

ผลกระทบจากการใช้คลื่นสนามไฟฟ้าต่อการกำจัดสารตะกั่วปนเปื้อนในดิน
สำหรับการเพาะปลูกพืช



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2566

EFFECT OF ELECTROMAGNETIC FIELD WAVES ON THE
REMEDICATION OF CONTAMINATED SOIL FOR CROP CULTIVATION



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2023

ผลกระทบจากการใช้คลื่นสนามไฟฟ้าต่อการกำจัดสารตะกั่วปนเปื้อนในดิน
สำหรับการเพาะปลูกพืช

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ดร.อภิชาติ อินทรพานิชย์)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.สำราญ สันทาลุนย์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.ชาญชัย ทองโสภะ)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

จรรยา ภาควิชา : ผลกระทบจากการใช้คลื่นสนามไฟฟ้าต่อการกำจัดสารตะกั่วปนเปื้อน
ในดินสำหรับการเพาะปลูกพืช (EFFECT OF ELECTROMAGNETIC FIELD WAVES ON THE
REMEDICATION OF CONTAMINATED SOIL FOR CROP CULTIVATION) อาจารย์ที่ปรึกษา :
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สำราญ สันทาลุนย์, 89 หน้า.

คำสำคัญ: ดินปนเปื้อนสารตะกั่ว/การให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ/ความเข้มของสนามไฟฟ้า/
คุณสมบัติไดอิเล็กตริก

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากดินปนเปื้อนสารตะกั่วหลังการบำบัดด้วยคลื่น
ความถี่วิทยุ (RF) และได้ทำการวิเคราะห์ผลด้วยการวัดค่าไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับ
อย่างกว้างขวาง และสำหรับสารตะกั่วที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ สารตะกั่วอะซิเตตไตรไฮเดรต (LEAD
(II) ACETATE 3-HYDRATE) ที่มีคุณสมบัติสามารถละลายน้ำได้ โดยตัวอย่างดิน 100 กรัม จะถูก
ปนเปื้อนสารตะกั่วที่ความเข้มข้น 200 600 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความชื้นต่ำและ
กำหนดการทดสอบด้วยเงื่อนไขระหว่างกลุ่มตัวอย่างดินที่จะนำไปผ่านการทดสอบ RF กับกลุ่ม
ตัวอย่างดินที่ไม่ได้ผ่านการทดสอบ RF เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นหลังการทดสอบ ซึ่งในการ
ทดสอบจะใช้คลื่นความถี่วิทยุ (RF) พร้อมแผ่นอิเล็กโทรดคู่ ส่งคลื่นสนามไฟฟ้าไปยังตัวอย่างดินภายใต้
ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกัน (112.5 150 225 และ 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร) ผลลัพธ์แสดง
ให้เห็นว่าอุณหภูมิของดินขณะทดสอบจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามความเข้มข้นสารตะกั่วและความเข้ม
สนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น การพิจารณาผลลัพธ์จากกราฟอุณหภูมิสำหรับความแรงของสนามไฟฟ้าที่
แตกต่างกันทำให้เห็นว่าอุณหภูมิสูงสุดจะเกิดที่ดินปนเปื้อนความเข้มข้นสารตะกั่วมากที่สุดไปยังความเข้ม
น้อย ตามลำดับ สำหรับการเปรียบเทียบการวัดค่าของไดอิเล็กตริก ทั้งที่มีและไม่มีทดสอบด้วย RF
บ่งชี้ว่าค่าไดอิเล็กตริกลดลงเรื่อย ๆ เมื่อความเข้มข้นของสารตะกั่วเพิ่มขึ้น และเมื่อนำไปเปรียบเทียบ
กับดินที่ได้รับการทดสอบด้วย RF ภายใต้ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกัน พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็ก
ตริกจะเข้าใกล้ค่าไดอิเล็กตริกของดินปกติที่ไม่ได้รับการทดสอบด้วย RF และการเปลี่ยนแปลงที่สังเกต
ได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้ความแรงของสนามไฟฟ้าที่ 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร ซึ่งให้เห็นว่าการ
ทดสอบด้วยคลื่นความถี่วิทยุอาจนำไปสู่การปรับปรุงคุณภาพของดินที่ปนเปื้อนสารตะกั่ว การศึกษานี้
ให้ข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับศักยภาพในการปรับปรุงคุณภาพดินผ่านการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจาก
กระบวนการ RF ในดินที่ปนเปื้อนสารตะกั่ว ตามที่เห็นได้จากค่าไดอิเล็กตริกที่ใกล้เคียงกันกับค่าคงที่
ไดอิเล็กตริกของดินที่ไม่มีการปนเปื้อนสารตะกั่ว และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาต่อยอด
เพื่อการศึกษาในการกำจัดสารปนเปื้อนในดินชนิดอื่น ๆ ได้อีกต่อไป



สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนักศึกษา.....*จวิน*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

JARIYA PAKPROM: EFFECT OF ELECTROMAGNETIC FIELD WAVES ON THE
REMEDICATION OF CONTAMINATED SOIL FOR CROP CULTIVATION.
THESIS ADVISOR: ASST. PROF. SAMRAN SANTALUNAI, Ph.D., 89 PP.

Keyword: LEAD CONTAMINATED SOIL/RADIO FREQUENCY HEATING/ELECTRIC FIELD
STRENGTH/DIELECTRIC PROPERTIES

This research is a study of the impact of soil contamination with lead compounds after treatment with radiofrequency (RF) waves, analyzed by measuring dielectric properties. Lead compounds used in this study include lead (II) acetate trihydrate, which is water-soluble. Soil samples of 100 grams were contaminated with lead compounds at concentrations of 200, 600, and 1,000 milligrams per liter under low moisture conditions. The samples were divided into two groups, one underwent RF testing and the other did not, to observe post-testing changes. RF testing used radiofrequency waves along with paired electrodes, delivering electric field waves to soil samples at different field strengths (112.5, 150, 225, and 450 kilovolts per meter). Results showed that soil temperature increased steadily with increasing concentrations of lead compounds and electric field strengths. Analysis of temperature graphs for different electric field strengths indicated that the maximum temperature occurred in the most heavily contaminated soil with the highest electric field strength, followed by the lower concentrations in sequence. Comparing dielectric measurements with and without RF testing showed a steady decrease in dielectric values with increasing lead compound concentrations. Comparing these values to those of soil without RF testing under different electric field strengths showed that the dielectric constant values approached those of normal, uncontaminated soil. Particularly noticeable changes were observed under a field strength of 450 kilovolts per meter, suggesting that RF testing may lead to improved soil quality in contaminated soils. This study provides valuable information on the potential for improving soil quality through changes induced by RF processes in lead-contaminated soil. The similarity in dielectric values between contaminated and uncontaminated soil suggests the potential for further

development and application in studying the removal of contaminants from other types of soil in the future.



School of Electronic Engineering
Academic Year 2023

Student's Signature.....*Jariya*
Advisor's Signature.....*S. W.*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สำราญ สันทาลุนย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ ปรีกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไข วิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภาก อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้การแนะนำ ชี้แนะ และคำปรึกษาการทำวิจัย รวมทั้งช่วย ตรวจและแก้ไขเนื้อหาวิทยานิพนธ์มาโดยตลอดจนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนเสฏฐ์ ทศศิกรพัฒน์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรม อิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำปรึกษาทางวิชาการมาโดยตลอด

ขอขอบคุณที่ น้อง บัณฑิตนักศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่คอยให้ ความช่วยเหลือ และคอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนใน การทำวิจัย รวมถึงบุคลากรทุกท่านที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยนี้

ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างสูงต่ออาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ได้เผยแพร่ความรู้ทาง วิชาการที่สำคัญทั้งในอดีตและปัจจุบัน ขอขอบพระคุณบิดา มารดา รวมทั้งญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุก ท่านที่ได้ให้การอบรมและเลี้ยงดู ด้วยความรักและอบอุ่นเสมอมา รวมถึงการสนับสนุนทางการศึกษา อย่างไม่หยุดยั้ง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสุภาพซึ่งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในช่วงเวลาที่ผู้วิจัยพบ ความทุกข์ใจและท้อแท้ ทำให้สามารถทำสำเร็จการศึกษาไปได้อย่างเต็มที่ สุดท้ายผู้วิจัยขอแสดงความ ขอขอบคุณที่ล้ำลึกแก่บิดา มารดา และญาติพี่น้องที่ได้เป็นกำลังใจและเสมอภาคในทุกสถานการณ์ ทั้ง ๆ ที่ผู้วิจัยได้รับความสำเร็จจากวิทยานิพนธ์นี้ มันเป็นผลมาจากความทุ่มเทและพยายามของทุกท่านที่มี ส่วนร่วมในการสร้างเสริมสร้างให้เกิดผลงานที่ดีขึ้นได้

จรียา ภาคพรหม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฌ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	4
1.4 สมมติฐานของการวิจัย.....	4
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.8 นวัตกรรมของงานวิจัยนี้.....	6
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 กล่าวนำ.....	7
2.2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงการฟื้นฟูด้วยไฟฟ้าจลศาสตร์.....	7
2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	21
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	34
2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงการฟื้นฟูด้วยไฟฟ้าจลศาสตร์.....	34
2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	36
2.3.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงการฟื้นฟูด้วยไฟฟ้าจลศาสตร์.....	37
2.3.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงการฟื้นฟูด้วยไฟฟ้าจลศาสตร์	44
2.3.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	45
2.4 สรุป	46
3 การวางแผนรูปแบบการทดสอบ	47
3.1 กล่าวนำ.....	47
3.2 รูปแบบการทดลองสำหรับระบบการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ	47
3.2.1 การวิเคราะห์ผลของวัสดุที่มีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้า	48
3.2.2 การวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติของโพลติไดอิเล็กตริก	49
3.3 รูปแบบการทดสอบตัวอย่างดินปนเปื้อนด้วยคลื่นสนามไฟฟ้า	50
3.3.1 การออกแบบการทดสอบระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง.....	51
3.3.2 การเตรียมตัวอย่างดินปนเปื้อนสารตะกั่วสำหรับการทดสอบ	53
3.4 สรุป	55
4 ผลการทดสอบและการอภิปรายผล.....	57
4.1 กล่าวนำ	57
4.2 การทดสอบระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง	57
4.3 การทดสอบระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงกับโพลติไดอิเล็กตริก.....	60
4.4 ผลการใช้พลังงานของระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง	62
4.5 สรุป	69
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	70
5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	70
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	71
5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	71
รายการอ้างอิง	72
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	84
ประวัติผู้เขียน	89

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความถี่และความยาวคลื่น.....	39
3.1 คุณสมบัติของการเตรียมตัวอย่างดิน.....	49
4.1 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวอย่างดินปนเปื้อนสารตะกั่วที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	66



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การบำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยไฟฟ้า 8
2.2	กลไกการขนส่งชั้นพื้นฐานเกิดจากการประยุกต์ใช้กระแสไฟฟ้า..... 9
2.3	แผนผังของอุปกรณ์ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าจลน์ที่มีการแลกเปลี่ยนขั้ว 10
2.4	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสำหรับการฟื้นฟูด้วยไฟฟ้าจลน์แบบธรรมดา..... 11
2.5	การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของดินสำหรับการบำบัดด้วยไฟฟ้าโคเนติกส์แบบทั่วไป 11
2.6	ส่วนที่เหลือของตะกั่วหลังจากการฟื้นฟูด้วยไฟฟ้าโคเนติกส์แบบทั่วไป 12
2.7	ค่าการกระจายตัวในดิน 12
2.8	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยมีช่วงการกลับขั้ว 48 ชม. 13
2.9	การกระจายตัวของสารตะกั่วในดินหลังการแก้ไขด้วยไฟฟ้าโคเนติกส์ด้วยการเปลี่ยนขั้ว..... 13
2.10	แผนผังของอุปกรณ์ทดลอง 14
2.11	การเคลื่อนย้ายของตะกั่วหลังเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมง 14
2.12	ความเข้มข้นตะกั่วของดินเทียบกับเวลา 15
2.13	แผนผังของเครื่องทดสอบ 16
2.14	การเปลี่ยนของปริมาณการระบาย EO พร้อมเวลาสำหรับวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ 16
2.15	การเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าตามเวลาสำหรับวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ..... 17
2.16	ค่าสัมประสิทธิ์การใช้พลังงานสำหรับวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ..... 17
2.17	การกระจายของความเข้มข้นของตะกั่ว..... 18
2.18	การกระจายความเข้มข้นสารตะกั่วของโครเมียมและนิกเกิล 18
2.19	ความสามารถในการรับน้ำหนักของดินสำหรับวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ 19
2.20	การเปลี่ยนแปลงของตะกั่ว 19
2.21	แผนผังการติดตั้ง..... 20
2.22	เปอร์เซ็นต์การกำจัดสารตะกั่วระหว่าง 3 รูปแบบ 20
2.23	เปอร์เซ็นต์การกำจัดสารตะกั่วระหว่าง 2 รูปแบบ 21
2.24	ความร้อน RF ของดินทรายที่ปนเปื้อนเทียม 22
2.25	ภาพตารางข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับเมทริกซ์ของดิน..... 24

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.26 ภาพตารางการเปรียบเทียบระหว่างความเข้มข้นของ Pb ที่ถูกขัดขวาง.....	24
2.27 ภาพตารางข้อมูลเบี่ยงหลังเกี่ยวกับ Pb ตั้งเดิมในตัวดูดซับ	25
2.28 ภาพตารางการอนุรักษ์ตะกั่ว.....	25
2.29 ภาพตารางเปอร์เซ็นต์การชะล้าง.....	25
2.30 ภาพตารางผลของปริมาณผงซีเมนต์ต่อความเข้มข้นของ pH และ Pb	26
2.31 ภาพตารางผลของเวลาบำบัดความร้อนต่อความเข้มข้นของ TCLP และค่า LP	26
2.32 ภาพตารางผลของปริมาณตัวดูดซับของตะกั่ว ใน TCLP น้ำชะล้าง และเปอร์เซ็นต์การชะล้าง.....	26
2.33 ภาพตารางข้อมูลที่ใช้ในการติดตั้งแบบจำลองการดูดซับระหว่าง การทดสอบ TCLP ของดิน ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน	27
2.34 ภาพตารางค่าคงที่สำหรับไอโซเทอร์มของ Freundlich และ Langmuir.....	27
2.35 ภาพตารางผลกระทบของอัตราการไหลของอากาศต่อเปอร์เซ็นต์การชะล้างของ Pb.....	27
2.36 ภาพตารางผลของเวลาการบำบัดด้วยความร้อนต่อเปอร์เซ็นต์การชะล้างของ Pb จากดิน ที่บำบัดในโหมด fluidized-bed	28
2.37 การไหลของกระบวนการที่เรียบง่ายของเทคโนโลยีความร้อนต่ำ	29
2.38 ภาพตารางคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของดินก่อนและหลังการบำบัดความร้อน.....	29
2.39 ภาพตารางการตรวจหาสารปรอทตกค้างในดินก่อนและหลังการรักษาความร้อน	30
2.40 ภาพตารางการสะสมปรอท (Hg) ทางชีวภาพในส่วนที่กินได้ของพืชผล.....	30
2.41 การกระจายของปรอทในส่วนต่าง ๆ ของพืชผลทั้งหมด.....	31
2.42 แผนผังของระบบทำความร้อน RF.....	32
2.43 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของดินปนเปื้อนที่ไม่อิ่มตัวและตัวอย่างดินปนเปื้อนอิ่มตัว ก่อนและ หลังกระบวนการให้ความร้อนด้วย RF.....	33
2.44 ลักษณะการเคลื่อนของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้า.....	36
2.45 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	38
2.46 อะตอมระหว่างประจุบวกต่อประจุลบของตัวกลาง.....	41
2.47 รูปแบบการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกด้วยความถี่สูง	42
2.48 รูปแบบตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต	44

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1	รูปแบบการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่สูง 48
3.2	การวัดค่าตัวอย่างของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง..... 50
3.3	เครื่องกำเนิดความร้อนความถี่สูงที่สามารถปรับความเข้มสนามไฟฟ้าได้ 51
3.4	การวัดสัญญาณความถี่ที่เกิดจากระบบโดยการใช้วิธีการเหนี่ยวนำ 52
3.5	กล้องถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรด 53
3.6	ตัวอย่างดินก่อนและหลังกรองขนาดอนุภาคความละเอียดสำหรับการทดสอบ..... 54
3.7	ตัวอย่างดินปนเปื้อนสารตะกั่วที่ระดับความชื้นต่ำ..... 55
4.1	ตัวอย่างการวัดดินปนเปื้อนที่ความเข้มของสนามไฟฟ้า 112.5 กิโลโวลต์ต่อเมตร..... 58
4.2	ตัวอย่างการวัดดินปนเปื้อนที่ความเข้มของสนามไฟฟ้า 150 กิโลโวลต์ต่อเมตร 58
4.3	ตัวอย่างการวัดดินปนเปื้อนที่ความเข้มของสนามไฟฟ้า 225 กิโลโวลต์ต่อเมตร 59
4.4	ตัวอย่างการวัดดินปนเปื้อนที่ความเข้มของสนามไฟฟ้า 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร 59
4.5	อุณหภูมิดินความชื้นต่ำปนเปื้อนตะกั่วที่ความเข้มของไฟฟ้า 112.5 กิโลโวลต์ต่อเมตร 60
4.6	อุณหภูมิดินความชื้นต่ำปนเปื้อนตะกั่วที่ความเข้มของไฟฟ้า 150 กิโลโวลต์ต่อเมตร 61
4.7	อุณหภูมิดินความชื้นต่ำปนเปื้อนตะกั่วที่ความเข้มของไฟฟ้า 225 กิโลโวลต์ต่อเมตร 61
4.8	อุณหภูมิดินความชื้นต่ำปนเปื้อนตะกั่วที่ความเข้มของไฟฟ้า 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร 62
4.9	ผลทดสอบตัวอย่างดินความชื้นต่ำที่ความเข้มของไฟฟ้า 112.5 กิโลโวลต์ต่อเมตร 63
4.10	ผลทดสอบตัวอย่างดินความชื้นต่ำที่ความเข้มของไฟฟ้า 150 กิโลโวลต์ต่อเมตร 64
4.11	ผลทดสอบตัวอย่างดินความชื้นต่ำที่ความเข้มของไฟฟ้า 225 กิโลโวลต์ต่อเมตร 64
4.12	ผลทดสอบตัวอย่างดินความชื้นสูงที่ความเข้มของไฟฟ้า 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร..... 65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 การถูกผลึกให้ติดกับแผ่นเพลทด้านบนของดินปนเปื้อนสารตะกั่ว ที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 112.5 กิโลโวลต์ต่อเมตร	67
4.14 การถูกผลึกให้ติดกับแผ่นเพลทด้านบนของดินปนเปื้อนสารตะกั่ว ที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 150 กิโลโวลต์ต่อเมตร	67
4.15 การถูกผลึกให้ติดกับแผ่นเพลทด้านบนของดินปนเปื้อนสารตะกั่ว ที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 225 กิโลโวลต์ต่อเมตร	68
4.16 อุณหภูมิดินความชื้นต่ำปนเปื้อนตะกั่วที่ความเข้มข้นของไฟฟ้า 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร	68



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันจากการปนเปื้อนในสภาพแวดล้อมของโลหะหนักส่งผลที่เป็นพิษโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อมกลายเป็นปัญหาร้ายแรงของคนทั้งโลก (Akpomie K.G. et al. 2018) เนื่องจากโลหะหนักไม่สามารถย่อยสลายและกำจัดออกจากระบบนิเวศได้ เพราะมีความเสถียรและยังก่อให้เกิดปัญหาสุขภาพที่เลวร้ายกับสิ่งมีชีวิตบนบกและใต้น้ำ (Mustafa S. et al. 2008) นอกจากนี้ มลพิษในดินได้กลายเป็นปัญหาร้ายแรงที่ต้องได้รับการแก้ไข (Xu S. et al. 2020) เนื่องจากเป็นภัยต่อความมั่นคงของอาหารทั้งโลกด้วย (Reddy V.A. et al. 2020) และไม่ได้เป็นเพียงอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตเท่านั้นแต่ยังเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมทั่วโลกอีกด้วย (Konate A. et al. 2017) (Moghal A.A.B. et al. 2015) โลหะหนักที่อาจเป็นพิษมากที่สุดชนิดหนึ่งคือตะกั่ว ซึ่งตะกั่วจัดอยู่ในประเภทไอออนบวกที่ละลายน้ำได้และให้ความเข้มข้นสูง (McBride M.B., 1994) ตะกั่วสามารถทำให้เกิดโรคที่ทำให้ร่างกายอ่อนแอลงได้ เนื่องจากทำให้เกิดการกระทบต่อร่างกายอย่างถาวร ยิ่งกว่านั้นคือในระบบประสาทส่วนกลางที่นำไปสู่โรคประสาท (Coen N. et al. 2001) (Dolk H. et al. 2003)

ตะกั่ว (Pb) ซึ่งเป็นโลหะหนักที่อาจเป็นพิษ จึงเป็นที่น่าสนใจมากขึ้น และเกิดการกระจายในวงกว้างและความเสี่ยงที่จะเกิดกับสิ่งแวดล้อม โดยที่การปนเปื้อนของตะกั่ว Pb ในดินนั้นไม่เพียงแต่กระตุ้นการเปลี่ยนแปลงในดินและกิจกรรมต่าง ๆ ที่อยู่บนดิน และยังทำให้มีผลกระทบต่อความอุดมสมบูรณ์ทำให้ดินเสื่อมสภาพลง อีกทั้งยังส่งผลต่อพืชผักเกษตร รวมไปถึงคุณภาพของข้าวเสื่อมลง (Majer et al. 2002) และในท้ายที่สุด สารตะกั่วจะสะสมอยู่ในร่างกายของมนุษย์ผ่านทางวัฏจักรการกินอาหารที่เป็นอันตรายกับสุขภาพของมนุษย์ (Liu et al. 2003) การกระทำหรือกิจกรรมต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดปัญหาจากโลหะหนัก เช่น การชุบโลหะ, การทำเหมือง, การผลิตสิ่งทอ, การย้อมสี, การผลิตแบตเตอรี่ เป็นต้น

ปัจจุบันการปนเปื้อนของสารตะกั่ว กลายเป็นปัญหาร้ายแรงต่อภาคการเกษตร เนื่องจากการปนเปื้อนในดินส่งผลกระทบต่อคุณภาพของดินทำให้สิ่งแวดล้อมและสุขภาพมนุษย์แย่ลง (Reddy V.A., et al. 2020) ประชากรที่เพิ่มขึ้นทั่วโลกและอุตสาหกรรมที่เติบโตมาก สร้างแรงกดดันต่อความต้องการที่ดินสำหรับทำเกษตรกรรม (Tilman et al. 2011) พร้อมกับกิจกรรมของมนุษย์ที่เป็นปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการปนเปื้อนดินสำหรับเกษตรกรรม (Rai et al. 2019, Yang et al. 2018) รวมถึงการปนเปื้อนโลหะหนักในดินนาข้าวด้วย (Kien et al. 2010, Williams et al. 2009)

ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เลวร้ายขึ้น โดยเฉพาะกับโรคสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการบริโภคข้าวที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนัก ต้นเหตุมาจากการปนเปื้อนดินในเขตเกษตรกรรม (Mao et al. 2019) ผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์นั้นร้ายแรงมาก ทุกส่วนในร่างกายมนุษย์ล้วนได้รับผลกระทบ ซึ่งระบบประสาทเป็นเป้าหมายที่ได้รับผลกระทบมากที่สุด ทั้งในเด็กและผู้ใหญ่ แต่ความเป็นพิษในเด็กจะมีผลกระทบมากกว่าในผู้ใหญ่ เนื่องจากเนื้อเยื่อของเด็กทั้งภายในและภายนอกมีความอ่อนนุ่มมากกว่าในผู้ใหญ่ ซึ่งการได้รับสัมผัสเป็นเวลานานของผู้ใหญ่อาจทำให้ประสิทธิภาพลดน้อยลง ในการทดสอบประสิทธิภาพการรับรู้บางอย่างที่วัดการทำงานของระบบประสาท ทารกและเด็กเล็กมีความไวต่อสารตะกั่วในระดับต่ำเป็นพิเศษ ซึ่งอาจนำไปสู่ปัญหาด้านพฤติกรรม การขาดดุลการเรียนรู้ และทำให้ IQ ลดลง (Rubin & Strayer, 2008) แม้ว่าในประเทศต่าง ๆ เช่น สหรัฐอเมริกา และแคนาดา จะมีการควบคุมการใช้สารตะกั่วในบางส่วน แต่ยังคงพบเจอการใช้สารตะกั่วอย่างรุนแรงในประเทศที่กำลังพัฒนา (Latif Wani A. et al. 2015) อีกทั้งยังก่อปัญหาที่ร้ายแรงต่อสิ่งมีชีวิตได้น้ำและบนบก โดยตะกั่วยังมีความคงทน เนื่องจากตะกั่ว (Pb) เป็นโลหะหนักที่มีค่าการนำไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับโลหะอื่น ๆ และตะกั่วมีองค์ประกอบที่ไม่จำเป็น ทำให้เกิดผลสำคัญต่อกระบวนการเผาผลาญของพืช ซึ่งระดับความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในดินก็พบว่าเป็นสิ่งสำคัญ อาจจะมีผลทั้งในด้านดีหรือด้านไม่ดีต่อการเจริญเติบโตและการพัฒนาของพืช ความเป็นพิษของตะกั่วในพืชมักเกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของราก รูปร่างที่ผิดปกติในพืชบางชนิด อีกทั้งทำให้เกิดความเครียดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ลดการผลิตสารชีวมวล ยับยั้งการงอก และกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ดังนั้นการปรากฏไอออนตะกั่วในดินที่ความเข้มข้นต่างกัน อาจจะทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบนิเวศตามธรรมชาติ ซึ่งทั่วโลกคาดว่า การปนเปื้อนของตะกั่ว จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากตรวจพบการใช้งานระดับสูงจากอุตสาหกรรมเกษตร และกิจกรรมภายในประเทศ (Aslam M. et al. 2021) (Yadav S.K. 2010) (Tchounwou P.B. et al. 2014) (Shahzad B. et al. 2018) (Horablaga A. et al. 2020) ซึ่งสารปนเปื้อนเหล่านี้ควรถูกกำจัดออกจากสิ่งแวดล้อมโดยเร็ว โดยวิธีการบำบัดฟื้นฟูที่ถูกต้องและเหมาะสม

แนวทางการจัดการในการแก้ไขปัญหา ถูกค้นพบวิธีการต่าง ๆ ดังนี้ การแลกเปลี่ยนไอออน, การไดอะไลซิสด้วยไฟฟ้า, การกรองนาโน, การตกตะกอนด้วยสารเคมี, การจับตัวเป็นก้อน, รีเวิร์สออสโมซิส, การลอยตัว (Khulbe K.C. and Matsuura T., 2018), การสกัดจากตัวทำละลาย, การเผาไหม้ (incineration), การระเหย (volatilization), การดูดซับโดยใช้ความร้อน (thermal absorption) และการใช้วิธีทางชีวภาพ (biological techniques) (SEPA, 2005) รวมถึงการล้างดิน การฝังกลบ การใช้พืช การกลายเป็นแก้ว การชะล้างในแหล่งกำเนิด เป็นต้น

การล้างดิน เป็นกระบวนการการแยกสิ่งสกปรกที่ถูกดูดซึมไปยังอนุภาคดินโดยใช้สารละลาย น้ำผ่านกระบวนการแยกขนาด การแยกแรงแด้วยแรงโน้มถ่วง กระบวนการล้างดินนี้ขึ้นอยู่กับสารละลายที่ใช้ในการล้างเพื่อเคลื่อนย้ายโลหะหนักโดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นจากสารละลาย ความเป็น

กรดและเบส และการเปลี่ยนแปลงสภาพรวมของสารละลาย สารละลายที่เหมาะสมควรปรับปรุงความ
 ลำลองและการเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อนโลหะหนัก แต่ต้องมีการปฏิสัมพันธ์อ่อนกับส่วนประกอบ
 ของดิน และควรสามารถถูกย่อยสลายและไม่มีผลที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตได้

การฝังกลบดิน เป็นเทคนิคการฟื้นฟูดินที่ง่ายที่สุด ในเทคนิคนี้ดินที่ปนเปื้อนถูกนำออกจากที่
 ต้นทางและขนพาไปที่บ่อกำจัดที่ปลอดภัยสำหรับการกำจัด ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีซีลล์กันน้ำ, ระบบ
 ระบายน้ำหลุมสำหรับน้ำหล่อเลี้ยง, และรั้วกัน การทิ้งถล่มเป็นเทคนิคที่มีชื่อเสียงสำหรับการทำลาย
 สารปนเปื้อนในน้ำเสีย มันเป็นวิธีทิ้งขยะที่ถูกใช้บ่อยที่สุดในสหรัฐอเมริกา เนื่องจากระยะทางที่
 ใหญ่ระหว่างที่เป็นที่เสี่ยงและบ่อกำจัดที่ปลอดภัย ต้นทุนรวมของการทิ้งถล่มดินในสหรัฐอเมริกา
 ระหว่าง 300 ดอลลาร์ต่อตันถึง 500 ดอลลาร์ต่อตัน (FRTR, 2012)

การบำบัดด้วยแสง เป็นการบำบัดด้วยพืชประเภทหนึ่ง คือการสกัดพืชโดยใช้พืชเพื่อดูดซับ
 สารปนเปื้อน จากนั้นจึงเก็บเกี่ยวและบำบัดหรือกำจัดพืช ในกระบวนการนี้ ส่วนใหญ่มักเสนอสำหรับ
 โลหะหนักและสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์อื่น ๆ บางชนิด เช่น สารหนู ดินจะปลูกด้วยสายพันธุ์ที่มีความ
 ความสัมพันธ์สูงต่อสารปนเปื้อน (Yan et al., 2020) พืชชนิดนี้เรียกว่า “ไฮเปอร์แอคคิวมูเลเตอร์”
 ในกระบวนการนี้ส่วนใหญ่มักเสนอสำหรับโลหะหนักและสิ่งปนเปื้อนอินทรีย์อื่น ๆ บางชนิด เช่น
 สารหนู โดยการปลูกพืชที่มีความเกี่ยวข้องสูงกับสารปนเปื้อน (เช่น Yan et al., 2020) พืชที่เรียกว่า
 “ไฮเปอร์แอคคิวมูเลเตอร์” นี้จะทำให้โลหะเคลื่อนย้ายจากดินและเก็บรักษาไว้ในเนื้อเยื่อของพืช ซึ่ง
 ในหลายกรณี พืชเหล่านี้สามารถเคลื่อนย้ายสารโลหะหนักผ่านท่อลำเลียงของพืชไปยังส่วนที่อยู่เหนือ
 พื้นดิน เช่น ลำต้นและใบ ซึ่งสามารถเก็บเกี่ยวและกำจัดเป็นระยะ ๆ ได้ และสารปนเปื้อนที่เป็นโลหะ
 จะค่อย ๆ ถูกกำจัดออกจากดิน ซึ่งกระบวนการนี้มักจะมิต้นทุนที่ต่ำกว่าด้วยวิธีอื่น การบำบัดด้วยแสง
 ยังได้รับการเสนอเพื่อสารปนเปื้อนอินทรีย์บางชนิด ตัวอย่างเช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl₄)
 แสดงให้เห็นว่าถูกนำขึ้นมาจากน้ำพุร้อนในดินและกำจัดคลอรีนโดยต้นป้อปลาร์ (Wang et al., 2004)

การแปรเปลี่ยนให้เป็นแก้ว เทคโนโลยีนี้ใช้พลังงานทางไฟฟ้าเพื่อทำให้ดินละลายเพื่อให้เกิด
 การทำให้มีความมั่นคงทางกายภาพหรือเคมีได้ การแปรเปลี่ยนให้เป็นแก้วไม่เหมาะสำหรับดินที่มี
 สารอินทรีย์มาก (7%) และความชื้นสูง (10%) ไม่สามารถใช้กับดินที่ถูกปนเปื้อนมากกับสารอินทรีย์ที่มี
 ความหนักการได้หรือเปลวไปได้ เพื่อให้การแปรเปลี่ยนให้เป็นแก้วสำเร็จ ควรมีปริมาณที่เพียงพอของ
 กะไดเยนท้อลคาไลน์เมียนต์ (โซเดียมและโพแทสเซียม) ต้องอยู่ในดิน (Meuser, 2013)

อย่างไรก็ตาม วิธีต่างๆ เหล่านี้เป็นวิธีการใช้พลังงานอย่างมากและมีราคาแพง และเป็น
 วิธีการที่ใช้ขั้นตอนที่หลากหลาย รวมถึงวิธีการซึ่งนำมาสู่การใช้สารเคมีที่ซับซ้อน แต่ในทางกลับกัน
 เทคโนโลยีการให้ความร้อนในดินทางการเกษตรด้วยคลื่นความถี่สูง การใช้วิธีนี้สามารถลดค่าใช้จ่าย
 และยังเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งความร้อนไปยังดิน สามารถปรับเทียบการรักษาตามระยะเวลาการ
 สัมผัสและการกระจายอุณหภูมิได้ รวมถึงปรากฏการณ์ความร้อนไดอิเล็กตริกและการถ่ายเทความร้อน
 (Noyes, 1991) การให้ความร้อนแบบอเล็กทรอนิกส์โดยตรงด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่

วิทยุ (RF) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการต่าง ๆ ในด้านสิ่งแวดล้อม โดยระบุว่าการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่สูง (RF) สามารถใช้กับการฟื้นฟูดินโดยการสกัดไอของดินหรือการย่อยสลายทางชีวภาพ และการให้ความร้อนแบบ RF โดยใช้ความถี่ในช่วงเมกะเฮิรตซ์ มีข้อดีเฉพาะบางประการเมื่อเปรียบเทียบกับ การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ โดยทั้งสองวิธีการนี้มีหลักการของการป้อนพลังงานโดยตรงเข้าไปในปริมาณจำกัด แต่การให้ความร้อนแบบอิเล็กทรอนิกส์โดยตรงด้วยคลื่นความถี่สูง (RF) สามารถใช้กับปริมาณความร้อนที่มากขึ้นได้ เนื่องจากคลื่นวิทยุสามารถแทรกซึมลึกเข้าไปได้มากขึ้น นอกจากนี้ กลไกการให้ความร้อนแบบอิเล็กทรอนิกส์โดยตรงด้วยคลื่นความถี่สูง (RF) ไม่ได้ผูกมัดโดยเคร่งครัด ดังนั้นวัสดุที่หลากหลายรวมถึงวัสดุที่แห้ง สามารถให้ความร้อนได้อย่างดีและมีประสิทธิภาพ (Roland U. et al., 2012)

เทคโนโลยีการให้ความร้อน RF เกี่ยวข้องกับการใช้สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงกับชุดของขั้วไฟฟ้าแบบขนานที่กำหนดเป็นตัวเก็บประจุ โดยตัวกลางที่จะถูกทำให้ร้อนจะถูกประกอบอยู่ระหว่างแผ่นเพลทอิเล็กโทรด และกระแสไฟสลับจะไหลผ่านตัวกลาง เป็นผลให้โมเลกุลที่มีขั้วในตัวกลางจัดเรียงตัวและหมุนในลักษณะตรงกันข้ามเพื่อให้ตรงกับสนามไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ ความร้อนเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลมีขั้วทำปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียง ส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียโครงสร้าง อีกทั้งเกิดแรงเสียดทานขณะหมุน ยิ่งความถี่ของสนามไฟฟ้าสลับสูงเท่าใด พลังงานที่ส่งไปยังตัวกลางก็จะยิ่งมากขึ้นเท่านั้น จนกระทั่งความถี่สูงจนโมเลกุลที่หมุนไม่สามารถไล่ตามสนามภายนอกได้อีกต่อไปเนื่องจากข้อจำกัดของโครงสร้าง ความถี่ที่ข้อจำกัดของโครงสร้างเกิดขึ้นเรียกว่า "Debye resonance" เป็นความถี่ที่สามารถจ่ายพลังงานสูงสุดให้กับตัวกลางสำหรับความแรงของสนามไฟฟ้าที่กำหนด

การบำบัดหรือฟื้นฟูด้วยความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (RF) เป็นระบบทำความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้แผ่นอิเล็กโทรดคู่ซึ่งจะให้การแทรกซึมที่มากกว่าระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ เนื่องจากมีความถี่ต่ำกว่า และประโยชน์จากการใช้เครื่องให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก ซึ่งการให้ความร้อนในรูปแบบนี้นั้นจะมีคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของพลังงานความร้อน ที่ประกอบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกโดยตรง ด้วยช่วงระยะความถี่ที่เหมาะสม ดังนั้น เทคนิคนี้จึงไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อวัสดุอื่น ๆ ซึ่งโครงสร้างจะใช้หลักการสเปกตรัมความถี่ ซึ่งเป็นสนามไฟฟ้าเพื่อถ่ายโอนพลังงานไปยังวัสดุโพลิตที่มีโมเลกุลขั้วเรโซแนนซ์ของโมเลกุลที่เกิดขึ้นในวัสดุไดอิเล็กตริกและคลื่นความร้อนจะถูกสร้างขึ้นอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ และมีการใช้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกกับการใช้งานในรูปแบบที่หลากหลาย (Myungsik K. and Kwangsoo K., 2012) ซึ่งชี้ให้เห็นว่า การใช้ระบบทำความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุแบบแผ่นอิเล็กโทรดคู่กับดินที่ปนเปื้อนอาจเป็นประโยชน์สำหรับการบำบัดดินในประเทศไทย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาและออกแบบรูปแบบการวัดเพื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการใช้คลื่นสนามไฟฟ้า RF ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อการกำจัดหรือลดสารตะกั่วในดินแบบเดิม เพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์ในรูปแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

การเกิดขึ้นของสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเพลตสองชั้นสามารถทำให้เกิดการผลึกสารโลหะหนักที่ไหลตโดอิเล็กทริก โดยการตอบสนองในย่านความถี่ที่ใช้งาน สนามไฟฟ้านี้ทำให้สามารถช่วยกำจัดสารตะกั่วในดินได้

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาหาข้อมูลในการทดสอบเครื่องให้ความร้อนโดยใช้คลื่นความถี่วิทยุ เพื่อให้ได้ความถี่ที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

1.4.2 ทำการทดสอบและเก็บผลการทดลอง

1.4.3 วิเคราะห์ประสิทธิภาพของความร้อนแบบไดอิเล็กทริกด้วยการวัดค่าปัจจัยในการสูญเสียไดอิเล็กทริก

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1.5.1 แนวทางการดำเนินงานวิจัย

- 1) ทำการศึกษาปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- 2) เตรียมดินสำหรับการตรวจสอบ
- 3) ทำการทดสอบตัวอย่างดินและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

1.5.2 ระเบียบวิธีวิจัย

1) ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูล โดยการศึกษาปรีทัศน์วรรณกรรมบริการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

2) วิเคราะห์ ออกแบบ และศึกษาข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือต่อรูปแบบการเตรียมดินสำหรับการทดสอบ

3) ทดสอบวัดค่าไดอิเล็กทริกด้วยเครื่องมือวัดและวิธีการที่เหมาะสมและทำการเก็บผลการทดสอบ

1.5.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการ สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อาคารเครื่องมือ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

1.5.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1) เครื่องวิเคราะห์เครือข่าย Agilent Technologies (E5071C) และคอมพิวเตอร์ที่มีซอฟต์แวร์เสริมเพื่อใช้ในการวิเคราะห์

2) คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

1.5.5 การเก็บรวบรวมข้อมูลจากการทดลอง

1) ทำการเก็บรวบรวมผลการทดลองและข้อมูลจากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมที่มีความเกี่ยวข้อง

2) รวบรวมข้อมูลจากการตรวจสอบตัวอย่างดินที่เตรียมไว้

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้ทราบค่าไดอิเล็กตริกของดินที่ปนเปื้อนสารตะกั่ว

1.6.2 ได้วิธีการบำบัดดินปนเปื้อนสารตะกั่วโดยใช้หลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก

1.7 นวัตกรรมของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการศึกษางานวิจัยที่กล่าวถึงผลกระทบจากการใช้คลื่นสนามไฟฟ้าเพื่อกำจัดสารตะกั่วปนเปื้อนในดิน โดยการศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวอย่างดินที่มีการปนเปื้อนสารตะกั่วในช่วงความถี่ 200 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 10 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยเฉพาะการวิเคราะห์ความแตกต่างในย่านความถี่ 40.68 เมกะเฮิร์ตซ์ นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาวิธีการของการเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าของอนุภาค ที่ผลกระทบการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก และความเข้มของสนามไฟฟ้าความถี่สูง การวิเคราะห์คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวอย่างดินที่มีการปนเปื้อนสารตะกั่วในช่วงความถี่ 200 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ช่วยในการระบุความแตกต่างระหว่างตัวอย่างดินที่ผ่านกระบวนการ RF และตัวอย่างดินที่ไม่ผ่านกระบวนการ RF ณ ความถี่ 40.68 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการกำจัดสารตะกั่วปนเปื้อนในดิน นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเรื่องการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามไฟฟ้าส่งผลกระทบจากการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก และความเข้มของสนามไฟฟ้าความถี่สูง ซึ่งเป็นการตรวจสอบครั้งแรกเพื่อยืนยันความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความเข้มสนามไฟฟ้าที่สำคัญในกระบวนการนี้

1.8 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

ในส่วนของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 5 บท ดังนี้

บทที่ 1 เป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ตามด้วยวัตถุประสงค์ของการวิจัย สมมติฐานของการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และนวัตกรรมของงานวิจัย

บทที่ 2 ปรัชญาบรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการศึกษาคุณสมบัติทั่วไปของสารตะกั่ว ซึ่งประกอบไปด้วย สารประกอบอนินทรีย์ และอินทรีย์ รวมไปถึงสาเหตุการปนเปื้อนที่เข้าสู่สิ่งแวดล้อมโดยมาจากธรรมชาติและมนุษย์สร้างขึ้น และการศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคไฟฟ้า รวมถึงการศึกษาในงานวิจัยนี้มีหัวข้อการศึกษาหลัก ๆ

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบวิธีการทดสอบ การวิเคราะห์คุณสมบัติไดอิเล็กตริก ซึ่งประกอบไปด้วยออกแบบความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง และการวางแผนศึกษาผลกระทบความเข้มสนามไฟฟ้าต่อการจำกัดสารปนเปื้อนตะกั่วในดิน

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบและการอภิปรายผล การทดสอบการให้ความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงกับโพล्टไดอิเล็กตริก ผลจากการใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ความเข้มต่างกัน และผลจากการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของดินที่ปนเปื้อนสารตะกั่ว

บทที่ 5 เป็นการกล่าวสรุปผลการวิจัย ปัญหาที่เกิดขึ้นกับงานวิจัยนี้ ข้อเสนอแนะ และแนวทางพัฒนาในอนาคต

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

บทความนี้ได้มีการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ ซึ่งในการศึกษานี้ประกอบไปด้วย คุณสมบัติทั่วไปของสารตะกั่ว สารประกอบอินทรีย์ และอินทรีย์ รวมถึงสาเหตุการปนเปื้อนที่เข้าสู่สิ่งแวดล้อม จากทั้งธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ การศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคไฟฟ้ามีบทสรุปในหัวข้อหลัก ๆ ได้แก่ การศึกษาผลของระบบทำความร้อนไดอิเล็กตริกต่อการลดการปนเปื้อนของสารตะกั่วในดินปลูก โดยใช้หลักการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่สูง การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่สูง มีการใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อแผ่กระจายคลื่นส่งต่อไปยังวัสดุที่ต้องการให้ความร้อน ความรู้และความเข้าใจในคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกของวัสดุในการใช้งานคลื่นความถี่เป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบตัวส่งสัญญาณและระบบใช้งานคลื่นความถี่ การถ่ายเทความร้อนด้วยคลื่นไฟฟ้ามีหลักการเบื้องต้น รวมถึงสมการที่ใช้ในการใช้คลื่นความถี่ด้วยความถี่วิทยุ คุณลักษณะของตัวเหนี่ยวนำ และการสรุปผล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดปนเปื้อนของสารตะกั่วในดินปลูก โดยนำข้อมูลต่าง ๆ มาวิเคราะห์และปรับปรุงการออกแบบเพื่อลดปริมาณสารปนเปื้อนในดินชนิดนี้ นอกจากนี้ยังพูดถึงหลักการเบื้องต้นสำหรับการกระจายความร้อนด้วยคลื่นความถี่สูง และหลักการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้า รวมถึงสมการที่ใช้สำหรับการใช้คลื่นความถี่ด้วยความถี่วิทยุ และคุณลักษณะของตัวเหนี่ยวนำ เพื่อให้ผู้อ่านได้ความเข้าใจในเนื้อหาที่นำเสนอ และสรุปผล

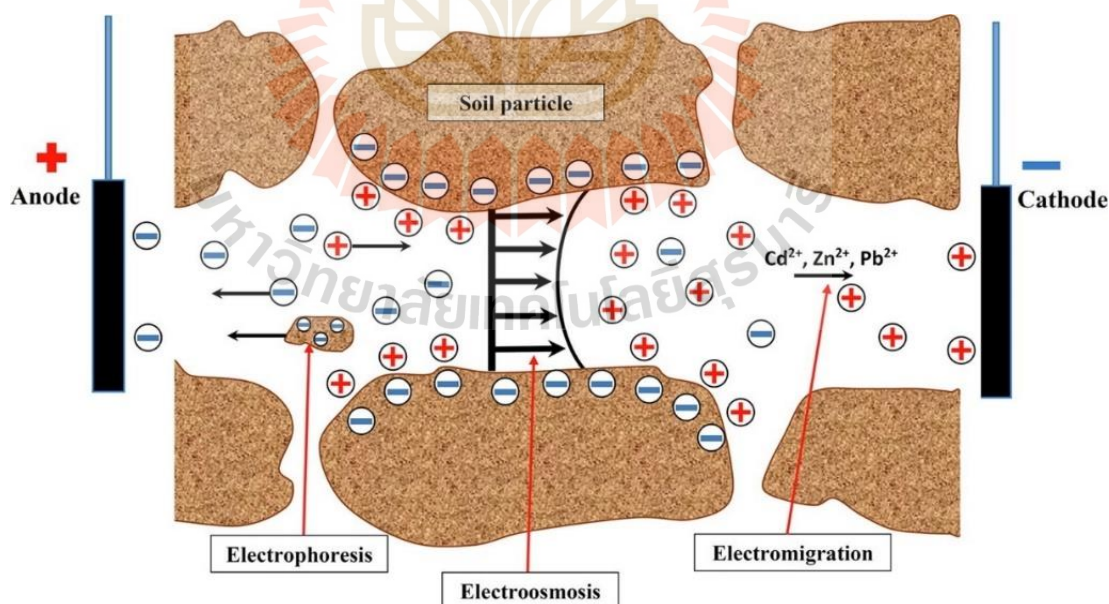
2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อให้ได้เข้าใจถึงแนวทางและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การศึกษานี้มุ่งเน้นการสำรวจทิศทางความเป็นไปได้ในงานวิจัย ปัญหาที่เกิดขึ้น และข้อเสนอแนะต่าง ๆ การศึกษานี้จะถูกพัฒนาขึ้นจากข้อมูลที่เก็บรวบรวมจากผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่และข้อมูลที่เชื่อถือได้จากแหล่งข้อมูลชั้นนำ เช่น ฐานข้อมูล ScienceDirect, IEEE และ SCOPUS รวมถึงการค้นหาข้อมูลจากท้องถิ่นและนานาชาติที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อที่นำเสนอ ซึ่งประกอบไปด้วยงานวิจัยสองหัวข้อหลัก ๆ ได้แก่ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงการฟื้นฟูด้วยไฟฟ้าจากงานวิจัย และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการให้พลังงานด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยแต่ละหัวข้อหลักนี้ ได้กล่าวถึงปัญหา วิธีการทดสอบ การทดสอบ และ

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบของงานวิจัย ทำให้ทราบถึงแนวทางในการนำมาประยุกต์ใช้ ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์และนำมาใช้ในการวางแผนงานวิจัยต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงการฟื้นฟูด้วยไฟฟ้าจลนศาสตร์

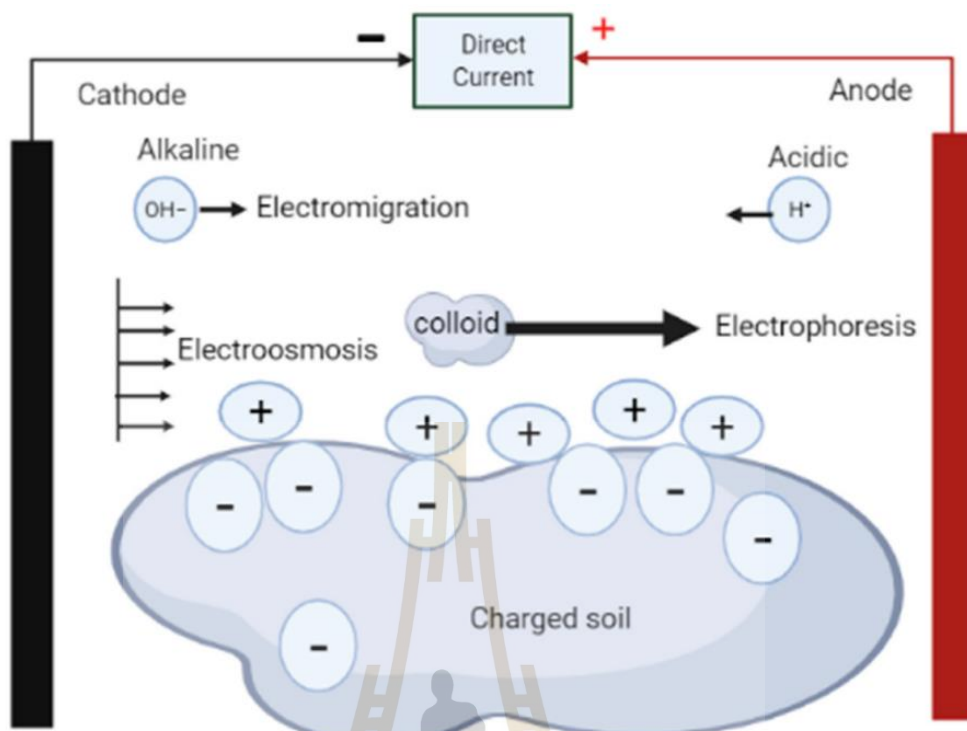
จากผลการวิจัยของ Hossein Beyrami (Hossein B., 2021) เกี่ยวกับการศึกษาการบำบัดดินที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนักอย่าง Zn, Cd, และ Pb ในจังหวัดแซนจอน ของอิหร่านโดยใช้วิธีการบำบัดด้วยไฟฟ้า การศึกษานี้ทดลองใช้วิธีอิเล็กโทรโคเนติกแบบทั้งสองขั้ว โดยมีข้อมูลความเข้มข้นของโลหะหนักในดิน และผลกระทบจากปริมาณความชื้นในดินและแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด และผลการทดลองพบว่า การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักได้ โดยการบำบัดด้วยกรดเอทิลีนไดเอมีนเตตระแอสีติก (EDTA) ซึ่งเป็นสารช่วยปรับ pH ช่วยจับโลหะหนักออกจากน้ำ โดยการกำจัดโลหะหนักที่มีความเข้มข้นอยู่ในระดับสูงสุดพบว่าได้ผลดี เมื่อความชื้นลดลงเหลือ 0.7 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางฟุต จะมีการกำจัดโลหะหนักลดลง แต่สูงสุดที่สามารถขจัดได้คือ แคดเมียม ซึ่ง สังกะสี และ ตะกั่ว ยังคงมีปัญหาอยู่ในระดับสูงกว่า สรุปคือ การบำบัดดินที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนักด้วยวิธีการบำบัดด้วยไฟฟ้าเป็นวิธีที่ดีในการขจัดโลหะหนักออกจากดิน การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าและการใช้กรดเอทิลีนไดเอมีนเตตระแอสีติก (EDTA) ในกระแสไฟฟ้าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก แต่ยังคงมีความจำเป็นในการพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อกำจัดโลหะหนักอย่าง Zn และ Pb ให้ได้ประสิทธิภาพยิ่งขึ้นในอนาคต



รูปที่ 2.1 การบำบัดดินที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนักด้วยวิธีการบำบัดด้วยไฟฟ้า

โดยรวมแล้วผลลัพธ์ที่แตกต่างกันของการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเกรเดียนต์ในกระบวนการบำบัด โดยมีการเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการบำบัดโลหะหนักที่มีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเกรเดียนต์ที่แตกต่างกัน ผู้เขียนเสนอว่าผลลัพธ์ที่ได้รับจะแตกต่างกันไปในบางประการเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก ในกระบวนการบำบัดโลหะหนักในโลหะที่เข้าใกล้และใช้การบำบัดด้วยกรดเอทิลีนไดเอมีนเตตระแอสีติก (EDTA) การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเกรเดียนต์จาก 1.33 โวลต์ต่อเซนติเมตร ถึง 2.66 โวลต์ต่อเซนติเมตร ได้เพิ่มประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดสังกะสี แคดเมียม และตะกั่ว นอกจากนี้ เคมีบางชนิด เช่น กรดเอทิลีนไดเอมีนเตตระแอสีติก (EDTA) ยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการบำบัดโลหะหนักที่ใช้ไฟฟ้าได้

จากผลการวิจัยของ Brian Gidudu (Gidudu B., 2022) กล่าวว่าการศึกษาการฟื้นฟูด้วยไฟฟ้าได้แสดงให้เห็นศักยภาพที่ดีในการฟื้นฟูสภาพแวดล้อมที่ปนเปื้อน เทคโนโลยีนี้สามารถกำจัดโลหะหนัก คลอโรฟีนอล โพลีคลอโรไบบีฟีนิล ฟีนอล ไตรคลอโรอีเทน เบนซีน โทลูอิน เอทิลเบนซีน และไซลีน (BTEX) และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนปิโตรเลียมทั้งหมดได้อย่างมีประสิทธิภาพ การฟื้นฟูด้วยไฟฟ้าใช้อิเล็กโทรลีส อีเล็กโทรออสโมซิส อีเล็กโทรโฟรีซิส การแพร่กระจาย และการย้ายถิ่นด้วยไฟฟ้า เป็นกระบวนการพื้นฐานห้กระบวนการในการบรรลู่การชำระล้างสภาพแวดล้อมที่ปนเปื้อน กระบวนการทั้งหมดขึ้นอยู่กับค่าของ pH แรงดันไฟฟ้า อีเล็กโทรด และอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในระบบเคมีไฟฟ้า ในการใช้เทคโนโลยีนี้ในระดับภาคสนาม จำเป็นต้องออกแบบกระบวนการที่มีประสิทธิภาพโดยมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานความยั่งยืนระดับโลก ดังนั้นจะต้องเข้าใจบทบาทของกระบวนการพื้นฐานและปฏิสัมพันธ์ของกระบวนการเหล่านี้ในการบรรลู่การบำบัดด้วยไฟฟ้าจลน์ที่มีประสิทธิผลและยั่งยืน เพื่อระบุวิธีแก้ปัญหาทางเลือกที่สะอาดกว่า บทความนี้นำเสนอภาพรวมของกระบวนการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการฟื้นฟูด้วยไฟฟ้าโคเนติก โดยมุ่งเน้นไปที่ผลกระทบของ pH อีเล็กโทรด สารลดแรงตึงผิว และอิเล็กโทรไลต์ ใช้สำหรับการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อน และวิธีที่สิ่งเหล่านี้สามารถนำมาพร้อมกับเทคโนโลยีที่สะอาดกว่าหรือสารเติมแต่งทางเลือก เพื่อให้บรรลุผล การฟื้นฟูด้วยไฟฟ้าจลน์แบบยั่งยืน มีการอธิบายปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าจลน์ ตามด้วยการประเมินผลกระทบของ pH สารลดแรงตึงผิว แรงดันไฟฟ้าอีเล็กโทรด เพื่อให้การบำบัดมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

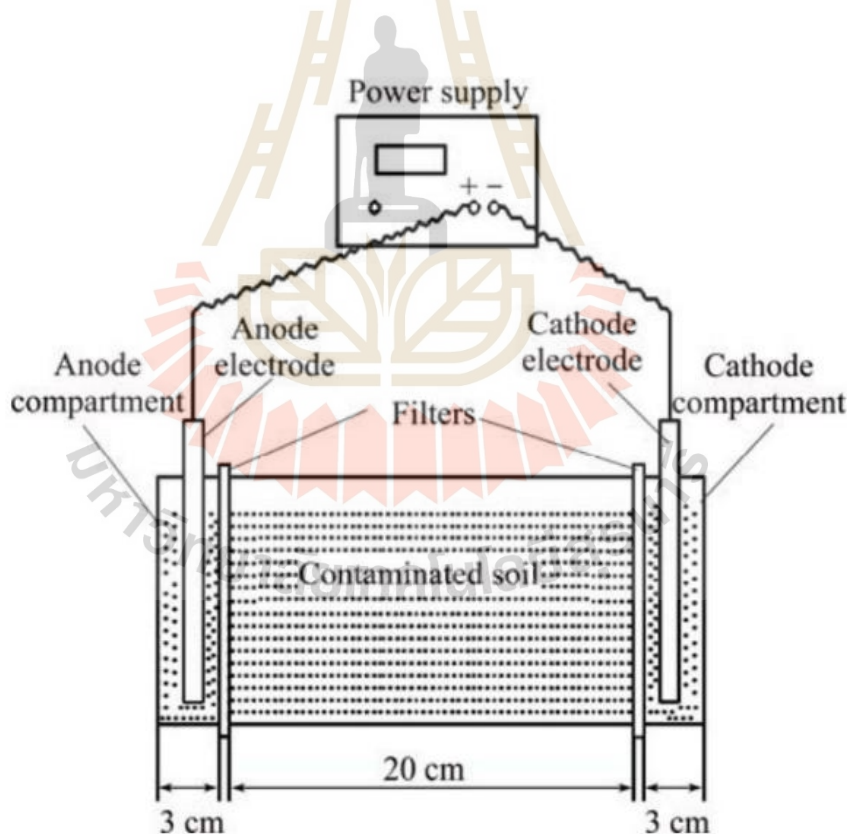


รูปที่ 2.2 กลไกการขนส่งชั้นพื้นฐานที่เกิดจากการประยุกต์ใช้กระแสไฟฟ้า

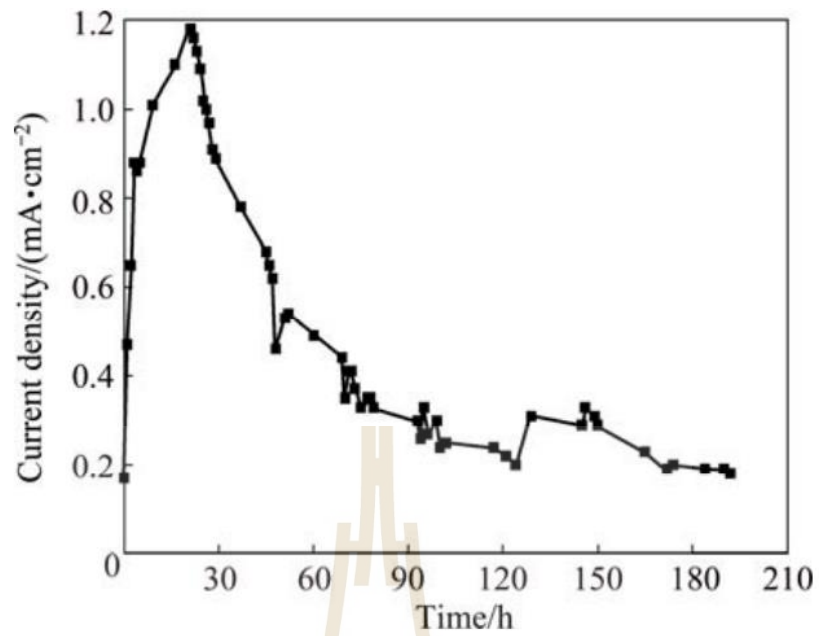
ข้อสรุปจากงานวิจัยนี้กล่าวว่า เนื่องจากการฟื้นฟูด้วยไฟฟ้าเป็นเทคโนโลยีการฟื้นฟูที่มีศักยภาพ เป็นที่ชัดเจนว่าจำเป็นต้องมีการศึกษาภาคสนาม เพื่อเพิ่มความเข้าใจให้มากขึ้นของแรงดันไฟฟ้าอิเล็กโทรไลต์ และสารลดแรงตึงผิวต่อกระบวนการฟื้นฟู จำเป็นมากที่จะต้องควบคุม pH เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบ ที่จะนำไปสู่การตกตะกอนของสารปนเปื้อน การกำหนดค่าอิเล็กโทรด เช่น การเข้าใกล้อิเล็กโทรดและการใช้สารลดแรงตึงผิว สามารถปรับปรุงกระบวนการและปรับค่าใช้จ่ายให้ลดลงด้านพลังงานของกระบวนการฟื้นฟูได้ เนื่องจากอิเล็กโทรดสามารถสักร้อนได้ในระหว่างกระบวนการฟื้นฟู การพิจารณาอิเล็กโทรดเฉื่อยจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อป้องกันการรวมกันของสารประกอบที่เป็นพิษระหว่างการฟื้นฟู นอกจากนี้ อิเล็กโทรดที่ไม่แอคทีฟ เช่น เพชรที่เจือด้วยโบรอน SnO_2 และ PbO_2 ยังสามารถใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการออกซิเดชันของสารมลพิษอินทรีย์ได้ อิเล็กโทรไลต์ไอออนิกยังสามารถใช้สำหรับการเพิ่มหรือขยายความแข็งแรงของไอออนิกของระบบ ในขณะเดียวกันก็ป้องกันการคายน้ำของดินที่อาจเป็นผลมาจากการไหลของของเหลวด้วยไฟฟ้าออสโมติก เพื่อให้กระบวนการฟื้นฟูมีความยั่งยืน สารเติมแต่งในกระบวนการ เช่น สารลดแรงตึงผิวทางชีวภาพ สามารถใช้แทนสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ได้เนื่องจากเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ แหล่งพลังงานที่มีความสะอาดกว่า เช่น พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม สามารถนำมาใช้กับ

การตอบสนองความต้องการของพลังงานที่สูงของกระบวนการฟื้นฟู ซึ่งอาจต้องใช้ไฟฟ้าแรงสูงเพื่อ บรรลุการชำระล้างการปนเปื้อนที่มีประสิทธิภาพ

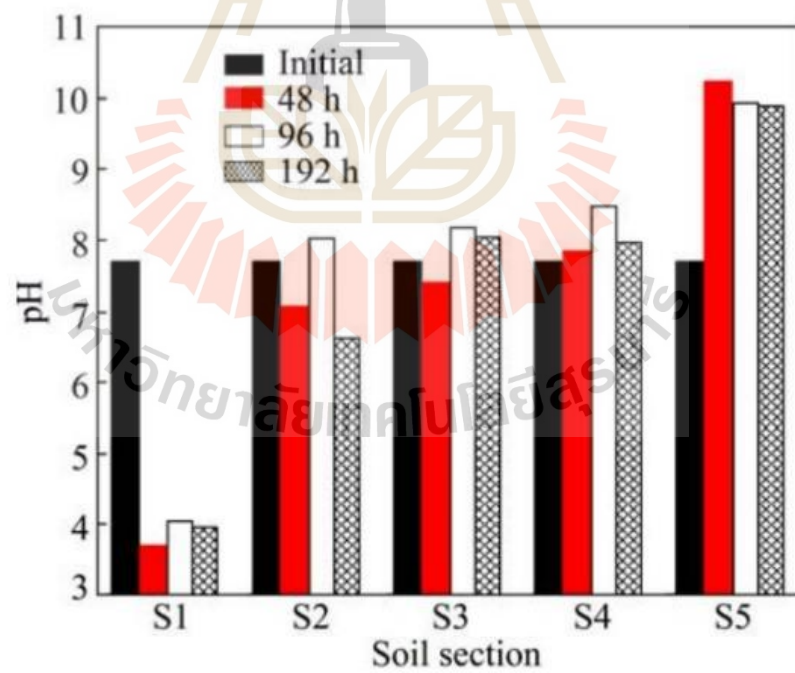
จากผลการวิจัยของ Zong-ping CAI (Cai, Zong-ping, et al. 2015) เกี่ยวกับการศึกษาเพื่อปรับปรุงการฟื้นฟูด้วยไฟฟ้าจลน์แบบเดิมของดินที่ปนเปื้อน Pb ดินที่มีการปนเปื้อน Pb ใกล้กับโรงงานแบตเตอรี่กรดตะกั่วในเขตสามเหลี่ยมปากแม่น้ำเพิร์ลของจีน ได้รับการแก้ไขด้วยไฟฟ้า ด้วยเทคนิคการแลกเปลี่ยนขั้ว พิจารณาความแปรผันของประสิทธิภาพการกำจัด Pb และค่า pH ของดินพร้อมเวลาการบำบัดและช่วงขั้วการแลกเปลี่ยน พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดของ Pb สูงถึง 87.7% เมื่อแรงดันไฟฟ้าไต่ระดับเป็น 1 โวลต์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และช่วงขั้วการแลกเปลี่ยนคือ 48 ชั่วโมง ค่านี้สูงกว่าค่าที่ได้จากการฟื้นฟูด้วยไฟฟ้าแบบธรรมดาตามาก (61.8%) นอกจากนี้ ยังสามารถหลีกเลี่ยง "เอฟเฟกต์การโพกัส" ที่ปรากฏในการแก้ไขด้วยไฟฟ้าโคเนติกแบบทั่วไปได้ และ ดังนั้น ไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีเพิ่มเติมสำหรับเทคนิคการแลกเปลี่ยนขั้ว อธิบายกลไกของพฤติกรรม การย้ายถิ่นด้วยไฟฟ้าของ Pb ในดินระหว่างการบำบัดด้วยเทคนิคการแลกเปลี่ยนขั้ว



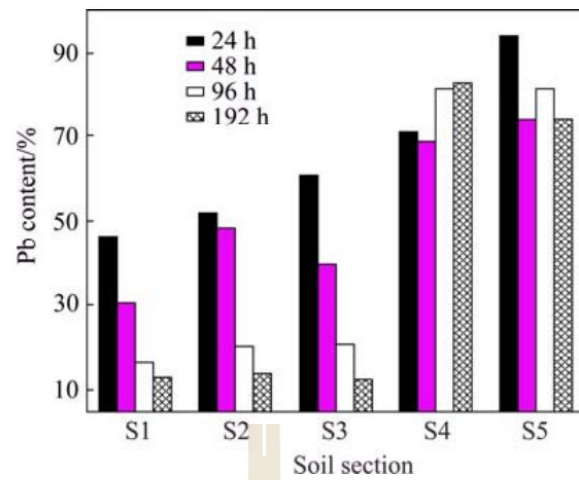
รูปที่ 2.3 แผนผังของอุปกรณ์ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าจลน์ที่มีการแลกเปลี่ยนขั้ว



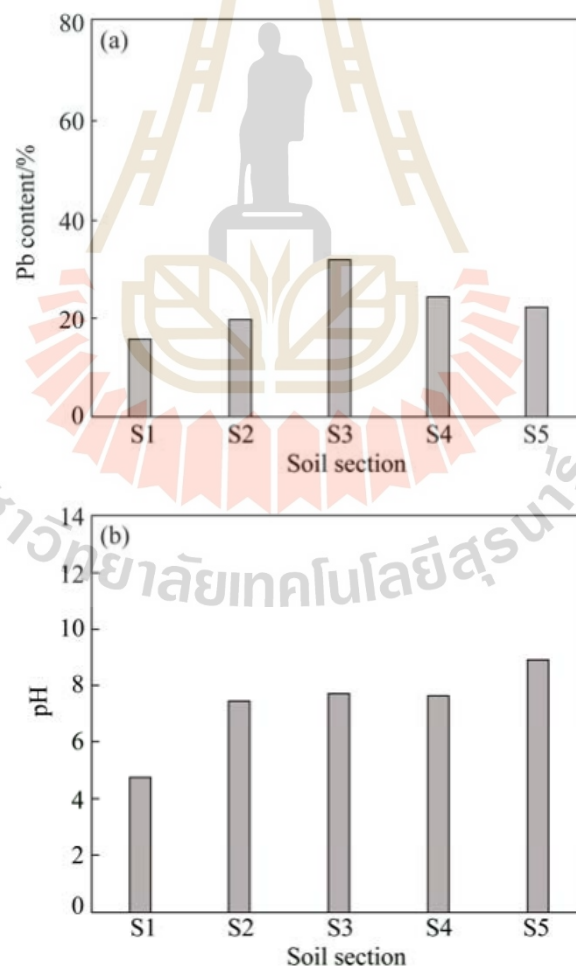
รูปที่ 2.4 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสำหรับการฟื้นฟูด้วยไฟฟ้าจลน์แบบธรรมดา



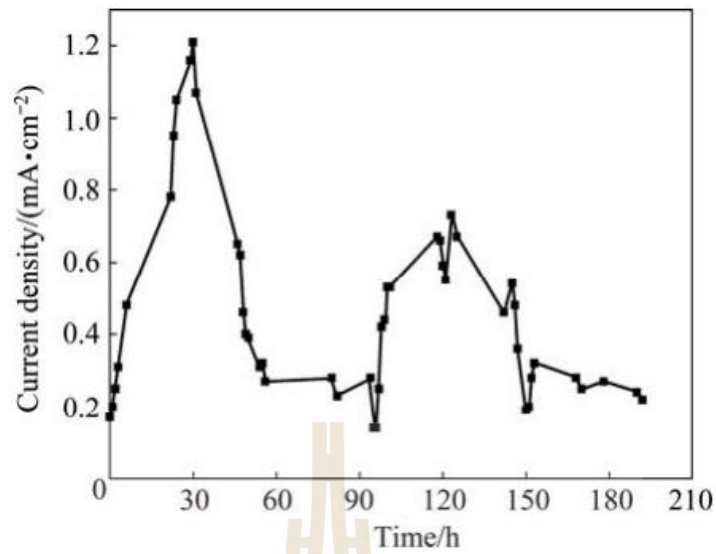
รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของดินสำหรับการบำบัดด้วยไฟฟ้าโคเนติกแบบทั่วไป



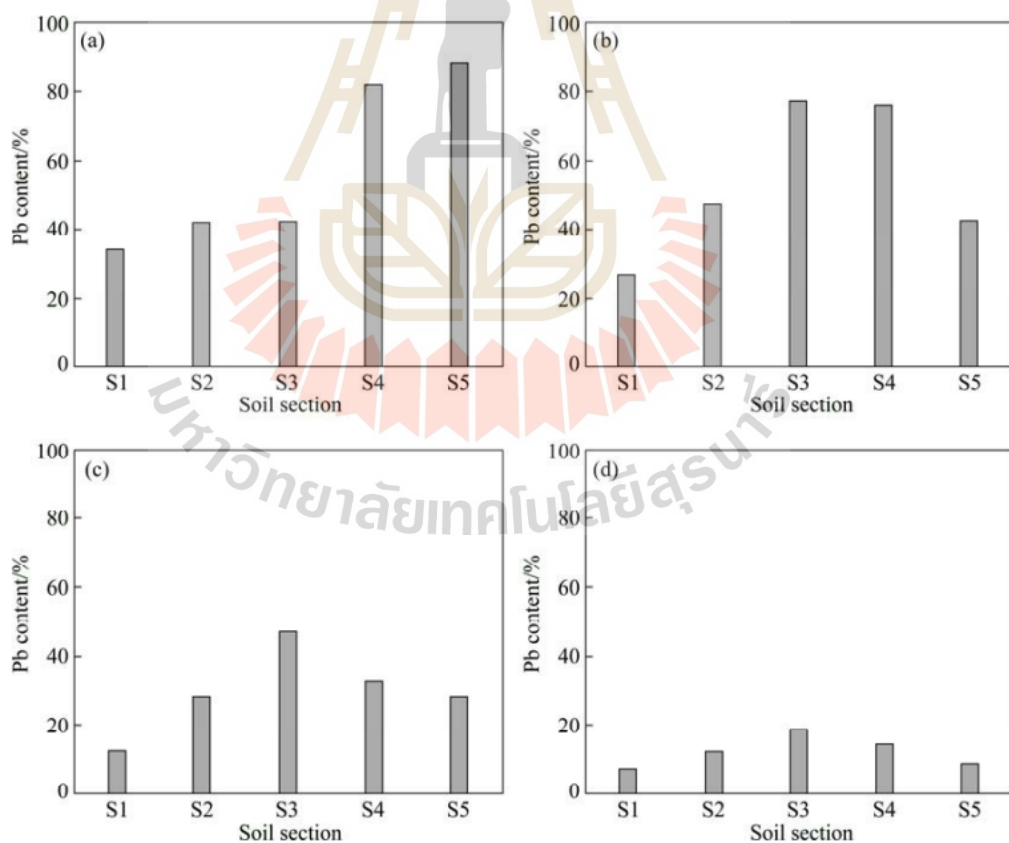
รูปที่ 2.6 ส่วนที่เหลือของตะกั่วหลังจากการฟื้นฟูด้วยไฟฟ้าไฟฟ้าโคเนติกแบบทั่วไป



รูปที่ 2.7 ค่าการกระจายตัวในดิน (a) ค่าตะกั่ว (b) ค่า pH หลังจากการฟื้นฟูด้วยไฟฟ้าแบบแลกเปลี่ยนขั้วเป็นเวลา 192 ชั่วโมง ด้วยช่วงเวลาการกลับขั้ว 96 ชั่วโมง

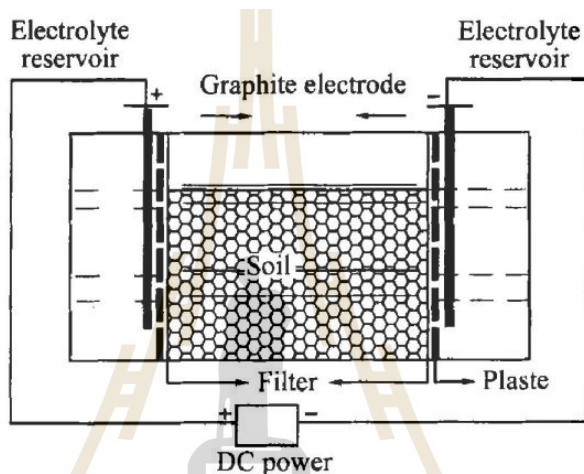


รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยมีช่วงการกลับขั้ว 48 ชม.

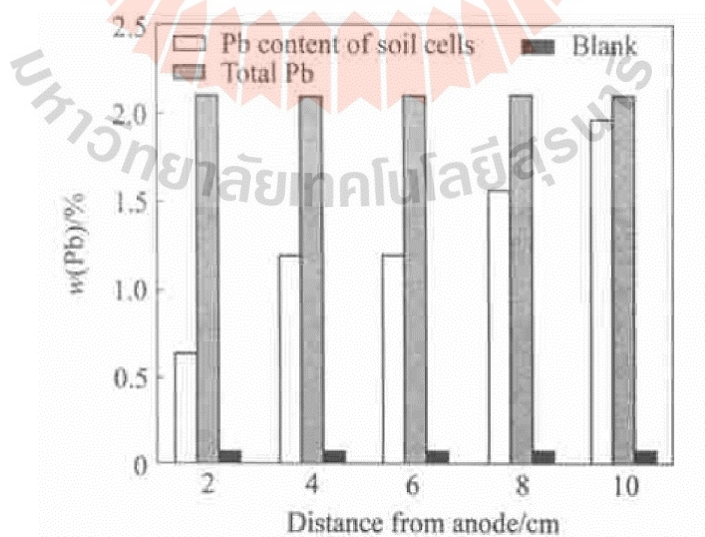


รูปที่ 2.9 การกระจายตัวของตะกั่ว ในดินหลังการแก้ไขด้วยไฟฟ้าโคเนติกด้วยการแลกเปลี่ยนขั้วด้วย ช่วงการกลับขั้วที่ 48 ชั่วโมง สำหรับค่าที่แตกต่างกันเวลาในการรักษา (ก) 48 ชั่วโมง (ข) 96 ชั่วโมง (ค) 144 ชั่วโมง (ง) 192 ชั่วโมง

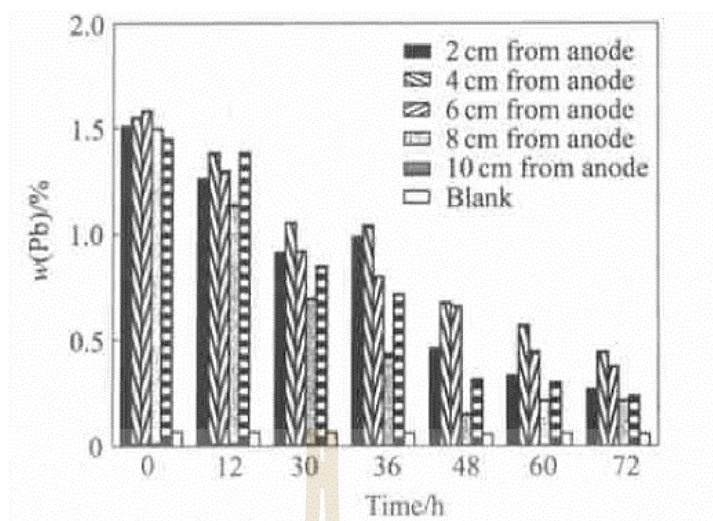
จากการวิจัยของ LIU Yun-guo และคณะ (Liu, Y. G. et al.,2020) ได้ศึกษาการทดสอบการบำบัดด้วยไฟฟ้า ได้ทำการทดลองกับดินแดงที่มีสารตะกั่วปนเปื้อน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดมลพิษจากตะกั่วออกจากดินแดงอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และเพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของดินและประสิทธิภาพการบำบัดด้วยไฟฟ้า ผลลัพธ์จากการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยีการบำบัดด้วยไฟฟ้ามีประสิทธิภาพในการแก้ไขดินสีแดงที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนัก Pb และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดได้โดยการควบคุมค่า pH ในการจัดเก็บแคโทดด้วย HNO_3 ประสิทธิภาพในการกำจัด Pb เพิ่มขึ้นจาก 24.5% เป็น 79.5% และการใช้พลังงานสูงถึง 285 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง



รูปที่ 2.10 แผนผังของอุปกรณ์ทดลอง



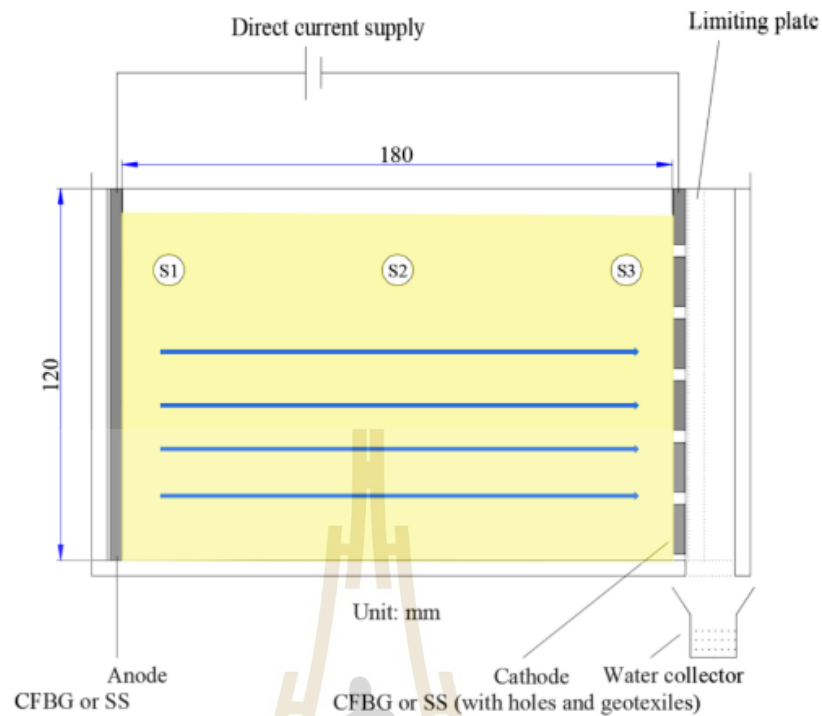
รูปที่ 2.11 การเคลื่อนย้ายของตะกั่วหลังเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมง



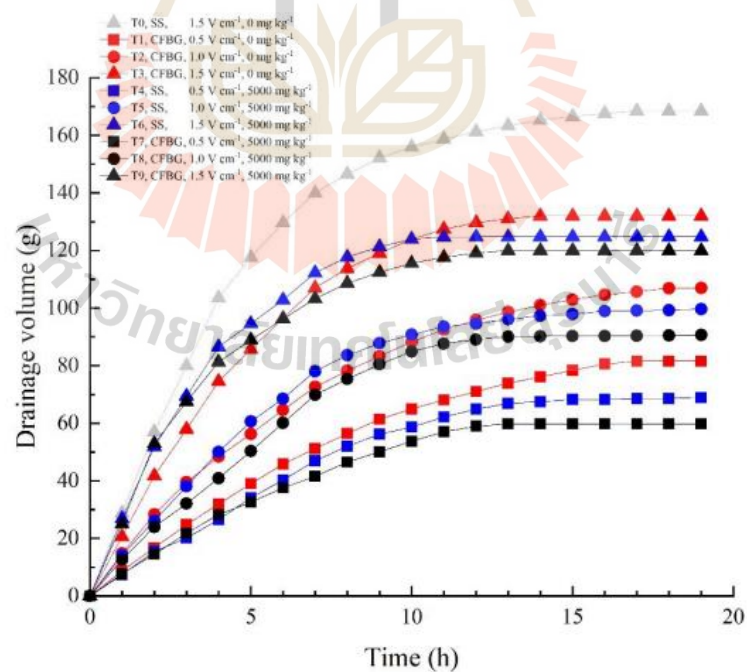
รูปที่ 2.12 ความเข้มข้นตะกั่วของเซลล์ดินเทียบกับเวลา

จากข้อสรุปงานวิจัยนี้กล่าวว่า 1) เทคโนโลยีอิเล็กโทรจอร์นศาสตร์เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการแก้ไขปัญหาดินที่มีการปนเปื้อนด้วยสาร Pb (ตะกอนสีแดง) โดยทำให้สามารถลดปริมาณสาร Pb ในดินได้ 2) การควบคุมด้วยกรดไนโตรเจนิกเช่น HNO_3 เป็นวิธีที่พบว่ามีประสิทธิภาพในการปรับปรุงการบำบัดสาร Pb จากดิน โดยลดการตกตะกอนของ Pb ในบริเวณที่มีการใช้แคโทด ซึ่งจะช่วยให้กระบวนการกำจัดรอยพับเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และการลดแรงดันไฟฟ้าของถังและการประหยัดพลังงานเป็นผลจากการลดปริมาณ Pb ในดิน ทำให้กระบวนการทั้งหมดมีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยรวม

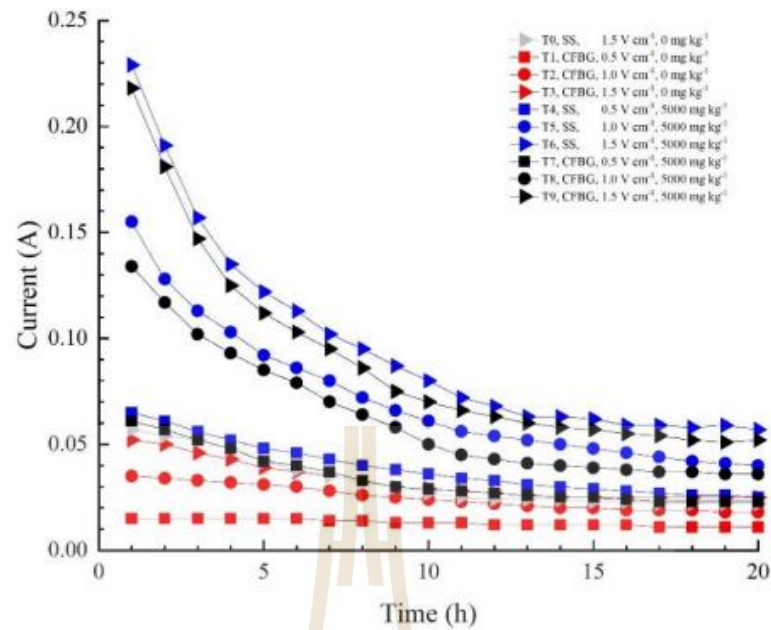
จากการวิจัยของ Shangqi Ge และคณะ (Shangqi G. et al., 2020) ได้ศึกษาการใช้อิเล็กโทรออสโมซิส (EO) ซึ่งพบว่าสามารถปรับปรุงความแข็งแรงของดินอ่อนอย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังสามารถชักนำให้เกิดการอพยพของโลหะหนักในดินได้ อิเล็กโทรดโลหะแบบดั้งเดิมมีข้อบกพร่องมากมายและจำเป็นต้องปรับปรุง งานวิจัยผลกระทบของ Geotextiles ที่ใช้คาร์บอนไฟเบอร์ (CFBGs) เป็นอิเล็กโทรดต่อคุณลักษณะของอิเล็กโทรออสโมซิส (EO) สำหรับการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสารตะกั่ว ผลจากการทดสอบได้แสดงให้เห็นว่า วัสดุ CFBG ทำให้กระแสไฟฟ้าและค่าสัมประสิทธิ์การใช้พลังงานต่ำกว่าอิเล็กโทรดเหล็กกล้าไร้สนิม (SS) ที่ปริมาตรการระบายน้ำใกล้เคียงกัน จึงใช้พลังงานน้อยกว่าอิเล็กโทรด SS ผลการบำบัดของ CFBG ต่อการย้ายตะกั่วหนักกว่าของ SS ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าเฉื่อยของ CFBG นอกจากนี้ การมีตะกั่วปนเปื้อนส่งผลถึงการรับน้ำหนักของดิน มีการกระจายไม่สม่ำเสมอหลังจากใช้อิเล็กโทรออสโมซิส (EO) สุกท้าย การรักษาอิเล็กโทรออสโมซิส (EO) ส่วนใหญ่จะลดปริมาณของเศษส่วนตะกั่วที่แลกเปลี่ยนได้และที่จับกับคาร์บอนเนต ซึ่งเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ที่แข็งแรงของตะกั่วที่แลกเปลี่ยนได้และสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวก



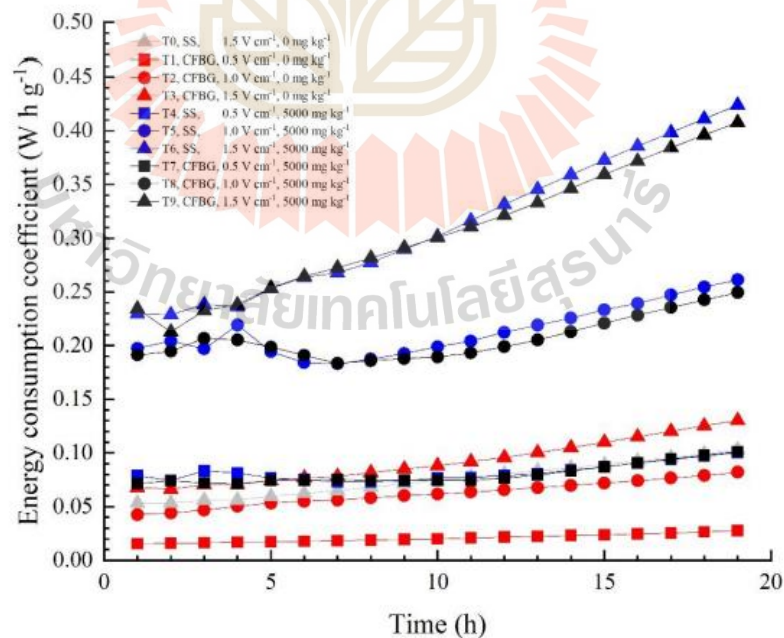
รูปที่ 2.13 แผนผังของเครื่องทดสอบ



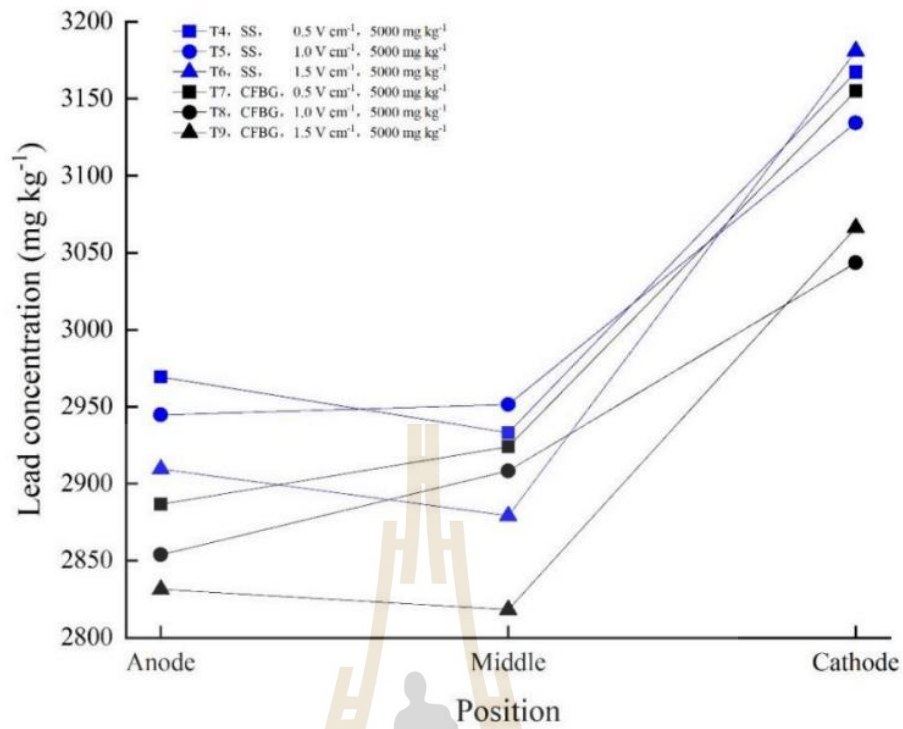
รูปที่ 2.14 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณการระบาย EO พร้อมเวลาสำหรับวัสดุอิเล็กโทรดต่าง ๆ (SS หรือ CFBG) ความต่างศักย์ไฟฟ้า (0.5, 1.0 หรือ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร) และความเข้มข้นของตะกั่ว (0 หรือ 5,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)



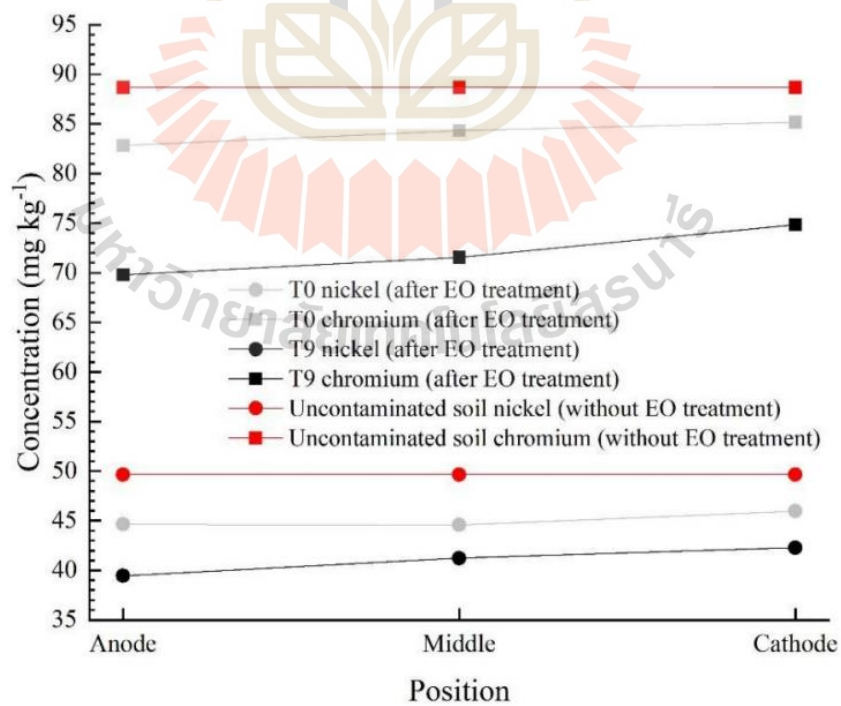
รูปที่ 2.15 การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าตามเวลาสำหรับวัสดุอิเล็กโทรดต่าง ๆ (SS หรือ CFBG) ความต่างศักย์ไฟฟ้า (0.5, 1.0 หรือ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร) และความเข้มข้นของตะกั่ว (0 หรือ 5,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)



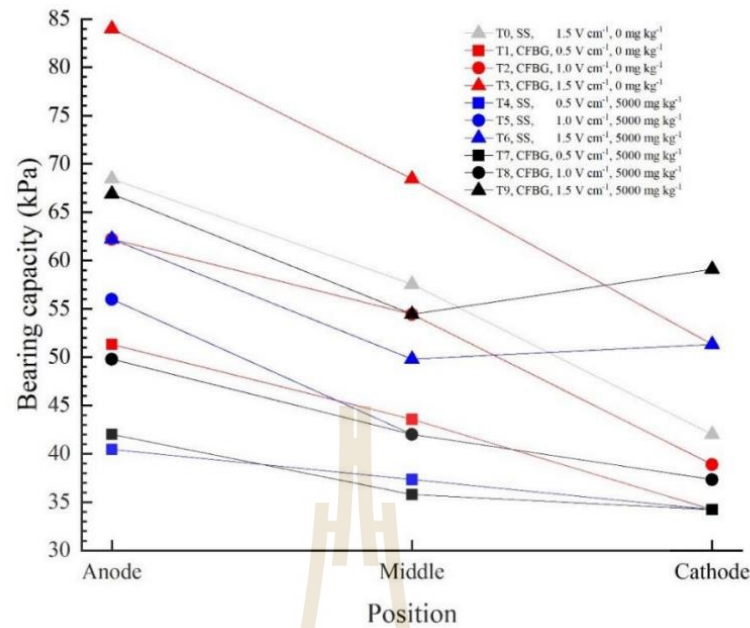
รูปที่ 2.16 ค่าสัมประสิทธิ์การใช้พลังงานสำหรับวัสดุอิเล็กโทรดต่าง ๆ (SS หรือ CFBG) ความต่างศักย์ไฟฟ้า (0.5, 1.0 หรือ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร) และความเข้มข้นของตะกั่ว (0 หรือ 5,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)



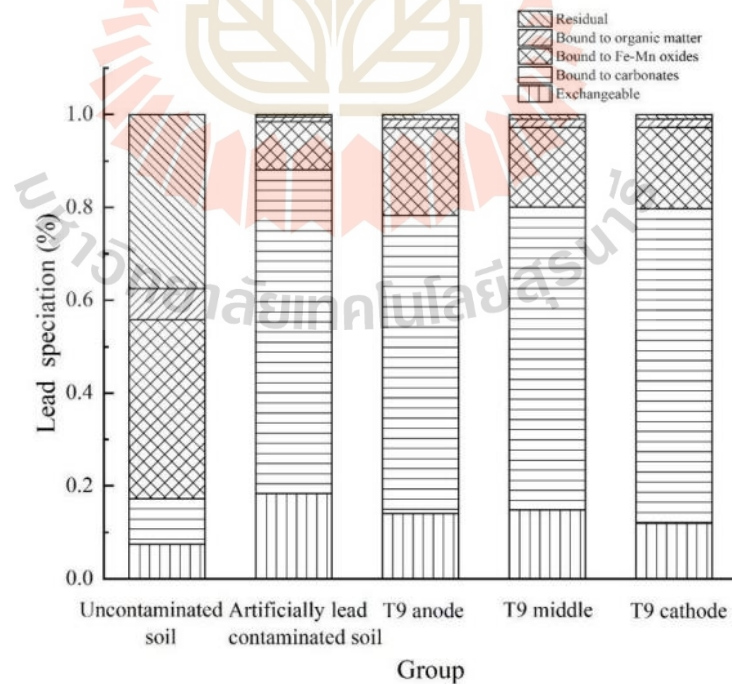
รูปที่ 2.17 การกระจายของความเข้มข้นของตะกั่ว (กลุ่ม T4-T9 หลัง EO)



รูปที่ 2.18 การกระจายความเข้มข้นของตะกั่วของโครเมียมและนิกเกิล (การปนเปื้อนเทียมในกลุ่ม T0, T9 ที่มีการบำบัดด้วย EO หรือไม่ปนเปื้อนโดยไม่มีการบำบัดด้วย EO)



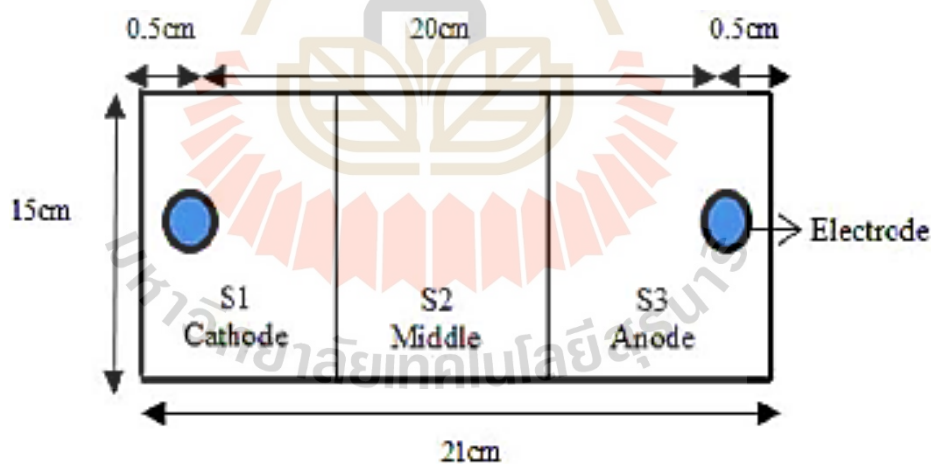
รูปที่ 2.19 ความสามารถในการรับน้ำหนักของดินสำหรับวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ (SS หรือ CFBG) ความต่างศักย์ไฟฟ้า (0.5, 1.0 หรือ 1.5 โวลต์ต่อเซนติเมตร) และความเข้มข้นของตะกั่ว (0 หรือ 5,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)



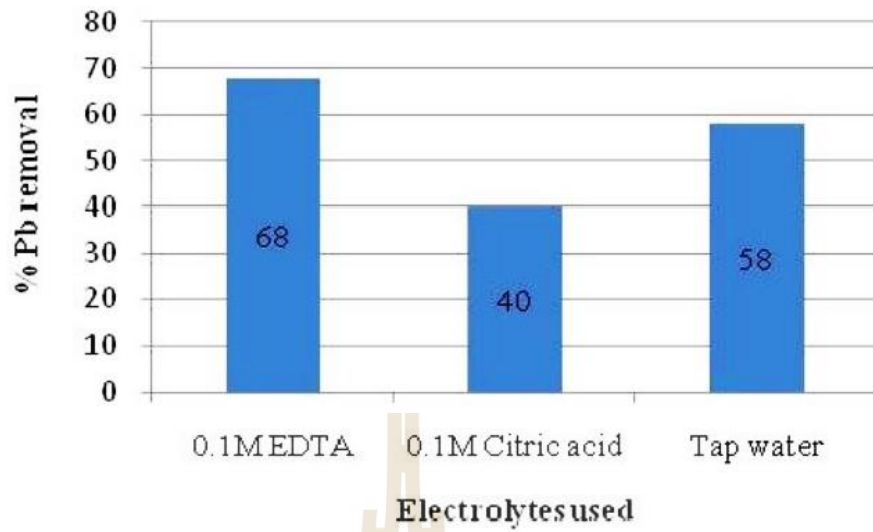
รูปที่ 2.20 การเปลี่ยนแปลงของตะกั่ว (ดินที่ไม่มีการปนเปื้อน ดินที่ปนเปื้อนสารตะกั่วเทียม และกลุ่มทดสอบ T9 ในตำแหน่งแอโนด ตรงกลาง และแคโทด)

สรุปโดยรวมว่าการใช้เกรเดียนต์ศักย์ไฟฟ้าแปรผัน CFBG ในกระบวนการบำบัดดินที่มีสารตะกั่วนั้นสามารถลดปริมาณสารตะกั่วปนเปื้อนในดินได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีการใช้อิเล็กโทรด SS และไม่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมเพิ่มเติม

จากงานวิจัยของ Malavika Gouri J. S. (Malavika Gouri J. S. 2017) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการฟื้นฟูด้วยไฟฟ้าของดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ได้ผลสำหรับการกำจัดโลหะหนัก ตามหลักการที่ว่า เมื่อไฟฟ้ากระแสตรงผ่านดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักสารปนเปื้อนบางประเภทจะเคลื่อนผ่านน้ำในรูพรุนของดินไปยังที่สามารถกำจัดออกได้ โลหะหนักจะถูกทำให้ความเข้มข้นมีปริมาณที่น้อยลง กระบวนการนี้เป็นวิธีการปรับสภาพดินที่มีประสิทธิภาพก่อนที่จะใช้เทคนิคการแก้ไขอื่น ๆ การศึกษานี้ได้ทำการประเมินความเป็นไปได้ของกระบวนการอิเล็กโทโคเนติกส์ในการทำให้ตะกั่วเข้มข้น ในดินที่ปนเปื้อนโดยใช้อิเล็กโทรไลต์ ประเภทต่าง ๆ ได้แก่ EDTA 0.1 M กรดซิตริก 0.1 M น้ำประปา และวัสดุอิเล็กโทรด เช่น กราไฟต์และทองแดง การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารตะกั่ว ในช่วงเวลาต่าง ๆ เช่น 24 และ 48 ชั่วโมงในการไหลระดับแรงดันไฟฟ้าที่ 1 โวลต์ต่อเซนติเมตร ตลอดการทดสอบ นอกจากนี้ยังประเมินความแปรผันของค่า PH ปริมาณปัจจุบันและความชื้นหลังการทดสอบ พบประสิทธิภาพการกำจัดที่สูงขึ้น 68 เปอร์เซ็นต์เมื่อใช้ EDTA เป็นอิเล็กโทรไลต์และกราไฟต์

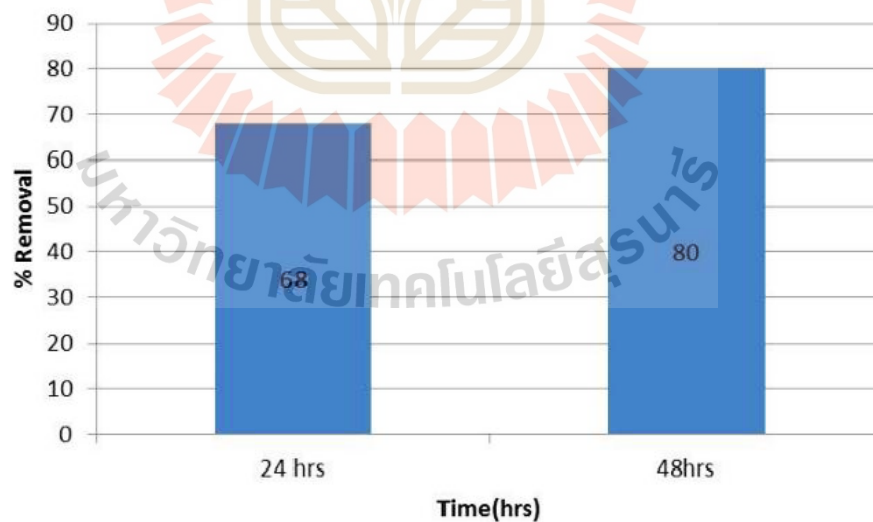


รูปที่ 2.21 แผนผังการติดตั้ง



รูปที่ 2.22 เปอร์เซนต์การกำจัดสารตะกั่ว

ดังนั้นจึงพบว่าการย้ายข้อมูลตะกั่วเกิดขึ้นจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ เมื่อใช้น้ำประปา และกรดซิตริกเป็นอิเล็กโทรไลต์ การเคลื่อนที่ของตะกั่วไม่ดี ซึ่งทำให้กำจัดตะกั่วได้น้อยลง ผลการวิจัยพบว่า EDTA ได้กำจัดตะกั่ว ประมาณ 68 เปอร์เซนต์ ออกจากดินที่ปนเปื้อน



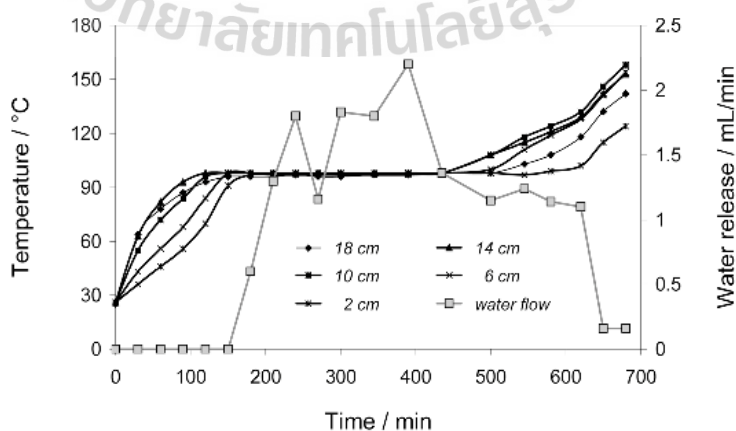
รูปที่ 2.23 เปอร์เซนต์การกำจัดสารตะกั่ว

จากการศึกษาความแปรผันของประสิทธิภาพการกำจัดด้วยระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นโดยมีระยะเวลา 2 ช่วงเวลา คือ 24 และ 48 ชั่วโมง เพอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่วหลังจากกระบวนการ EK ดังแสดงในรูปที่ 2.23 พบว่าตะกั่วจำนวนมากระจุกตัวอยู่ที่บริเวณแคโทดเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น

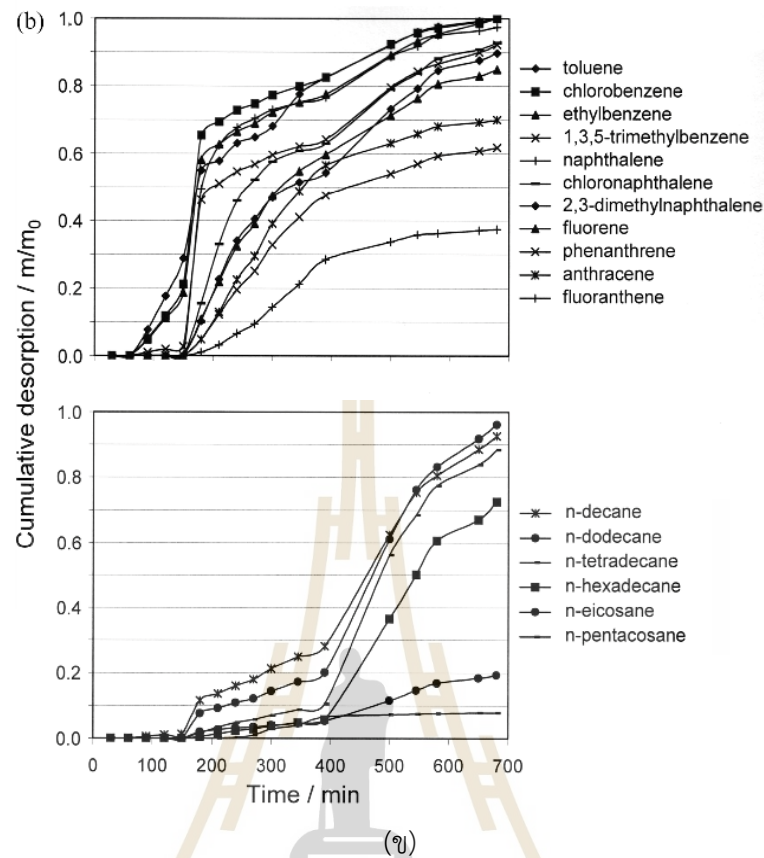
ผลที่ได้จากการศึกษาในงานวิจัยนี้ได้สรุปว่า ผลของอิเล็กโทรไลต์และวัสดุอิเล็กโทรดต่าง ๆ ในการทำให้ตะกั่วเข้มข้นทำให้ดินมีปริมาณทรนอยลง และเมื่อขนาดของกระแสไหลมากขึ้นสำหรับ EDTA ซึ่งได้ทำให้การเคลื่อนย้ายของตะกั่วดีขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพของอิเล็กโทรไลต์จึงเท่ากับ $0.1M \text{ EDTA} > \text{Tap water} > 0.1 M \text{ Citric acid}$ และพบว่า EDTA เป็นอิเล็กโทรไลต์ที่ดีกว่าในการทำให้ตะกั่วเข้มข้น และประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเหมือนกันสำหรับกราฟและทองแดงในบริเวณแอโนด อย่างไรก็ตามกราฟแสดงการโยกย้ายที่ดีขึ้นของตะกั่ว ในทั้งสามภูมิภาค ได้รับประสิทธิภาพการกำจัด 68 เปอร์เซ็นต์ ด้วยอิเล็กโทรดแกรไฟต์ และประสิทธิภาพการกำจัดสารตะกั่วเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น

2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่สูง

การศึกษางานวิจัยของ Ulf Roland และคณะ (Ulf Roland et al., 2010) ที่เกี่ยวกับการคายความร้อนของสารปนเปื้อนอินทรีย์ในวงกว้างด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (RF) การศึกษานี้ได้ดำเนินการในห้องปฏิบัติการและเครื่องซึ่งโรงงานนำร่องสำหรับดินปนเปื้อนเทียมและดินที่ปนเปื้อนเดิมจากพื้นที่อุตสาหกรรม การให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ ทำให้สามารถสังเกตเห็นอัตราการดูดซับปานกลางที่สูงถึง 100 องศาเซลเซียส การดูดซับสารปนเปื้อนที่ระเหยได้น้อยได้รับการปรับปรุงอย่างมากที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะเมื่อการระเหยน้ำในดินเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดไอน้ำ การเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียสหลังจากการผึ่งให้แห้งของดินอีกครั้งทำให้อัตราการกำจัดเพิ่มขึ้น และการให้ความร้อนด้วย RF จึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการสกัดไอระเหยของดินด้วยความร้อน ซึ่งสามารถทำความสะอาดดินที่ปนเปื้อนอย่างมีประสิทธิภาพได้



(ก)



รูปที่ 2.24 การให้ความร้อนด้วย RF ของดินทรายที่มีการปนเปื้อนเทียมในระดับห้องปฏิบัติการ (ก) อุณหภูมิในชั้นต่างๆ ของ เครื่องปฏิกรณ์และการปล่อยน้ำทั้งหมด และ (ข) การคาย การดูดซึมสะสมของสารประกอบโพรบอินทรีย์

จากการศึกษาวิจัยของ Stephen L. Price และคณะ (Price S. et al. 1999) กล่าว เกี่ยวกับการทำความร้อนด้วยความถี่วิทยุเพื่อการฟื้นฟูดินไว้ว่า การทำความร้อนด้วยความถี่วิทยุ (RFH) เป็นเทคโนโลยีที่เพิ่มความคุ้มค่าของเทคโนโลยีการแก้ไขไซต์ต่าง ๆ โดยการเร่งอัตราการกำจัด สิ่งปนเปื้อน การให้ความร้อนทำให้คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพของวัสดุ เช่น สาร ปนเปื้อน ดิน และน้ำใต้ดิน คล้อยตามในการบำบัดได้มากขึ้น RFH นำความร้อนที่มีการควบคุมไปยัง ใต้ผิวดิน เพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสิ่งปนเปื้อนโดยการสกัดด้วยไอน้ำในดิน (SVE) การเติมอากาศ ใต้ดิน (การกระจายอากาศ) การบำบัดทางชีวภาพ และการนำผลิตภัณฑ์กลับมาใช้ใหม่ ผลลัพธ์ที่ นำเสนอมานจากการศึกษาแบบตั้งโต๊ะและการสาธิตภาคสนามที่ทั้งสองใช้ RFH เพื่อปรับปรุง ประสิทธิภาพของ SVE การศึกษาระดับตั้งโต๊ะที่ดำเนินการกับดินที่ปนเปื้อน PCE พบว่าอัตราการ กำจัดเพิ่มขึ้น 8 เท่าเมื่อใช้ RFH เพื่อให้ความร้อนแก่ดินถึง 90 องศาเซลเซียส การใช้ RFH เป็นเวลา สามสัปดาห์ที่ปั้มน้ำมันเก่าใกล้กับเมืองเซนต์พอล รัฐมินนิโซตา ส่งผลให้อุณหภูมิดินโดยรอบเพิ่มจาก

8 องศาเซลเซียส เป็น 100 องศาเซลเซียส ในบริเวณใกล้เคียงกับอุปกรณ์ RFH และเพิ่มเป็น 40 องศาเซลเซียส ห่างออกไป 1.5 เมตร (5 ฟุต) สิ่งที่สำคัญที่สุดคือ การใช้ระบบ RFH/SVE แบบบูรณาการสามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ที่มีช่วงน้ำมันเบนซิน (GRO) ในดินโดยรวมได้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ในช่วงระยะเวลาสองถึงสามเดือน การอภิปรายครอบคลุมถึงการประยุกต์ใช้ RFH ในการปรับปรุงการบำบัดทางชีวภาพและการนำผลิตภัณฑ์กลับมาใช้ใหม่

ผลการวิจัยของ Gordon C.C Yang และ Shuen-Long Lin (Gordon C. and Shuen L., 1998) ได้สรุปว่าสารตะกั่วในดินร่วนปนทรายแห้งสามารถกำจัดได้โดยใช้วิธีการบำบัดด้วยไฟฟ้า ซึ่งเมื่อดินร่วนปนทรายแห้งที่มีปริมาณตะกั่วประมาณ 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ถูกบำบัดโดยใช้อิเล็กโทรโคเนติกและการไล่ระดับสีด้วยไฟฟ้า เมื่อเทียบกับระยะทางจากฐานของโครงสร้างไฟฟ้าที่ความแรง 1 โวลต์ต่อเซนติเมตรในการทดสอบทั้งหมด สำหรับการทดลองนี้ได้ใช้เป็นกรดอะซิติก 0.1 โมลาร์ เป็นสารไหลในอ่างเก็บน้ำแคโทด ผลจากการทดสอบได้แสดงให้เห็นว่าการไหลของอิเล็กโทรโมซิส (EO) ในทิศทางของฝั่งแคโทดจะเปลี่ยนทิศเมื่อค่า pH ของระบบน้อยกว่าจุดประจุไฟฟ้า (PZC) ของอนุภาคดิน นอกจากนี้ ค่า pH ของสารอิเล็กโทรดที่ใช้ในอ่างเก็บน้ำก็มีความสำคัญต่อการกำจัดไอออนตะกั่วออกจากดิน และผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าการใช้กรดอะซิติก, กรดซิตริก และ EDTA เป็นของเหลวในอ่างเก็บน้ำแอโนดทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วเพิ่มขึ้น โดยประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ได้มีค่าเท่ากับ 27.6, 53.3 และ 11.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากการวิจัยของ Zong-ping CAI และคณะ ในปี 2015 ได้ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงการบำบัดดินปนเปื้อนด้วยสารตะกั่ว (Pb) ใกล้โรงงานแบตเตอรี่กรดตะกั่ว โดยใช้กระบวนการทางไฟฟ้าของดินที่ปนเปื้อนด้วยสารตะกั่ว (Pb) เพื่อปรับปรุงการฟื้นฟูทางไฟฟ้าของดินในพื้นที่เหล่านี้ วิธีการดั้งเดิมในการปรับปรุงดินที่ปนเปื้อนด้วยสารตะกั่ว (Pb) ใกล้กับโรงงานแบตเตอรี่กรดตะกั่วในภูมิภาคสามเหลี่ยมปากแม่น้ำเพิร์ลของจีนเป็นการใช้เทคนิคการแลกเปลี่ยนขั้ว การศึกษาค้นหาค่าความแปรผันของประสิทธิภาพในการกำจัด Pb และค่า pH ของดินในกระบวนการบำบัดและช่วงการเปลี่ยนขั้วพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด Pb สูงถึง 87.7 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าต้นเป็น 1 โวลต์ต่อเซนติเมตรและช่วงการแลกเปลี่ยนขั้วคือ 48 ชั่วโมง ค่านี้สูงกว่าค่าที่ได้จากการใช้ไฟฟ้าทั่วไปในการบำบัด (61.8 เปอร์เซ็นต์) นอกจากนี้ยังสามารถหลีกเลี่ยงผลการโพกัสที่เกิดขึ้นในกระบวนการแลกเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าแบบธรรมดาได้ อีกทั้งยังไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีเพิ่มเติมสำหรับเทคนิคการแลกเปลี่ยนขั้ว

ผลงานวิจัยของ Yu-Ling Wei (Yu-Ling Wei, 2012) ได้ศึกษาเกี่ยวกับดินปนเปื้อนสารตะกั่วเทียมที่มีปริมาณสารตะกั่วต่างกัน (200, 450, 600 และ 900 ppm) ถูกตรึงด้วยความร้อนทั้งในโหมดฟลักซ์เบดและฟลูอิดเบดที่อุณหภูมิบำบัดปานกลาง (น้อยกว่า 500 องศาเซลเซียส) สำหรับตัวแปรต่าง ๆ เวลาการเก็บรักษาของเรา ผงซีเมนต์และผงอิฐถูกเติมลงให้กับดินที่มีการปนเปื้อนเทียมเพื่อเพิ่มการตรึงตะกั่ว ผลลัพธ์บ่งชี้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการบำบัดจะเพิ่ม

ขอบเขตของการตรึงสารตะกั่ว ตามที่กำหนดโดยกระบวนการกรองลักษณะความเป็นพิษของสำนักงานป้องกันสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (U.S. EPA) Leachability Procedure (TCLP) เปอร์เซ็นต์ของตะกั่วที่ระลอกออกจากส่วนผสมของดิน/ซีเมนต์อยู่ในช่วงน้อยกว่า 0.251 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับช่วงระหว่าง 13.6 เปอร์เซ็นต์ ถึง 40.7 เปอร์เซ็นต์ สำหรับส่วนผสมของดิน/อิฐที่สอดคล้องกัน เนื่องจากปริมาณฝุ่นอิฐที่เติมลงในดินที่เจือด้วย Pb เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการตรึง Pb จำเพาะจึงเพิ่มขึ้นจาก 0.0675 เป็น 0.149 mg Pb/g อิฐ (สำหรับการเติมอิฐ 20 และ 50 กรัม ตามลำดับ) อัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้นจาก 2 เป็น 40 ลิตร/นาที่ ทำให้เปอร์เซ็นต์การชะล้างของ Pb ลดลงเล็กน้อยจาก 14.96 เปอร์เซ็นต์ เป็น 11.59 เปอร์เซ็นต์ ทั้งไอโซเทอร์มของ Freundlich และ Langmuir ให้ค่าที่เหมาะสม ($r=0.945-0.998$) สำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง TCLP ของตัวอย่างดินที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน (105 องศาเซลเซียสและ 500 °C) ซึ่งมีสารตะกั่วปนเปื้อน การดูดซับจากสารปนเปื้อนตะกั่วในดินและเมทริกซ์ตัวดูดซับเป็นประเภทหลักของการดูดซับทางเคมี ผลลัพธ์ทางจลนพลศาสตร์บ่งชี้ว่าระบบดินที่เจือด้วย Pb นั้นซับซ้อนเกินอธิบายได้ด้วยการคำนวณอย่างง่าย

Soil composition ^a and property ^a						Heavy metal concentration by Method 3051 (mg/kg soil)					
Sand	Silt	Clay	Organic matter	pH	CEC	Average diameter	Pb	Cr	Zn	Ni	Cu
(%)	(%)	(%)	(%)		(meq/100g)	(cm)					
42.04	33.8	24.16	1.24	4.15	4.17	0.038	23.37	11.03	34.01	9.63	4.1

^aref. 8.

รูปที่ 2.25 ภาพตารางข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับเมทริกซ์ของดิน

Spiked concentration	3051 acid-digested concentration	
	Extracted Pb concentration ^a (mg/kg)	Extracted Pb percentage ^a (%)
200	158.79±(11.93%), n ^b =6	79.4
450	367.21±(7.65%), n=9	81.6
600	465.85±(2.88%), n=6	77.64
900	687.38±(1.59%), n=6	76.38

^a after deduction of 23.37 mg/kg soil (in Table 1)
^b number of replicate.

รูปที่ 2.26 ภาพตารางการเปรียบเทียบระหว่างความเข้มข้นของ Pb ที่ถูกขัดขวางและความเข้มข้นของ Pb ที่ย่อยด้วยกรด ของดินที่ปนเปื้อน Pb เทียม

Sorbent type	Pb concentration	
	Method 3051 (mg/kg)	TCLP (mg/L)
Brick dust	3.75	0.1
Kaolinite	N.D.	N.D.
Coal fly ashes	N.D.	N.D.
Cement powder	47.2	N.D.

N.D. <3.7 mg/kg or 0.037 mg/L.

รูปที่ 2.27 ภาพตารางข้อมูลเบี่ยงหลังเกี่ยวกับ Pb ดั้งเดิมในตัวดูดซับ

Temperature (°C)	LC of mixed sample ^a (%)				
	No sorbent	Brick dust	Coal fly ash	Kaolinite	Cement powder
200	99.69	100.08	108.72	104.88	99.32
300	99.51	104.15	107.6	100.1	97.16
400	98.36	98.18	104.31	100.25	99.01
500	96.44	100.07	103.24	104.93	95.04

^aeach mixed sample = 20.00 gram sorbent + 100.00 gram artificially contaminated soil

รูปที่ 2.28 ภาพตารางการอนุรักษ์ตะกั่ว (i.e., LC, เปอร์เซ็นต์) ของตัวอย่างผสมที่ผ่านการบำบัดด้วยอุณหภูมิความร้อนที่ต่างกัน

Temperature (°C)	LP of mixed sample ^a (%)				
	Unspiked soil ^b	Brick dust	Coal fly ash	Kaolinite	Cement powder
105 ^c	45	40.7	45.4	45.1	0.251
200	24.2	21.2	28.4	23.6	0.139
300	18.1	16.1	19.1	20.5	0.09
400	18.2	16.4	16.1	17.1	0.09
500	10.2	13.6	12.6	--	0.112

^a each mixed sample = 20.00 gram sorbent + 100.00 gram artificial soil.
^b 20.00 gram unspiked soil was used as sorbent.
^c oven-heating at 105°C for 3-5 days.

รูปที่ 2.29 ภาพตารางเปอร์เซ็นต์การชะล้างของตัวอย่างผสมที่บำบัดด้วยความร้อนในโหมด fixed-bed ที่อุณหภูมิต่างกัน.

Ratio of cement powder to artificial soil (g : g)	Characteristics of TCLP extract	
	pH	Pb concentration (mg/L)
20:100	10.76	0.047
15:100	9.73	0.058
10:100	5.81	0.94
5:100	5.18	3.7

รูปที่ 2.30 ภาพตารางผลของปริมาณผงซีเมนต์ต่อความเข้มข้นของ pH และ Pb ในน้ำชะล้าง TCLP

Treatment time (min)	LC (%)	TCLP concentration (mg Pb/L)	LP (%)
3	102.91	6.46	28.7
5	104.15	6.4	28.4
10	101.19	6.36	28.3
20	100.06	4.34	19.3
30	99.35	3.94	17.5
60	100.99	3.82	17

รูปที่ 2.31 ภาพตารางผลของเวลาบำบัดความร้อนต่อความเข้มข้นของ TCLP และค่า LP (ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส)

Run number, i	Quantity of sorbent ^a added (g)	TCLP concentration (mg Pb/L)	LP ^b (%)	η (mg Pb/g sorbent)
--	0	5.45	24.2	0.341 ^b
1	20	3.98	21.2	0.0675 ^c
2	30	2.79	16.1	0.122 ^c
3	40	2.34	14.5	0.109 ^c
4	50	1.16	7.7	0.149 ^c

^a brick dust used as sorbent.

^b immobilization effectiveness of Pb by soil.

^c immobilization effectiveness of Pb by addition of brick dust.

รูปที่ 2.32 ภาพตารางผลของปริมาณตัวดูดซับของ Pb ใน TCLP น้ำชะล้างและร้อยละการชะล้าง (ที่ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที)

Pb concentration in soil (mg / kg)	TCLP concentration (mg / L)		Equilibrium concentration, C (mg / kg)		Adsorbed quantity, q_e (mg / kg)	
	105°C	500°C	105°C	500°C	105°C	500°C
	200	3.66	0.934	73.2	18.7	126.8
450	9.15	3.05	183	61	267	389
600	16.9	4.21	338	84.2	262	515.8
900	23.8	11.5	476	230	424	670

รูปที่ 2.33 ภาพตารางข้อมูลที่ใช้ในการติดตั้งแบบจำลองการดูดซับระหว่างการทดสอบ TCLP ของดินที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน

Thermal treatment temperature (°C)	Freundlich			Langmuir		
	ln K	1/n	r^a	1/Q	1/KQ	r^a
105	2.443	0.571	0.945	0.002	0.438	0.974
500	3.733	0.531	0.974	0.001	0.083	0.998

^a correlation coefficient.

รูปที่ 2.34 ภาพตารางค่าคงที่สำหรับไอโซเทอร์มของ Freundlich และ Langmuir

Air flow rate (L/min)	C_{TCLP} (mg Pb/L leachate)	Leaching percentage, LP (%)
2 ^a	2.81	14.96
8 ^a	2.49	13.25
15 ^a	2.43	12.95
40 ^b	2.17	11.59

^a fixed-bed mode
^b fluidized-bed mode

รูปที่ 2.35 ภาพตารางผลกระทบของอัตราการไหลของอากาศต่อเปอร์เซ็นต์การชะล้างของ Pb

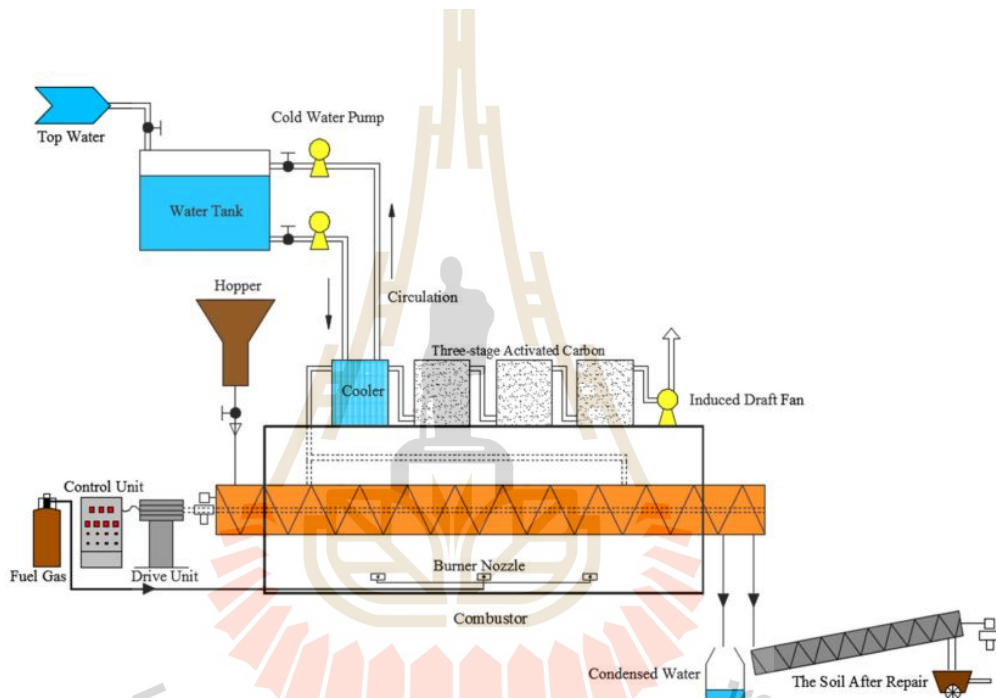
Treating time (min)	C _{TCLP} (mg Pb/L leachate)	Leaching percentage, LP (%)
10	2.89	15.42
20	2.49	13.29
30	2.17	11.59
40	1.96	10.46

รูปที่ 2.36 ภาพตารางผลของเวลาการบำบัดด้วยความร้อนต่อเปอร์เซ็นต์การชะล้างของ Pb จากดินที่บำบัดในโหมด fluidized-bed

การตรึงโลหะตะกอนน้ำ (Lead, Pb) ในดินโดยใช้การบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิปานกลาง ผลการศึกษาพิสูจน์ว่าการตรึงโลหะตะกอนน้ำด้วยการบำบัดความร้อนที่อุณหภูมิปานกลางเป็นไปได้ แร่ดินเหนียวและสารอิวมิกถูกพิจารณาว่าเป็นส่วนประกอบสำคัญในกระบวนการตรึงโลหะตะกอนน้ำ การเติมซีเมนต์ในดินช่วยให้สามารถจับโลหะตะกอนน้ำได้อย่างมีความสำคัญ เนื่องจากมีการเพิ่มค่าพื้นฐาน เสียโลหะตะกอนน้ำผ่านกระแสก๊าซไอเสียในกระบวนการบำบัดความร้อนทั้งหมดให้น้อยกว่า 0.1 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนัก) ของโลหะตะกอนน้ำที่เริ่มจับโดยสารเทียม อย่างไรก็ตาม มีข้อมูลที่ชัดเจนในการชะล้างโลหะตะกอนน้ำ ที่สอดคล้องกับทั้งโครงสร้างอิฐของ Freundlich และ Langmuir การเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการบำบัดความร้อนช่วยเพิ่มการตรึงและดูดซับโลหะตะกอนน้ำสำหรับกระบวนการทั้งหมด ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการดูดซับด้วยเคมีมีผลกระทบที่ดีกว่าการดูดซับทางกายภาพสำหรับตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยความร้อน มีข้อได้เปรียบที่ชัดเจนในการใช้กระบวนการบำบัดความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียสเพื่อตรึงโลหะตะกอนน้ำในดินหรือกากตะกอนอินทรีย์ นั่นคือ ถ้าความเข้มข้นของโลหะตะกอนน้ำในเมทริกซ์เหล่านี้ถูกจัดการโดยการเติมของเสีย เช่น แก๊สลอย ผุ่นอิฐ ดินเหนียว หรือแม้แต่ดินที่ค่อนข้างสะอาดก่อนกระบวนการบำบัดด้วยความร้อน ปริมาณโลหะตะกอนน้ำที่ถูกตรึงจะเพิ่มขึ้น และความเข้มข้นของโลหะตะกอนน้ำในน้ำเสีย TCLP จะต่ำพอที่จะตอบสนองตามข้อกำหนดข้อบังคับได้อย่างง่ายดายที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียสแหล่งความร้อนสามารถดึงสารออกจากหม้อไอน้ำหรือกระแสก๊าซทิ้งจากเตาเผา โดยทั่วไปจะออกจากสแต็ก โดยมีอุณหภูมิที่น้อยกว่า 300 องศาเซลเซียส

งานวิจัยของ Ting Zhao และคณะ (Ting Z. et al.,2018) ที่ได้กล่าวถึงเทคโนโลยีที่ความร้อนต่ำได้ถูกนำมาใช้กับการบำบัดดินพื้นที่การเกษตรที่ปนเปื้อนสารปรอทจากโรงงานเคมีในมณฑลกุ้ยโจว ประเทศจีน ซึ่งจุดของการทดลองปลูกในแปลงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณรวมและเมทิล-ปรอท ในพืชหลังการบำบัดด้วยความร้อน ผลจากการวิจัยได้ชี้ว่า ความเข้มข้นของปรอทในดินมีค่าลดลงประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ จาก 255.74 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ลดลงเป็น 80.63 มิลลิกรัมต่อ

กิโลกรัม เมื่อผ่านการบำบัดที่เวลา 30 นาที ณ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส และในการทดลองระดับวิศวกรรม และดินที่ผ่านการบำบัดยังคงรักษาดินดั้งเดิมไว้ได้เกือบทั้งหมด สารปรอทที่จับกับสารอินทรีย์และสารปรอทที่ตกค้างในดินที่ผ่านการบำบัดแล้วลดลง 64.1 และ 56.4 เปอร์เซ็นต์ โดยวิธีการสกัดตามลำดับ ความเข้มข้นรวมและเมทิล-เมอร์คิวรี ในพีซีผลพบว่าการลดลง และระดับของการสะสมปรอทในดินจนถึงรากพืชลดลงเช่นกัน โดยความเข้มข้นของปรอท (Hg) ทั้งหมดในมันฝรั่งและข้าวโพดต่ำกว่าขีดจำกัดความทนทานต่อสารปรอทสำหรับอาหารในประเทศจีน และความเข้มข้นของปรอท (Hg) ในหัวไชเท้าก็ใกล้ถึงขีดจำกัดแล้ว เทคโนโลยีนี้มีข้อดีที่ง่ายที่ยั่งยืนมากขึ้นสำหรับการบำบัดดินพื้นที่การเกษตรที่ปนเปื้อนสารปรอทในการใช้งานด้านวิศวกรรมในอนาคต



รูปที่ 2.37 การไหลของกระบวนการที่เรียบง่ายของเทคโนโลยีความร้อนต่ำ

Indicators	pH	SOM (%)	TN (g/kg)	Alkalytic N (mg/kg)	TP (g/kg)	Available P (mg/kg)	TK (g/kg)	Readily available K (mg/kg)	Soil total porosity %
Before thermal treatment	7.50 ± 0.17	26.98	3.33 ± 0.66	100 ± 5.75	0.72 ± 0.02	35.1 ± 0.76	12.3 ± 0.43	1053 ± 193.5	76.31
After thermal treatment	7.61 ± 0.02	26.88	2.82 ± 0.17	114 ± 5.85	0.77 ± 0.04	85.6 ± 1.39	12.1 ± 0.71	471 ± 16.0	63.15

All values are expressed as means ± S.D. ($n = 12$). SOM, soil organic matter; TN, total nitrogen; TP, total phosphorus; TK, total potassium

รูปที่ 2.38 ภาพตารางคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของดินก่อนและหลังการบำบัดความร้อน

Soil samples	Item	Total Hg	F1	F2	F3	F4	F5
Before thermal treatment	Means (mg/kg)	255.74	0.133	0.087	0.160	140.22	58.84
	Standard deviation (mg/kg)	7.17	0.018	0.006	0.015	5.19	2.70
	Minimum value (mg/kg)	243.29	0.115	0.076	0.141	134.06	55.39
	Maximum value(mg/kg)	263.11	0.163	0.094	0.177	146.29	62.23
	Coefficient of Variation (%)	2.80	13.53	6.90	9.38	3.70	4.59
After thermal treatment	Means (mg/kg)	80.63	0.204	0.052	0.131	37.62	24.83
	Standard deviation (mg/kg)	2.91	0.019	0.009	0.011	2.93	1.59
	Minimum value (mg/kg)	76.55	0.187	0.039	0.117	32.67	22.12
	Maximum value(mg/kg)	85.43	0.234	0.062	0.143	40.64	26.45
	Coefficient of Variation (%)	3.61	9.31	17.31	8.40	7.79	6.20
Removal rate (%)		68.47	-53.38	40.23	18.13	73.17	57.80

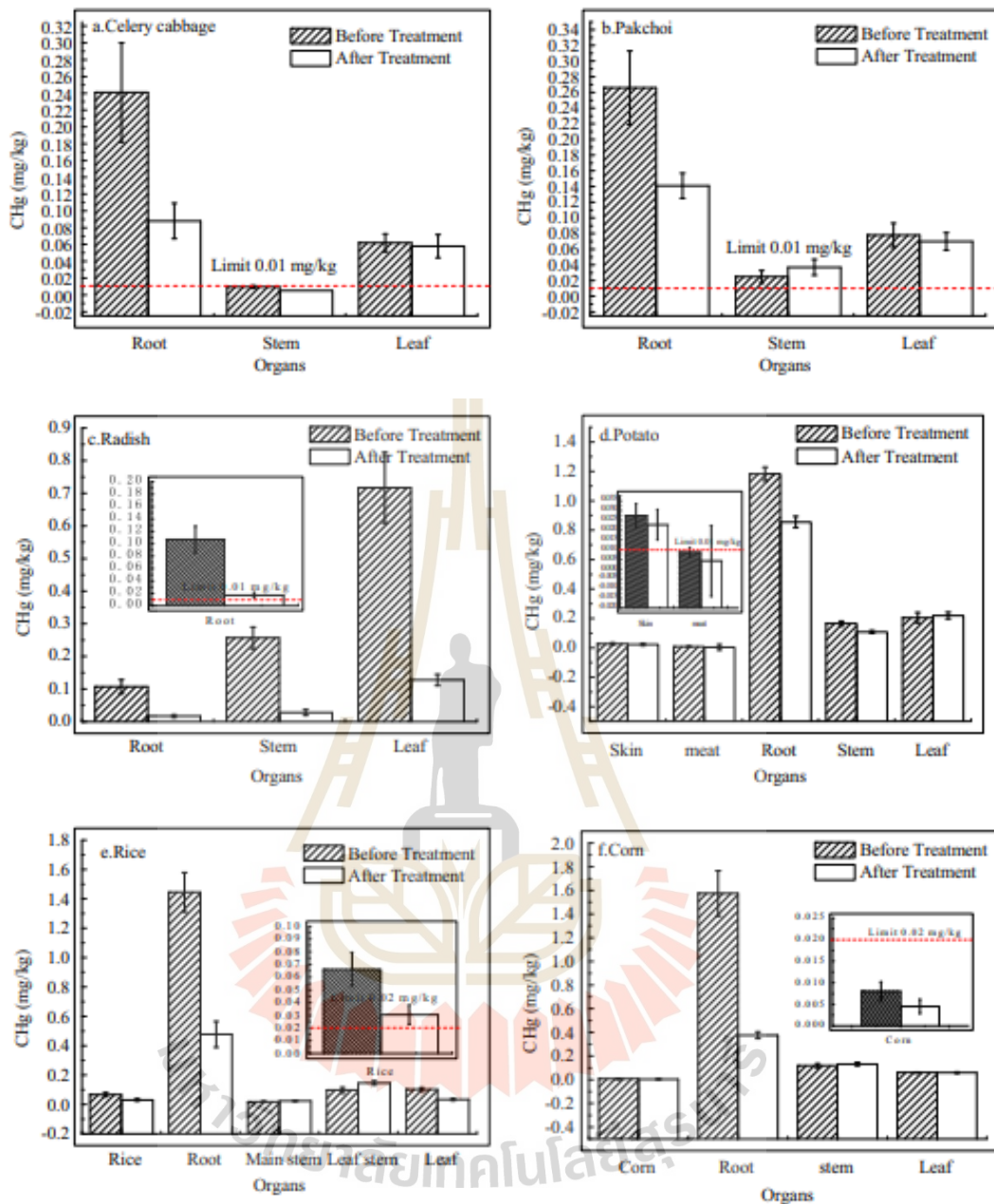
F1, water-soluble fraction; F2, special absorbed fraction; F3, oxide-bound fraction; F4, organic-bound fraction; F5, residual fraction. $n = 12$

รูปที่ 2.39 ภาพตารางการตรวจหาสารปรอทตกค้างในดินก่อนและหลังการรักษาความร้อน

Crops	Total Hg (mg/kg)		Methyl-Hg ($\mu\text{g}/\text{kg}$)		Tolerance limit of total Hg (China)
	Before thermal treatment	After thermal treatment	Before thermal treatment	After thermal treatment	
Celery cabbage	0.0621 \pm 0.0106	0.0585 \pm 0.0137	1.04 \pm 0.054	0.825 \pm 0.051	0.01
Napa cabbage	0.0780 \pm 0.0154	0.0707 \pm 0.0111	1.121 \pm 0.101	0.905 \pm 0.023	
Radish	0.1072 \pm 0.0213	0.0171 \pm 0.0042**	0.916 \pm 0.021	0.113 \pm 0.012**	0.02
Potato	0.0086 \pm 0.0023	0.0042 \pm 0.0012*	0.252 \pm 0.053	0.245 \pm 0.049	
wheat	0.0543 \pm 0.0122	0.0310 \pm 0.0069*	1.961 \pm 0.193	1.249 \pm 0.087*	
Rice	0.0660 \pm 0.0135	0.0305 \pm 0.0075*	14.52 \pm 1.39	6.48 \pm 1.89**	
Corn	0.0080 \pm 0.0022	0.0045 \pm 0.0016*	1.939 \pm 0.478	0.925 \pm 0.216*	

Data in table are means \pm S.D. ($n = 12$). *Significant correlation at the level of $P < 0.05$. **Significant correlation at the level of $P < 0.01$

รูปที่ 2.40 ภาพตารางการสะสมปรอท (Hg) ทางชีวภาพในส่วนที่กินได้ของพืชผล

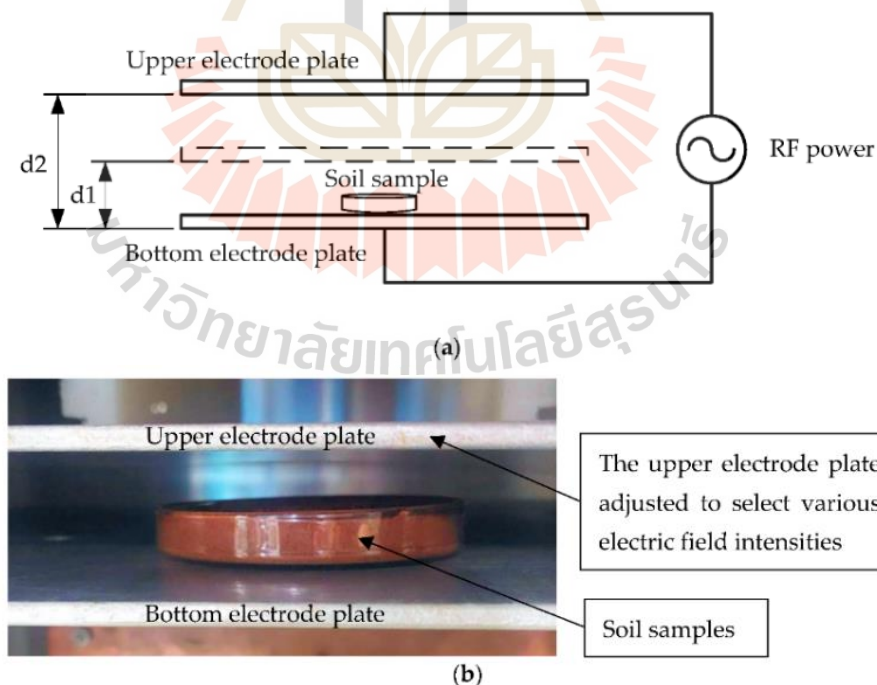


รูปที่ 2.41 การกระจายของปรอทในส่วนต่าง ๆ ของพืชผลทั้งหมด

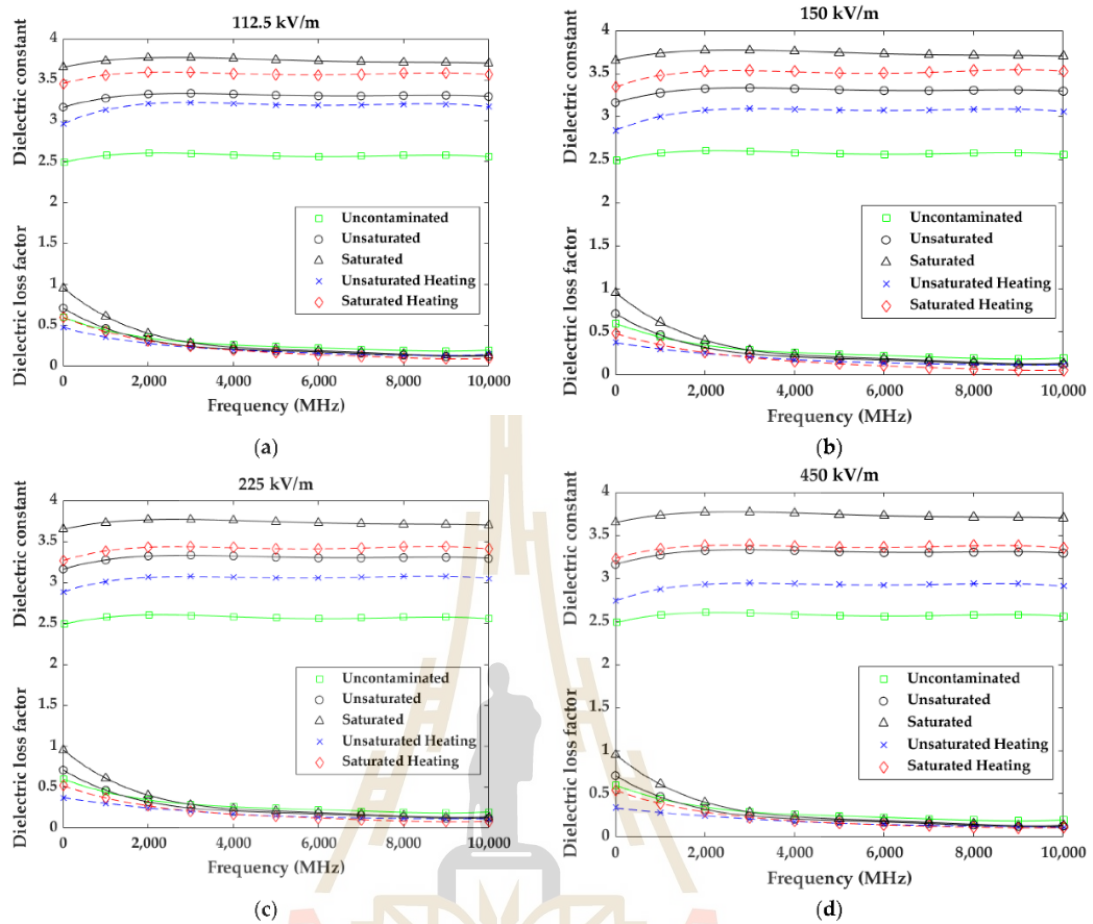
จากผลของการสรุบน้ำงานวิจัยนี้กล่าวว่า การใช้เทคโนโลยีกับความร้อนต่ำ สำหรับการกำจัดปรอท (Hg) จากดินที่ปนเปื้อนอย่างน้อย 70 เปอร์เซ็นต์ ของปรอทถูกกำจัดออกจากดินได้ และดินที่ผ่านกระบวนการบำบัดยังคงรักษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของดินดั้งเดิมไว้เกือบทั้งหมด ส่วนของสารอินทรีย์และสารตกค้างของปรอทลดลงร้อยละ 73.17 และร้อยละ 57.80 และอัตราการกำจัดเมทิล-ปรอท ในดินสูงถึงร้อยละ 87 อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ เปอร์เซ็นต์ของปรอทที่ละลายน้ำและแลกเปลี่ยนได้เพิ่มขึ้น 53.38 เปอร์เซ็นต์ หลังจากกระบวนการบำบัดด้วยความร้อน

การทดลองในภาคสนามพบว่าปริมาณและความเข้มข้นของเมทิล-ปรอท ในพีชนั้นมีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น แนะนำให้ใช้ดินที่ผ่านกระบวนการบำบัดในการปลูกพืชหัวสูง สายพันธุ์และรากพืชผัก โดยสรุป เทคโนโลยีความร้อนต่ำเป็นวิธีการแก้ไขที่ยั่งยืนสำหรับการบำบัดดินปนเปื้อนสารปรอทในการใช้งานด้านวิศวกรรมในอนาคต อย่างไรก็ตาม เพื่อให้มั่นใจว่าดินที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้วเหมาะสมกับการปลูกพืช จำเป็นต้องมีการตรวจสอบในระยะยาว

ผลของงานวิจัยจาก Teerapon Yodrot และคณะ (Teerapon Y., 2023) ซึ่งเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกในดินที่มีการปนเปื้อนด้วยน้ำมันดีเซล B7 โดยใช้ระบบทำความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (RF) แบบแผ่นอิเล็กโทรดคู่ วิธีการนี้ช่วยให้เราสามารถสังเกตพฤติกรรมของดินที่ปนเปื้อนก่อนและหลังการบำบัดด้วยความร้อน RF ได้ง่ายขึ้น ผลการทดลองพบว่าคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกในดินที่ไม่มีการปนเปื้อนและดินที่ปนเปื้อนมีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ การใช้ความร้อน RF ที่มีความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าที่ 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร สามารถทำให้ดินที่ปนเปื้อนมีคุณสมบัติที่คล้ายกับดินที่ไม่มีการปนเปื้อน ผลลัพธ์จากการวิจัยนี้แสดงให้เห็นได้ว่าการใช้ความร้อน RF กับตัวอย่างดินที่ปนเปื้อนช่วยปรับปรุงสภาพอากาศในรูพรุนเมื่อเทียบกับดินที่ปนเปื้อนแต่ไม่ได้รับความร้อน วิธีการนี้อาจจะมีประโยชน์ในการบำบัดดินในประเทศไทยโดยใช้ระบบทำความร้อน RF พร้อมแผ่นอิเล็กโทรดคู่



รูปที่ 2.42 แผนผังของระบบทำความร้อน RF (ก) ตัวอย่างดินที่ใช้สำหรับระบบทำความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (ข) ระบบทำความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ



รูปที่ 2.43 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของดินปนเปื้อนแบบไม่อิ่มตัวและอิ่มตัวก่อนและหลังการให้ความร้อนด้วย RF เปรียบเทียบกับดินที่ไม่มีน้ำมันดีเซล B7 เกรดเชิงพาณิชย์ (ก) สนามไฟฟ้า 112.5 กิโลโวลต์ต่อเมตร (ข) สนามไฟฟ้า 150 กิโลโวลต์ต่อเมตร (ค) สนามไฟฟ้า 225 กิโลโวลต์ต่อเมตร (ง)สนามไฟฟ้า 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร

ผลการวิจัยพบว่าระบบทำความร้อน RF ที่ใช้ความเข้มของสนามไฟฟ้า 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร สามารถลดปริมาณของน้ำมันดีเซล B7 เกรดเชิงพาณิชย์ในดินได้สูงสุด ซึ่งเกิดจากความเข้มของสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้น ซึ่งมีผลการดูดซับพลังงานทำให้มีการปรับปรุงหน่วยปริมาตร ในวัสดุไดอิเล็กตริก ผลลัพธ์ที่ได้นี้ชี้ให้เห็นว่าการใช้ความร้อน RF กับตัวอย่างดินที่ปนเปื้อนนำไปสู่การระเหยของน้ำมันดีเซล B7 เกรดเชิงพาณิชย์ในดิน และการปรับปรุงอากาศในรูปพรุณ พร้อมกับการปิดกั้นช่องว่างอากาศ เมื่อเทียบกับตัวอย่างดินปนเปื้อนที่ไม่ได้รับความร้อน กลยุทธ์นี้มีภาพลักษณ์ว่าอาจเป็นประโยชน์สำหรับการบำบัดดินในประเทศไทย โดยการใช้ระบบทำความร้อน RF พร้อมกับแผ่นอิเล็กโทรดคู่ ที่ส่งผลให้มีการระเหยของน้ำมันดีเซล B7 เกรดเชิงพาณิชย์ในดินและปรับปรุงคุณภาพ

อากาศในรูปพุน นอกจากนี้ยังมีการปิดกั้นช่องว่างอากาศเพิ่มเติม ทั้งนี้เพื่อเสริมสร้างการปรับปรุงพลังงานและสภาพดินที่ดีขึ้นในบริบทของการใช้ระบบทำความร้อน RF ในการบำบัดดินในประเทศไทย

จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่ามีการนำคลื่นความถี่ RF มาใช้ในการทดลองแล้ว โดยตัวอย่างของงานวิจัยที่น่าสนใจคืองานของ Teerapon Yodrot และคณะ (Teerapon Y., 2023) ซึ่งได้ศึกษาวิธีการกำจัดน้ำมันปิโตรเลียมที่ปนเปื้อนอยู่ในดิน ผลลัพธ์จากการทดลองได้ชี้ให้เห็นวิธีการ ความสามารถในการกำจัดน้ำมันจากดินอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งการทดลองนั้นเน้นไปที่การใช้คลื่นความถี่จากคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อกระตุ้นกระบวนการกำจัดน้ำมันที่ติดอยู่ในดิน วิธีนี้มีความพิเศษตรงที่สามารถระเหยน้ำมันจากดินอย่างได้ผลทันที โดยใช้วิธีการวัดผลผ่านการวัดค่าไดโอดีเล็กทรอนิกส์สำหรับวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันที่ถูกกำจัดออกไป และผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้ได้สรุปว่า การใช้คลื่นความถี่จากคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นการทดสอบที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมน้ำมันปิโตรเลียมที่ปนเปื้อนอยู่ในดิน การวัดผลผ่านค่าไดโอดีเล็กทรอนิกส์เป็นวิธีที่ได้ผลมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว นอกจากนี้ยังเป็นการทดลองที่สามารถนำไปใช้ในงานด้านการบำบัดน้ำมันในสภาพแวดล้อมที่มีปัญหาน้ำมันปิโตรเลียมที่รั่วออกมาที่พื้นดินหรือพื้นผิวอื่น ๆ ที่ต้องการการกำจัดน้ำมันอย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็วในการดำเนินงาน

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 คุณสมบัติทั่วไปของสารตะกั่ว

ตะกั่วถือเป็นองค์ประกอบทรานซิชันในตารางธาตุ ซึ่งจัดอยู่ในหมู่ 4A และมีเลขอะตอมเท่ากับ 82 พร้อมทั้งน้ำหนักเชิงอะตอมอยู่ที่ 207.19 ซึ่งพบมากทั่วไปในธรรมชาติ แบ่งพบได้ในแร่กาลีนา (Galena, PbS) เซอร์ไซต์ (Cerussite, PbCO₃) และแองกลีไซต์ (Anglesite, PbSO₄) โดยส่วนใหญ่พบปนอยู่ในหินอัคนีบางชนิดที่มีลักษณะเป็นซิลไฟด์ เป็นโลหะหนักที่มีความถ่วงจำเพาะที่ระดับ 11.34 และมีจุดหลอมเหลว 327.4 องศาเซลเซียส รวมทั้งจุดเดือด 1,740 องศาเซลเซียส เมื่อสารตะกั่วมีความบริสุทธิ์ จะแสดงลักษณะที่เรียบเนียนและมีสีเทาเข้ม และที่ผิวบนพบว่าเป็นสีเทาฟ้า และยังมีความทนทานต่อกระบวนการกัดกร่อน นอกจากนี้ยังมีความหล่อลื่นที่เป็นเอกลักษณ์เนื่องจากเป็นโลหะอ่อนที่สามารถตัด ริด และตีได้ง่าย อีกทั้งยังมีความสามารถในการขยายตัวมากเมื่อได้รับความร้อน ตะกั่วมีความหลากหลายในการผสมกับโลหะต่าง ๆ และสารตะกั่วส่วนมากไม่ละลายในน้ำ ทั่วไปมีสีขาวหรือไม่มีสี แต่ไดออกไซด์ของตะกั่วจะมีสีเหลืองหรือสีส้ม ในขณะที่ไดออกไซด์จะมีสีเทาหรือสีดำ นอกจากนี้ ตะกั่วอาจปรากฏในรูปของสารประกอบอินทรีย์ โดยบางชนิดสามารถละลายน้ำได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

2.3.1.1 สารประกอบอินทรีย์ตะกั่ว (Inorganic lead)

1) โลหะตะกั่วสามารถนำมาผสมในแท่งโลหะผสมหรือในรูปของผงเพื่อใช้ในกระบวนการเชื่อมบัดกรีโลหะหรือการผลิตแผ่นหรือท่อโลหะ เป็นวัสดุที่มีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเคมีเพื่อป้องกันการกัดกร่อน ในงานผลิตแผ่นกรองสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์ หรือในการผลิตลูกปืนฉากกั้นสารกัมมันตรังสี

2) ออกไซด์ของสารตะกั่ว ได้แก่

ตะกั่วมอนอกไซด์ (Lead monoxide) เป็นสารใช้ในอุตสาหกรรมสี โดยใช้เป็นสารสีเหลืองผสมสีทาบ้าน ตะกั่วออกไซด์ (Lead dioxide) ซึ่งใช้ทำเป็นขั้วอิเล็กโทรดของแบตเตอรี่รถยนต์และเครื่องจักร ตะกั่วออกไซด์ หรือตะกั่วทองแดง (Leadred oxide) ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ สีทาโลหะเพื่อกันสนิม เครื่องแก้ว ยาง และเครื่องเคลือบ

3) สารประกอบของเกลือตะกั่ว คุณสมบัติที่มีสีต่าง ๆ แตกต่างกันไปจึงนิยมใช้เป็นแม่สี หรือสีผสมในอุตสาหกรรมสี เช่น ตะกั่วเหลือง (Lead cromate) และตะกั่วขาว (Lead carbonate) มักจะใช้ในการทำสี ตะกั่วซัลเฟต (Lead sulfate) ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมสีและหมึกพิมพ์ ตะกั่วอะซิเตท (Lead acetate) จะใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ครีมใส่ผม

2.3.1.2 สารประกอบอินทรีย์ตะกั่ว (Organic lead)

เตตราเอทิลเลด (Tetramethyl lead) และเตตราเมทิลเลด (Tetra-methyl lead) ถูกใช้เป็นสารต้านทานการน็อกหรือสารป้องกันการกระตุกของเครื่องยนต์ในการทำงาน โดยผสมเข้ากับน้ำมันเบนซิน เพื่อเพิ่มค่าดัชนีออกเทนของเชื้อเพลิงในกระบอกเผาผลาญ เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการเผาไหม้และลดการกระตุกขณะทำงานของเครื่องยนต์ได้เป็นอย่างดี (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ เล่มที่ 22, 2540)

2.3.1.3 การเข้าสู่สิ่งแวดล้อมของตะกั่ว

สิ่งแวดล้อมของสารตะกั่ว เกิดได้ทั้งโดยธรรมชาติและจากการกระทำของมนุษย์ โดยการระเบิดจากภูเขาไฟ และการสึกกร่อนของแหล่งแร่ เป็นสาเหตุหลักของการเข้าสู่สิ่งแวดล้อมของตะกั่วที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ ซึ่งเกิดขึ้นรวมกันประมาณ 19,000 ตันต่อปี

2.3.1.4 การเข้าสู่สิ่งแวดล้อมของตะกั่ว จากกิจกรรมของมนุษย์

1. การทำเหมืองแร่ โดยประมาณร้อยละ 70 ของสินแร่ตะกั่วมักเกิดร่วมกับสังกะสี โดยการทำเหมืองแร่ทำให้ตะกั่วไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังทำให้มีการปนเปื้อนในอากาศจากการฟุ้งกระจายของผงแร่การถลุงแร่และการทำแร่ให้บริสุทธิ์ ทำให้ตะกั่วปนเปื้อนในน้ำ อากาศ รวมถึงในดินและน้ำใต้ดิน

2. กระบวนการผลิตสารประกอบของตะกั่วหรือการประกอบผลิตภัณฑ์และการบรรจุที่เกี่ยวข้องกับตะกั่วจะถูกเปลี่ยนแปลงในทางที่สามารถควบคุมฝุ่นละอองได้ดีขึ้นในโรงงานที่มีมาตรฐานสูง นอกจากนี้ การลดการปล่อยตะกั่วในอากาศยังเป็นไปได้เมื่อมีการใช้ระบบบำบัดน้ำเสีย

ที่มีประสิทธิภาพในโรงงาน หากไม่มีการดูแลรักษาที่เหมาะสม, ตะกั่วที่ถูกทิ้งจากโรงงานอาจปนเปื้อนน้ำในธรรมชาติได้

3. การเก็บรักษาและการขนส่ง ซึ่งเกิดอุบัติเหตุ เกิดการทรุดหรือรั่วไหลของตะกั่วออกมาสู่สิ่งแวดล้อม

4. การใช้ตะกั่วเนื่องจากถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในทางอุตสาหกรรมเพื่อผลิตสารประกอบและผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ซึ่งสารประกอบตะกั่วหลายชนิดเป็นส่วนประกอบอยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ใช้ภายในบ้านเรือน เช่น ยาย้อมผม สีทาบ้าน ลูกปืน สารกำจัดแมลง และแบตเตอรี่รถยนต์ การใช้ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ทำให้ตะกั่วเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้

5. การจัดการกากของเสียของโรงงาน ซึ่งมีระบบบำบัดที่ไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วทำให้พบสารตะกั่วในแหล่งน้ำตามธรรมชาติและตะกอนดิน การจัดการของเสียมีตะกั่วเจือปนโดยการเผาด้วยเตาที่มีระบบกำจัดไม่ดีพอทำให้ตะกั่วหลุดออกสู่ชั้นบรรยากาศได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

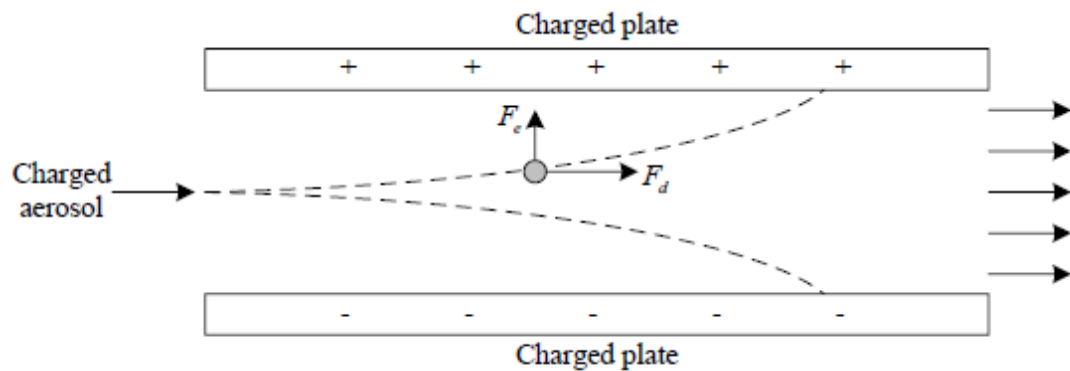
2.3.2 การเคลื่อนที่อนุภาคในสนามไฟฟ้า

อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าถูกวัดในสถานะที่มีความเข้มของสนามไฟฟ้า E ด้วยการใช้อิเล็กโตรดสองอันที่มีขั้วต่างกันตามที่แสดงในภาพที่ 2.30 และมีการไหลของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าผ่านช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดทั้งสอง อนุภาคที่มีประจุนั้นถูกรับแรงไฟฟ้าสถิตที่เรียกว่า F_e ซึ่งดึงดูดให้อนุภาคนั้นเคลื่อนที่ไปสู่อิเล็กโตรดที่มีขั้วตรงข้ามอยู่ และจากนั้นตกลงบนอิเล็กโตรดนั้น แรงไฟฟ้าสถิตที่กระทำต่ออนุภาคสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.1

$$F_e = n_p e E \quad (2.1)$$

เมื่อ n_p คือ จำนวนประจุบนอนุภาค e คือ ค่าประจุอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.61 \times 10^{-19} C$ และ E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า ถ้าไม่มีแรงภายนอกอื่นใด ๆ มากระทำ (โดยทั่วไปแล้วถ้าอนุภาคของขนาดเล็กกว่าไมครอน อยู่ในสนามไฟฟ้าที่ความเข้มแรงไฟฟ้าสูงสถิตจะมีค่ามากกว่าแรงโน้มถ่วง คือ $F_e \gg F_g$ เนื่องจาก d_p^3 ขึ้นอยู่กับสมการที่ 2.2

$$F_g = \frac{\pi}{\sigma} d_p^3 \rho_g g \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.44 รูปแบบการเคลื่อนที่ของอนุภาคสนามไฟฟ้า

โดยมีตัวอย่างดังนี้ อนุภาคของเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 ไมโครกรัม มีประจุไฟฟ้าที่ 18 ประจุ อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่ความเข้ม 2.5×10^5 โวลต์ต่อเมตร จะมีแรงไฟฟ้าสถิตมากกว่าแรงโน้มถ่วงประมาณ 1120 เท่าถ้าแรงไฟฟ้าสถิตสมดุลโดยแรงต้านสต็อกส์ F_d และมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของอนุภาคที่น้อยกว่าที่ประมาณหนึ่งทำให้ได้สมการเชิงอนุพันธ์ของอนุภาคการเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าคือ

$$m_p \frac{dV_p}{dt} = \frac{3\pi\mu d_p}{C_c} V_p + n_p eE \quad (2.3)$$

สามารถคำนวณหามวลของอนุภาคของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้จากสมการดังนี้

$$m_p = \frac{\pi}{\sigma} \rho_p d_p^3 \quad (2.4)$$

ทำการคำนวณหาปริพันธ์ของสมการที่ 2.3 จะได้ความเร็วไฟฟ้าสถิตปลายดังสมการที่ 2.5

$$V_{TE} = \frac{n_p eEC_c}{3\pi\mu d_p} \quad (2.5)$$

ดังสมการที่ 2.5 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของอนุภาคการเคลื่อนที่แบบทางกลได้ดังนี้

$$V_{TE} = n_p eEB \quad (2.6)$$

แนวโน้มของอนุภาคที่มีประจุเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าเรียกว่าความเคลื่อนที่ได้ทางไฟฟ้า Z_p มีหน่วยเป็น $m^2 / V \cdot s$ และมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเคลื่อนที่ได้ของอนุภาคแสดงดังที่แสดงในสมการที่ 2.7

$$Z_p = \frac{V_{TE}}{E} = n_p eB = \frac{n_p e C_c}{3\pi\mu d_p} \quad (2.7)$$

2.3.3 การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก

การปนเปื้อนสารตะกั่วสามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยาต่อการเจริญเติบโตของพืชและเป็นอันตรายต่อมนุษย์ ซึ่งอาจก่อการเกิดโรคและการเสียชีวิตได้ เพื่อป้องกันผลกระทบเหล่านี้ พบว่าวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยให้พืชเจริญเติบโตได้และไม่ส่งผลเสียต่อมนุษย์คือการควบคุมการปนเปื้อนให้ตะกั่วไปสะสมในดิน ซึ่งสามารถทำได้โดยการแยกหรือกำจัดสารตะกั่วออกจากดิน ปัจจุบันมีวิธีที่น่าสนใจคือ การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกไปส่งตรงที่วัสดุไดอิเล็กตริกที่เหมาะสมโดยไม่มีผลกระทบต่อวัสดุอื่น เกิดขึ้นโดยการใช้คลื่นความถี่ในรูปของสนามไฟฟ้า เพื่อส่งความร้อนไปยังส่วนกลางของวัสดุไดอิเล็กตริก การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกสามารถใช้สมการเพื่อค้นหาวัดไดอิเล็กตริกที่เหมาะสมที่สุดในการส่งความร้อน มีรูปแบบการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกทั้งหมด 3 รูปแบบ ได้แก่ 1) การให้ความร้อนด้วยการแผ่รังสีโดยใช้คลื่นอินฟราเรด โดยใช้คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ในช่วงของอินฟราเรด การนี้ทำให้เกิดการให้ความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริก (Payne, 1988) 2) การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นกระบวนการที่ใช้คลื่นย่านความถี่ไมโครเวฟเพื่อกระจายพลังงานความร้อนไปยังวัสดุที่ต้องการให้ความร้อน กระบวนการนี้เป็นไปได้เมื่อวัสดุนั้นมีโมเลกุลที่ตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟ เช่น โมเลกุลของน้ำหรือโมเลกุลที่มีขั้ว คลื่นไมโครเวฟจะทำให้โมเลกุลในวัสดุเกิดการสั่นสะเทือน ซึ่งเป็นผลทำให้พลังงานของคลื่นถูกดูดซับและเปลี่ยนเป็นความร้อน โดยทำให้อุณหภูมิที่ต้องการเกิดความร้อนขึ้นได้ 3) การให้ความร้อนผ่านคลื่นความถี่วิทยุคือกระบวนการที่ใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อส่งพลังงานความร้อนไปยังวัสดุไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ นักวิจัยได้ส่งเสริมความสนใจในเทคโนโลยีนี้เป็นอย่างมาก (Bayrashev et al., 2002, Granada et al., 2012) เทคโนโลยีการให้ความร้อนได้รับความสนใจเพราะมีช่วงความถี่ที่เหมาะสมสำหรับวัสดุทั่วไปและง่ายต่อการออกแบบวงจร นอกจากนี้ยังสามารถปรับความถี่ได้เพื่อให้เข้ากับลักษณะของวัสดุได้อย่างสะดวก โดยใช้หลักการกระจายคลื่นความถี่วิทยุเพื่อส่งพลังงานความร้อนไปยังวัสดุที่ต้องการ ยังช่วยให้เราสามารถปรับความถี่ให้เหมาะสมกับวัสดุได้อย่างสะดวกอย่างมีประสิทธิภาพ

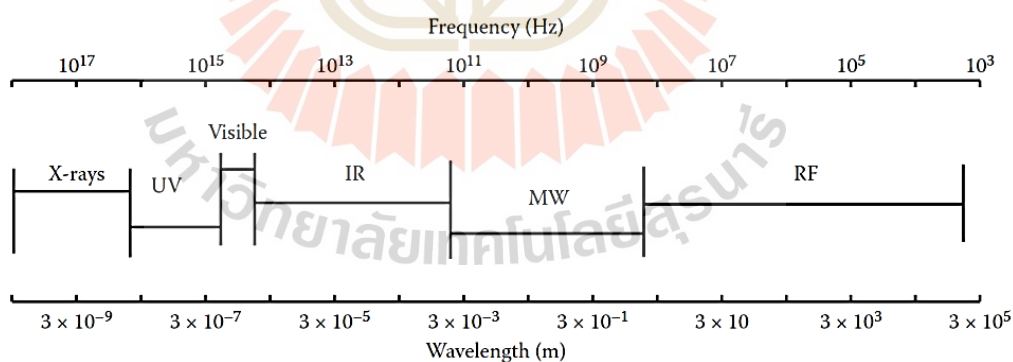
2.3.4 หลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกด้วยความถี่วิทยุ

ความร้อนที่เกิดจากคลื่นความถี่วิทยุและความถี่ไมโครเวฟเป็นลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการส่งพลังงานไปยังวัสดุเพื่อทำให้เกิดความร้อน กระบวนการนี้เรียกว่า การ

สูญเสียของวัสดุ การใช้คลื่นความถี่สูงนี้ทำให้เกิดการสลับขั้วในสนามไฟฟ้าและกระตุ้นโมเลกุลภายในวัสดุทำให้เกิดการสั่นไหว ซึ่งเป็นต้นแบบของการกำเนิดความร้อนภายในวัสดุนั้น ๆ พลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ถูกนำมาใช้ในหลายภาคของอุตสาหกรรมอาหาร เช่น การอบแห้ง และการละลายเนื้อสัตว์ที่แช่แข็ง (Richardson, 2001) วิธีนี้แตกต่างจากวิธีการให้ความร้อนทั่วไปทั้งในปริมาณและความเร็วที่แตกต่างกันไป

2.3.4.1 การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกด้วยความถี่วิทยุ

การให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุและไมโครเวฟเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงในงานวิศวกรรมอาหาร วัสดุไดอิเล็กตริกมักถูกนำมาใช้ในกระบวนการนี้เนื่องจากมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าต่ำ (Barber, 1983) ทำให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำ เป็นข้อดีที่พบว่ามีประสิทธิภาพสูงและเป็นข้อแตกต่างจากการให้ความร้อนแบบธรรมดา เช่น การนำความร้อนและการพาความร้อนที่ใช้เวลานานในการเป็นต้น วิธีการเหล่านี้ใช้แหล่งความร้อนภายนอกวัสดุและนำความร้อนผ่านผิววัสดุไปยังภายใน ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นช้า ๆ ซึ่งแตกต่างจากการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกที่สร้างความร้อนจากภายในวัสดุเอง มีความเร็วและอุณหภูมิที่สูงมีอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นในการให้ความร้อนจึงขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ ทำให้การใช้การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกเป็นทางเลือกที่นิยมมาก ความแตกต่างระหว่างคลื่นความถี่วิทยุและไมโครเวฟอยู่ที่ความถี่และความยาวคลื่น ความถี่วิทยุมีช่วงความถี่ตั้งแต่ 3 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 300 เมกะเฮิร์ตซ์ ในขณะที่ไมโครเวฟมีความถี่ตั้งแต่ 300 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 300 กิกะเฮิร์ตซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.45



รูปที่ 2.45 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Marra F. et al., 2009)

คลื่นความถี่วิทยุและคลื่นเอกซเรย์ โดยกล่าวถึงความยาวคลื่นและความถี่ของแต่ละชนิดของคลื่น ความถี่วิทยุมีความยาวคลื่นที่ยาวกว่าไมโครเวฟ แต่อยู่ในช่วงของเรดาร์และสามารถเชื่อมต่อกับระบบสื่อสารได้ แต่มีแค่นี้ก็ความถี่เท่านั้น ที่ได้รับอนุญาตสำหรับการใช้งานด้านอุตสาหกรรมวิทยาศาสตร์และการแพทย์ (ISM) โดยความถี่วิทยุเหล่านั้น มีดังนี้ 13.56, 27.12 และ 40.68

เมกะเฮิรตซ์ และสำหรับไมโครเวฟ 915 เมกะเฮิรตซ์ และ 2,450 เมกะเฮิรตซ์ ที่ได้รับอนุญาต ความถี่วิทยุและไมโครเวฟมีความยาวคลื่นที่สอดคล้องตามตารางที่ 2.1 และความถี่ที่สูงจะทำให้ความยาวคลื่นลดลงเช่นกัน

$$c = \lambda f \quad (2.8)$$

โดยที่ c คือ ความเร็วของแสง ($2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$)

λ คือ ความยาวคลื่น (m)

f คือ ความถี่ (Hz)

ตารางที่ 2.1 คลื่นความถี่วิทยุและความยาวคลื่นไมโครเวฟ (Tang et al., 2000)

รูปแบบ	ความถี่วิทยุ			ไมโครเวฟ	
ความถี่ (MHz)	13.56	27.12	40.68	915	2450
ความยาวคลื่น (m)	22	11	7.4	0.33	0.12

ลักษณะการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก เป็นขั้นตอนกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับโมเลกุลของวัสดุไดอิเล็กตริก เช่น อาหาร เมื่อไดอิเล็กตริกอยู่ในสนามไฟฟ้าสลับ โมเลกุลจะมีขั้วทางไฟฟ้า ทำให้โมเลกุลเกิดการเคลื่อนที่โดยการโยกย้ายขั้วไปตามสนามไฟฟ้า และนำไปสู่การโพลาไรซ์เซชัน ซึ่งทำให้เกิดการหมุนของขั้ว (Dipole rotation) โดยปรากฏว่า ขั้วของโมเลกุลจะหมุนไปตามสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่นี้เป็นสาเหตุของการสูญเสียพลังงานและเกิดการให้ความร้อน ซึ่งเป็นหลักการที่ใช้ในการทำเครื่องทำความร้อนแบบไดอิเล็กตริกในการปรุงอาหารและอุตสาหกรรมอื่น ๆ (Marra et al., 2009) การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกโดยการเหนี่ยวนำด้วยไอออนคือกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อมีการหมุนของประจุบริเวณรอบ ๆ โมเลกุลภายใน ซึ่งทำให้คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเปลี่ยนพลังงานเป็นความร้อน และทำให้อุณหภูมิภายในวัสดุเพิ่มมากขึ้น กระบวนการนี้แตกต่างจากการเคลื่อนไหวของไอออนในอาหารที่แยกออกจากกัน เรียกว่า การเหนี่ยวนำด้วยไอออน (Ionic conduction) และการหมุนของขั้ว เป็นกลไกหลักสำหรับการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก ด้วยการใช้ความถี่วิทยุและไมโครเวฟ ทั้งสองกลไกนี้ ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นสนามไฟฟ้าและความถี่ที่ใช้ในการเหนี่ยวนำไอออน กระบวนการนี้สามารถใช้ในการผลิตอุปกรณ์ที่ให้ความร้อนได้เป็นอย่างดี และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในหลายๆ อุตสาหกรรมที่แตกต่างกันได้

2.3.4.2 คุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริก

เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการใช้คลื่นความถี่ มีความสำคัญสำหรับการออกแบบตัวปล่อยคลื่นความถี่ จากการศึกษาเรื่องนี้ เราสามารถทราบถึงกระบวนการเกิดและการแพร่กระจายความร้อนในไดอิเล็กตริกได้ การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก ที่มีลักษณะเฉพาะภายใต้ของการใช้งานคลื่นที่ความถี่ต่าง ๆ สามารถอธิบายได้จากการเปลี่ยนแปลงในขณะที่ใช้คลื่น โดยใช้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกยังผลเป็นตัวบ่งชี้ที่เรียกว่า dielectric constant ซึ่งมีสมการเชิงความสัมพันธ์ตามที่กล่าวถึงในงานวิจัยของ (Wang1, et.al., 2003)

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad \varepsilon^* = \varepsilon \quad (2.9)$$

เมื่อ ε'' คือ ปัจจัยที่ทำให้เกิดการสูญเสียยังผล หรือ Dielectric loss factor เป็นผลมาจากส่วนที่เป็นจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ และอุณหภูมิที่ใช้ของวัสดุ นั้น ๆ นอกจากนี้ยังสามารถใช้การนิยาม Loss tangent เพื่ออธิบายอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่สูญเสียไป และพลังงานที่เก็บไว้ในวัสดุ มีไว้เพื่อวิเคราะห์ค่าการสูญเสียในวัสดุต่าง ๆ เช่น วัสดุฉนวนหรือวัสดุสื่อสาร และสามารถคำนวณตามสมการที่ได้รับกล่าวถึงในบทความ (สมการที่ 2.10)

$$\tan \delta = \varepsilon'' / \varepsilon' \quad (2.10)$$

วัสดุไดอิเล็กตริกมีคุณสมบัติเสถียรและเป็นของเหลว ที่สามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าในย่านความถี่วิทยุและไมโครเวฟเป็นพลังงานความร้อน โดยการทำอันตรกิริยากันระหว่างพลังงานไมโครเวฟ และตัวกลางที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบมีขั้ว ซึ่งทำให้เกิดความร้อนและสามารถใช้งานได้หลาย ๆ วงการ เช่น ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมและการแพทย์ ซึ่งมีการพัฒนาวัสดุได้อย่างต่อเนื่อง เพื่อความสะดวกและประหยัดพลังงานในการใช้งาน ดังนั้น การใช้งานวัสดุไดอิเล็กตริกนี้จะช่วยลดการใช้พลังงานได้ และคำนวณได้ตามสมการที่ 2.11 และ 2.12 (Nelson, 1996)

$$P = \rho C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (2.11)$$

$$\rho C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} = 5.563 \times 10^{-11} f E^2 \varepsilon'' \quad (2.12)$$

โดยที่ P คือ พลังงานที่เกิดขึ้นในวัสดุไดอิเล็กตริก (W / m^3)

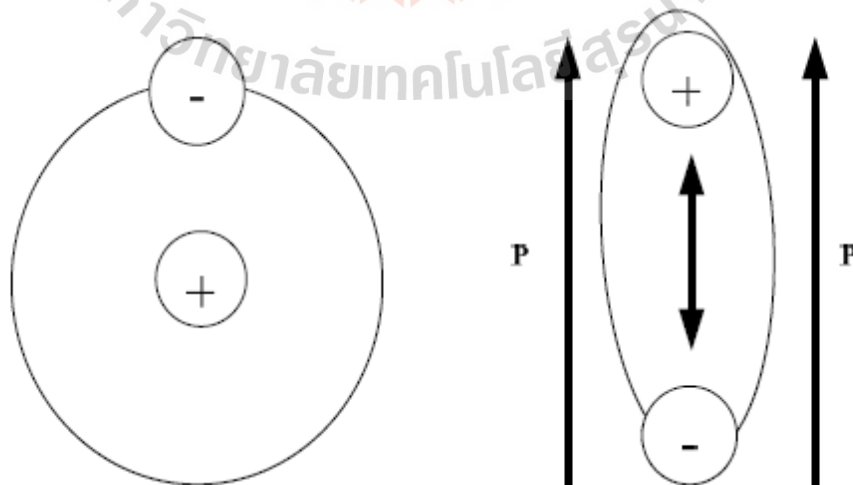
C_p คือ ความร้อนจำเพาะ (specific heat) ($J / kg \cdot ^\circ C$)

ρ	คือ ความหนาแน่นของวัสดุ (kg / m^3)
E	คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้า (V / m)
Δt	คือ ระยะเวลา (s)
ΔT	คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในวัสดุ $^{\circ}C$
f	คือ ความถี่ dA (Hz)

2.3.4.2 กลไกการให้ความร้อนแกไดอิเล็กตริก

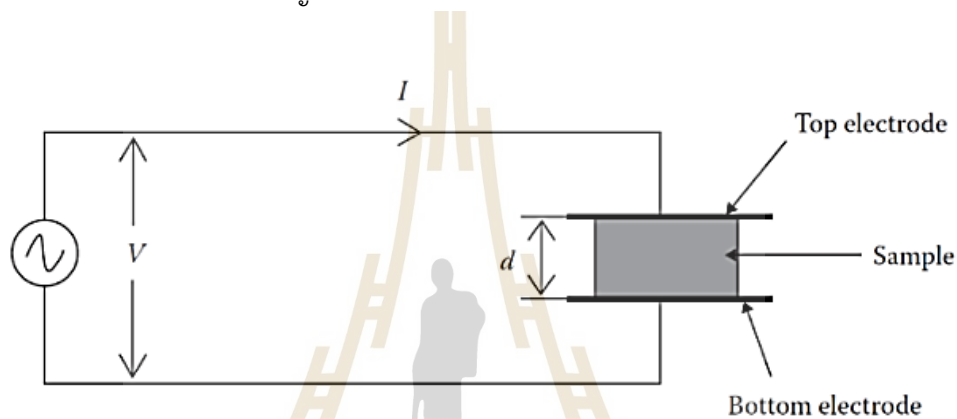
วัสดุที่เรียกว่าไดอิเล็กตริกมีความสามารถในการสร้างความร้อนเมื่อมีการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปในมัน ความสามารถนี้มีต้นทางจากการสร้างโพลาริซซ์ภายในไดอิเล็กตริกเกิดขึ้นโดยมีการป้อนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปในวัสดุนั้น สำหรับกรณีที่มีการแปลงพลังงานในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสลับ โพลาริซซ์จะถูกสร้างขึ้นเหมือนกันตามรูปที่ 2.46 แต่การหมุนของโพลจะตามรอบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และการหมุนนี้จะทำให้ได้ความร้อน โดยมีการเสียดทานภายในโมเลกุล การหมุนนี้เกิดขึ้นตามคาบเวลาของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสลับ และการหมุนของโพลจะมีผลในการสร้างความร้อน โดยเกิดจากค่าไดโพลโมเมนต์ที่สูง ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดความเป็นไปได้ในการสร้างความร้อนในไดอิเล็กตริก และวัสดุไดอิเล็กตริกสูญเสียส่วนใหญ่จะมีส่วนผสมของน้ำในตัว

โดยปกติแล้ววัสดุไดอิเล็กตริกนี้ สามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าได้โดยการแยกประจุบวกและประจุลบ นั้นเกิดจากการให้พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าสู่วัสดุไดอิเล็กตริก ทำให้เกิดการแยกประจุภายในวัสดุนั้น ๆ โดยวัสดุไดอิเล็กตริกจะต้านต่อแรงยึดเหนี่ยวของอะตอมหรือโมเลกุลที่มีอยู่ภายใน การแยกประจุนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุไดอิเล็กตริก และความถี่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวัสดุไดอิเล็กตริกนั้น ๆ



รูปที่ 2.46 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างประจุบวกและประจุลบในอะตอม

วัสดุไดอิเล็กตริกเป็นชนิดของวัสดุที่สามารถสร้างความร้อนเมื่อมีการป้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปในนั้น ความสามารถในการสร้างความร้อนเกิดจากการโพลารไรซ์ของประจุภายในไดอิเล็กตริกที่ถูกสร้างขึ้นโดยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกป้อนเข้าไปในนั้น ในกรณีที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีพลังงานที่สลับตามเวลา โพลารไรซ์จะเกิดขึ้นเช่นเดียวกัน แต่การหมุนของโพลจะเกิดตามคาบเวลาของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การหมุนของโพลนี้ทำให้เกิดเป็นความร้อนอยู่ภายในไดอิเล็กตริก โดยมีสาเหตุมาจากความเสียดทานภายในของโมเลกุล วัสดุไดอิเล็กตริกที่มีค่าไดโพลโมเมนต์สูงเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพในการทำให้เกิดความร้อนในไดอิเล็กตริก ในขณะที่วัสดุไดอิเล็กตริกที่สูญเสียส่วนใหญ่ มักจะมีน้ำเป็นส่วนประกอบสำคัญ



รูปที่ 2.47 รูปแบบการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกด้วยความถี่สูง

รูปแบบการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกด้วยความถี่วิทยุ ที่ใช้หลักการของตัวเก็บประจุสำหรับการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก ดังรูปที่ 2.47 เป็นการออกแบบเป็นตัวเก็บประจุแบบแผ่นเพลต ซึ่งจะแสดงค่าความจุตามสมการที่ 2.13

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r' A}{d} \quad (2.13)$$

เมื่อ	C	คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุ (F)
	A	คือ พื้นที่ผิวของเพลตด้านที่ติดกับโพลไดอิเล็กตริก (m^2)
	d	คือ ระยะห่างระหว่างเพลต (m)
	ϵ_0	คือ สภาพความยอมของสุญญากาศ ($8.854 \times 10^{-12} F/m$)
	ϵ_r'	คือ ปัจจัยการสูญเสียของไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์

การเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุโดยใช้ความถี่วิทยุเป็นวิธีที่นำเสนอไว้ในงานวิจัย โดยมีการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนแปลงพลังงานเหล่านี้ให้กลายเป็นความร้อน การทำนี้ขึ้นอยู่กับความยอมของวัสดุที่ใช้, ความถี่ของคลื่นวิทยุ, และความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ใช้ (Orfeuil, 1987) สามารถใช้สมการที่ถูกระบุไว้ในงานวิจัยดังกล่าวเพื่อคำนวณหาอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปได้ดังสมการที่ 2.14

$$\Delta T = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon''ftE^2}{\rho C_p} \quad (2.14)$$

เมื่อ	ΔT	คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ($^{\circ}C$)
	t	คือ ระยะเวลาที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น (s)
	f	คือ ความถี่ (Hz)
	ε_0	คือ สภาพความยอมของสุญญากาศ ($8.854 \times 10^{-12} F/m$)
	ε''	คือ ปัจจัยการสูญเสียของไดอิเล็กตริก
	E	คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m^3)
	C_p	คือ ความร้อนจำเพาะ ($J/kg.^{\circ}C$)

ระดับความลึกผิว ความสำคัญของความถี่ของคลื่นวิทยุในการทะลุทะลวงเข้าสู่วัสดุ เกิดจากการลดลงของพลังงานขณะที่คลื่นวิทยุป้อนเข้าไปในพื้นที่ของวัสดุที่เป็นไดอิเล็กตริก โดยคลื่นวิทยุมีความยาวคลื่นมากกว่าคลื่นความถี่ไมโครเวฟ และมีความถี่ต่ำกว่า ดังนั้น ความถี่ของคลื่นวิทยุเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้งาน การคำนวณค่าการทะลุทะลวงของคลื่นสามารถใช้สมการที่ 2.15 ในการวัด โดยการตรวจสอบค่าความถี่ของคลื่นวิทยุที่ต้องการใช้ และพิจารณาค่าที่เหมาะสมกับวัสดุที่จะนำมาใช้งานได้

$$d_p = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\varepsilon' \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} - 1 \right]}} \quad (2.15)$$

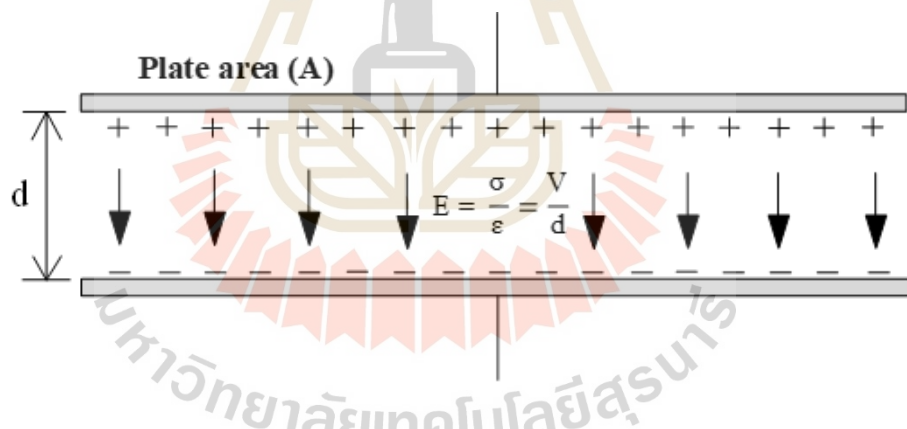
โดยที่	d_p	คือ ความลึกของการทะลุทะลวง
	c	คือ ความเร็วแสงในอวกาศว่าง ($3 \times 10^8 m/s$)

การศึกษาคุณสมบัติของดินปนเปื้อนตะกั่ว เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบเครื่องและเก็บผลการทดลองต่อไป โดยวิจัยนี้ใช้หลักการส่งผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังดินปนเปื้อนตะกั่ว เพื่อให้เกิดการสั่นในดินปนเปื้อนตะกั่ว ซึ่งทำให้ตะกั่วปนที่เปื้อนในดินนั้นถูกผลักขึ้นไปติดเพลทในที่สุด โดยดินปนเปื้อนตะกั่วเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียต่างกันระหว่างอุณหภูมิและความถี่ การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุนี้จะช่วยให้เราเข้าใจลักษณะของวัสดุและสามารถนำมาใช้ในการออกแบบเครื่องและการทดลองต่อไปได้โดยมีประโยชน์อย่างมากในการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ ในอนาคต

2.3.5 หลักการพื้นฐานของการกระจายความร้อนด้วยคลื่นสนามไฟฟ้า

1) หลักการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้า

หลักการของตัวปล่อยคลื่น ได้มีความสำคัญในขั้นตอนกระบวนการ ซึ่งเป็นส่วนที่มีบทบาทในการกระจายพลังงานสนามไฟฟ้าเข้าสู่วัสดุไดอิเล็กตริก เพื่อให้มีความเหมาะสมของการกระจายคลื่นนั้น การวิเคราะห์ขนาดและปริมาณที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญในกระบวนการนี้ การวิจัยในหลาย ๆ งานที่ผ่านมาได้พัฒนาตัวปล่อยคลื่นแบบแผ่นเพลท ซึ่งเป็นที่ยอมรับในการให้ความร้อนที่เหมาะสมที่สุด นั่นเพราะมีการกระจายสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเพลทมากที่สุด โดยใช้วัสดุตัวกลางที่มีการสูญเสีย ซึ่งลักษณะของตัวปล่อยคลื่นแบบแผ่นเพลทได้แสดงในรูปที่ 2.48



รูปที่ 2.48 รูปแบบตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลท

จากรูปที่ 2.48 เป็นลักษณะตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลท ซึ่งสามารถออกแบบได้จากสมการที่ 2.16

$$C = \frac{k\epsilon_0 A}{d} \quad (2.16)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริก
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นเพลท (m^2)

ϵ คือ $8.857 \times 10^{-12} \text{ F/m}$
 d คือ ระยะห่างระหว่างเพลต (m)

ลักษณะของการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้า จะมีการกระจายตัวจากการมีแรงดันขั้วบวกไปยังขั้วลบของแผ่นเพลต โดยค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นเพลตสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 2.17

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{V}{d} \quad (2.17)$$

โดยที่ ϵ คือ ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริก
 V คือ แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างแผ่นเพลต (Voltage)
 d คือ ระยะห่างระหว่างเพลต (m)
 σ คือ ค่าความนำของวัสดุไดอิเล็กตริก

โดยตัวแปรหลักที่ใช้ในการประเมินความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นประกอบด้วย แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างแผ่นเพลต (V) และระยะห่างของสองแผ่นเพลต (d) เป็นตัวที่สำคัญในการวิเคราะห์นี้ ดังนั้นการตรวจสอบแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างสองแผ่นเพลตเป็นส่วนสำคัญในการประเมินความเข้มของสนามไฟฟ้า และทำให้สามารถทำการวิเคราะห์การส่งความร้อนไปที่ตัววัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

2.3.6 คุณลักษณะของตัวเหนี่ยวนำ

การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ โดยไม่ให้เกิดการหักล้างของสนามแม่เหล็กและสามารถเพิ่มความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในพื้นที่ที่ต้องการได้ มีวิธีการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำที่หลากหลาย โดยแบ่งเป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ helical solenoid, pancake coil และ internal coil โดยทั่วไปใช้ลวดแดงในฐานะตัวนำไฟฟ้า เรียกว่า "copper wire" และมีลักษณะตัวอย่างขดลวดที่แตกต่างกัน เช่น กลม, สี่เหลี่ยมผืนผ้า, จักรูป, แพนเค้ก, เกลียวเฮลิคอลล และ สปริงภายใน การเลือกใช้ขดลวดเหนี่ยวนำต้องพิจารณาสถานะของงานและรูปร่างวัสดุที่เหมาะสม เพื่อลดการสูญเสียพลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพในระบบ ความสำคัญของการคำนึงถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของขดลวดเหนี่ยวนำในการออกแบบมีปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณา ได้แก่ จำนวนเส้นแรงแม่เหล็ก, ความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยรวม, และการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำ การคำนวณและพิจารณาปัจจัยเหล่านี้ช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถเลือกใช้วัสดุและการออกแบบที่เหมาะสมกับการใช้งานและเงื่อนไขที่แตกต่างกันได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยถูกกำหนดโดย 3 ปัจจัยดังนี้

1) จำนวนรอบของขดลวดมีผลกระทบต่อค่าความเป็นผู้นำของวัสดุที่ผลิตจากขดลวดได้ การเพิ่มจำนวนรอบของขดลวดจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีขนาดมากขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดมีปริมาณมากขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ เมื่อมีจำนวนรอบของขดลวดเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งเกิดจากการตัดขดลวดที่ประสานกับเส้นแม่เหล็ก ซึ่งทำให้ค่าความเป็นผู้นำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น ค่าความเป็นผู้นำของวัสดุนั้นจะเป็นสัดส่วนตรงกับจำนวนรอบของขดลวดที่มีในวัสดุนั้น ๆ

2) จำนวนรอบของขดลวดมีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำของวัสดุที่ทำจากขดลวด เมื่อมีจำนวนรอบของขดลวดมากขึ้น สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดจะเกิดมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นในตัวเหนี่ยวนำ โดยเส้นแรงแม่เหล็กจะตัดกับขดลวดและส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำของวัสดุนั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนรอบของขดลวดที่มีอยู่ในวัสดุนั้น ๆ

3) การขยายหรือหดขนาดของลวดจะมีผลต่อสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น การขยายขนาดของลวดโดยการขดลวด 4 รอบจะทำให้ลวดที่ถูกพันกันมากขึ้น ซึ่งจะเพิ่มปริมาณของสนามแม่เหล็ก และทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นด้วย ในทางกลับกัน การขดลวด 4 รอบที่แต่ละรอบมีการหดขนาดจะทำให้ปริมาณลดลง และสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะไม่มีการเสริมกัน ซึ่งทำให้ค่าความเหนี่ยวนำลดลงตามไปด้วย ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงขนาดของลวด

$$L = \frac{\mu AN^2}{l} \quad (2.18)$$

เมื่อ	L	คือ ความเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น เฮนรี
	μ	คือ ความซึมซาบได้
	N	คือ จำนวนรอบของขดลวด
	A	คือ พื้นที่หน้าตัด มีหน่วยเป็นตารางเมตร
	l	คือ ความยาวของวัสดุที่นำมาทำแกน มีหน่วยเป็น เมตร

2.4 สรุป

การออกแบบการพันฟิวินที่ปนเปื้อนสารตะกั่วมีขั้นตอนและหลายด้านที่ต้องพิจารณาเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสม โดยเราเน้นการใช้คลื่นความถี่สูงเพื่อบำบัดดินในช่วงความถี่ที่เหมาะสม การศึกษาหลักการให้ความร้อนแบบ RF เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยเราได้ศึกษาหลักการแผ่กระจายคลื่นวิทยุเข้าสู่วัสดุเพื่อผลิตพลังงานความร้อนและนำไปใช้ในการพันฟิวินที่ปนเปื้อน

นอกจากนี้ เราได้ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริกและระบบการใช้งานคลื่นความถี่เพื่อทราบถึงกระบวนการในการให้ความร้อนส่งผ่านไปยังไดอิเล็กตริกในกระบวนการออกแบบการทดลอง เราใช้สมการที่เหมาะสมสำหรับการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกด้วยความถี่วิทยุ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อน การทดลองนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อการออกแบบกระบวนการทำให้ได้ผลลัพธ์ที่เชื่อถือได้ เพื่อเสริมความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการนี้ ทางเรายังได้ศึกษาหลักการพื้นฐานของการแพร่กระจายความร้อนผ่านการใช้คลื่นไฟฟ้า เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนอย่างเหมาะสม และได้เข้าใจเกี่ยวกับหลักการพื้นฐานนี้จะช่วยให้กระบวนการออกแบบที่ดีที่สุดและเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมและเนื้อดินที่ต้องการฟื้นฟู



บทที่ 3

การวางแผนรูปแบบการทดสอบ

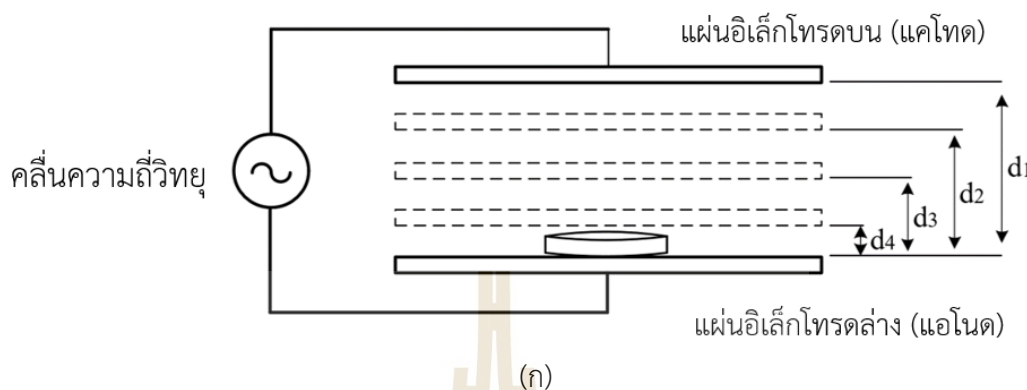
3.1 กล่าวนำ

ในส่วนของบทนี้ ได้กล่าวถึงรูปแบบการทดสอบ โดยขั้นตอนแรกเป็นการศึกษาและออกแบบความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงด้วยสมการการคำนวณ เมื่อค่าความเข้มสนามไฟฟ้ามาแล้วจึงได้ทำการวางรูปแบบการทดลองตัวโดยใช้ระบบการให้ความร้อนแบบ RF หลังจากการทดสอบตัวอย่างดินเสร็จสิ้น เราได้นำดินทั้งหมดไปวัดค่าไดอิเล็กตริก สำหรับวิเคราะห์ผลจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างตัวอย่างดินก่อน และหลังการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบต้องอยู่ในสภาพแวดล้อมเดียวกันเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องและเปรียบเทียบได้ เช่น หัววัดโคแอกเซียลแบบปลายเปิด, เครื่องวิเคราะห์เครือข่าย Agilent Technologies (E5071C), และห้องปฏิบัติการที่มีคอมพิวเตอร์ที่ใช้ซอฟต์แวร์เสริมสำหรับการวิเคราะห์ การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าความถี่สูงที่แผ่กระจายเข้าไปในโหลดที่เป็นดิน จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มการครอบคลุมของคลื่นสนามไฟฟ้า และนำผลลัพธ์ที่ได้มาใช้ในการเปรียบเทียบอย่างชัดเจน ผลลัพธ์จากการทดสอบถูกบันทึกไว้ในระหว่างกระบวนการจากระบบการให้ความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง ทำให้ได้ข้อมูลที่มีประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์และทำความเข้าใจในพฤติกรรมของดินในสภาพสนามไฟฟ้าที่มีความถี่สูง

3.2 รูปแบบการทดลองสำหรับระบบการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

จากการทำวิจัยนี้ เราได้ใช้ระบบการให้ความร้อนแบบด้วยคลื่นความถี่วิทยุหรือที่นิยมเรียกกันว่า RF และทำงานที่ความถี่ 40.68 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งช่วงความถี่ที่ใช้สำหรับการทำความร้อนในอุตสาหกรรมอยู่ระหว่าง 10 ถึง 50 เมกะเฮิร์ตซ์ (Xueyan Tang., et al. 2005) นอกจากนี้ความถี่ที่ได้รับอนุญาตสำหรับการใช้งานทางการแพทย์วิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม คือ 13.56, 27.12 และ 40.68 เมกะเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ (Francesco Marra., et al. 2009) และระบบนี้ประกอบด้วยแผ่นอิเล็กโทรดทั้งหมดสองแผ่น โดยทั้งสองแผ่นมีขนาดเท่ากันที่ 520 มม. x 520 มม. แผ่นด้านบนถูกออกแบบให้เป็นขั้วแคโทด และแผ่นด้านล่างเป็นขั้วแอโนด ในขณะที่แผ่นด้านล่างถูกทำให้คงที่และไม่สามารถขยับได้ การออกแบบแผ่นด้านบนได้ถูกปรับเปลี่ยนเพื่อให้สามารถปรับระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าได้ ซึ่งมีระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่สามารถปรับได้ ดังนี้ 112.5 กิโลโวลต์ต่อเมตร, 150 กิโลโวลต์ต่อเมตร, 225 กิโลโวลต์ต่อเมตร และ 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร เพื่อให้ได้อัตราการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากนี้ การวิจัยยังพิจารณาการกระจายอุณหภูมิในระบบโดย

มีการแสดงผลในรูปที่ 3.1 ซึ่งบ่งชี้ถึงการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอภายในระบบ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด



รูปที่ 3.1 รูปแบบการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (ก) การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุแก่ตัวอย่างดินปนเปื้อนสารตะกั่วที่ระยะต่าง ๆ (ข) ตัวอย่างการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่สูง

3.2.1 การวิเคราะห์ผลของวัสดุที่มีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้า

ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบเป็นดินชนิดดินนา ถูกทำให้แห้งด้วยการนำไปตากแดด เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากที่ดินแห้งแล้ว จึงนำไปปั่นให้ละเอียดและทำการกรองผ่านตะแกรงเพื่อกรองดินที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ออก ทำให้ได้ดินที่มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 0.10 มิลลิเมตร ถึง 0.25 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นดินขนาดที่ต้องการ จากนั้นนำไปใช้ในการทดลองในขั้นตอนต่อไป ดินที่ผ่านการแปร

รูปเสร็จแล้วจะถูกปนเปื้อนเทียมด้วยตะกั่ว (II) อะซีเตต ไตรไฮเดรต ซึ่งเป็นสารตัวแทนที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้ โดยสารตะกั่ว (II) อะซีเตต ไตรไฮเดรต จะถูกแบ่งออกเป็น 3 ปริมาณ ได้แก่ 200, 600 และ 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร สำหรับการปนเปื้อนเทียม ตัวอย่างดินที่ผ่านกระบวนการแล้วทั้งหมดจะถูกเก็บไว้ในจานแก้ว (เส้นผ่านศูนย์กลาง 9.3 เซนติเมตร x 1.5 เซนติเมตร) พร้อมตัวอย่างดิน 100 กรัม ดินทั้งหมดจะถูกแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้ ดินปกติ, ดินผสมปนเปื้อนตะกั่ว 200, 600 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งกลุ่มที่ 1 นี้จะใช้สำหรับนำไปวัดค่าไดอิเล็กตริกเท่านั้น และกลุ่มที่ 2 ใช้สำหรับนำไปทดสอบ RF ก่อนจะนำไปวัดไดอิเล็กตริกในขั้นตอนถัดไป ทั้งนี้เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของทั้ง 2 รูปแบบดังกล่าว และการเตรียมวัสดุได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของการเตรียมตัวอย่างดิน

รายการ	ค่า
ดิน	100 กรัม
ขนาดอนุภาคของเม็ดดิน	0.10 – 0.25 mm
ความพรุน	0.69
ปริมาตรของขวดใส่ดิน	100 ลูกบาศก์เซนติเมตร
ความหนาแน่น	0.85 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
ปริมาณสารตะกั่ว	200, 600, 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

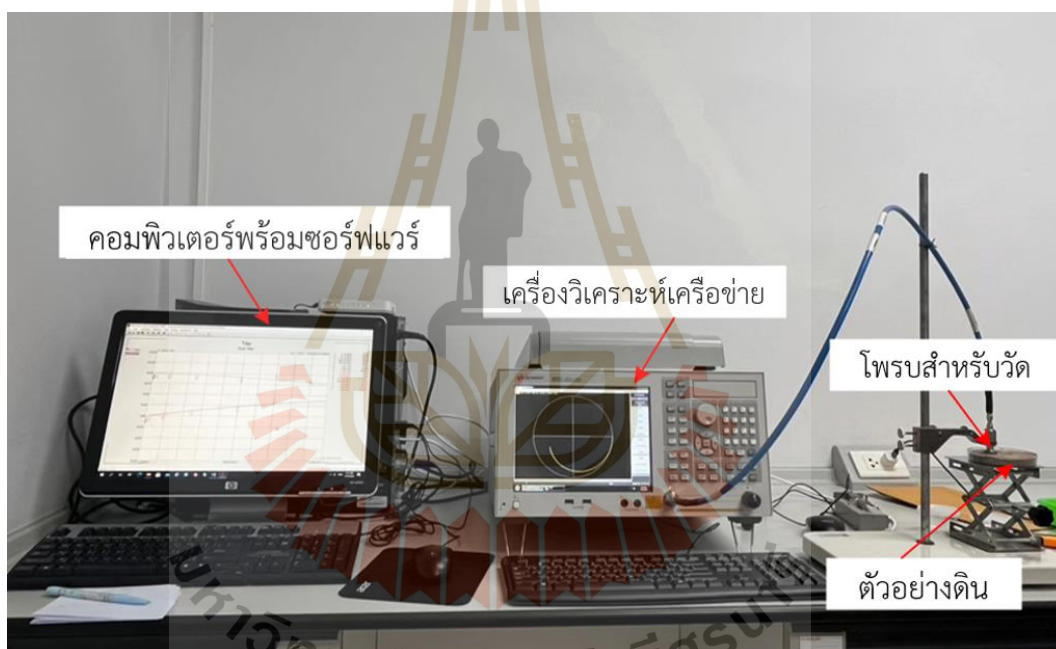
3.2.2 การวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติของโพลติไดอิเล็กตริก

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกจะต้องอยู่ในสภาพแวดล้อมเดียวกัน ประกอบด้วย หัววัดโคแอกเซียลแบบปลายเปิด เครื่องวิเคราะห์เครือข่าย Agilent Technologies (E5071C) คอมพิวเตอร์ที่มีซอฟต์แวร์เสริมในห้องปฏิบัติการ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งจะใช้ค่าไดอิเล็กตริกของตัวอย่างดินที่ไม่มีการปนเปื้อน (Control Normal) และดินที่ปนเปื้อนที่ความเข้มข้นสารตะกั่วต่าง ๆ ที่ไม่ผ่านความร้อนแบบ RF ใช้กำหนดเป็นพารามิเตอร์ไดอิเล็กตริกพื้นฐานเพื่อเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ไดอิเล็กตริกดินปนเปื้อน โดยกำหนดช่วงความถี่กว้างตั้งแต่ 20 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 10 กิกะเฮิร์ตซ์ และใช้หัววัดไดอิเล็กตริกเป็นแบบ High Temperature สำหรับการเก็บข้อมูลและการคำนวณคุณสมบัติไดอิเล็กตริกตามที่แนะนำใน (Shunda Lin., et al. 2020) การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเกี่ยวข้องกับการหาทั้งค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและปัจจัยการสูญเสียไดอิเล็กตริก ดังที่อธิบายไว้ในสมการต่อไปนี้

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (3.1)$$

โดยที่ ε' คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และ ε'' คือค่าปัจจัยในการสูญเสียไดอิเล็กตริก

กระบวนการในการปรับเทียบเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ประกอบไปด้วย อากาศ, การช้อนด้วยโพรบ และน้ำปราศจากไอออน ซึ่งการปรับเทียบ และการวัดในครั้งนี้ได้ถูกดำเนินการขึ้นในห้องปฏิบัติการที่มีระดับอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ก่อนเริ่มทำการวัดนั้นจะต้องทำการตั้งค่าระบบก่อนทุกครั้ง โดยกำหนดช่วงการวัดที่ 20 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 10 กิกะเฮิรตซ์ โดยใช้ VNA กำหนดค่าด้วยจุดสุ่มตัวอย่างทั้งหมด 1,001 จุด



รูปที่ 3.2 การวัดค่าตัวอย่างของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.3 รูปแบบการทดสอบตัวอย่างดินปนเปื้อนด้วยคลื่นสนามไฟฟ้า

จากการออกแบบและวิเคราะห์การใช้คลื่นสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มของสนามไฟฟ้าความถี่สูงในการกำจัดสารตะกั่วปนเปื้อนในดิน หลังจากได้รับข้อมูลจากการทดสอบองค์ประกอบต่าง ๆ สำหรับระบบนี้ เราได้นำเสนอแผนการทดสอบผลกระทบของความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการกำจัดสารปนเปื้อนตะกั่วในดิน การศึกษาและการออกแบบนี้ จะนำไปใช้ในระบบจริง เราได้กำหนดค่าของกำลังอินพุตที่ตำแหน่งที่กำหนดโดยใช้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 9 กิโลโวลต์ และกำหนดค่าของความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระหว่างแผ่นเพลททั้ง 2 แผ่น ที่มีระดับ 4 ระดับคือ 450, 225, 150, และ

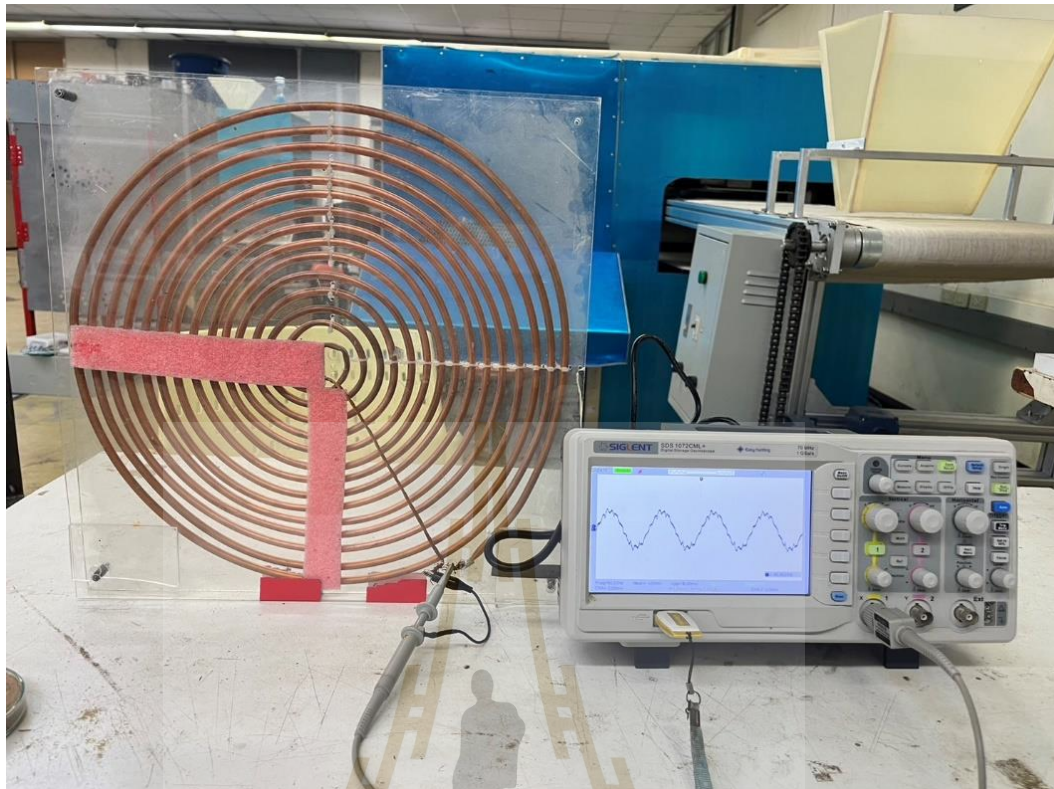
112.5 กิโลโวลต์ต่อเมตร ตามลำดับการศึกษานี้ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือการวางแผนการทดสอบดินที่ไม่ได้รับความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูง และการวางแผนการทดสอบดินที่มีสารตะกั่วผ่านกระบวนการความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูง การศึกษาและการวางแผนเหล่านี้เป็นส่วนสำคัญในการค้นหาวิธีการปรับปรุงและใช้งานในระบบจริงของเทคโนโลยีนี้ในอนาคต



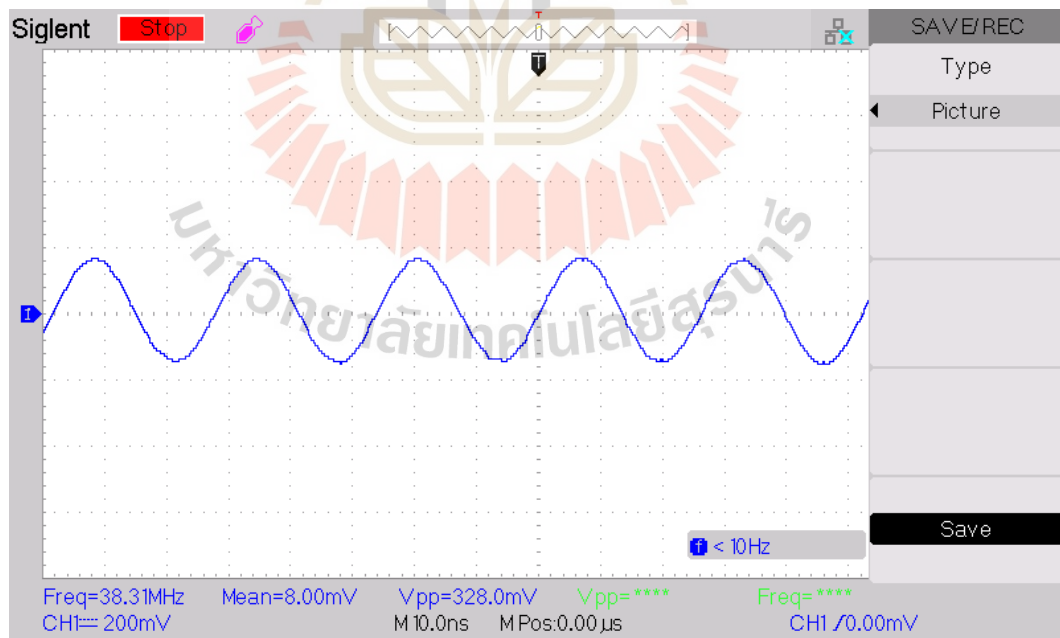
รูปที่ 3.3 เครื่องกำเนิดความร้อนความถี่สูงที่สามารถปรับความชื้นสนามไฟฟ้าได้

3.3.1 การออกแบบการทดสอบระบบตัวปล่อยความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูง

การออกแบบโครงสร้างของระบบตัวปล่อยความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูงที่สามารถปรับความชื้นสนามไฟฟ้าได้ เป็นขั้นตอนที่ซับซ้อนมาก เพื่อให้ระบบนั้นได้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพในการวางรูปแบบโครงสร้าง โดยคำนึงถึงการปรับค่าความชื้นสนามไฟฟ้าได้ตลอดระยะทางของแผ่นเพลทขนาดความกว้าง 52 และความยาว 52 เซนติเมตร ซึ่งสามารถปรับความชื้นสนามไฟฟ้าได้ในทุกตำแหน่งของแผ่น ซึ่งในการทดสอบระบบได้ทำการวางแผนการทดสอบโดยการเตรียมโพลต์ในระบบจริงและปรับความชื้นสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเพลท ซึ่งมีการกำหนดระดับความชื้นสนามไฟฟ้าทั้งหมด 4 ระดับ คือ 2 ซม. (450 kV/m), 4 ซม. (250 kV/m), 6 ซม. (150 kV/m), และ 8 ซม. (112.5 kV/m) และการวางแผนทดสอบได้มีการกำหนดระยะของขั้วอิเล็กโทรดแต่ละระดับตามสมการ 2.10 ในบทที่ 2 ทั้งนี้ การทดสอบจะดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ F03203 อาคารเครื่องมือ 3 (F3) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นำผลลัพธ์ที่ได้มาทดสอบใช้ในการพัฒนาระบบตัวปล่อยความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูงอย่างมีประสิทธิภาพ



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.4 การวัดสัญญาณความถี่ที่เกิดจากระบบโดยใช้วิธีการเหนี่ยวนำ (ก) ชุดเครื่องมือวัดสัญญาณออสซิลอโคป (ข) ตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากวัดเมื่อทำการทดสอบ

การทดสอบระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงมีวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ ในการให้ความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงแก่วัดที่ต่างกัน กระบวนการทดสอบนี้แนะนำการใช้กำลังงานเพื่อสร้างสัญญาณความถี่ที่แตกต่างกันจากระบบที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าต่าง ๆ ก่อนที่จะนำข้อมูลไปที่เครื่องมือออสซิลโลสโคปเพื่อการวัดผล เนื่องจากระบบมีแรงดันไฟฟ้ากำลังสูงและไม่สามารถทดสอบโดยการวัดได้โดยตรง วิธีการทดสอบถูกออกแบบในลักษณะของการเหนี่ยวนำ (Induced) โดยสัญญาณจะถูกนำออกจากระบบผ่านขดลวดเหนี่ยวนำก่อนจะนำเข้าเครื่องมือออสซิลโลสโคป Siglent SDS1072CML+ 70MHz เพื่อทำการวัดสัญญาณระบบที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกัน กระบวนการนี้ช่วยให้เราสามารถทำความเข้าใจและวิเคราะห์ผลลัพธ์ของสัญญาณที่เกิดขึ้นในระบบที่มีความแตกต่างกันของความเข้มสนามไฟฟ้า โดยไม่ต้องทำการวัดโดยตรงที่แรงดันไฟฟ้ากำลังสูงที่ไม่สามารถทำได้โดยตรงโดยใช้ออสซิลโลสโคป Siglent SDS1072CML+ 70MHz ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีความแม่นยำ และสามารถเชื่อถือได้ในการวัดสัญญาณความถี่สูง



รูปที่ 3.5 กล้องถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรด

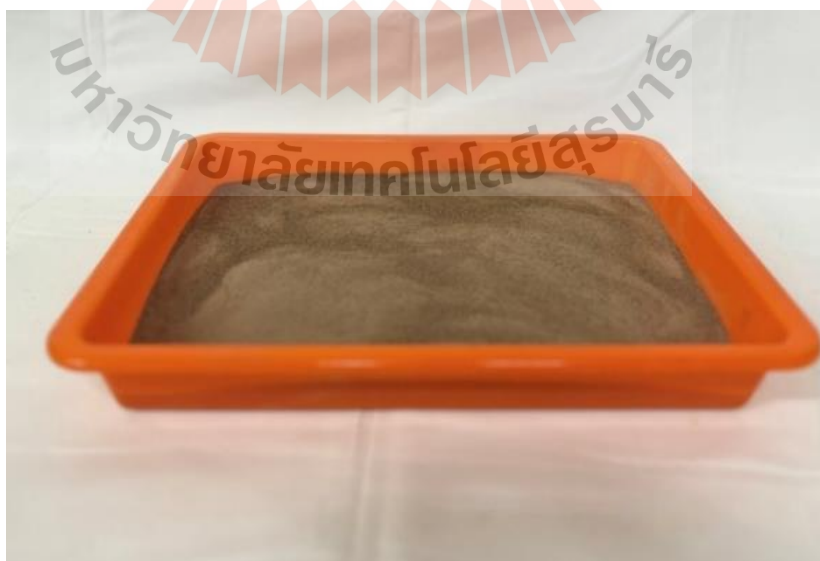
3.3.2 การเตรียมตัวอย่างดินปนเปื้อนสารตะกั่วสำหรับการทดสอบ

ตัวอย่างดินถูกสุ่มมาจากดินชนิดดินนา และถูกนำไปตากแดดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพื่อให้ดินมีความแห้งที่เหมาะสมสำหรับการทดลอง หลังจากที่ดินแห้งแล้ว จะถูกปั่นให้ละเอียดและทำการกรองผ่านตะแกรงเพื่อกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้ได้ดินที่มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 0.10 มิลลิเมตร ถึง 0.25 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมสำหรับการทดลองทางดิน ซึ่งดินที่ได้จากกระบวนการทำให้แห้งและกรองดินจะถูกนำไปใช้ในการทดลองต่อไป โดยการนำตะกั่ว (II) อะซีเตต ไตรไฮเดรตมาปนเปื้อนเทียบกับดิน โดยการแบ่งตะกั่ว (II) อะซีเตต ไตรไฮเดรตเป็น 3 ระดับ คือ 200, 600 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อศึกษาผลกระทบของการปนเปื้อนตะกั่วต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดิน ตัวอย่างดินที่ได้จากกระบวนการทดลองจะถูกแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ ดินปกติ และดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ทั้งนี้เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของทั้ง 2 รูปแบบ

การกระจายตะกั่วลงในดินถูกดำเนินการโดยใช้หลอดฉีดยาเป็นตัวกลาง และจะกระจายตะกั่วในดินในระดับความเข้มข้นต่าง ๆ โดยจะทำให้สารตะกั่วกระจายลงในดินทั่วถึงและมีการดูดซับได้อย่างทั่วถึงในส่วนบนของดิน ทำให้ได้ดินที่มีการปนเปื้อนตะกั่วตามที่ต้องการการปรับความเข้มข้นของสารตะกั่วในดินได้ถูกทำในระดับที่แตกต่างกัน ด้วยความเข้มข้นของสารตะกั่วที่แบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ 200, 600 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีน้ำหนักของดินในแต่ละจานเท่ากับ 100 กรัม และปริมาณสารตะกั่วที่มีอยู่ในแต่ละจานเป็น 69 เปอร์เซ็นต์ หรือเทียบเท่ากับ 69 มิลลิกรัม ขั้นตอนการกระจายสารตะกั่วในดินได้ถูกดำเนินการโดยใช้หลอดฉีดยาเป็นตัวกลาง ซึ่งทำให้สารตะกั่วกระจายลงในดินอย่างทั่วถึงในทุก ๆ ระดับความเข้มข้น ซึ่งช่วยให้การทดสอบทางไฟฟ้าของดินมีความถูกต้องและเหมาะสม



(ก) ก่อนกรอง



(ข) หลังกรอง

รูปที่ 3.6 ตัวอย่างดินก่อนและหลังกรองขนาดอนุภาคความละเอียดสำหรับการทดสอบ



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างดินปนเปื้อนสารตะกั่วที่ระดับความเข้มข้นต่ำ

จากภาพที่ 3.7 ซึ่งเป็นตัวอย่างการทดสอบดินที่มีปนเปื้อน ที่ความเข้มข้นไฟฟ้าต่าง ๆ ได้แก่ 112.5, 150, 225 และ 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร ตามลำดับ วัตถุประสงค์หลักของการทดสอบนี้ คือการศึกษาความเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นไฟฟ้าในดิน โดยการวัดระยะที่เกิดปฏิกิริยาของแผ่นเพลทต่อสารปนเปื้อนในดิน ภายในการทดสอบดินเหล่านี้จะได้รับการวิเคราะห์อย่างละเอียดเพื่อศึกษาประสิทธิภาพและพฤติกรรมของดินในสภาพที่มีการกระทำของความเข้มข้นไฟฟ้าต่าง ๆ ผลลัพธ์ที่ได้จะทำให้เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไฟฟ้าในดินกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดิน อีกทั้งสามารถใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเพื่อช่วยในการพัฒนาวิธีการจัดการดิน ในสภาพแวดล้อมที่มีการกระทำของความเข้มข้นไฟฟ้าต่าง ๆ อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน การศึกษาความเข้มข้นไฟฟ้านี้ ทำให้มีข้อมูลที่มีคุณภาพที่สามารถนำไปใช้ในการวางแผนและพัฒนาโครงการที่เกี่ยวข้องกับการจัดการดินในหลายมิติและสถานการณ์ที่ต่างกันไป การเข้าใจและการนำไปใช้ข้อมูลจากการทดสอบดินที่มีปนเปื้อนต่าง ๆ นี้จะทำให้เกิดประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนาในปัจจุบันและอนาคต

3.4 สรุป

ในบทนี้เราได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์อย่างละเอียดเกี่ยวกับระบบตัวปล่อยความเข้มข้นไฟฟ้าความถี่สูง (RF) โดยในกระบวนการนี้ เราได้มุ่งเน้นที่การออกแบบและการวิเคราะห์ของกระบวนการในการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด ในกระบวนการวิเคราะห์ที่ละเอียดนี้ เราได้พิจารณาคูณสมบัติต่าง ๆ ของไดอิเล็กตริกและทำการเปรียบเทียบค่าต่างๆ เพื่อเลือกใช้ความถี่ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบตัวปล่อยความเข้มข้นไฟฟ้าความถี่สูงแบบแผ่นเพลท การวิเคราะห์และออกแบบนี้ไม่เพียงเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ตอบสนองต่อการให้ความร้อนอย่างมี

ประสิทธิภาพเท่านั้น แต่ยังเน้นไปที่การวางแผนและศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความเข้ม
สนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการกำจัดสารปนเปื้อนตะกั่วในดินสำหรับการเพาะปลูกพืช ข้อมูลที่ได้จาก
กระบวนการวิเคราะห์และออกแบบนี้จะถูกนำมาใช้ในการทดลองในบทต่อไป เพื่อหาผลลัพธ์และ
ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการพัฒนาและปรับปรุงระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อไป
การวิเคราะห์และออกแบบนี้ถือเป็นขั้นตอนสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืน
ในการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกในระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง



บทที่ 4

ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

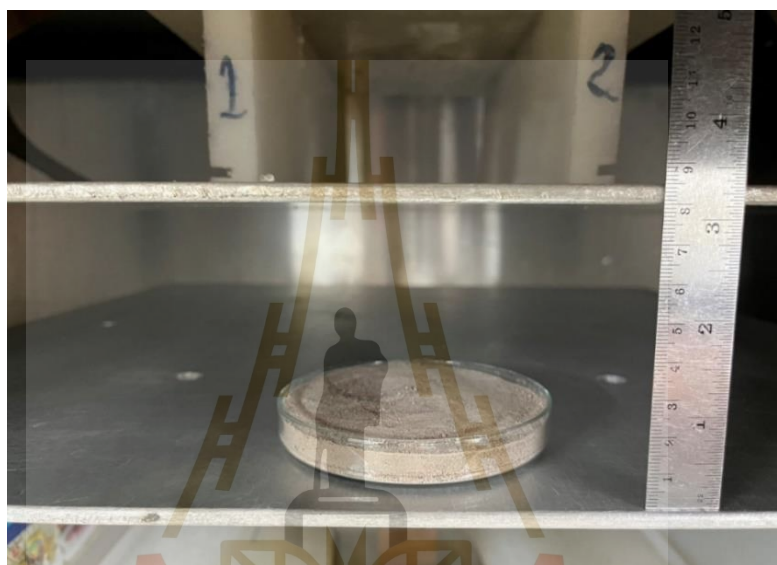
4.1. กล่าวนำ

ในส่วนของบทความนี้จะเน้นการทดสอบและวัดผลกระทบของความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการกำจัดสารปนเปื้อนตะกั่วในดิน โดยผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับประสิทธิภาพของระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงที่ออกแบบขึ้น จากการวิเคราะห์ตัวอย่างในบทก่อนหน้า พบว่าค่าที่ความถี่ 40.68 เมกะเฮิรตซ์ มีค่าความแตกต่างมากที่สุด ดังนั้น การออกแบบระบบจริงจึงถูกดำเนินต่อไปโดยการปรับระดับความเข้มสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลท แผ่นเพลทมีขนาด 52 เซนติเมตร x 52 เซนติเมตร x 0.5 เซนติเมตร โดยระบบนี้มีขนาดกำลังงานไฟฟ้าที่ 9 กิโลวัตต์ การทดสอบจะถูกดำเนินต่อไปเพื่อวัดผลกระทบจากความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการกำจัดสารปนเปื้อนในดิน การทดสอบนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการในบทก่อนหน้า เพื่อเป็นพื้นฐานในการออกแบบระบบจริงระบบการให้ความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงนี้สามารถปรับระดับความเข้มสนามไฟฟ้าได้ในแต่ละแผ่นเพลท ซึ่งทำให้สามารถทดสอบผลกระทบของความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นเพลทกับดินที่ปนเปื้อนสารตะกั่วได้ การศึกษาผลกระทบความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงจะถูกดำเนินต่อไปโดยการวัดทดสอบความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นเพลทในโหลด และสุดท้ายผลที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับผลจากความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการกำจัดสารปนเปื้อนตะกั่วในดิน การวิเคราะห์ผลกระทบนี้จะช่วยในการปรับปรุงระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงในการใช้งานจริง และนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีได้อย่างมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารปนเปื้อนตะกั่วในดิน ด้วยทฤษฎีและข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ และสุดท้ายจะนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ผลกระทบจากความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการกำจัดสารปนเปื้อนตะกั่วในดินเพื่อสรุปผลการวิจัยต่อไป ดังรูปที่ 4.1

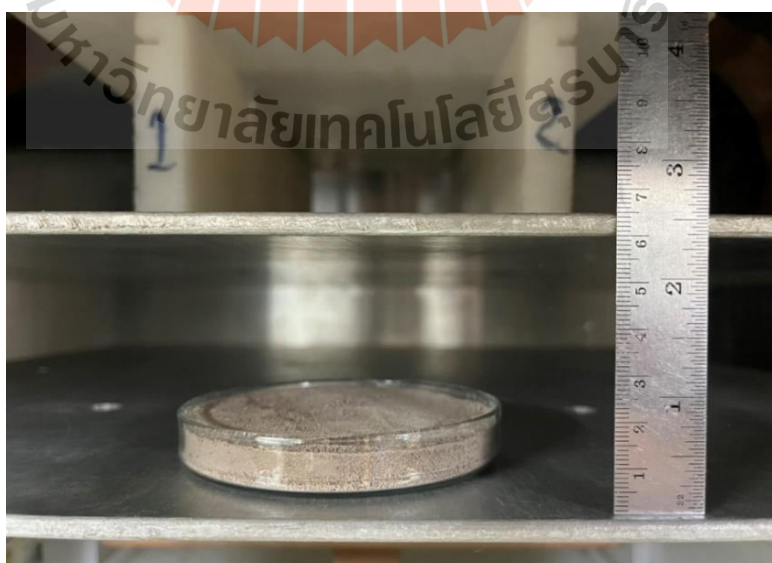
4.2 การทดสอบระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง

สำหรับผลการตั้งคาระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงระหว่างแผ่นเพลทที่เกิดจากระบบในเงื่อนไขระยะห่างระหว่างแผ่นเพลทที่ต่างกัน พบว่าที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 450, 225, 150 และ 112.5 กิโลโวลต์ต่อเมตร ซึ่งมีระยะห่างระหว่างแผ่นเพลทคือที่ 2, 4, 6 และ 8 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.1-4.4 ตามลำดับ โดยเป็นการปรับระยะห่างระหว่างแผ่นเพลทในระบบการให้ความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง ซึ่งจะนำไปทดสอบระดับของสัญญาณความถี่ที่เกิดจากระบบที่ความเข้มสนามไฟฟ้าต่างกับกับโหลดที่เป็นดินปนเปื้อนตะกั่วต่อไป

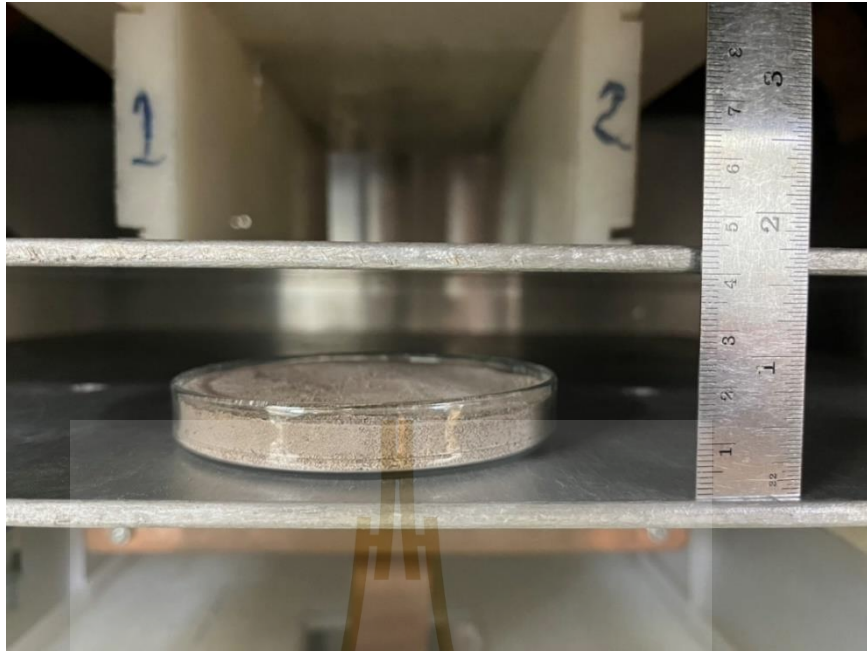
สำหรับผลการทดสอบระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงโดยการวัดสัญญาณผ่านวงจรถอดทอนสัญญาณแบบขดลวดเหนี่ยวนำที่ต่ออยู่กับเครื่องมือออสซิลโลสโคปเพื่อวัดระดับของคลื่นสัญญาณไฟฟ้าของความถี่ที่เกิดจากการส่งผ่านพลังงานไปยังโหลด ค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่กระแสสลับชั่วขณะที่เกิดขึ้นจากการเรโซแนนซ์กับโหลดจากระบบที่ความเข้มสนามไฟฟ้า เครื่องมือจะแสดงกราฟรูปคลื่นสัญญาณไซน์ที่แตกต่างกัน ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 450, 225, 150 และ 112.5 กิโลโวลต์ต่อเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างการวัดดินปนเปื้อนที่ความเข้มของสนามไฟฟ้า 112.5 กิโลโวลต์ต่อเมตร



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างการวัดดินปนเปื้อนที่ความเข้มของสนามไฟฟ้า 150 กิโลโวลต์ต่อเมตร



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างการวัดดินปนเปื้อนที่ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า 225 กิโลโวลต์ต่อเมตร

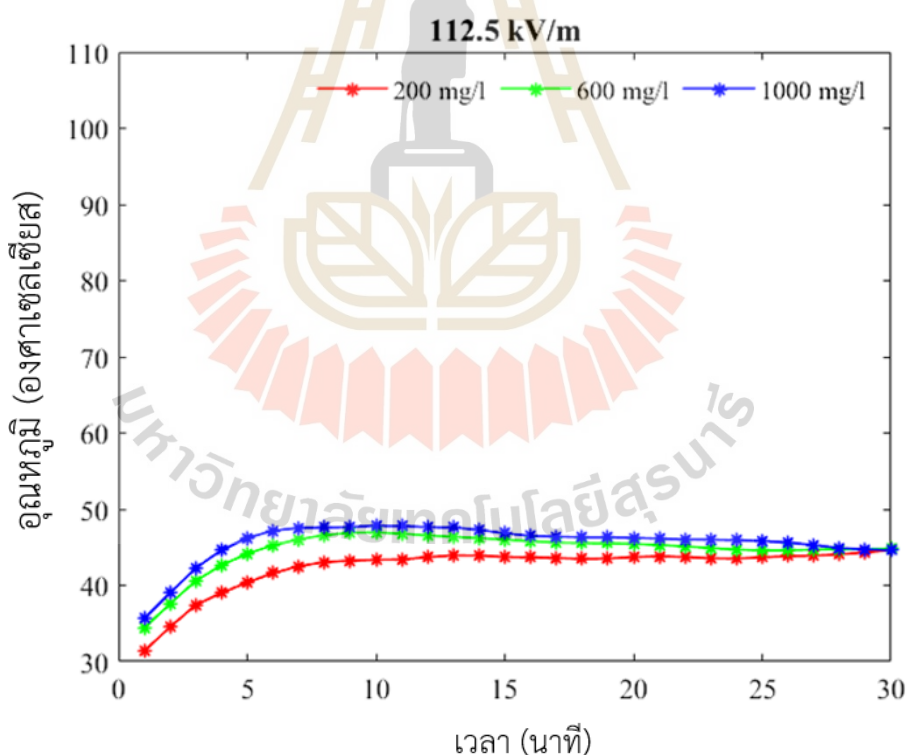


รูปที่ 4.4 ตัวอย่างการวัดดินปนเปื้อนที่ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร

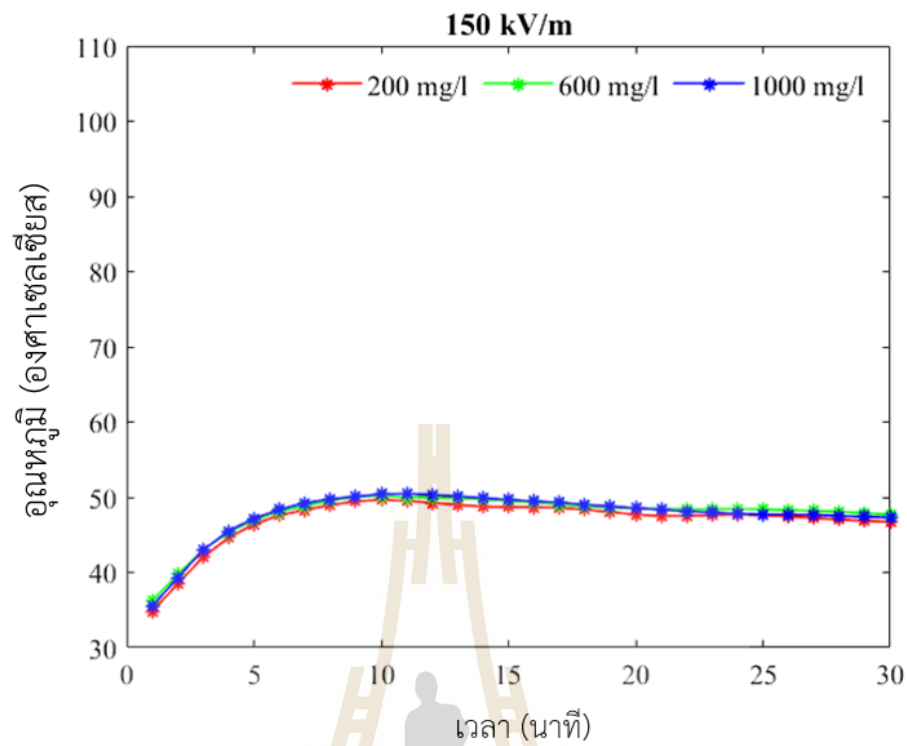
4.3 การทดสอบระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงกับโพลติไดอิเล็กตริก

สำหรับผลที่ได้จากระบบความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงกับโพลติไดอิเล็กตริกที่เกิดจากเงื่อนไขความเข้มสนามไฟฟ้าที่ต่างกัน โดยกล้องถ่ายภาพความร้อนสามารถวัดค่าความร้อนในโพลติดินปนเปื้อนสารตะกั่ว พบว่าที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 450, 225, 150 และ 112.5 กิโลโวลต์ต่อเมตร แสดงค่าความร้อนในโพลติดินปนเปื้อนตะกั่ว ดังแสดงในรูปที่ 4.5 – 4.8

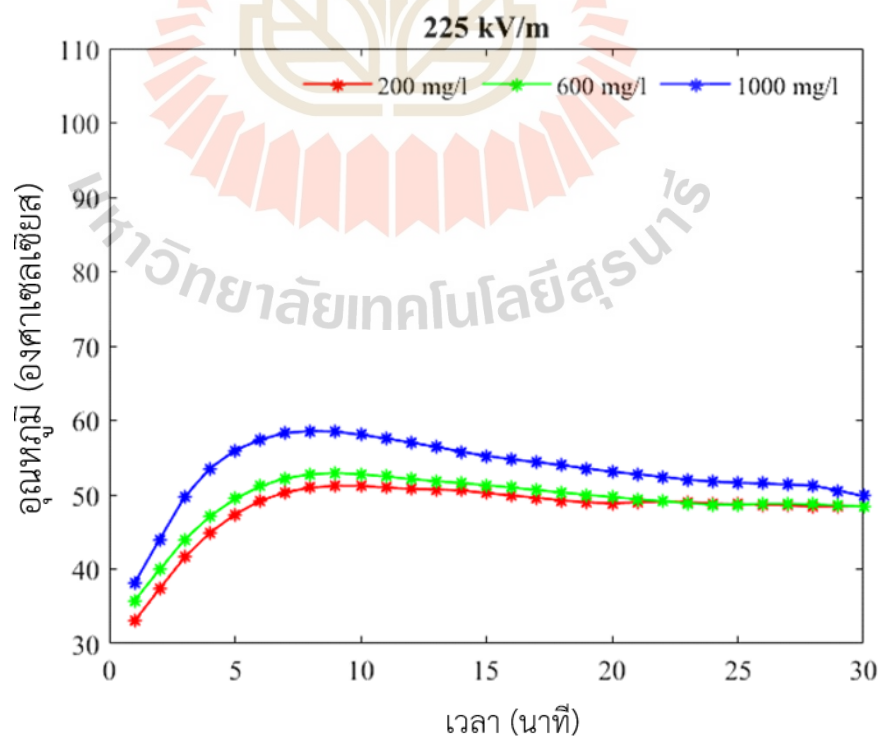
สำหรับผลการทดสอบอุณหภูมิตามเวลา ได้รับการตรวจสอบด้วยการวัดความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ต่างกันที่ 112.5 กิโลโวลต์ต่อเมตร, 150 กิโลโวลต์ต่อเมตร, 225 กิโลโวลต์ต่อเมตร, และ 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร เพื่อประเมินผลในกรณีการปนเปื้อนดินด้วยสารตะกั่วที่มีปริมาณ 200, 600, และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองรวมทั้งหมัดนี้ ตัวอย่างดินที่ถูกปนเปื้อนได้รับการบำบัดด้วยกำลังไฟ 9,000 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที โดยมีการบันทึกอุณหภูมิในแต่ละนาทีด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรด โดยพิจารณาจากอุณหภูมิตามเวลาที่ได้จากความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ 112.5 กิโลโวลต์ต่อเมตร, 150 กิโลโวลต์ต่อเมตร, 225 กิโลโวลต์ต่อเมตร และ 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร



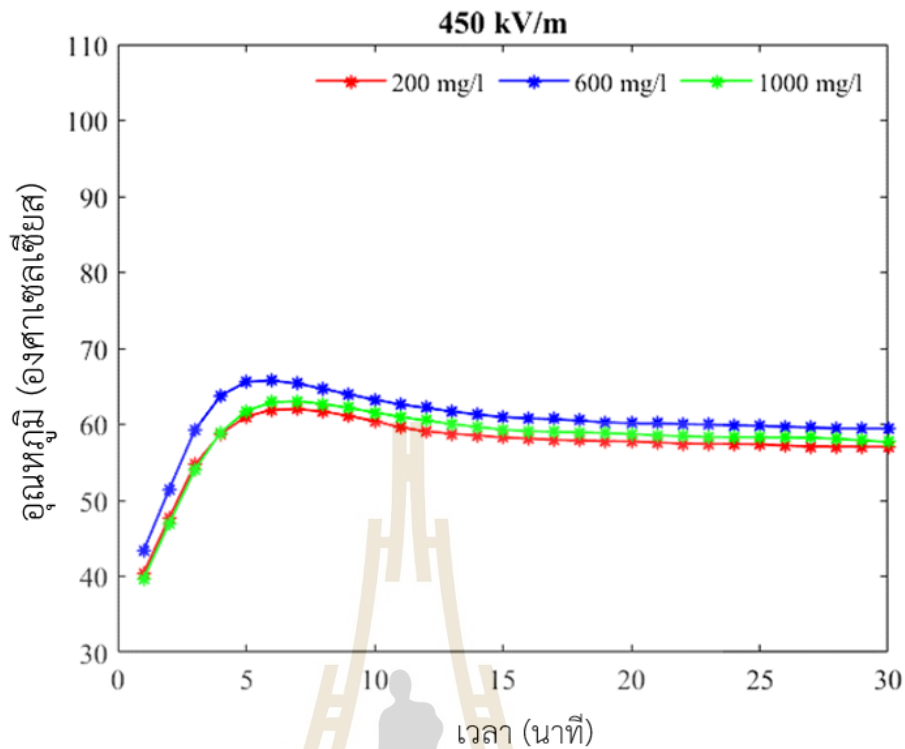
รูปที่ 4.5 อุณหภูมิดินความชื้นต่ำปนเปื้อนตะกั่วที่ความเข้มของไฟฟ้า 112.5 กิโลโวลต์ต่อเมตร



รูปที่ 4.6 อุณหภูมิดินความชื้นต่ำปนเปื้อนตะกั่วที่ความเข้มของไฟฟ้า 150 กิโลโวลต์ต่อเมตร



รูปที่ 4.7 อุณหภูมิดินความชื้นต่ำปนเปื้อนตะกั่วที่ความเข้มของไฟฟ้า 225 กิโลโวลต์ต่อเมตร

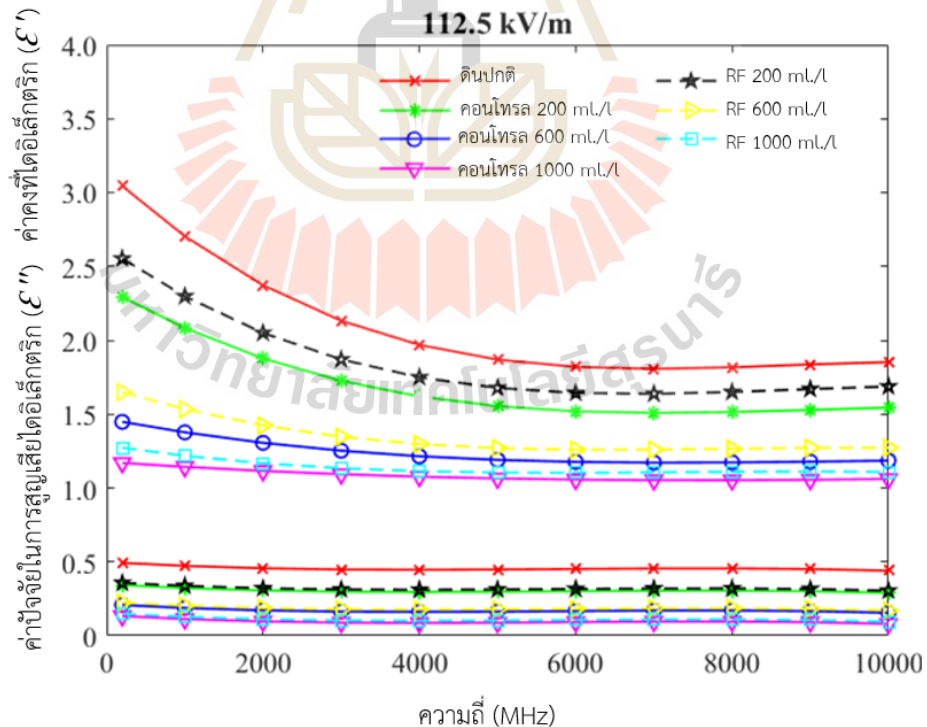


รูปที่ 4.8 อุณหภูมิดินความชื้นต่ำปนเปื้อนตะกั่วที่ความเข้มของไฟฟ้า 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร

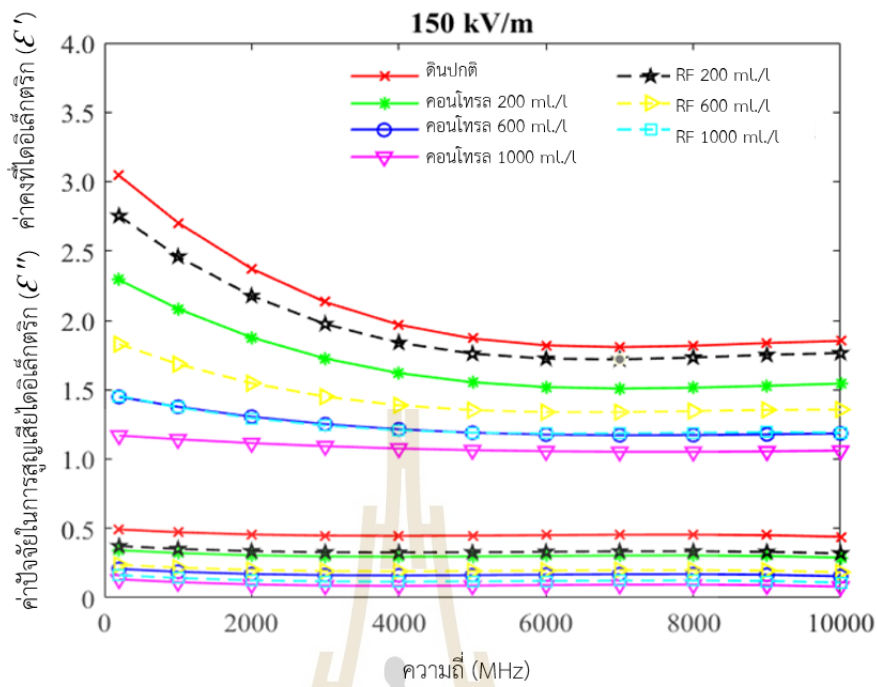
ในการวิเคราะห์กราฟของดินอุณหภูมิความชื้นต่ำ ตลอดจนผลลัพธ์ที่แสดงในรูปที่ 4.5-4.8 โดยจะเห็นได้ชัดว่าอุณหภูมิสูงที่สุดเกิดขึ้นเมื่อดินปนเปื้อนผ่านกระบวนการ RF ที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 450 kV/m โดยมีค่าอุณหภูมิสูงถึง 65 องศาเซลเซียส นั้นอาจมาจากระยะการทดสอบที่ใกล้ที่สุด จากกราฟที่ปรากฏได้แสดงให้เห็นว่าค่าอุณหภูมิลดลงเมื่อความเข้มสนามไฟฟ้าลดลงตามลำดับ โดยที่ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 225 kV/m มีอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส 150 kV/m มีที่ 50 องศาเซลเซียส และ 112.5 kV/m มีที่ 50 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าตัวอย่างดินทั้ง 3 ตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของสารตะกั่วที่ 200, 600 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีอุณหภูมิสูงที่สุดตามลำดับ คือ 1000, 600 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร นั้นหมายถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารตะกั่วในดินและอุณหภูมิ โดยอุณหภูมิมีค่าสูงเมื่อปริมาณสารตะกั่วมากขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้า ปริมาณสารตะกั่วในดินและอุณหภูมิ และช่วยในการเข้าใจว่าการสะสมสารตะกั่วในดินอาจมีผลต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้นในกระบวนการ RF ที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าสูง 450 kV/m โดยอุณหภูมิสูงที่สุดจะเกิดขึ้นในดินที่สะสมสารตะกั่วมากที่สุด ความสัมพันธ์นี้อาจช่วยในการทำความเข้าใจหลักทฤษฎีและการพัฒนาในด้านนี้ในอนาคต

4.4 ผลทดสอบจากการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

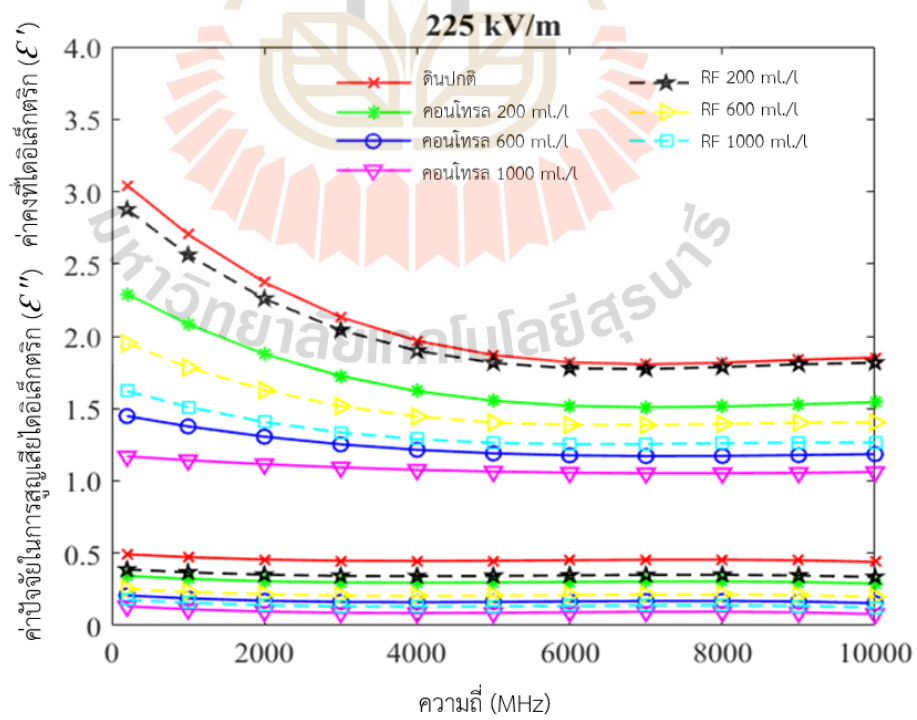
ในขั้นตอนนี้จะนำเสนอการทดสอบและวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียไดอิเล็กตริกในสามระดับความชื้นต่ำ เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพของการสูญเสียไดอิเล็กตริกขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตะกั่วในดิน โดยมีปริมาณคงที่ของสารตะกั่วที่ 200, 600 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร สองประเภทของดินที่ใช้คือ ดินที่ไม่ผ่านการทดสอบ RF และดินที่ผ่านการทดสอบ RF ซึ่งมีการปนเปื้อนสารตะกั่วในระดับความเข้มข้นต่าง ๆ การทดสอบนี้ใช้ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ค่าเข้มข้นของสนามไฟฟ้าได้รับการกำหนดเป็น 112.5, 150, 225 และ 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร ตามลำดับ การทดสอบค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกจะประกอบไปด้วยขั้นตอนการวัดและบันทึกข้อมูลที่ละเอียดอ่อน เมื่อข้อมูลได้รับมาแล้ว การวิเคราะห์จะทำการจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบทางสถิติ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำและเชื่อถือได้ เพื่อให้การนำข้อมูลไปสร้างกราฟมีประสิทธิภาพที่สูง ขั้นตอนต่อไปคือการปรับกราฟโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อให้ได้เส้นกราฟพหุนามที่นำเชื่อถือ ผลลัพธ์ที่ได้จากกราฟนี้จะถูกจัดเรียงให้เป็นข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือและใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบมากที่สุด นอกจากนี้ กราฟที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อให้เข้าใจแบบลึกซึ้งในเรื่องของความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ผลลัพธ์นี้จะถูกนำเสนอในรูปแบบที่สมบูรณ์และมีประสิทธิภาพสูงในการแสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบงานวิจัย



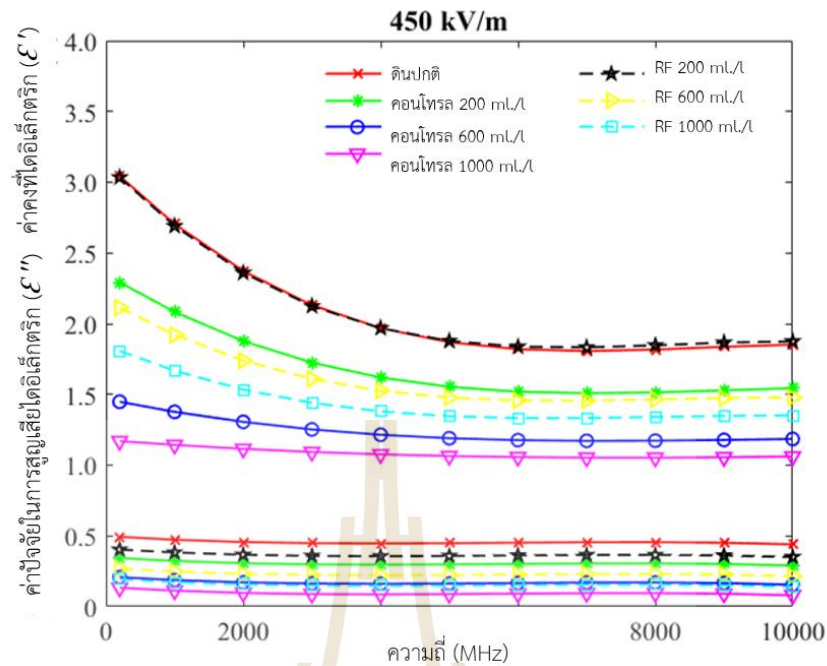
รูปที่ 4.9 ผลทดสอบตัวอย่างดินความชื้นต่ำที่ความเข้มของไฟฟ้า 112.5 กิโลโวลต์ต่อเมตร



รูปที่ 4.10 ผลทดสอบตัวอย่างดินความชื้นต่ำที่ความเข้มของไฟฟ้า 150 กิโลโวลต์ต่อเมตร



รูปที่ 4.11 ผลทดสอบตัวอย่างดินความชื้นต่ำที่ความเข้มของไฟฟ้า 225 กิโลโวลต์ต่อเมตร



รูปที่ 4.12 ผลทดสอบตัวอย่างดินความชื้นต่ำที่ความเข้มของไฟฟ้า 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร

จากกราฟที่แสดงถึงผลการทดสอบดินที่ปนเปื้อนสารตะกั่วที่ได้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มและผลลัพธ์ที่น่าสนใจ ซึ่งเกิดขึ้นจากกระบวนการ RF ที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าต่าง ๆ คือ 112.5, 150, 225 และ 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.9 - 4.12 และแต่ละเงื่อนไขมีตัวอย่างดินที่ผ่านการทดสอบ RF และไม่ผ่านการทดสอบ RF รวมทั้งดินปกติทั่วไป ผลการวิเคราะห์ได้แสดงให้เห็นว่า ผลของการปนเปื้อนสารตะกั่วในดิน โดยมีการวัดค่าไดอิเล็กตริกของตัวอย่างดินทั้งหมด 7 ตัวอย่าง เพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ การทดสอบกระบวนการ RF ที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าต่าง ๆ เป็นการพิจารณาค่าไดอิเล็กตริกของดินในสถานะที่ปนเปื้อนสารตะกั่ว จากผลการวิเคราะห์นี้พบว่า ตัวอย่างดินปกติทั่วไปที่ไม่มีสารตะกั่วมีค่าไดอิเล็กตริกมากที่สุด และเมื่อมีการปนเปื้อนสารตะกั่วเพิ่มขึ้น ค่าไดอิเล็กตริกของดินลดลงเรื่อย ๆ ตามความเข้มข้นของสารที่มีการปนเปื้อน นอกจากนี้ ผลการผสมตัวอย่างดินที่ปนเปื้อนสารตะกั่วแต่ละความเข้มข้นสารโดยการนำไปผ่านกระบวนการ RF แสดงให้เห็นว่าค่าไดอิเล็กตริกของดินมีการเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าที่ 112, 150, 225 และ 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร ตามลำดับ ผลจากการทดสอบสำหรับความชื้นต่ำ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงชัดเจนมากขึ้น อันเป็นสัญญาณที่ดินที่มีการปนเปื้อนสารตะกั่วได้รับผลกระทบจากกระบวนการ RF มากขึ้น โดยค่าไดอิเล็กตริกของดินที่เพิ่มขึ้นเข้าใกล้ค่าของดินปกติทั่วไปมากที่สุด เป็นสัญญาณว่ากระบวนการนี้อาจทำให้สารตะกั่วถูกกำจัดออกไปจากดินได้ การตรวจสอบความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าทำให้เราเข้าใจได้ว่ากระบวนการ RF มีประสิทธิภาพอย่างน้อยแค่ไหนในการกำจัดสารตะกั่ว ตลอดจนเป็นข้อมูลที่สามารถนำไปปรับปรุงและพัฒนากระบวนการนี้ในอนาคต

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวอย่างดินปนเปื้อนสารตะกั่วที่ความถี่ต่างกัน

ความเข้มข้น สารตะกั่ว	ความถี่ (MHz)	ดินปกติ (Normal)		ความเข้มสนามไฟฟ้า 112.5 kV/m		ความเข้มสนามไฟฟ้า 150 kV/m		ความเข้มสนามไฟฟ้า 225 kV/m		ความเข้มสนามไฟฟ้า 450 kV/m	
		ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''
200 mg./l	200	3.04	0.49	2.55	0.35	2.75	0.37	2.87	0.38	3.03	0.40
	1,000	2.70	0.47	2.29	0.33	2.45	0.35	2.56	0.36	2.69	0.38
	3,000	2.13	0.44	1.87	0.31	1.97	0.32	2.04	0.34	2.12	0.35
	6,000	1.82	0.45	1.64	0.31	1.72	0.33	1.77	0.34	1.83	0.36
	10,000	1.85	0.44	1.68	0.30	1.76	0.32	1.81	0.33	1.87	0.35
600 mg./l	200	3.04	0.49	1.64	0.22	1.82	0.23	1.95	0.25	2.11	0.26
	1,000	2.70	0.47	1.53	0.20	1.68	0.21	1.78	0.23	1.92	0.24
	3,000	2.13	0.44	1.34	0.17	1.45	0.19	1.51	0.20	1.60	0.22
	6,000	1.82	0.45	1.25	0.18	1.18	0.19	1.38	0.21	1.45	0.22
	10,000	1.85	0.44	1.27	0.17	1.35	0.18	1.40	0.20	1.47	0.21
1000 mg./l	200	3.04	0.49	1.27	0.14	1.45	0.16	1.62	0.17	1.80	0.19
	1,000	2.70	0.47	1.21	0.12	1.37	0.14	1.51	0.15	1.66	0.17
	3,000	2.13	0.44	1.13	0.10	1.24	0.11	1.33	0.13	1.44	0.14
	6,000	1.82	0.45	1.10	0.10	1.18	0.12	1.25	0.13	1.33	0.15
	10,000	1.85	0.44	1.10	0.09	1.19	0.11	1.24	0.12	1.35	0.14

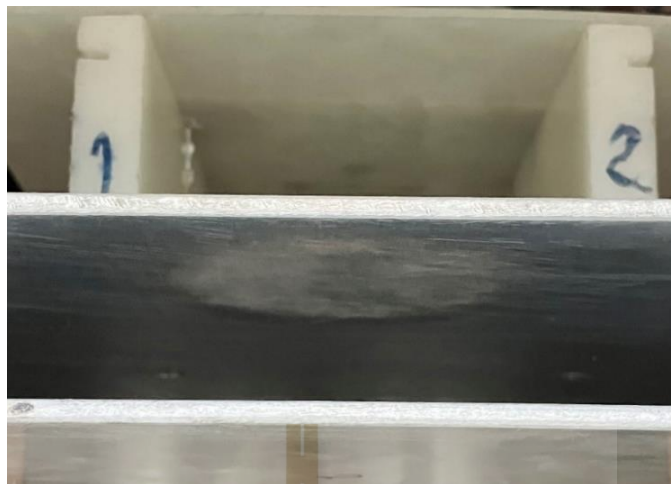
ผลการวิจัยนี้เน้นการวิเคราะห์ตัวอย่างดินที่ความเข้มข้นสารตะกั่ว 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ได้ผ่านกระบวนการให้ความร้อน RF ที่แตกต่างกัน โดยพิจารณาผ่านความชื้นสนามไฟฟ้าที่ระดับ 112.5, 150, 225 และ 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร เนื่องจากกราฟของดินปนเปื้อนที่ความเข้มข้นนี้ พบว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นได้แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัดของการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ซึ่งได้ชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างที่ชัดเจนของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกดินในแต่ละความชื้นสนามไฟฟ้า โดยเฉพาะเมื่อเทียบกับค่าคุณสมบัติของดินปกติ (Normal) โดยเฉพาะในกรณีของความชื้นสนามไฟฟ้าที่ระดับ 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร



รูปที่ 4.13 การถูกผลึกให้ติดกับแผ่นเพลทด้านบนของดินปนเปื้อนสารตะกั่วที่ความชื้นสนามไฟฟ้า 112.5 กิโลโวลต์ต่อเมตร



รูปที่ 4.14 การถูกผลึกให้ติดกับแผ่นเพลทด้านบนของดินปนเปื้อนสารตะกั่วที่ความชื้นสนามไฟฟ้า 150 กิโลโวลต์ต่อเมตร



รูปที่ 4.15 การถูกผลึกให้ติดกับแผ่นเพลทด้านบนของดินปนเปื้อนสารตะกั่วที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 225 กิโลโวลต์ต่อเมตร



รูปที่ 4.16 การถูกผลึกให้ติดกับแผ่นเพลทด้านบนของดินปนเปื้อนสารตะกั่วที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร

จากรูปที่ 4.13-4.16 ซึ่งเป็นตัวอย่างดินที่ความเข้มข้นสารตะกั่ว 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ผน ความเข้มข้นไฟฟ้า 112.5, 150, 225 และ 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร ซึ่งเป็นความเข้มข้นสารตะกั่วที่ สามารถเห็นผลจากการวัดค่าไดโอดีเลกทริกที่ได้ประสิทธิภาพมากที่สุด ที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร ซึ่งหลังการทดสอบด้วยกระบวนการ RF จะเห็นได้ว่า ดินปนเปื้อนตะกั่วบางส่วนได้ ถูกดูดไปติดที่แผ่นเพลทด้านบน โดยจะเห็นได้ว่าแต่ละความเข้มข้นไฟฟ้าจะมีความหนาบางของดิน ปนเปื้อนตะกั่วแตกต่างกัน และจะหนาขึ้นตามความเข้มข้นไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น

4.5 สรุป

ในส่วนของบทนี้เป็นการอธิบายและวิเคราะห์การทดสอบผลที่เกิดจากการความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการกำจัดสารปนเปื้อนตะกั่วในดิน จากการทดสอบเพื่อยืนยันผลกระทบที่เกิดขึ้นจริงด้วยระบบการให้ความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูง โดยได้ทำการทดสอบที่ระยะ 112.5, 150, 225 และ 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร เพื่อหาอัตราการกำจัดสารตะกั่วในดินที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยการทดสอบด้วยการใช้กำลังงานอินพุต 9 กิโลวัตต์ ที่ความถี่ 40.68 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งเมื่อจ่ายไฟยังแผ่นเพลทระหว่างสองขั้วที่ต่างกันไปยังโพลไดอิเล็กตริกหรือดินที่มีการปนเปื้อนสารตะกั่ว จากการทดสอบพบว่า การให้ความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูงนั้นส่งผลให้สารตะกั่วปนเปื้อนในดินเกิดการวิ่งไปติดแผ่นเพลทที่อยู่อีกฝั่งซึ่งมีขั้วอิเล็กโทรดที่ต่างกัน ทั้งนี้ยังพบอีกว่า ที่ความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูงที่ระดับที่สูงขึ้นส่งผลโดยตรงต่อโพลดินปนเปื้อนสารตะกั่ว รวมถึงจากการหาความสัมพันธ์เกี่ยวข้องระหว่างความร้อนและความชื้นสนามไฟฟ้ามีผลเกี่ยวข้องกับการกำจัดสารตะกั่วปนเปื้อนในดิน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

ผลสรุปการวิจัยจากการทดสอบดินปนเปื้อนสารตะกั่วในเงื่อนไขที่แตกต่างกันที่ความเข้มข้นสนามไฟฟ้าต่าง ๆ (112.5, 150, 225, และ 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร) โดยมีตัวอย่างดินที่ได้ผ่าน RF และไม่ผ่าน RF รวมทั้งดินปกติทั่วไป ผลที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่าผลของดินปนเปื้อนสารตะกั่วจากการวัดค่าไดอิเล็กตริก เพื่อเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ ซึ่งผลการวิเคราะห์นี้ทำให้เห็นว่าตัวอย่างดินปกติทั่วไปที่ไม่มีสารตะกั่วมีค่าไดอิเล็กตริกสูงที่สุด และเมื่อมีการปนเปื้อนความเข้มข้นสารตะกั่วในดินเพิ่มขึ้น ค่าไดอิเล็กตริกกลับมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งผลการผสมตัวอย่างดินที่ปนเปื้อนสารตะกั่วแต่ละความเข้มข้น โดยการนำไปผ่านกระบวนการ RF แสดงให้เห็นว่าค่าไดอิเล็กตริกของดินมีการเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าที่ 112, 150, 225, และ 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร ตามลำดับ และพบว่าที่ตัวอย่างดิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นสนามไฟฟ้า 450 กิโลโวลต์ต่อเมตร สามารถกำจัดสารตะกั่วได้ 99 เปอร์เซ็นต์

การทดลองพบว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามการผสมสารตะกั่วในปริมาณที่มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารต่าง ๆ ระหว่าง 200, 600, และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสารในตัวอย่างดินมีอุณหภูมิสูงสุดเมื่อมีความเข้มข้นของสารเป็น 1,000, 600, และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งการแสดงผลดังกล่าวช่วยให้เราเข้าใจได้ถึงผลของการผสมสารต่าง ๆ ในสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในสถานะที่มีการกระจายของสารและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในดินได้

ผลลัพธ์จากการทดสอบในงานวิจัยนี้ได้สรุปถึงการลดปริมาณของสารตะกั่วที่มีการเข้าใกล้ค่าความเป็นดินปกติ ผลลัพธ์เหล่านี้ได้มาจากกระบวนการวัดค่าคงที่ของไดอิเล็กตริก ในการทดสอบโดยจ่ายแรงดันกระแสไฟฟ้าสลับ (AC) ถูกส่งผ่านแผ่นเพลทที่มีสองขั้วอิเล็กโทรด โดยมีโพลคือ ดินปนเปื้อนสารตะกั่วอยู่ตรงกลาง การให้แรงดันกระแสไฟฟ้าสลับนี้ได้มีผลในการเคลื่อนที่ของสารโลหะหรือตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน โดยสารโลหะนี้ถูกดูดไปติดยังขั้วแคโทดของแผ่นเพลทที่อยู่ตรงกลาง จากนั้น แผ่นอิเล็กโทรดนี้จะทำให้การผลึกสารโลหะของสัญญาณมีลักษณะคลื่นสัญญาณขึ้นลง การเคลื่อนที่ของสารโลหะนี้จะเป็นไปในรูปแบบคลื่นสัญญาณขณะที่มีการให้แรงดันกระแสไฟฟ้าสลับ ซึ่งทำให้สารโลหะค่อยๆดูดติดไปยังแผ่นเพลทจนถึงเวลาสิ้นสุดของการทดสอบที่ดำเนินการ ดังนั้นจากผลการทดสอบทั้งหมด เราสามารถสรุปได้ว่า การให้แรงดันกระแสไฟฟ้าสลับทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของสารโลหะที่ปนเปื้อนในดิน ซึ่งนำไปสู่การดูดติดของสารโลหะนั้นไปยังแผ่นเพลท โดยทำให้เกิดการ

เคลื่อนที่นี้ในรูปแบบของคลื่นสัญญาณ การศึกษานี้มีความสำคัญเนื่องจากสามารถทำให้เข้าใจการเคลื่อนที่ของสารโลหะในดินในสถานะที่มีแรงดันกระแสไฟฟ้าสลับอย่างชัดเจน

5.2. ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ปัญหาที่พบในระหว่างการดำเนินการวิจัย คือ การที่เราไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างดินที่มีความเข้มข้นของสารตะกั่วต่าง ๆ ให้เท่ากันได้ เนื่องจากห้องปฏิบัติการยังขาดแคลนด้านอุปกรณ์การวัดที่เพียงพอ ทำให้เกิดความไม่สอดคล้องในการประมาณค่าความชื้นในดินของแต่ละตัวอย่าง

5.3 แนวทางพัฒนาในอนาคต

ในงานวิจัยที่ได้มีการใช้คลื่นสนามไฟฟ้าต่อการกำจัดสารปนเปื้อนตะกั่วในดินสำหรับการเพาะปลูกพืชนั้น ในบทความวิจัยข้างต้น เราได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเพลทต่อการกำจัดสารปนเปื้อนตะกั่วในดิน ที่ความเข้มข้นสารปนเปื้อนตะกั่ว โดยที่เราได้มุ่งเน้นเกี่ยวกับผลกระทบที่เกิดขึ้นในกระบวนการให้ความร้อนด้วย RF ร่วมกับการปรับความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า และทดสอบจริง และในทิศทางของการพัฒนางานวิจัยนี้ เราคาดหวังว่าแนวทางที่เราได้นำเสนอนี้สามารถนำไปใช้กับการกำจัดสารโลหะหนักชนิดอื่น ๆ เพิ่มเติมได้อีก เพื่อเพิ่มคุณภาพให้กับดินสำหรับการเพาะปลูกพืช เรายังเสนอว่าในการวัดอุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบการให้ความร้อนด้วย RF ควรใช้เครื่องวัดที่มีความแม่นยำและเหมาะสมมากกว่าการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน เนื่องจากจะได้ข้อมูลทางสถิติที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

- Abdelgwad, A.H.; Said, T.M. Design of ground penetrating radar antenna for detecting soil contamination at L-band frequencies. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications* 2017, 16, 853–866.
- Bayrashev, A., & Ziaie, B. (2002, January). Silicon wafer bonding with an insulator interlayer using RF dielectric heating. In *Technical Digest. MEMS 2002 IEEE International Conference. Fifteenth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems* (Cat. No. 02CH37266) (pp. 419-422). IEEE.
- Horablaga A., B. Lixandru, M. Petrovici, A. Sinitean, A.-A. Marin, F. Morariu, et al., "Use of benthic macroinvertebrates in the diagnosis of bega river water quality and self-purification process", *Environmental Engineering and Management Journal*, vol. 19, pp. 505-510, 2020.
- Konate, A.; He, X.; Zhang, Z.; Ma, Y.; Zhang, P.; Alugongo, G.M.; Rui, Y. Magnetic (Fe₃O₄) Nanoparticles Reduce Heavy Metals Uptake and Mitigate Their Toxicity in Wheat Seedling. *Sustainability* 2017, 9, 790.
- Moghal, A.A.B.; Shamrani, M.A.A.; Zahid, W.M. Heavy metal desorption studies on the artificially contaminated Al-Qatif soil. *Int. J. Geomate* 2015, 8, 1323–1327.
- Richardson, A. E. (2001). Prospects for using soil microorganisms to improve the acquisition of phosphorus by plants. *Functional Plant Biology*, 28(9), 897-906.
- Wani, A. L., Ahmad, A., Shadab, G. G. H. A., & Usmani, J. A. (2017). Possible role of zinc in diminishing lead-related occupational stress—a zinc nutrition concern. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 8682-8691.
- Yan, A., Wang, Y., Tan, S. N., Mohd Yusof, M. L., Ghosh, S., & Chen, Z. (2020). Phytoremediation: a promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land. *Frontiers in Plant Science*, 11, 359.
- Gidudu, B.; Chirwa, E.M.N. The Role of pH, Electrodes, Surfactants, and Electrolytes in Electrokinetic Remediation of Contaminated Soil. *Molecules* 2022, 27, 7381.

- Shahzad B., M. Tanveer, Z. Che, A. Rehman, S.A. Cheema, A. Sharma, et al., "Role of 24-epibrassinolide (EBL) in mediating heavy metal and pesticide induced oxidative stress in plants: a review", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 147, pp. 935-944, 2018.
- Kien, C. N., Noi, N. V., Son, L. T., Ngoc, H. M., Tanaka, S., Nishina, T., & Iwasaki, K. (2010). Heavy metal contamination of agricultural soils around a chromite mine in Vietnam. *Soil Science & Plant Nutrition*, 56(2), 344-356.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the national academy of sciences*, 108(50), 20260-20264.
- Marra, F., Zhang, L., & Lyng, J. G. (2009). Radio frequency treatment of foods: Review of recent advances. *Journal of food engineering*, 91(4), 497-508.
- Brodie, G. (2019). Energy transfer from electromagnetic fields to materials. *Electromagnetic Fields and Waves*, 1-18.
- Liu, Y. G., Li, Zeng, G. M., Huang, B. R., & Zhang, H. Z. (2003). Electrokinetics removal of lead from lead-contaminated red soils. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 13(6), 1475-1478.
- Yang, G. C., & Lin, S. L. (1998). Removal of lead from a silt loam soil by electrokinetic remediation. *Journal of Hazardous Materials*, 58(1-3), 285-299.
- Zhu, G., Guo, Q., Yang, J., Zhang, H., Wei, R., Wang, C., ... & Yang, J. (2015). Washing out heavy metals from contaminated soils from an iron and steel smelting site. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 9, 634-641.
- Barber, H. *Electroheat*; Granada Publishing Limited: London, 1983; 226-276.
- Beyrami, H. (2021). Effect of different treatments on electrokinetic remediation of Zn, Pb and Cd from a contaminated calcareous soil. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 38, 255-265.
- Meuser, H., & Meuser, H. (2013). *Soil Decontamination. Soil Remediation and Rehabilitation: Treatment of Contaminated and Disturbed Land*, 201-278.
- WANG¹, J. X., ZHAO¹, X. F., DENG¹, Y., QI¹, H. Y., & WANG², Z. J. (2003). Chromosomal polymorphism of mandarin vole, *Microtus mandarinus* (Rodentia). *Hereditas*, 138(1), 47-53.

- Bernhard J. Majer, Dagmar Tscherko, Albrecht Paschke, Rainer Wennrich, Michael Kundi, Ellen Kandeler, Siegfried Knasmüller, Effects of heavy metal contamination of soils on micronucleus induction in *Tradescantia* and on microbial enzyme activities: a comparative investigation, *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, Volume 515, Issues 1–2, 2002, Pages 111-124, ISSN 1383-5718,
- Akpomie, K.G.; Dawodu, F.A.; Eze, S.I.; Asegbeloyin, J.N.; Ani, J.U. Heavy metal remediation from automobile effluent by thermally treated montmorillonite-rice husk composite. *Trans. R. Soc. S. Afr.* 2018, 73, 254–263.
- Khulbe, K.C.; Matsuura, T. Removal of heavy metals and pollutants by membrane adsorption techniques. *Appl. Water Sci.* 2018, 8, 19.
- Aslam M., A. Aslam, M. Sheraz, B. Ali, Z. Ulhassan, U. Najeeb, et al., Lead toxicity in cereals: Mechanistic insight into toxicity mode of action and management, 2021.
- Bilgin, M., & Tulun, S. (2016). Removal of heavy metals (Cu, Cd and Zn) from contaminated soils using EDTA and FeCl₃. *Global Nest J*, 18, 98-107.
- Ghazali, M.D.; Zainon, O.; Idris, K.M.; Zainon, S.N.A.; Karim, M.N.A.; Anshah, S.A.; Talib N.F.A. The Assessment of Relative Permittivity on Diesel Vapour in the Moisture Content of Terap Red Soil by Ground Penetrating Radar. *Air, Soil and Water Research* 2020, 13, 1–11.
- McBride, M.B., 1994. *Environmental Chemistry of Soils*. Oxford University Press, New York, 406 pp.
- Orfeuil, M. (1987). Electric process heating.
- Williams, M., Richardson, A. D., Reichstein, M., Stoy, P. C., Peylin, P., Verbeeck, H., ... & Wang, Y. P. (2009). Improving land surface models with FLUXNET data. *Biogeosciences*, 6(7), 1341-1359.
- Zeng, L. S., Liao, M., Chen, C. L., & Huang, C. Y. (2006). Effects of lead contamination on soil microbial activity and rice physiological indices in soil–Pb–rice (*Oryza sativa* L.) system. *Chemosphere*, 65(4), 567-574.

- Coen, N., Mothersill, C., Kadhim, M., & Wright, E. G. (2001). Heavy metals of relevance to human health induce genomic instability. *The Journal of Pathology: A Journal of the Pathological Society of Great Britain and Ireland*, 195(3), 293-299.
- Rai, P. K., Lee, S. S., Zhang, M., Tsang, Y. F., & Kim, K. H. (2019). Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. *Environment international*, 125, 365-385.
- Tchounwou P.B., C. G. Yedjou, A.K Patlolla and D. J. Sutton, "Heavy metals toxicity and the environment", *Molecular Clinical and Environmental Toxicology*, vol. 101, pp. 133-164, 2014.
- Payne, R., & Theodorou, I. E. (1972). Dielectric properties and relaxation in ethylene carbonate and propylene carbonate. *The Journal of Physical Chemistry*, 76(20), 2892-2900.
- Rubin, R., Strayer, D. S., & Rubin, E. (Eds.). (2008). *Rubin's pathology: clinicopathologic foundations of medicine*. Lippincott Williams & Wilkins.
- Alghanmi, S. I., Al Sulami, A. F., El-Zayat, T. A., Alhogbi, B. G., & Salam, M. A. (2015). Acid leaching of heavy metals from contaminated soil collected from Jeddah, Saudi Arabia: kinetic and thermodynamics studies. *International Soil and Water Conservation Research*, 3(3), 196-208.
- Ge, S., Zhang, X., Wang, Y., Zheng, L., & Xie, X. (2020). Electro-osmosis treatment of lead-contaminated soil with carbon fiber-based geotextile electrodes. *Int. J. Electrochem. Sci*, 15, 11454-11467.
- Lin, S., Gao, L., Yang, Y., Chen, J., Guo, S., Omran, M., & Chen, G. (2020). Dielectric properties and high temperature thermochemical properties of the pyrolusite-pyrite mixture during reduction roasting. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 13128-13136.
- Mustafa, S.; Shah, K.H.; Naeem, A.; Waseem, M.; Tahir, M. Chromium (III) removal by weak acid exchanger Amberlite IRC-50 (Na). *J. Hazard Mater.* 2008, 160, 1–5.
- Nelson, S. O. (2005). Dielectric properties measurement for agricultural applications. In 2005 ASAE Annual Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.

- Price, S. L., Kasevich, R. S., Johnson, M. A., Wiberg, D., & Marley, M. C. (1999). Radio frequency heating for soil remediation. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 49(2), 136-145.
- Wang, S. J., Liu, Q. M., & Zhang, D. F. (2004). Karst rocky desertification in southwestern China: geomorphology, landuse, impact and rehabilitation. *Land degradation & development*, 15(2), 115-121.
- Xu, S.; Zhou, Z.; Liu, K. Multi-Evolutionary Game Research on Heavy Metal Pollution Control in Soil: Based on a Third-Party Perspective. *Sustainability* 2020, 12, 5306
- Yadav S.K., "Heavy metals toxicity in plants: An overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants", *South African Journal of Botany*, vol. 76, pp. 167-179, 2010.
- Yodrot, T.; Santalunai, S.; Thongsopa, C.; Thosdeekoraphat, T.; Santalunai, N. Measurement of Dielectric Properties in Soil Contaminated by Biodiesel-Diesel Blends Based on Radio Frequency Heating. *Appl. Sci.* 2023, 13, 1248.
- Zhao, T., Yu, Z., Zhang, J. et al. Low-thermal remediation of mercury-contaminated soil and cultivation of treated soil. *Environ Sci Pollut Res* 25, 24135–24142 (2018).
- Roland, U., Holzer, F., Trommler, U., Hoyer, C., Rabe, C., Kraus, M., ... & Kopinke, F. D. (2012). Applications of radio-frequency heating in environmental technology. *Procedia Engineering*, 42, 161-164.
- Roland, U., Bergmann, S., Holzer, F., & Kopinke, F. D. (2010). Influence of in situ steam formation by radio frequency heating on thermodesorption of hydrocarbons from contaminated soil. *Environmental science & technology*, 44(24), 9502-
- Reddy, V.A.; Solanki, C.H.; Kumar, S.; Reddy, K.R.; Du, Y.J. Stabilization/Solidification of Zinc- and Lead-Contaminated Soil Using Limestone Calcined Clay Cement (LC3): An Environmentally Friendly Alternative. *Sustainability* 2020, 12, 3725.
- Reddy, V.A.; Solanki, C.H.; Kumar, S.; Reddy, K.R.; Du, Y.J. Stabilization/Solidification of Zinc and Lead-Contaminated Soil Using Limestone Calcined Clay Cement (LC3): An Environmentally Friendly Alternative. *Sustainability* 2020, 12, 3725.

- Tang, X., Cronin, D. A., & Brunton, N. P. (2005). The effect of radio frequency heating on chemical, physical and sensory aspects of quality in turkey breast rolls. *Food Chemistry*, 93(1), 1-7.
- Wei YL. Thermal Immobilization of Lead Contaminants in Soils Treated in a Fixed- and Fluidized-Bed Incinerator at Moderate Temperatures. *J Air Waste Manag Assoc.* 1996 May;46(5):422-9. doi: 10.1080/10473289.1996.10467475. PMID: 26613122.
- Yang, Y., & Guo, Y. (2018). Unraveling salt stress signaling in plants. *Journal of integrative plant biology*, 60(9), 796-804.
- Cai, Z. P., Van Doren, J., Fang, Z. Q., & Li, W. S. (2015). Improvement in electrokinetic remediation of Pb-contaminated soil near lead acid battery factory. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(9), 3088-3095.
- FRTR, Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Version 4.0 (2012)
- Noyes, 1991, Handbook of Pollution Control Process, USA.9508.
- SEPA, 2005, Maximum Levels of Contaminant in Food, In GB 2005, State Environmental Protection Administration, Beijing.



ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Jariya Pakprom, Weerawat Charoensiri, Samroeng Santalunai, Samran Santalunai, Chanchai Thongsopa, Thanaset Thosdeekoraphat and Nuchanat Santalunai. Effects of Dielectric Heating System on Reduction of Lead Contamination in Potting Soil. The 17th Southeast Asian Technical University Consortium: SEATUC 2023. 92-95.



Effects of Dielectric Heating System on Reduction of Lead Contamination in Potting Soil

* Jariya Pakprom⁽¹⁾, Weerawat Charoensiri⁽¹⁾, Samroeng Santalunai⁽¹⁾
Samran Santalunai⁽¹⁾, Chanchai Thongsopa⁽¹⁾, Thanaset Thosdeekoraphat⁽¹⁾
and Nuchanat Santalunai⁽²⁾

⁽¹⁾ School of Electronics Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology.

⁽²⁾ Department of Telecommunications engineering, Faculty of Engineering and technology, Rajamangala University of Technology Isan.

*Corresponding author: jariyapakprom.jp@gmail.com

Abstract: This study investigates the impact of radio waves on reducing lead contamination in soil through the use of dielectric heating. The lead reduction system employs two copper plates, which emit radio waves to generate electric fields. The dielectric properties of the soil, including the dielectric constant and dielectric loss factor, were measured at frequencies ranging from 20 MHz to 3GHz to compare the properties of lead-contaminated soil before and after heating. Results from testing soil samples at room temperature revealed that the dielectric constant and dielectric loss factor varied at different frequencies when the soil was exposed to dielectric heating. To confirm the examination of dielectric properties, a lead test kit was used to measure lead contaminants in the soil.

Keywords: Soil, Contaminated soil, Lead, Dielectrics, Dielectric Heating.

1. Introduction

Lead contamination in soil is a prevalent and serious environmental issue. The long-term persistence, slow degradation rate, and high toxicity levels of lead contribute to its adverse health effects upon exposure. These effects can include cognitive dysfunction, behavioral disorders, strokes, and in severe cases, death [1]. Lead (Pb), a heavy metal, has a lower electrical conductivity than other metallic elements. However, its presence in soil is not required for plant growth and development, yet its impact on plant metabolism can be substantial. The impact of lead ions on plant growth and development depends on the concentration present in the soil, which can have both positive and negative effects. Lead toxicity in plants is often linked to reduced root growth, irregular morphology in certain plant species, and the induction of oxidative stress. This can result in decreased biomass production, inhibition of germination, and disruption of the photosynthetic process. Therefore, the presence of lead ions in soils at various levels of concentration poses a threat to natural ecosystems, and it is expected that lead contamination will rise due to its widespread use in industry, agriculture, and homes. [2]-[6].

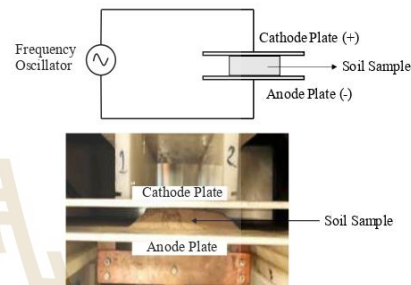


Fig. 1. Dielectric heating structure.

The utilization of high-frequency agricultural soil heating technology has been gaining increasing attention as an alternative approach to traditional methods for soil heating in agriculture. This method is characterized by its cost-effectiveness and efficiency, as well as its ability to eradicate microorganisms, including insect pests, fungi, and bacteria. Recent research has examined a range of strategies for reducing lead contamination in soil, such as solvent extraction, incineration, volatilization, thermal absorption, and biological methods [7]. However, conventional methods are often cumbersome and complicated, as well as costly. The use of high-frequency agricultural soil heating technology utilizes a method of heating the soil to pasteurization temperature. The treatment protocol can be adjusted in accordance with the duration of exposure and the distribution of temperature. The model incorporated the examination of dielectric thermal phenomena and heat transfer, taking into account the impacts of temperature on both the dielectric and thermal characteristics of the soil [8]. As a result, the researcher has determined that utilizing radio frequency heat generators is the optimal method for dielectric heating. This is because dielectric heating is the most significant property of thermal energy, and it involves the direct application of dielectric material within a specific frequency range. Consequently, the utilization of this technique does not have any impact on other materials [9].

2. Dielectric heating structure

In Fig 1, the dielectric heating structure is proposed, it consists of two copper plates that are 52 cm wide and long and 5 mm thick. The top plate is the cathode and the bottom one is the anode. This creates an electric field in the dielectric load. The lead-contaminated soil is placed between the electrode plates, which are 15 mm apart. The gap between electrode plates is fixed with 15 mm. In the testing of a dielectric heating to improve the quality of lead-contaminated soil by radio-frequency heating generators. The testing is individual into two testing time to find the best way to remove lead from the soil, compared with the control soil. The system takes two sets of 50 g of soil, which are lead contaminated soil for testing at 3 min and lead contaminated soil for testing at 5 min. The distance between the anode and cathode plates to be close to the soil by using radio wave heating generators with power of 2 kW. The first cycle, the system heats the lead-contaminated soil in 3 minute and followed by the lead-contaminated soil test in 5 min. And then, the dielectric heated soil is put into the container cup to measure the dielectric constant and the dielectric loss factor in the next section.

3. Results and discussion

3.1 Soil preparation



Fig. 2. Lead contaminated soils under test.

The preparation of test samples begins with collecting soil samples, mixing methods, and preparing lead-contaminated soil samples. The first step is to take a soil sample from an area in Buriram province. The field soil has a sandy loam texture, so the samples are ground and sifted to obtain a finer texture. Then, lead is mixed into the soil to prepare for testing. The mixing components are 100 g of water, 10 g of lead, and 700 g of soil. The lead is dissolved in water and then mixed with the soil to create lead-contaminated soil. The soil is then left to dry for a week. Once dry, the soil samples are grinded and sifted through a sieve to get a homogenous sample. Finally, the soil is divided into 50-gram with three containers as shown in Fig 2.

3.2 Results of the dielectric properties.

Upon the conclusion of the heating process utilizing dielectric heating, this stage measurements are conducted to determine the dielectric constant and dielectric loss factor for all of the samples. The dielectric properties of soils contaminated with lead were evaluated at frequency range of 25 MHz to 3 GHz, as determined by the Network Analyzer with a dielectric meter, as illustrated in Fig 3. This experimental proposes three samples of contaminated soil with lead which are control sample that is lead contaminated soil and



Fig. 3. Measuring of the dielectric properties of a soil under test with a dielectric meter.

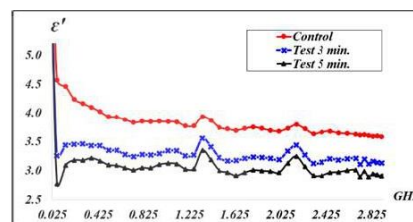


Fig. 4. Dielectric constant.

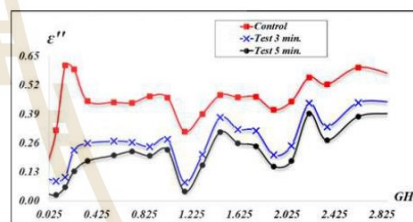


Fig. 5. Dielectric loss factor.

Table 1. Comparison table of dielectric properties at heating time of 3 and 5 minutes.

f (GHz)	Dielectric Properties					
	Dielectric constants (ϵ')			Dielectric loss factor (ϵ'')		
	Control soil	Heating time (minute)		Control soil	Heating time (minute)	
		5	3		5	3
0.027	5.77	4.54	3.19	0.32	0.09	0.15
0.040	5.04	3.38	3.63	0.61	0.11	0.25
0.915	3.78	3.20	2.97	0.47	0.24	0.06
2.450	3.68	3.40	2.96	0.52	0.33	0.32

samples of lead soil contaminated that are heated with three-minute and five -minute. A sample of soil treated with lead to be evaluated in terms of dielectric constant after a three-minute interval (cross-line). The expected range for the dielectric constant of the lead-treated soil sample is 3.25 - 3.70, is plotted in Fig 4. In addition, when soil contaminated with lead is heated for a period of 5 minutes (triangular line), the dielectric constant is estimated to fall within a range of approximately 2.75 to 3.3. The study aimed to assess the effectiveness of dielectric heating in reducing lead contamination in soil. The results indicated that the soil heated for 5 minutes (triangular line) had the lowest dielectric constant in

comparison to the control soil and soil heated for 3 minutes. This implies that dielectric heating for a longer duration of 5 minutes is more efficient at reducing lead contamination than heating for 3 minutes. As illustrated in Fig. 5, the control soil had the highest dielectric loss factor, while the soil heated for 3 minutes had a lower dielectric loss factor than the control. The soil heated for 5 minutes had the lowest dielectric loss factor.

Table 1 presents a comparison of the effective dielectric constant and dielectric loss factor at the ISM band frequencies at heating times of 3 and 5 minutes. The results indicate that the grid channel of lead contaminated soil (control) exhibits the highest dielectric constant, with values of 5.77, 5.04, 3.78, and 3.68 at the frequency of 0.027 GHz, 0.040 GHz, 0.915 GHz, and 2.45 GHz, respectively. However, when contaminated soils under test were attached to the anode and cathode plates at 3 and 5 minutes, the dielectric constant decreased over time. This suggests that the dielectric heating system can reduce lead contamination, as evidenced by values of 4.54, 3.38, 3.20, and 3.10 at the frequency of 0.027 GHz, 0.040 GHz, 0.915 GHz, and 2.45 GHz, respectively, when the testing time was 3 minutes. The results were similar when the testing time was 5 minutes, with dielectric constants of 3.19, 3.63, 2.97, and 2.96 at the frequency of 0.027 GHz, 0.040 GHz, 0.915 GHz, and 2.45 GHz, respectively. The comparison of the dielectric loss factor was found to be highest in the lead contaminated soil (control) due to its high level of contamination as illustrated in Table 1. At the resonant frequency of 0.027 GHz, 0.040 GHz, 0.915 GHz, and 2.45 GHz, respectively, the dielectric loss factor was 0.32, 0.61, 0.47, and 0.52, respectively. The results of the heating time of 3 and 5 minutes showed that the effective dielectric constant decreased with increasing time.

3.3 Testing with a lead dust or surface test kit

In this section, we conduct an experiment on lead contamination testing in soil using a test kit certified by B Smart Science Co., Ltd, which specializes in providing tools, chemicals, and scientific equipment for contaminants in food, water, drugs, soil, and cosmetics for use in industrial factories, laboratories, agriculture, teaching in schools, government jobs, and the general public. Four types of soil were used for testing: normal soil (bare soil), lead soil (control), and lead soil under test with heating time of 3 and 5 minutes. The scale was calibrated from the standard color guide provided in the test kit as shown in Fig 6, and Fig 7 shows the soil mixed with solution for the test kit before testing, which includes a normal soil and lead-contaminated soil (control). When the samples were tested using the lead test kit, it was found that the lead in the glass bottle number 1 had a milky white color, indicating that lead contaminants in the soil were close to 0 mg. In the glass bottle number 2, it was a soil mixed with lead (control), and the color was black. Comparing the standard color bar of the lead dust test kit, it indicated a high level of lead contaminants in the soil (0.5 mg). Moreover,

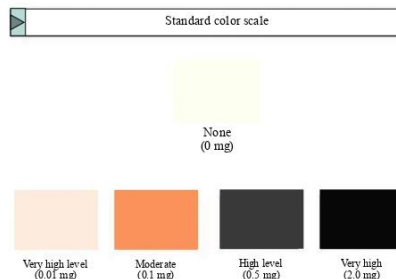


Fig. 6. The standard color bar of the lead dust test kit.

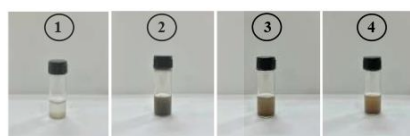


Fig. 7. Results of lead dust test kit.

the soil mixed with solution for the test kit after testing with the dielectric heating system at 3 and 5 minutes are presented from the glass bottles number 3 and 4, respectively. It was found that the lead in soil under test can be reduced because the color of the samples is lighter than the glass bottles number 2. Additionally, the lead-contaminated soil at 3 minutes still had a higher concentration of lead-contaminated soil than at 5 minutes.

4. Conclusions

The present study employed dielectric heating to reduce lead contamination in potting soil. Results indicate that the most effective reduction was achieved after five minutes of heating, as indicated by lead dust test kit analysis. Furthermore, the lead-contaminated soil was observed to exhibit a lighter color compared to the control soil mixed with lead after three minutes of heating. Additionally, measurements of dielectric properties revealed significant changes at both three and five minutes.

Acknowledgment

This research was funded by Suranaree University of Technology (SUT), Thailand Science Research and Innovation (TSRI), and National Science Research and Innovation Fund (NSRF) (NRIIS no. 160356). Special thanks is given to Suranaree University of Technology for OROG scholarship.

References

- [1] Gain Report Number: CH14058, 2014, China's Maximum Levels for Contaminants in Foods, pp. 1-19, USDA Foreign Agricultural Service, China.
- [2] M. Aslam, A. Aslam, M. Sheraz, B. Ali, Z. Ullhassan and U. Najeab, Lead toxicity in cereals: Mechanistic insight into toxicity mode of action and management, 2021.

The 17th South East Asian Technical University Consortium: SEATUC 2023
23 – 24 February 2023 Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND

- [3] S.K. Yadav, "Heavy metals toxicity in plants: An overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants," South African Journal of Botany, vol. 76, pp. 167-179, 2010.
- [4] P.B. Tchounwou, C.G. Yedjou, A.K. Patlolla and D. J. Sutton, "Heavy metals toxicity and the environment," Molecular Clinical and Environmental Toxicology, vol. 101, pp. 133-164, 2014.
- [5] B. Shahzad, M. Tanveer, Z. Che, A. Rehman, S.A. Cheema and A. Sharma, "Role of 24-epibrassinolide (EBL) in mediating heavy metal and pesticide induced oxidative stress in plants: a review," Ecotoxicology and Environmental Safety, vol. 147, pp. 935-944, 2018.
- [6] A. Horablaga, B. Lixandru, M. Petrovici, A. Sinitean, A.-A. Marin and F. Morariu, "Use of benthic macroinvertebrates in the diagnosis of bega river water quality and self-purification process," Environmental Engineering and Management Journal, vol. 19, pp. 505-510, 2020.
- [7] SEPA, 2005, Maximum Levels of Contaminant in Food, In GB 2005, State Environmental Protection Administration, Beijing.
- [8] Noyes, 1991, Handbook of Pollution Control Process, USA.
- [9] K. Myungsik and K. Kwangsoo, "Development of a compact cylindrical reaction cavity for a microwave dielectric heating system," Review of Scientific Instruments, vol. 83, pp. 1, 2012.



Samran Santalunai received the B.Eng. M.Eng. and Ph.D. degrees in telecommunication engineering from Suranaree University of Technology in 2007, 2009 and 2015, respectively. Now He is lecturer in School of Electronic Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. Research interests include heating applications, heavy metals wireless power transfer, RF and microwave circuit design.



Chanchai Thongsopa Thongsopa C. B.Eng. (1'Hons) Electronics Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand. M.Eng. (Electrical and Communications Engineering), Kasetsart University, Thailand, and D.Eng. (Electrical Engineering), King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand in 1992, 1996 and 2002, respectively. Experiences & Expert are RF circuit design, active antenna, Microwave heating application.

Authors Information



Jariya Pakprom received the B.E. (2019). Present, studying for a master's degree Electronic Engineering at Suranaree University of Technology. She current interests include heavy metals, RF and Microwave heating.



Weerawat Charoensiri received the B.E. (2017), M.E. (2020) and He is studying for a Ph.D. Electronic Engineering at Suranaree University of Technology. His current interest is Reduction of contaminants heavy metals, RF and Microwave heating.



Samroeng Santalunai received the B.E. (2018), M.E. (2020) and He is studying for a Ph.D. Electronic Engineering at Suranaree University of Technology. His current interest is heavy metals, RF and Microwave heating, air pollution.



Thanaset Thosdeekoraphat received the B.S. M.S. and Ph.D. degrees in Telecommunication engineering from Suranaree University of Technology in 2006, 2008 and 2013 respectively. At present Lecturer, School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand. Research interests include hyperthermia inductive heating, magnetic shielding system, RF and microwave circuit design, microwave heating.



Nuchanat Santalunai received the B.Eng. (2009), M.Eng. (2011), and D.Eng. (2014) degrees in telecommunication engineering from SUT. She is a lecturer at RMUTI. She current interests include antenna design, metamaterial, and Electromagnetic Band Gap.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวจรรยา ภาคพรหม เกิดเมื่อวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539 ที่อำเภอสำโรงทาบ จังหวัดสุรินทร์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาต้นและปลายที่โรงเรียนสำโรงทาบวิทยาคม อำเภอสำโรงทาบ จังหวัดสุรินทร์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2562 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ด้วยทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอกจากกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา (ทุนOROG) สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี