175	-31.2086	5.0521
		SP5	19.26840*	5.66158	0.038	1.1380	37.3988
		SP10	3.33971	5.66158	0.932	-14.7907	21.4701

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

สมมติฐานของการทดสอบ มี 6 คู่ และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่า Sig. (Significance) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 1 H_0: $\mu_{SP0} = \mu_{SP5}$

H_1: $\mu_{SP0} \neq \mu_{SP5}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 1 **ตารางที่ ข – 77** ได้ค่า Sig. = 0.002 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดในชุดที่ไม่มีการปลูกพืชและชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 2 H_0: $\mu_{SP0} = \mu_{SP10}$

H_1: $\mu_{SP0} \neq \mu_{SP10}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 2 **ตารางที่ ข – 77** ได้ค่า Sig. = 0.077 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดในชุดที่ไม่มีการปลูกพืชและชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 3 H_0: $\mu_{SP0} = \mu_{SP15}$

H_1: $\mu_{SP0} \neq \mu_{SP15}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 3 **ตารางที่ ข – 77** ได้ค่า Sig. = 0.175 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดในชุดที่ไม่มีการปลูกพืชและชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 4 H_0: $\mu_{SP5} = \mu_{SP10}$

H_1: $\mu_{SP5} \neq \mu_{SP10}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 5 **ตารางที่ ข – 77** ได้ค่า Sig. = 0.087 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 5 H_0: $\mu_{SP5} = \mu_{SP15}$

H_1: $\mu_{SP5} \neq \mu_{SP15}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 6 **ตารางที่ ข – 77** ได้ค่า Sig. = 0.038 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 5 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คู่ที่ 6 H_0: $\mu_{SP10} = \mu_{SP15}$

H_1: $\mu_{SP10} \neq \mu_{SP15}$

ใช้ผลลัพธ์บรรทัดที่ 9 **ตารางที่ ข – 77** ได้ค่า Sig. = 0.932 ซึ่งสูงกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ดังนั้นปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่สะสมในดินบริเวณขั้วอิเล็กโทรดในชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 10 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง และชุดที่มีการปลูกพืชที่ความหนาแน่น 15 ต้นต่อพื้นที่หน้าตัดกระถาง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวดารารัตน์ โรจนพิทยากร เกิดเมื่อวันเสาร์ที่ 8 กันยายน พ.ศ. 2533 ที่อำเภอเมืองสุราษฎร์ธานี จังหวัดสุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (เกียรตินิยมอันดับสอง) จากมหาวิทยาลัยศิลปากร เมื่อปี พ.ศ. 2555 และในปี พ.ศ. 2556 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สหสาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร Environment Asia Vol. 9 No.1 (January 2016) เรื่อง Electrokinetic enhancement on phytoremediation in zinc contaminated soil by Ruzi grass. ปัจจุบันอาศัยอยู่บ้านเลขที่ 165 หมู่ 1 ถนนวิชิตภักดี ตำบลตลาดไชยา อำเภอไชยา จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84110

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University