



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ อิทธิพลของสารพาราควอตและไกลโฟเสทในดิน
ที่มีต่อความสามารถในการดูดซับของดิน

โดย ดร. วภากร (อมรธรรม) ศิริวงศ์

กรกฎาคม 2553

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ อิทธิพลของสารพาราควอตและไกลโฟเสทในดินที่มีต่อ
ความสามารถในการดูดซับของดิน

คณะผู้วิจัย

ดร. วภากร (อมรธรรม) ศิริวงศ์
คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยนเรศวร

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ.และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยเพื่อศึกษาอิทธิพลของสารกำจัดวัชพืชสองชนิดคือสารพาราควอตและสารไกลโฟเสตที่มีต่อความสามารถในการดูดซับธาตุต่างๆในดิน เป็นการศึกษาในตัวอย่างดินร่วนปนทรายแป้ง (silty loam) มีปริมาณอนุภาคขนาดดินเหนียว 39.3 % และปริมาณอินทรีย์วัตถุ 3.27% ประกอบด้วย การทดลองในสภาพโรงเรือนกับดินที่บรรจุใน soil microcosm ทำการใส่สารกำจัดวัชพืช 4 ตำรับการทดลอง ประกอบด้วย ตำรับควบคุมที่ไม่ใส่สารกำจัดวัชพืช (Control) ตำรับที่ใส่สารพาราควอตร่วมกับสารไกลโฟเสตอัตรา 2.5 เท่า (2.5PQ2.5GLY) ตำรับที่ใส่สารพาราควอตอัตรา 5 เท่า (PQ) และตำรับที่ใส่สารไกลโฟเสตอัตรา 5 เท่า (GLY) ของอัตราที่แนะนำให้กับเกษตรกร โดยทำการใส่สารกำจัดวัชพืชต่อเนื่องกัน 4 ครั้ง เก็บตัวอย่างดินไปวิเคราะห์เมื่อเวลา 8 สัปดาห์หลังจากการใส่สารกำจัดวัชพืชแต่ละครั้งและเก็บต่อเนื่องไปเมื่อเวลา 16, 24, 32 และ 40 สัปดาห์หลังจากการใส่สารครั้งที่สี่ ผลจากการวิจัย พบว่า การใส่สารพาราควอตและไกลโฟเสตมีผลทำให้ปริมาณการดูดซับแคลเซียมและทองแดงในดินลดลงอย่างชัดเจนเมื่อใช้สารกำจัดวัชพืชอัตรา 5 เท่าของอัตราแนะนำแก่เกษตรกร ไม่พบอิทธิพลดังกล่าวในตำรับการทดลองที่มีการใช้สารกำจัดวัชพืชร่วมกันในอัตรา 2.5 เท่า การลดลงของปริมาณการดูดซับแคลเซียมและทองแดงพบได้ทันทีหลังจากการเติมสารแต่ละชนิดลงในดินทั้งตำรับที่ใส่เพียงหนึ่งครั้งและตำรับที่ใส่อย่างต่อเนื่องกันสี่ครั้ง อิทธิพลของสารกำจัดวัชพืชที่มีต่อการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบไม่ถาวร โดยผลของสารพาราควอตต่อการดูดซับแคลเซียมพบเฉพาะเมื่อใส่สารทันทีและผลดังกล่าวหมดไปอย่างรวดเร็วและไม่พบในสัปดาห์ที่ 8 สำหรับอิทธิพลของสารพาราควอตต่อการดูดซับทองแดงพบได้เมื่อใส่สารทันที การใส่สาร 4 ครั้งจะทำให้มีผลต่อเนื่องไปถึงสัปดาห์ที่ 8 แต่ไม่พบในสัปดาห์ที่ 16 และโครงการวิจัยนี้ไม่พบอิทธิพลของสารกำจัดวัชพืชต่อปริมาณการดูดซับธาตุแมกนีเซียมและธาตุสังกะสีในดิน สำหรับอิทธิพลต่อคุณสมบัติด้านต่างๆของดิน พบว่า การใส่สารกำจัดวัชพืชมีผลต่อปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน แต่ไม่มีผลต่อความหนาแน่นและค่าพีเอชดิน

การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับสารไกลโฟเสตและพาราควอตในตัวอย่างดินของโครงการวิจัย พบว่าปริมาณการดูดซับไกลโฟเสตและพาราควอตในดินมีค่าขึ้นกับความเข้มข้นและมีความสอดคล้องกับสมการ Freundlich Isotherm จากการคำนวณค่า adsorption capacity และ adsorption intensity สำหรับพาราควอตพบว่า K_f มีค่า 3812 และ $1/n$ มีค่า 0.182 สำหรับไกลโฟเสตพบว่า K_f มีค่า 40 – 550 และ $1/n$ มีค่า 0.40 – 0.63 จากค่า $1/n$ แสดงถึงความไม่เป็นเส้นตรงและความไม่สม่ำเสมอของกลไกการดูดซับสารพาราควอตและไกลโฟเสตในดิน คุณสมบัติของดินที่มีผลต่อพฤติกรรมการดูดซับสารไกลโฟเสต 10 ตัวอย่างดินประกอบด้วย ปริมาณดินเหนียว ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ความจุแลกเปลี่ยนไอออนบวกในดิน และปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน

คำสำคัญ

พาราควอต ไกลโฟเสต สารกำจัดวัชพืช ดิน การดูดซับ ทองแดง สังกะสี แคลเซียม แมกนีเซียม

Abstract

Research on effect of paraquat and glyphosate herbicides on soil adsorption capacity was studied in silty loam texture soil which contained 39.3% clay and 3.27% organic matter. Herbicide applications were applied in PVC soil microcosms for 4 treatments including 1) Control: no herbicide application, 2) 2.5PQ2.5GLY: paraquat and glyphosate application each at 2.5 times, 3) PQ: paraquat application at 5 times, and 4) GLY: glyphosate application at 5 times of official application rate. The four herbicide treatments were applied in microcosm soils for 4 times, continuously. Soil in microcosm was harvested at 0 and 8 weeks after each application and continuously at 16, 24, 32 and 40 weeks after the fourth application. The results exhibited that the amount of calcium and copper adsorption in soil was decreased significantly as effected by paraquat and glyphosate application. The decreasing effect was found at immediately after application and at a rate of 5 times of single herbicide application, but not found in mixed application. This herbicidal effect was temporal, the decreasing effect of paraquat and glyphosate on calcium adsorption was not exhibited at 8 weeks, but the obstructive effect of paraquat on copper adsorption was continuously found at 8 weeks but not at 16 weeks and later on. There was no evident of the effect of herbicide on magnesium and zinc adsorption. Soil organic matter was an additional characteristic influenced by herbicide application that it was decreased significantly in all herbicide treatments.

Paraquat and glyphosate adsorption in soil was concentration dependence and fitted to Freundlich Isotherm which $1/n$ value reflecting nonlinearity and non-uniformity adsorption. Adsorption capacity and adsorption intensity was calculated, for paraquat, K_f and $1/n$ were 3812 and 0.182, respectively. For glyphosate adsorption, K_f value were 40 – 550 and $1/n$ value were 0.40 – 0.63 and adsorption capacity was significantly correlated to clay content, organic matter content and exchangeable calcium.

Keywords:

Glyphosate, Paraquat, Herbicide, Soil, Adsorption, Calcium, Magnesium, Copper, Zinc, Metal
Freundlich Isotherm

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

Executive Summary

ประเทศไทยมีการใช้สารกำจัดวัชพืช (herbicide) มากเป็นอันดับหนึ่งของสารกำจัดศัตรูพืชทั้งหมด สารไกลโฟเสทและพาราควอตเป็นสารกำจัดวัชพืชที่มีการนำเข้ามาใช้มากที่สุด สารเคมีต่างๆ ที่ลงสู่ดินจะมีพฤติกรรม (behavior) ความเป็นไป (fate) และการแพร่กระจายไปสู่ระบบนิเวศน์ นอกจากนี้ยังมีโอกาสทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติและกิจกรรมทางเคมีต่างๆ ในดินที่ส่งผลต่อการแสดงบทบาทหน้าที่ในด้านการเป็นแหล่งน้ำและอาหารต่อพืชและในด้านการเป็นตัวดูดซับและย่อยสลายมลพิษในสิ่งแวดล้อม การศึกษาถึงผลกระทบของการใช้สารกำจัดวัชพืชต่อคุณสมบัติของดินที่ผ่านมาส่วนใหญ่เป็นการศึกษาในสภาพแวดล้อมของต่างประเทศที่มีภูมิอากาศแตกต่างจากประเทศไทย และเป็นการศึกษาอิทธิพลที่มีต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน ยังมีรายงานการศึกษาน้อยมากในด้านผลกระทบของการใช้สารกำจัดวัชพืชต่อคุณสมบัติดินทางเคมีและกายภาพที่ส่งผลถึงความสามารถในการดูดซับสารประกอบและไอออนของดินทั้งในและต่างประเทศ โครงการวิจัย เรื่อง การศึกษาอิทธิพลของสารกำจัดวัชพืชสองชนิดคือพาราควอตและไกลโฟเสทที่มีต่อความสามารถในการดูดซับธาตุต่างๆ ในดิน ประกอบด้วย การทดสอบพฤติกรรมการดูดซับสารไกลโฟเสทและสารพาราควอตในห้องปฏิบัติการ และการทดลองในสภาพโรงเรือนเพื่อศึกษาอิทธิพลของการใส่สารพาราควอตและไกลโฟเสทลงในดินต่อความสามารถในการดูดซับของดิน โดยวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย ประกอบด้วย 1) ศึกษาผลของสารกำจัดวัชพืชสองชนิดต่อความสามารถในการดูดซับของดิน 2) ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการใส่สารกำจัดวัชพืชที่มีต่อความสามารถในการดูดซับของดิน 3) ศึกษาผลของการใส่สารกำจัดวัชพืชอย่างต่อเนื่องต่อความสามารถในการดูดซับของดิน และ 4) เพื่อให้สามารถระบุตัวดัชนีชี้วัดผลกระทบของการใช้สารกำจัดวัชพืชต่อคุณภาพของทรัพยากรดิน การวิจัยเพื่อศึกษาอิทธิพลของสารกำจัดวัชพืชสองชนิด คือ สารพาราควอตและสารไกลโฟเสทต่อความสามารถในการดูดซับของดิน เป็นการศึกษาทั้งในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาพฤติกรรมการดูดซับสารพาราควอตและไกลโฟเสทในดินโดยวิธี batch equilibration technique

การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของสารกำจัดวัชพืชต่อความสามารถในการดูดซับของดิน เป็นการศึกษาอิทธิพลของสารพาราควอตและไกลโฟเสท ในแง่ที่เกี่ยวข้องกับอัตราการใช้ ระยะเวลาหลังการใส่และวิธีการใส่ลงในดินซ้ำกันอย่างต่อเนื่อง โดยใช้ตัวอย่างดินร่วนปนทรายแป้ง (silty loam) ที่มีปริมาณอนุภาคขนาดดินเหนียว 39.3 % และปริมาณอินทรีย์วัตถุ 3.27% บรรจุใน soil microcosm สารพาราควอตและไกลโฟเสทที่ใช้เป็นสารละลายที่เตรียมจากสารมาตรฐานประกอบด้วย 4 ตำรับการทดลอง คือ ตำรับควบคุมที่ไม่ใส่สารกำจัดวัชพืช (Control) ตำรับที่ใส่สารพาราควอตร่วมกับสารไกลโฟเสทอัตรา 2.5 เท่า (2.5PQ2.5GLY) ตำรับที่ใส่สารพาราควอตอัตรา 5 เท่า (PQ) และอัตราที่ใส่สารไกลโฟเสทอัตรา 5 เท่า (GLY) ของอัตราที่แนะนำให้กับเกษตรกร การใส่สารกำจัดวัชพืชเป็นการใส่ลงบนผิวดินใน microcosm ต่อเนื่องกัน 4 ครั้ง ทำการเก็บตัวอย่างดินไปวิเคราะห์โดยเก็บทันทีและเก็บหลังจากการใส่สารกำจัดวัชพืชแต่ละครั้ง 8 สัปดาห์และหลังจากการใส่ครั้งที่สี่ทำการเก็บตัวอย่างไปอย่างต่อเนื่องในระยะ 16, 24, 32 และ 40 สัปดาห์ ตัวแปรที่ทำการศึกษา

ประกอบด้วย คุณสมบัติต่างๆของดิน ได้แก่ ความเป็นกรดต่าง ปริมาณอินทรีย์วัตถุและความหนาแน่นรวมของดิน รวมทั้งความสามารถในการดูดซับธาตุแคลเซียม แมกนีเซียม สังกะสีและทองแดงในดินที่ระดับความลึก 5 เซนติเมตร สภาพการทดลองมีการควบคุมความชื้นของดินตลอดการทดลอง

ผลการศึกษาวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การดูดซับสารไกลโฟเสทในดินมีปริมาณขึ้นกับความเข้มข้น มีรูปกราฟแบบ L-curve ซึ่งสอดคล้องกับสมการ Freundlich Isotherm ค่า $1/n$ ของสมการการดูดซับมีค่าระหว่าง 0.40 – 0.63 แสดงถึงความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเส้นตรงเนื่องจากองค์ประกอบต่างๆของดินทำให้มีกลไกการดูดซับที่หลากหลายเกิดขึ้น ค่าความสามารถในการดูดซับสารไกลโฟเสทดินที่คำนวณจากสมการ (K_f) มีค่าระหว่าง 40 – 550 โดยมีความสัมพันธ์กับปริมาณดินเหนียว ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ความจุแลกเปลี่ยนไอออนบวกและปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน

2. การดูดซับสารพาราควอตในดินมีความสัมพันธ์ทางบวกกับค่าความเข้มข้นซึ่งสามารถอธิบายได้โดย Freundlich Adsorption Isotherm และมีค่า adsorption capacity (K_p) เป็น 3812 และ adsorption intensity ($1/n$) เป็น 0.182

3. การใส่สารกำจัดวัชพืชไม่ทำให้ความหนาแน่นรวมของดินเปลี่ยนแปลง แต่ค่าพีเอชของดินที่ทดลองมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาของการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อเริ่มต้นการทดลองดินมีค่าพีเอชเป็น 6.11 และลดลงเป็น 5.92 ในการเก็บตัวอย่างครั้งสุดท้าย แต่การเปลี่ยนแปลงระดับพีเอชดังกล่าวไม่สามารถสรุปได้ว่าเป็นอิทธิพลจากปัจจัยของสิ่งทดลอง

4. ปริมาณอินทรีย์วัตถุของดินมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีแนวโน้มลดลงในทุกตำรับการทดลอง ปริมาณอินทรีย์วัตถุของดินลดลงอย่างมีนัยสำคัญในตำรับการทดลองที่ได้รับสารกำจัดวัชพืชทั้งสองชนิด แต่ปริมาณอินทรีย์วัตถุของดินตำรับ Control มีการลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งอธิบายได้ว่าอินทรีย์วัตถุในดินมีการสลายตัวไปตามธรรมชาติ สำหรับดินที่ทำการทดลองไม่ได้รับอินทรีย์วัตถุเพิ่มเติมตลอดการทดลองจึงมีปริมาณอินทรีย์วัตถุลดลงไปตามระยะเวลาของการทดลอง สารพาราควอตและไกลโฟเสทที่ใส่ลงในดินสามารถเป็นแหล่งอาหารและพลังงานทำให้กิจกรรมของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นเกิดการย่อยสลายอินทรีย์สารที่มีอยู่ในดินได้รวดเร็วขึ้น

5. สารพาราควอตในอัตราสูงที่ใส่ลงดินมีผลทำให้ปริมาณการดูดซับแคลเซียมและทองแดงของดินลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากสารพาราควอตมีโมเลกุลที่แตกตัวเป็นสารอินทรีย์ไอออนบวก (organic cation) จึงสามารถดูดซับบนผิวอนุภาคดินได้ดีกว่าและลดพื้นที่ดูดซับไอออนบวกอื่นๆลง นอกจากนั้น สารพาราควอตและทองแดงยังมีความชอบต่อการดูดซับบนอนุภาคอินทรีย์คอลลอยด์จึงเกิดการแข่งขันกันได้

6. สารไกลโฟเสททำให้ปริมาณการดูดซับแคลเซียมลดลงอย่างชัดเจน แต่ไม่มีผลต่อปริมาณการดูดซับแมกนีเซียม ทองแดงและสังกะสี อิทธิพลของไกลโฟเสทที่มีต่อปริมาณการดูดซับแคลเซียมในดินอธิบายได้จากความสามารถของสารไกลโฟเสทในการจับกับไอออนบวกสองประจุ (divalent cation) สร้างเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีอิสระต่อการดูดซับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแคลเซียมสามารถตะกอนกับไกลโฟเสทในสัดส่วน 1 : 1 ดังนั้นการมีสารไกลโฟเสทในดินจึงทำให้การดูดซับธาตุแคลเซียมในดินลดลงเป็นอย่างมาก ผลการศึกษามีความขัดแย้งกับงานวิจัยอื่นๆ โดยการศึกษาครั้งนี้ไม่พบผลของสารไกลโฟเสทต่อการดูดซับธาตุทองแดงและ

สังกะสี เนื่องจากตัวอย่างดินที่ศึกษามีปริมาณอินทรีย์วัตถุและค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนบวกสูง แต่อิทธิพลทางลบของไกลโฟเสตต่อการดูดซับธาตุโลหะจะพบอย่างชัดเจนบนแร่ออกไซด์และพบในดินที่มีอินทรีย์วัตถุ และค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนบวกต่ำ รวมทั้งอัตราการใส่สารไกลโฟเสตในการทดลองนี้ต่ำมากเมื่อเทียบกับงานอื่นๆ ดังนั้นจึงไม่เห็นผลของสารไกลโฟเสตต่อการดูดซับธาตุสังกะสี

7. อิทธิพลของสารพาราควอตและไกลโฟเสตต่อปริมาณการดูดซับต่างๆ เกิดเฉพาะเมื่อใช้สารในอัตราสูงถึง 5 เท่าของปริมาณที่แนะนำแก่เกษตรกร การใช้สารทั้งสองชนิดร่วมกันในอัตรา 2.5 เท่าของปริมาณที่แนะนำไม่มีผลต่อปริมาณการดูดซับต่างๆ

8. อิทธิพลของสารพาราควอตและไกลโฟเสตต่อปริมาณการดูดซับต่างๆ ในดินพบได้เมื่อเก็บตัวอย่างดินทันทีหลังจากใส่สารกำจัดวัชพืช อิทธิพลดังกล่าวหมดไปอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 8 สัปดาห์หลังจากการใส่สารกำจัดวัชพืชทุกครั้ง เนื่องจากปฏิกิริยาการดูดซับและการสลายตัวของสารกำจัดวัชพืชเกิดได้อย่างรวดเร็ว ผลของสารกำจัดวัชพืชต่อการดูดซับแคลเซียมพบเมื่อใส่สารกำจัดวัชพืชครั้งแรก ส่วนผลของสารพาราควอตต่อการดูดซับธาตุทองแดงสามารถสังเกตได้หลังจากการใส่ต่อเนื่องกันถึงสี่ครั้ง

9. ปริมาณการดูดซับธาตุแคลเซียมและทองแดงในดินและปริมาณอินทรีย์วัตถุซึ่งได้รับผลกระทบจากการมีสารพาราควอตและไกลโฟเสตปนเปื้อนในดิน ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมและอาจพัฒนาไปเป็นตัวบ่งชี้ผลกระทบของสารกำจัดวัชพืชต่อคุณภาพดินได้ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ที่สนับสนุนงบประมาณในการวิจัย และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยนเรศวรที่สนับสนุนโอกาส เวลาและสถานที่ในการดำเนินโครงการวิจัย รวมทั้งขอกราบขอบพระคุณ รศ. ดร. ปรีดา พากเพียร ที่ได้กรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลงได้ด้วยความร่วมมือและกำลังใจจากครอบครัว มารดา พี่น้อง เพื่อนพ้องและผู้ใกล้ชิดทุกท่าน ผู้วิจัยขอแสดงความระลึกถึงความดีและขอขอบคุณทุกท่านมา ณ ที่นี้

ดร. วภากร (อมรธรรม) ศิริวงศ์

ผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	i
Abstract.....	ii
บทสรุปสำหรับผู้บริหาร.....	iii
กิตติกรรมประกาศ.....	vi
สารบัญ.....	vii
สารบัญตาราง.....	ix
สารบัญภาพ.....	x
 บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
 บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 สารพาราควอท.....	3
2.1.1 การดูดซึมและการออกฤทธิ์ในพืช.....	3
2.1.2 พืชต่อคนและสัตว์.....	5
2.1.3 ความเป็นไปของพาราควอทในสิ่งแวดล้อมและในดิน.....	5
2.2 สารไกลโฟเสท.....	7
2.2.1 การดูดซึมและการออกฤทธิ์ในพืช.....	7
2.2.2 พืชต่อคนและสัตว์.....	8
2.2.3 ความเป็นไปของพาราควอทในสิ่งแวดล้อมและในดิน.....	8
2.3 ผลกระทบของสารกำจัดวัชพืชต่อคุณภาพทรัพยากรดิน.....	9
 บทที่ 3 วิธีการศึกษาวิจัย	
3.1 กรอบและแผนผังโครงการวิจัย.....	12
3.2 การคัดเลือกตัวอย่างดินและคุณสมบัติของดินที่ใช้ในการศึกษา.....	12
3.3 การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับพาราควอทและไกลโฟเสทในดิน.....	14
3.4 การศึกษาอิทธิพลของสารกำจัดวัชพืชต่อการเปลี่ยนแปลงการดูดซับของดิน.....	14
3.4.1 แผนการทดลอง.....	15
3.4.2 การใส่สารกำจัดวัชพืช การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	17

	หน้า
บทที่ 4 ผลการศึกษา	
4.1 พฤติกรรมการดูดซับสารไกลโฟเสทและพาราควอทในดิน.....	18
4.1.1 การดูดซับไกลโฟเสทของดิน.....	18
4.1.2 การดูดซับพาราควอทของดิน.....	24
4.2 อิทธิพลของสารพาราควอทและไกลโฟเสทในดิน.....	25
4.2.1 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆของดิน.....	25
4.2.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณการดูดซับธาตุแคลเซียมของดิน.....	29
4.2.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณการดูดซับธาตุแมกนีเซียมของดิน.....	30
4.2.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณการดูดซับธาตุทองแดงของดิน.....	31
4.2.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณการดูดซับธาตุสังกะสีของดิน.....	32
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและวิจารณ์	33
เอกสารอ้างอิง.....	37
ภาคผนวก	43

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 คุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของสารพาราควอทและสารไกลโฟเสท	4
3.1 คุณสมบัติต่าง ๆ ของดิน 10 ตัวอย่าง	13
3.2 ปริมาณสารพาราควอทและไกลโฟเสทที่ใส่ในดินตามตำรับการทดลองในแต่ละครั้ง	15
3.3 แผนการใส่สารกำจัดวัชพืช	17
4.1 ปริมาณการดูดซับและปริมาณความเข้มข้นของไกลโฟเสทที่จุดสมดุลที่ความเข้มข้นเริ่มต้นระดับต่าง ๆ ของตัวอย่างดิน 10 ชนิด	20
4.2 ค่าคงที่ของสมการ Freundlich Adsorption Isotherm และค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดของสมการเส้นตรงของการดูดซับไกลโฟเสทใน 10 ตัวอย่างดิน	22
4.3 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่จากสมการการดูดซับกับคุณสมบัติต่าง ๆ ของดิน	23
4.4 ปริมาณการดูดซับและปริมาณความเข้มข้นของพาราควอทของตัวอย่างดิน SIT ที่ทำการศึกษา	24
4.5 ค่าพีเอชของดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ หลังจากได้รับสารกำจัดวัชพืชแต่ละตำรับการทดลอง	26
4.6 ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ หลังจากได้รับสารกำจัดวัชพืชแต่ละตำรับการทดลอง	27
4.7 ค่าความหนาแน่นของดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ หลังจากได้รับสารกำจัดวัชพืชแต่ละตำรับการทดลอง	28
4.8 ปริมาณการดูดซับแคลเซียมในดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ หลังจากใส่สารกำจัดวัชพืชตามตำรับการทดลอง	29
4.9 ปริมาณการดูดซับแมกนีเซียมในดินตามตำรับการทดลองและตามระยะเวลาใส่และเก็บตัวอย่าง	30
4.10 ปริมาณการดูดซับทองแดงในดินตามตำรับการทดลองและตามระยะเวลาใส่และเก็บตัวอย่าง	31
4.11 ปริมาณการดูดซับสังกะสีในดินตามตำรับการทดลองและตามระยะเวลาใส่และเก็บตัวอย่าง	32

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1.1 สถิติการนำเข้าสารกำจัดศัตรูพืชของประเทศไทย	1
3.1 กรอบและแผนผังการทดลองภายใต้กรอบโครงการวิจัย	11
3.2 สภาพพื้นที่เก็บตัวอย่าง	16
3.3 การบรรจุตัวอย่างดินแบบไม่รบกวนโครงสร้างใน Soil Microcosm	16
3.4 สภาพโรงเรือนทดลองและลักษณะการให้น้ำ	16
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นที่จุดสมดุลเมื่อใช้สัดส่วนดินต่อสารละลายต่างกัน	18
4.2 ปริมาณการดูดซับสารไกลโฟเสตตามระยะเวลาเมื่อใช้สัดส่วนดินต่อสารละลายต่างกัน	19
4.3 Adsorption Isotherm ของไกลโฟเสตใน 10 ตัวอย่างดิน	22
4.4 Adsorption Isotherm ของสารพาราควอตในตัวอย่างดิน SIT	24
4.5 ค่าพีเอชของดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ หลังจากได้รับสารกำจัดวัชพืชแต่ละตำรับการทดลอง	26
4.6 ความชื้นของดินใน microcosm ตลอดระยะเวลาการทดลอง	26
4.7 ปริมาณอินทรีย์วัตถุของดินใน microcosm หลังจากได้รับสารกำจัดวัชพืชในแต่ละตำรับการทดลองระยะต่าง ๆ	27
4.8 ความหนาแน่นรวมของดินใน microcosm ที่ระยะเวลาต่าง ๆ หลังจากได้รับสารกำจัดวัชพืชแต่ละตำรับการทดลอง	28
4.9 ปริมาณการดูดซับทองแดงในตัวอย่างดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ หลังจากได้รับสารกำจัดวัชพืชตามตำรับทดลอง	30
4.10 ปริมาณการดูดซับทองแดงในตัวอย่างดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ หลังจากได้รับสารกำจัดวัชพืชตามตำรับทดลอง	32

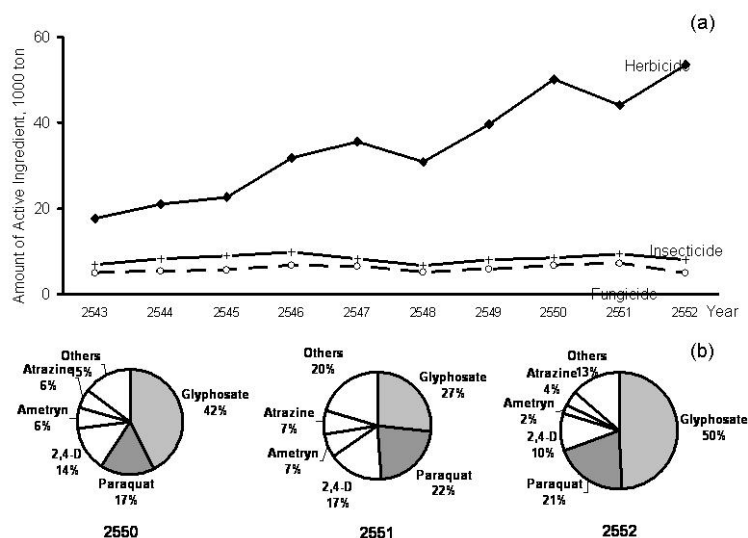
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย

ภาพรวมของการผลิตในภาคเกษตรกรรมของประเทศไทยยังเป็นระบบเกษตรกรรมเชิงพาณิชย์แบบเข้มข้นซึ่งมีการเกษตรกรรมที่มีความต้องการใช้ปัจจัยการผลิตรวมถึงสารกำจัดศัตรูพืชเป็นปริมาณมาก ข้อมูลสถิติปริมาณการนำเข้าสารกำจัดวัชพืชของสำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร ในภาพที่ 1.1 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า สารกำจัดวัชพืชเป็นหนึ่งในปัจจัยการผลิตที่มีการใช้ในปริมาณมาก มีสัดส่วนสูงสุดเมื่อเทียบกับสารกำจัดศัตรูพืชชนิดอื่นๆ และมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

สารพาราควอต (paraquat) และสารไกลโฟเสต (glyphosate) เป็นสารกำจัดวัชพืชที่มีการนำเข้ามาใช้เป็นสัดส่วนมากที่สุดต่อเนื่องกันทุกปี ไกลโฟเสตเป็นสารกำจัดวัชพืชในกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต (organophosphate) ที่เป็นสารกำจัดวัชพืชหลังออก ใช้ปราบวัชพืชทั้งใบกว้างและใบแคบทั้งในและนอกพื้นที่เพาะปลูก ส่วนพาราควอตเป็นสารที่ใช้กำจัดวัชพืชสีเขียวทั้งในไร่ นา สวนไม้ผล ขอบบ่อและริมทางต่างๆ สำหรับในพื้นที่ภาคเหนือตอนล่างของประเทศไทยมีการใช้สารพาราควอตในการเพาะปลูกพืชเศรษฐกิจอย่างกว้างขวางในพื้นที่ปลูกไม้ผล ข้าวโพด พริก เป็นต้น นอกจากนี้เกษตรกรเป็นจำนวนมากในพื้นที่ยังมีการใช้สารพาราควอตในปริมาณมากกว่าอัตราแนะนำ (Amondham, 2006)



ภาพที่ 1.1 สถิติการนำเข้าสารกำจัดศัตรูพืชของประเทศไทย (a) ปริมาณการนำเข้าสารกำจัดศัตรูพืชหลัก (b) สัดส่วนการนำเข้าสารกำจัดวัชพืช
ที่มา: ข้อมูลจากสถิติการนำเข้าวัตถุดิบอันตราย (สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร, 2553)

สารเคมีต่าง ๆ รวมทั้งสารกำจัดวัชพืชเมื่อลงสู่ดินแล้วจะมีพฤติกรรม (behavior) และปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่มีผลต่อความเป็นไป (fate) ของสารเคมี เช่น การดูดซับ (adsorption) การเคลื่อนย้าย (transport) หรือการย่อยสลาย (degradation) นอกจากนี้ปฏิกิริยาต่าง ๆ ยังมีโอกาสส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบและคุณสมบัติของดิน ผลกระทบดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของสารเคมีนั้น ๆ ในดิน โดยเฉพาะ เช่น ลักษณะความเป็นกรดหรือด่างของสารกำจัดวัชพืชนั้น ความสามารถในการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในดิน และความเป็นพิษของสารต่อสิ่งมีชีวิตที่ทำการกิจกรรมในดิน และสามารถเกิดจากปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างสารเคมีกับองค์ประกอบดิน เช่น การแทนที่โมเลกุลหรือไอออนในส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ การถูกตรึงในหลัของแร่ดินเหนียว และการย่อยสลายไปเป็นสารเมตาโบไลต์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้หากเกิดในระยะยาวจะมีโอกาสทำให้องค์ประกอบและคุณสมบัติของดินเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งอาจส่งผลต่อคุณภาพของดินในการแสดงบทบาทหน้าที่ด้านการเป็นแหล่งน้ำและอาหารต่อพืช ด้านการเป็นส่วนประกอบในระบบนิเวศน์และการเป็นตัวดูดซับและย่อยสลายมลพิษในสิ่งแวดล้อมได้

อิทธิพลของการใช้สารกำจัดวัชพืชต่อคุณสมบัติของดินเป็นประเด็นปัญหาที่มีผู้สนใจทำการศึกษากันมากและมีรายงานถึงผลกระทบต่อจุลินทรีย์ในดินในแง่ปริมาณ ชนิดและกิจกรรม โดยส่วนใหญ่เป็นการศึกษาในต่างประเทศที่มีภูมิอากาศแตกต่างจากประเทศไทย ความรู้ด้านผลกระทบของการใช้สารกำจัดวัชพืชที่มีต่อคุณสมบัติดินที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมทางเคมีและทางกายภาพที่ส่งผลถึงความสามารถในการดูดซับของดินยังมีการรายงานน้อยมากทั้งในและต่างประเทศ โครงการวิจัยนี้จึงทำการศึกษาอิทธิพลของการใช้สารกำจัดวัชพืชสองชนิดต่อความสามารถในการดูดซับของดิน ผลที่ได้รับจากการวิจัยจะทำให้ทราบถึงคุณสมบัติที่อาจนำไปพัฒนาเป็นดัชนีชี้วัดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพดินต่อการใช้ประโยชน์อันเนื่องมาจากสารกำจัดวัชพืชในดิน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาผลของสารกำจัดวัชพืชสองชนิดต่อความสามารถในการดูดซับของดิน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการใส่สารกำจัดวัชพืชที่มีต่อความสามารถในการดูดซับของดิน
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลของการใส่สารกำจัดวัชพืชอย่างต่อเนื่องต่อความสามารถในการดูดซับของดิน
- 1.2.4 เพื่อให้ทราบคุณสมบัติดินที่สามารถประยุกต์ใช้เป็นตัวดัชนีชี้วัดผลกระทบของการใช้สารกำจัดวัชพืชต่อคุณภาพของทรัพยากรดิน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ศึกษาผลของสารกำจัดวัชพืชสองชนิดคือสารไกลโฟเสทและสารพาราควอต โดยใช้สารเคมีมาตรฐานที่เป็นสารออกฤทธิ์หลักของสารกำจัดวัชพืชและเป็นการศึกษาผลเชิงเดี่ยวของสารกำจัดวัชพืชชนิดนั้น ๆ โครงการวิจัยนี้ศึกษาผลที่เกิดขึ้นภายในชั้นหน้าดินระดับความลึก 5 เซนติเมตรในสภาพการทดลองในห้องปฏิบัติการที่มีการควบคุมความชื้นของดิน ตัวแปรที่ทำการศึกษา ประกอบด้วย คุณสมบัติต่าง ๆ ของดิน ได้แก่ ความเป็นกรดด่าง ความจุแลกเปลี่ยนไอออน ปริมาณอินทรีย์วัตถุและความหนาแน่นรวมของดิน รวมทั้งความสามารถในการดูดซับของสารกำจัดวัชพืชแต่ละชนิด การดูดซับธาตุสังกะสี อะลูมิเนียมและทองแดง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

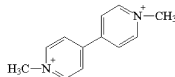
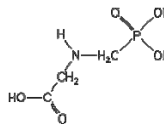
2.1 สารพาราควอต

พาราควอตเป็นสารเคมีในกลุ่ม heterocyclic organic compound ที่มีชื่อทางเคมีว่า 1,1'-dimethyl-4,4'-bipyridium และมีอื่นๆ เช่น dimethyl viologen และ methyl viologen เป็นต้น (Gangolli, 1999) เป็นสารออกฤทธิ์ที่ใช้ในการผลิตสารกำจัดวัชพืชเป็นการค้ามากกว่า 84 ชนิด เช่น Gramoxone, Gramoxone-extra, paraquat และ agriquat เป็นต้น (Agricultural Toxic Substances Division, 1994) มีคุณสมบัติต่างๆ ทั้งทางเคมี-กายภาพ พิษวิทยา และพิษวิทยาสิ่งแวดล้อมตามข้อมูลในตารางที่ 2.1

2.1.1 การดูดซึมและการออกฤทธิ์ในพืช

พาราควอตเป็นสารกำจัดวัชพืชประเภทที่มีการออกฤทธิ์โดยการสัมผัส (contact herbicide) และทำลายเนื้อเยื่อสีเขียวของพืช (defoliation) เป็นสารที่ใช้กับวัชพืชได้กว้างขวางทั้งพืชใบกว้างและพืชใบแคบ การสัมผัสทำลายเกิดจากความสามารถของสารพาราควอตในการถูกเปลี่ยนไปเป็นสารอนุมูลอิสระ เช่น phytotoxic superoxides หรืออนุมูลอื่นๆ ได้โดยปฏิกิริยาการถ่ายทอดอิเล็กตรอน (Hassan and Fridovich, 1979) การทำลายเนื้อเยื่อพืชเกิดเมื่อ phospholipids ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์คลอโรพลาสต์ถูกทำลายไปเนื่องจากพันธะบนชั้นไขมันถูกทำลายโดยอนุมูลอิสระ ทำให้มีลักษณะเปราะบางแตกหักง่าย ส่งผลให้คลอโรพลาสต์มีวงจรการสังเคราะห์แสงลดลง (Chia et al., 1981 และ Chia et al., 1982) ซึ่งการทำลายเนื้อเยื่อเกิดได้มากขึ้นในสภาพที่มีแสงเข้ม ปริมาณออกซิเจนสูงและมี chlorophyll II (Summers, 1980) สารพาราควอตถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางทั้งในและนอกพื้นที่เกษตรกรรมเนื่องจากเป็นสารที่ออกฤทธิ์ได้รวดเร็ว มีการดูดซึมเข้าสู่ต้นพืชได้อย่างรวดเร็วและทำลายวัชพืชหลังงอกได้ทุกชนิด (non-selective herbicide for emerging broad-leaved plant) การเคลื่อนย้ายสารพาราควอตจากรากสู่ยอดเกิดได้อย่างจำกัดโดยเป็นการดูดซึมและเคลื่อนย้ายผ่านในท่อน้ำเลี้ยงและผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ การทำลายเนื้อเยื่อพืชเกิดได้ทั้งในระหว่างการดูดซึมและการเคลื่อนย้ายในระดับความเข้มข้นต่ำๆ เพียง $0.01 \mu\text{g L}^{-1}$ (Riley et al., 1976)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติด้านต่างๆของสารพาราควอตและสารไกลโฟเสต

Characteristic	Paraquat	Glyphosate
Molecule Structure		
Molecule Structure		
IUPAC Name	1,1'-dimethyl-4,4'-bipyridinium	N-(phosphonomethyl)glycine
Other Name		Phosphonomethyliminoacetic acid
Empirical formula	C ₁₂ H ₁₄ Cl ₂ N ₂	C ₃ H ₈ NO ₅ P
Molecular Weight	Ion 186.25 g Dichloride 257.2 g Dimethylsulfate 408.4	169.07 g
Physicochemical Properties		
Physical Feature	Crystalline powder, white, odorless and hygroscopic	White powder
Density	1.24 – 1.26 g cm ⁻³ at 20°C	1.704 g cm ⁻³
Boiling point	Decomposition175 – 180°C	
Melting point	Above 300°C decomposition	230, 184.5 °C, decomposition at 187°C
Vapour pressure	Very low (<10 ⁻³ Pa at 20°C)	<1x10 ⁻⁵
Water solubility	700,000 mg L ⁻¹ at 20°C	12,000 mg L ⁻¹
Solubility in Alcohol	Soluble	
Solubility in Organic solvents	Insoluble	Insoluble
Henry's constant	–	
Partition Coefficient	2.44	
Parachor, P ^b		313 cm ³ g ^{1/4} s ^{-1/2} mol
Dipole moment		9.7 μ ^b (D)
Eco-toxicology		
Adsorption Coefficient	28 – 1,000,000 μg g ⁻¹	
Log P	< 7	
Log Kow		0.0017, -4.1
Koc	15,473 – 51,856	24,000
BCF	0.3	
Environmental Toxicology		
Reference Level	ADI: 0.004 mg kg ⁻¹ day ⁻¹ MCL: Not Available RfD: 0.0045 mg kg ⁻¹ day ⁻¹	HA: 0.03 mg L ⁻¹ (lifetime) TLV: 0.1 mg m ⁻³ (8-hour) (respirable fraction)
Half-life time	16 months – 13 years	47 days

Sources: WHO (1984); The Royal Society of Chemistry (1991); Mensink and Janssen (1994);

Extension Toxicology Network (2001); Douklas et al. (2001) and Mamy and Barriuso, 2005

2.1.2 พืชต่อคนและสัตว์

ตามปกติสารพาราควอตเป็นสารที่มีความเป็นพิษต่อคนและสัตว์ต่ำ อันตรายส่วนใหญ่เกิดจากการกินเข้าไปทางปากโดยตั้งใจ ความเป็นพิษจากเส้นทางการอื่นมีโอกาสเกิดขึ้นน้อยเพราะสารพาราควอตมีการสะสมในร่างกายได้น้อย เนื่องจากเป็นสารที่ไม่ถูกดูดซึมผ่านกระเพาะอาหารอย่างทันทีและการดูดซึมทางผิวหนังเกิดได้น้อย นอกจากนั้นไต่ยังมีความสามารถในการขับพาราควอตออกจากระบบหมุนเวียนในร่างกายออกทางปัสสาวะได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูง อาการในร่างกายคนและสัตว์ที่ได้รับสาร พาราควอตที่มีความเข้มข้นสูงเกิดจากกลไกการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์เช่นเดียวกับที่เกิดกับพืช การสัมผัสทางผิวหนังทำให้เกิดอาการผิวหนังไหม้เกรียม โรคผิวหนังและเล็บเสียหาย การได้รับสารพิษโดยการกลืนกินทำให้เกิดโรคจากระวังเกร็งหรือชักอย่างรุนแรง และการระคายเคืองในกระเพาะอาหาร ไตวายและแผลในตับ การได้รับสารพาราควอตโดยการหายใจทำให้เกิดความเสียหายของต่อมหมวกไต ความเสื่อมของเส้นประสาท และระบบหายใจขัดข้อง การศึกษาผลของสารพาราควอตในสัตว์ทดลอง มีรายงานการพบว่าทำให้เกิดเนื้องอกในตับ ต่อมไทรอยด์ ผิวหนังและต่อมไร้ท่อ แต่ยังไม่มียางานหลักฐานการเกิดมะเร็งในสัตว์ทดลอง สารพาราควอตถูกจัดเข้าอยู่ในกลุ่มของสารก่อมะเร็งโดย EPA เนื่องจากเป็นสารที่สามารถเกิดเป็นสารอนุมูลอิสระได้ ผลของพาราควอตที่เกิดต่อคนพบบ้างต่อความผิดปกติของยีนในคน จุลินทรีย์และหนู (Logani and Davies, 1979) ส่วนใหญ่พบว่ามีอาการรายงานผลการทำลายตับอย่างถาวรและโรคพากินสัน ซึ่งพบว่าเป็นโรคเกี่ยวกับสมองและระบบประสาทที่เกิดเรื้อรังโดยพบว่าเกิดขึ้นเมื่อหนูได้รับสารพาราควอตพร้อมกับสารกำจัดโรคพืชมาเน็บ (Ricky, 2001) ระดับความเข้มข้นที่ทำให้เกิดอันตราย (LD_{50}) ของสารพาราควอตพบได้ตั้งแต่ $0.1 - 1,000 \text{ mg L}^{-1}$ ในสัตว์น้ำ นกและสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม 35 mg kg^{-1} ในคน และ $0.5 - 50 \text{ mg L}^{-1}$ ในพืชน้ำเป็นต้น (Eisler, 1990) ความเข้มข้นของสารพาราควอตที่ไม่ก่อให้เกิดพิษเมื่อได้รับในอาหารและน้ำ ตีมีหลายระดับต่างกันในแต่ละประเทศ ความเข้มข้นที่อนุญาตให้มีได้ในน้ำดื่มมีค่า 10 และ $40 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ ในประเทศอังกฤษ-แคนาดาและออสเตรเลีย ตามลำดับ (Gustafson, 1993) สำหรับประเทศไทยและประเทศในเขตร้อนค่าความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณคือ $4.6 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ (Amondham, 2006)

2.1.3 ความเป็นไปของพาราควอตในสิ่งแวดล้อมและในดิน

พาราควอตเป็นสารเคมีที่ถูกจัดอยู่ในพวกสารที่คงทนและเคลื่อนที่ได้จำกัดในดิน (Summer, 1980) สารพาราควอตมีองค์ประกอบโมเลกุลมีขั้วที่สามารถแตกตัวได้อย่างสมบูรณ์ (Khan, 1980 และ Gevaio et al., 2000) โมเลกุลมีลักษณะเป็นสารอินทรีย์ที่มีประจุบวกสองตัว (divalent cationic organic compound) สามารถถูกดูดซับโดยอนุภาคดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุในดินได้อย่างรวดเร็วและแข็งแรง โดยตัวดูดซับสำคัญที่มีความชอบมากไปหาน้อย คือ แร่ดินเหนียวมีโนซิลิเกต อินทรีย์วัตถุและแร่ออกไซด์ (Karickhoff and Brown, 1978; Rytwo and Margulies, 1996 และ Cheng et al., 2002) โดยมีกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นกลไกหลักและการถ่ายโอนประจุเป็นกลไกที่พบได้ (Weber and Weed, 1968; Karickhoff and Brown, 1978; Khan, 1980; Narine and Guy, 1982; Sojo et al., 1989; Rytwo and Margulies, 1996 และ

Gonzalez-Pradas et al., 2000) สารพาราควอทมีความชอบต่อการดูดซับบนอนุภาคดินเหนียวมากกว่า อินทรีย์วัตถุ (Khan, 1980; Kookana and Aylmore, 1993 และ Singh et al., 1900) และมีความชอบในการดูดซับบนแร่ดินเหนียว monmortillonite มากกว่า kaolonite โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินที่มีค่าพีเอชสูง (Khan, 1980) การดูดซับบนแคโอลิไนท์เกิดเฉพาะที่ผิวภายนอกซึ่งมีศักยภาพการดูดซับการสูงสุดต่ำกว่า ค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนบวกของแร่ (Weber et al., 1965) อินทรีย์วัตถุเป็นอนุภาคคอลลอยด์อีกชนิดที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับสำคัญในดิน การดูดซับพาราควอทโดยอินทรีย์วัตถุเป็นการดูดซับที่ย้อนกลับได้ และในองค์ประกอบต่างๆของสารอินทรีย์ humic acid จัดเป็นองค์ประกอบของอินทรีย์วัตถุในดินที่ดูดซับพาราควอทได้ดีกว่า fulvic acid ดังนั้นสารพาราควอทที่ดูดซับบนอินทรีย์คอลลอยด์ในดินจึงยังสามารถถูกพืชดูดซึมได้ และสามารถเป็นพืชต่อพืชได้ (Khan, 1973) แร่ออกไซด์เป็นตัวดูดซับในดินอีกชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการดูดซับพาราควอทในดินกรดเขตร้อน ความสามารถในการดูดซับสูงของแร่ออกไซด์มาจากการมีเนื้อที่ผิวจำเพาะสูงแม้ว่าจะมีค่า effective CEC ต่ำก็ตาม อย่างไรก็ตาม การดูดซับโดยแร่ออกไซด์มีความสัมพันธ์กับค่าพีเอชซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงประจุตาม point of zero (Juo and Oginni, 1978) การดูดซับพาราควอทในดินที่ระดับความเข้มข้นต่ำสามารถอธิบายได้โดย Freundlich isotherm (Brownawell et al., 1990; Cheah et al., 1997 และ Amondham et al., 2006) โดยมีค่า $1/n$ น้อยกว่า 1 และค่าความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติต่างๆของดิน เช่น สัดส่วนความอิ่มตัวของแคลเซียมและโซเดียม และปริมาณแร่เหล็กออกไซด์ในดิน (Amondham et al., 2006)

การดูดซับสารพาราควอทบนแร่ดินเหนียวที่ยึดหดได้เป็นการดูดซับที่แข็งแรงและไม่ย้อนกลับ เนื่องจากการดูดซับอยู่ในหลืบของผลึกแร่ (Weber and Weed, 1968) สารพาราควอทที่ไม่เลกุลมีลักษณะเป็นระนาบและมีความหนาเพียง 0.3 มม. สามารถแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นซิลิกาของแร่มอนต์มอริโลไนต์ได้ นอกจากนั้นระยะห่างระหว่างประจุ 0.7-0.8 นาโนเมตรทำให้โมเลกุลพาราควอททำหน้าที่เป็นแขนยึดแผ่นผลึกแร่สองข้างให้อยู่ติดกันไว้อย่างยืดหยุ่นได้ (Rytwo et al., 1996) การดูดซับในหลืบอย่างแข็งแรงนี้ไม่สามารถถูกไล่ที่ออกไปโดยธาตุปุ๋ยหรือปุ๋ยที่ใส่ลงในดิน (Brownawell et al., 1990)

พาราควอทเป็นสารเคมีที่สามารถเปลี่ยนรูปและสลายตัวได้ในสิ่งแวดล้อม ปฏิกริยาการสลายตัวประกอบด้วย photodegradation, chemical degradation และ biological degradation (The Royal Society of Chemistry, 1991) ปฏิกริยา pyrolysis เกิดเมื่อได้รับรังสี UV ในช่วงคลื่น 285 - 310 nm. โดยช่วงคลื่นที่ดูดซับได้สูงสุดคือ 257 nm. (Funderburk, 1969) พาราควอทสลายตัวได้อย่างรวดเร็วเมื่อมีแสงแดดจ้าและอาจสลายตัวหมดไปภายในเวลา 3 สัปดาห์ (WHO, 1984) โดยทั่วไปการสลายตัวด้วยแสงเกิดภายในความลึกเพียงไม่กี่เซนติเมตรจากผิวดินและการสลายตัวในดินและบนผิวใบใช้ระยะเวลา 100 วัน (Hebert and Miller, 1990) การสลายตัวทางเคมีของสารพาราควอทในสิ่งแวดล้อมไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดเป็นกลางและมีออกซิเจน ในสภาพแวดล้อมที่มีความเป็นด่างสารพาราควอทสามารถถูกรีดิวซ์ไปเป็นสารอนุมูลอิสระสีม่วงที่สามารถผันกลับได้ สารรีดิวซ์ในสิ่งแวดล้อม (reducing agent) บางชนิดสามารถเปลี่ยนพาราควอทไปเป็นสารอนุมูลอิสระที่ไม่ผันกลับ (Funderburk, 1969 และ Staiff et al., 1981) จุลินทรีย์หลายชนิด ทั้งแบคทีเรีย เชื้อรา แอคติโนมัยซิสและยีสสามารถใช้สารพาราควอทเป็นแหล่งคาร์บอนและไนโตรเจนได้ดี บางชนิดใช้พาราควอทเพียงอย่างเดียวเป็นแหล่งคาร์บอนและไนโตรเจนได้และจุลินทรีย์บางชนิดสามารถใช้

พาราควอตได้ดีกว่า NO_3^- (WHO, 1984; Ricketts, 1999) สำหรับการสลายตัวของพาราควอตในดินเกิดได้จำกัดกว่าในอาหารเลี้ยงเชื้อ แม้ว่าจะมีจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยได้เป็นจำนวนมากแต่จากความสามารถในการดูดซับอย่างแข็งแรงบนอนุภาคดินทำให้สารพาราควอตในดินมีความคงทน โดยค่าครึ่งชีวิตของการสลายตัวในดินมีความยาวนานได้ถึง 100 วัน 16 เดือน หรือ 13 ปี (United State Department of Agriculture, 2001 และ Extension Toxicology Network, 2001).

2.2 สารไกลโฟเสท

ไกลโฟเสท (Glyphosate) เป็นชื่อของสารออกฤทธิ์ในผลิตภัณฑ์สารกำจัดวัชพืชที่มีชื่อทางการค้าหลายชนิดหลายสูตร เช่น ราวน็อพ (Roundup[®]) ราวน็อพ อัลตรา (Roundup Ultra) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมของเกลือ isopropylamine salt ทัชดาวน์ (Touchdown) เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีเกลือ trimethylsulfonium salt และ ทัชดาวน์ ไอคิว (Touchdown IQ) เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีเกลือ diammonium salt เป็นองค์ประกอบ เป็นต้น มีคุณสมบัติต่างๆทั้งทางเคมี-กายภาพ พิษวิทยา และพิษวิทยาสิ่งแวดล้อมตามข้อมูลในตารางที่ 2.1

2.2.1 การดูดซึมและการออกฤทธิ์ในพืช

ไกลโฟเสทเป็นสารกำจัดวัชพืชที่ออกฤทธิ์ทำลายพืชโดยการดูดซึมทำลายพืชทั้งต้น ทำลายพืชหลังงอก และไม่เลือกชนิดวัชพืช (systemic, post-emergent non-selective herbicide) จัดอยู่ในกลุ่ม substituted amino acid ที่มีการออกฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase (EPSPS) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์กรดอะมิโนในกลุ่มอะโรมาติกใน Shikimate pathway เช่น Phe, Tyr และ Tryp ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโปรตีน ลิกนิน ในพืช สารไกลโฟเสทที่สัมผัสหรือดูดซึมเข้าสู่ลำต้นพืชไม่เป็นอันตรายต่อเซลล์พืชอย่างทันทีทันใด ดังนั้นจึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านระบบลำเลียงไปสู่ target site และไม่ถูก metabolite ทำให้สามารถเคลื่อนที่ไปทุกส่วนในพืช และมีโอกาสสัมผัสกับ target site ของเอนไซม์ได้ สารไกลโฟเสทจะจับกับเอนไซม์ได้อย่างแข็งแรงทำให้เอนไซม์ไม่ทำงาน มีผลทำให้ไม่สามารถสังเคราะห์กรดอะมิโนและทำให้พืชตาย ต้นพืชที่ได้รับสารไกลโฟเสทสามารถดูดซึมสารเข้าไปได้อย่างรวดเร็ว และเป็นปริมาณมาก โดยสะสมในใบได้ถึง 22-28%, 45%, 9% และ 14% ในใบกล้าของ *Populus tremuloides* ใบมันฝรั่ง (*Solanum tuberosum*) ราสเบอร์รี่และเบอร์รี่ป่า ตามลำดับ (Smid and Hiller, 1981 และ Roy et al., 1989) สารไกลโฟเสทในใบพืชสามารถแตกตัวหรือสลายไปอย่างรวดเร็วโดยมีค่าครึ่งชีวิตน้อยกว่า 14 วันในพืชป่า (Newton et. al., 1984) ใบของต้น alder และ salmonberry มีค่าครึ่งชีวิตเพียง 8-9 วันในใบแห้ง (Feng and Thompson, 1990) และมี DT_{90} 100 วันในใบสด (Mensink and Janssen, 1994) แต่สารไกลโฟเสทมีความคงทนในเนื้อเยื่อพืชได้ เช่น สามารถคงอยู่ได้นานในถึง 270 และ 390 วัน ในไลเคน *Cladonia rangiferina* หรือ ใช้เวลาการสลายตัวถึง 1 ปีในต้น *Vaccinium myrtillus* (Siltanen et al., 1981)

2.2.2 พิษต่อคนและสัตว์

การสัมผัสสารไกลโฟเสทของคนเกิดได้หลายทาง เช่น การหายใจ การสัมผัสและการกินทั้งโดยอุบัติเหตุและความตั้งใจ ความเป็นพิษของสารไกลโฟเสทต่อมนุษย์ทำให้เกิดอาการได้ตั้งแต่ระดับต่ำ เช่น อาการในระบบย่อยอาหาร จนถึงอาการในระดับรุนแรง เช่น ปวดไม่ทำงาน โรคไตในระดับที่ต้องล้างไต ความดันโลหิตสูง หัวใจหยุดเต้นฉับพลัน ลมชักและตาย ซึ่งหากอาการรุนแรงสามารถตายได้ภายในหนึ่งชั่วโมง (Talbot et al., 1991) หากมีการสัมผัสสารไกลโฟเสทระหว่างการกำจัดวัชพืช ปริมาณการซึมผ่านเข้าสู่ร่างกายอยู่ในระดับต่ำกว่า NOEL คือ ปริมาณที่ผ่านเข้าทางผิวหนังจากการได้รับสารระหว่างการผสม การฉีดพ่น และการเข้าไปในแปลงหลังการฉีดพ่นภายใน 7 วัน มีค่า 805, 271–3619 และ $16 \mu\text{g ml}^{-1}$ ปริมาณที่ผ่านเข้าทางการหายใจมีค่า 18, 0.19–2.47 และ $0.12 \mu\text{g ml}^{-1}$ (Mensink and Janssen, 1994) ค่าความเป็นพิษของสารไกลโฟเสทต่อสัตว์เกิดโดยทางการกินและทางผิวหนัง ค่า Lethal Dose (LD_{50}) มีความแตกต่างกันตามชนิดสัตว์ ในหนูมีค่าตั้งแต่ 4300 จนถึงมากกว่า 5000 mg kg^{-1} ทางการกิน และ 2000 mg kg^{-1} ทางผิวหนัง และในกระต่ายมีค่า LD_{50} มากกว่า 5000 mg kg^{-1} ทางผิวหนัง และในแพะมีค่า LD_{50} 3500 – 5700 mg kg^{-1} ทางการกิน เป็นต้น

2.2.3 ความเป็นไปในสิ่งแวดล้อม

ไกลโฟเสทเป็นสารเคมีที่ถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มสารที่มีความคงทนปานกลาง (moderate persistence) และการเคลื่อนที่ในดินน้อยหรือไม่เคลื่อนที่ (immobile–low mobile) (Mantylähti, 2003) เนื่องจากเป็นสารที่ถูกดูดซับได้ดี โมเลกุลของสารไกลโฟเสทประกอบด้วยกลุ่ม glycine และ phosphonomethyl ที่มี functional group ที่สามารถแตกตัวได้ 3 กลุ่ม คือ amine, carboxylate และ phosphonate และมีปฏิกิริยาเป็นกรดอ่อน (Morillo et al., 2002; Zhou, et al., 2004; Barrett and McBride, 2006 และ Gimsing et al., 2007) การแตกตัวเป็นโมเลกุลที่มีประจุทำให้สามารถดูดซับอย่างแข็งแรงบนอนุภาคดินโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับในห้องปฏิบัติการในดินและแร่ดินเหนียวต่างๆ $8\text{--}377 \text{ dm}^3 \text{ kg}^{-1}$ กลไกการดูดซับเกิดจากการที่สารไกลโฟเสทสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับลิแกนด์ต่างๆบนผิวอนุภาคแร่ดินเหนียวต่างๆ ได้แก่ goethite, kaolinite, illite, montmorillonite กลไกการสร้างสารเชิงซ้อนบนพื้นผิวดูดซับเกิดได้มากบนแร่ออกไซด์และความมากน้อยของการดูดซับมีความสัมพันธ์กับค่าพีเอช (Pesaagno, et al., 2008) นอกจากนั้น การดูดซับบนแร่ดินเหนียวเกิดได้ทั้งบนพื้นที่ผิวภายนอกและภายใน ความสามารถในการดูดซับอย่างแข็งแรงของไกลโฟเสทบนพื้นผิวนุภาคและการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับธาตุโลหะมีผลต่อความสามารถในการสลายตัวของสารไกลโฟเสท การเคลื่อนย้ายและความเป็นประโยชน์ของสารไกลโฟเสทต่อสิ่งมีชีวิต

2.3 ผลกระทบของสารกำจัดวัชพืชต่อคุณภาพทรัพยากรดิน

ผลกระทบของสารกำจัดวัชพืชต่อคุณภาพของดินได้รับความสนใจและมีการศึกษากันมากในแง่ต่างๆ เช่น ผลของสารกำจัดวัชพืชต่อชนิด ปริมาณและกิจกรรมของสิ่งมีชีวิตต่างๆในดินที่มีผลต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารและก๊าซในดิน เช่น สารไดโนสเบ เมทริบิวซิน มีผลต่อกระบวนการ Denitrification ของไนโตรเจนที่ส่งผลต่อปริมาณก๊าซ N_2 และ N_2O ในดิน (Yeomans and Bremner, 1985) สาร 2,4-D มีผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน เช่น การยับยั้งกระบวนการออกซิเดชันของมีเทน (CH_4) ในดิน (Priem and Ekelund, 2001) ที่ส่งผลให้เกิดการสูญเสีย functional stability ของเอนไซม์ Urease, Glucosidase Sulfatase และกระทบต่อกลไกของการต้านทานความเสื่อมโทรมและกลไกการฟื้นฟูคุณภาพของดิน (Blaejaert et al., 2006) และมีผลยับยั้งการเกิดสารเชิงซ้อนของ Humus-laccase ในดิน (Ruggiero and Radogna, 1985) การศึกษาผลของการใช้สารกำจัดวัชพืชต่อปริมาณธาตุต่างๆในดิน พบว่า การใช้สาร Sulfometuron-methyl ลงในดินทรายปนกรวดที่เป็นกรดจัด Typic Dystrochrepts เป็นเวลา 3 ปี ทำให้ระดับความเข้มข้นของอะลูมิเนียมและไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้นและทำให้สัดส่วนระหว่างธาตุแคลเซียมกับอะลูมิเนียมในดินลดลงซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงจนถึงระดับวิกฤติที่เกิดความเป็นพิษของธาตุอะลูมิเนียมต่อพืช นอกจากนี้หลังจากใส่สารดังกล่าวเป็นเวลา 1 ปีทำให้ดินมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้นด้วย (Schreffler and Sharpe, 2003) โดยในสภาพพีเอชปกติสาร Sulfometuron-methyl ไอออนลบสามารถจับกับไอออนบวกในดินเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายได้และถูกชะละลายออกไปจากหน้าตัดดินทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของไอออนบวกในดิน (Wehtje et al., 1987)

สำหรับผลของสารพาราควอตในดินมีรายงานการใส่สารพาราควอตในดินเพาะปลูกติดต่อกันหลายครั้งว่ามีผลต่อการลดลงปริมาณจุลินทรีย์และเชื้อราในดินอย่างมีนัยสำคัญ (Duah-Yentumi and Johnson, 1986) สำหรับสารไกลโฟเสทแม้ว่าจะได้รับการอ้างถึงความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม (Giesy, et al., 2000) แต่พบว่ามีรายงานการศึกษาถึงผลของสารไกลโฟเสทต่อกิจกรรมจุลินทรีย์ดิน ปริมาณธาตุและการดูดซับในดิน Araujo et al. (2003) ได้รายงานผลของการใส่สารไกลโฟเสทในดิน Typic Hapludults และ Hapludoxs เป็นเวลา 32 วันว่าทำให้ปริมาณ Actinomycete และเชื้อราในดินเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณแบคทีเรียลดลง นอกจากนี้สารไกลโฟเสทยังมีผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน เช่น ทำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในดินที่เกิดจากกระบวนการหายใจเพิ่มขึ้น 10-15% และทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ Fluorescein Diacetate (FDA) เพิ่มขึ้น 9-19% นอกจากนี้ยังพบว่าไกลโฟเสทสามารถถูกย่อยสลายได้ในการทดลอง

ในด้านพฤติกรรมการดูดซับต่างๆในดิน มีรายงานอย่างมากถึงบทบาทของสารไกลโฟเสทที่มีต่อพฤติกรรมการดูดซับ (adsorption) สารเคมีในดินและการเคลื่อนที่ได้ (mobility) ของไอออนบวกต่างๆในดิน Barrett and McBride (2006) รายงานผลการศึกษาพบว่า การใส่ไกลโฟเสทในรูปราวน้ำซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ทางการค้าโดยใส่ในดินที่ระดับความเข้มข้นของสารออกฤทธิ์ 220 mg kg^{-1} มีผลทำให้ธาตุต่างๆ เช่น ทองแดง อะลูมิเนียมและฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในดินสามารถเคลื่อนที่ได้ออกมาได้มากขึ้น ไกลโฟเสทแสดงอิทธิพลต่อการดูดซับสารเคมีแตกต่างกันไปในดินแต่ละชนิดที่มีคุณสมบัติต่างกัน Morillo, et al. (2002) รายงานผลของการใส่สารไกลโฟเสทลงดินทำให้ดินมีการดูดซับธาตุทองแดงลดลง โดยชนิดของแร่ดินเหนียวในดินเป็นตัว

ควบคุมความมากมายของอิทธิพลของไกลโฟเสทที่มีต่อการดูดซับ ดิน S48 (%Clay=10 %OM=5.34) ซึ่งมีแร่ดินเหนียวส่วนใหญ่เป็นพวกอะลูมิเนียมซิลิเกต การใส่ไกลโฟเสทในระดับ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 mM ทำให้ปริมาณการดูดซับทองแดงของดินลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับดินที่ไม่ใส่ไกลโฟเสท โดยระดับต่างๆของสารไกลโฟเสทไม่แตกต่างกัน ส่วนดิน LM (%Clay=25 %OM=1.41) และดิน ST (%Clay=18 %OM=1.86) ซึ่งมีแร่ดินเหนียวออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ พบว่า ปริมาณการดูดซับทองแดงจะลดลงน้อยกว่าดิน S48 และปริมาณการลดลงสัมพันธ์ทางบวกกับระดับต่างๆของสารไกลโฟเสทอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังมีรายงานผลการวิจัยที่ยืนยันถึงผลทางลบของสารไกลโฟเสทที่มีต่อธาตุโลหะหนักอื่นๆ เช่น ทองแดง สังกะสีและแคดเมียม โดยดินที่มีอินทรีย์วัตถุและความจุแลกเปลี่ยนไอออนสูงจะมีอิทธิพลน้อยกว่าในดินที่มีอินทรีย์วัตถุและความจุแลกเปลี่ยนไอออนบวกต่ำ (Morillo, et al., 2002; Wang, et al., 2006 และ Gimsing et al., 2007) ความเป็นกรดต่างของดินเป็นคุณสมบัติสำคัญที่มีส่วนควบคุมการดูดซับโลหะหนักเช่นกัน ในดินกรดสารไกลโฟเสทมีผลทำให้โลหะหนักเคลื่อนที่ลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินได้น้อยลง ส่วนดินด่างสารไกลโฟเสทมีผลทำให้ธาตุโลหะหนักเคลื่อนที่ได้มากขึ้นและมีความเป็นประโยชน์ต่อสิ่งมีชีวิตมากขึ้น (Wang, et al., 2008) การศึกษาส่วนใหญ่ใช้วิธีการ batch equilibrium experiment ที่ไม่ได้ยืนยันผลที่เกิดขึ้นในสภาพหน้าตัดดิน

อิทธิพลของสารไกลโฟเสทต่อการดูดซับในดินมีกลไกที่เกี่ยวข้องหลายกลไก ประกอบด้วย 1) การสร้าง ternary surface complexs ของไกลโฟเสทบนแร่เกอไทต์ทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มขึ้น 2) กลไกการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนอิสระกับธาตุไอออนบวกสองประจุเนื่องจากโมเลกุลมี amine, carboxylate และ phosphonate functional groups ทำให้สารไกลโฟเสทเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับธาตุไอออนบวกที่มีสองประจุ (divalent cation) เกิดเป็นอนุมูลเชิงซ้อน bidentate และ tridentate complexs ที่มีความเป็นอิสระในสารละลายดินได้เป็นอย่างดี (Motekaitis and Martell, 1985 และ Barja et al., 2001) ความคงทนของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารไกลโฟเสทกับไอออนบวกมีค่าแตกต่างกัน โดยค่าคงที่ความเสถียรภาพของสารเชิงซ้อน (stability constant) ของ 1:1 complexs กับไอออน Cu^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Ca^{2+} และ Mg^{2+} มีค่าตามลำดับจากมากไปหาน้อยเป็น 11.92, 8.4, 5.53, 3.25 และ 3.25 การมีอนุมูล carboxylic group ในโมเลกุลทำให้สารเชิงซ้อนของไกลโฟเสทกับไอออนบวกมีความคงทนมากกว่าสารอื่น เช่น ค่า stability constant ของสาร iminodiacetic acid กับไอออน ไอออน Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ca^{2+} และ Mg^{2+} มีค่าเป็น 10.55, 7.0, 2.59 และ 2.94 ตามลำดับ (Lundager-Madsen et al., 1978) สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นมีความอิสระในสารละลายดินมีความชอบ (affinity) ต่อการดูดซับด้วยอนุภาคดินน้อยกว่าไอออนบวกอิสระ ดังนั้น สารไกลโฟเสทในดินจึงมีผลทำให้ธาตุไอออนบวกในดินถูกดูดซับน้อยลง จึงมีการเคลื่อนที่ไปกับน้ำชะละลายดินและมีความเป็นประโยชน์ต่อสิ่งมีชีวิตมากขึ้น (Morillo, et al., 2002; Wang et al., 2006) ธาตุแคลเซียมและแมกนีเซียมสามารถเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับไกลโฟเสทได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแคลเซียมสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนในอัตราส่วนแคลเซียมต่อไกลโฟเสท 1:1 (Gauvrit et al., 2001; Schoenherr and Schreiber, 2004) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไกลโฟเสทกับไอออนบวกไม่พบในไอออนที่มีหนึ่งประจุ (Stahlman and Phillips, 1979) 3) กลไกการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดในสารละลายดินเนื่องจากคุณสมบัติความเป็นกรดของไกลโฟเสทมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงประจุบนแร่ที่มีประจุไม่ถาวร

และ 4) กลไกการแข่งขันกับสารอื่นบนพื้นที่ผิวดูดซับ (Wang, et al., 2004; Barrett and McBride, 2006 และ Gimsing et al., 2007)

นอกจากนั้น สารไกลโฟเสตยังมีผลต่อการดูดซับฟอสเฟตในดินเนื่องจากการแข่งขันบนพื้นผิวดูดซับและส่งผลกระทบต่ออัตราการดูดซับจุลธาตุ สารไกลโฟเสตมีการแข่งขันการดูดซับกับฟอสเฟตในดินเนื่องจากมีลักษณะการดูดซับคล้ายกันในด้านตำแหน่งพื้นผิว กลไกและรูปแบบการดูดซับ แต่ไกลโฟเสตมีความสามารถในการแข่งขันการดูดซับได้ดีกว่าฟอสเฟตในดิน มีผลทำให้มีการปลดปล่อยฟอสเฟตออกมาสู่สารละลายดินมากขึ้น จากการศึกษาของ Gimsing et al. (2007) พบว่า ไกลโฟเสตสามารถแข่งขันในการดูดซับกับฟอสเฟตในดิน การดูดซับของไกลโฟเสตและฟอสเฟตสอดคล้องกับสมการ Langmuir โดยไกลโฟเสตมีปริมาณการดูดซับสูงสุดมากกว่าฟอสเฟต นอกจากนั้น Barrett and McBride (2006) ยังพบว่า การปลดปล่อยฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับอยู่ที่อนุภาคดิน เป็นผลมาจากการแข่งขันแย่งพื้นผิวดูดซับซึ่งไกลโฟเสตดูดซับได้ดีกว่า โดยระดับความเข้มข้นของไกลโฟเสตในดินที่สามารถแสดงอิทธิพลต่างๆคือ $50 \text{ mg.a.i. kg}^{-1}$ ซึ่งเป็นระดับที่พบเมื่อพิจารณาชั้นบางๆที่ผิวดิน ฟอสเฟตที่ถูกปลดปล่อยออกมาเป็นอิสระในสารละลายดินมีอิทธิพลในทางยับยั้ง (antagonistic effect) ความเป็นประโยชน์และการเคลื่อนย้ายจุลธาตุในดินซึ่งเกิดได้หลายปฏิกิริยา เช่น ฟอสเฟตที่เพิ่มขึ้นในสารละลายดินทำให้จุลธาตุถูกดูดซับมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประจุลบบนผิวอนุภาคดินเหนียว โดยแร่ดินเหนียวที่มีการเปลี่ยนแปลงมากคือ แร่ออกไซด์ในดิน (Saeed and Fox, 1979 และ Xie and MacKenzie, 1990) ฟอสเฟตในสารละลายดินสามารถตกตะกอนกับสังกะสีและทองแดงที่ทำให้ละลายได้น้อยลง (Jurinak and Inouye, 1962) แต่มีผลการศึกษาที่แสดงถึงความขัดแย้งกัน โดย Shuman (1988) รายงานว่า KH_2PO_4 ทำให้สังกะสีที่จับอยู่กับแร่เหล็กและแมงกานีสออกไซด์ปลดปล่อยออกมาเป็นอิสระในรูปที่แลกเปลี่ยนได้มากขึ้น

บทที่ 3

วิธีการศึกษาวิจัย

โครงการวิจัยเรื่องการศึกษาอิทธิพลของสารพาราควอตและไกลโฟเสทในดินที่มีต่อความสามารถในการดูดซับของดิน เป็นการวิจัยที่มุ่งเน้นการศึกษาเพื่ออธิบายพฤติกรรมการดูดซับของสารพาราควอตและไกลโฟเสทในดินตัวอย่าง และศึกษาผลกระทบของสารพาราควอตและไกลโฟเสทที่มีต่อความสามารถของดินในการดูดซับธาตุต่าง ๆ

3.1 กรอบและแผนผังโครงการวิจัย

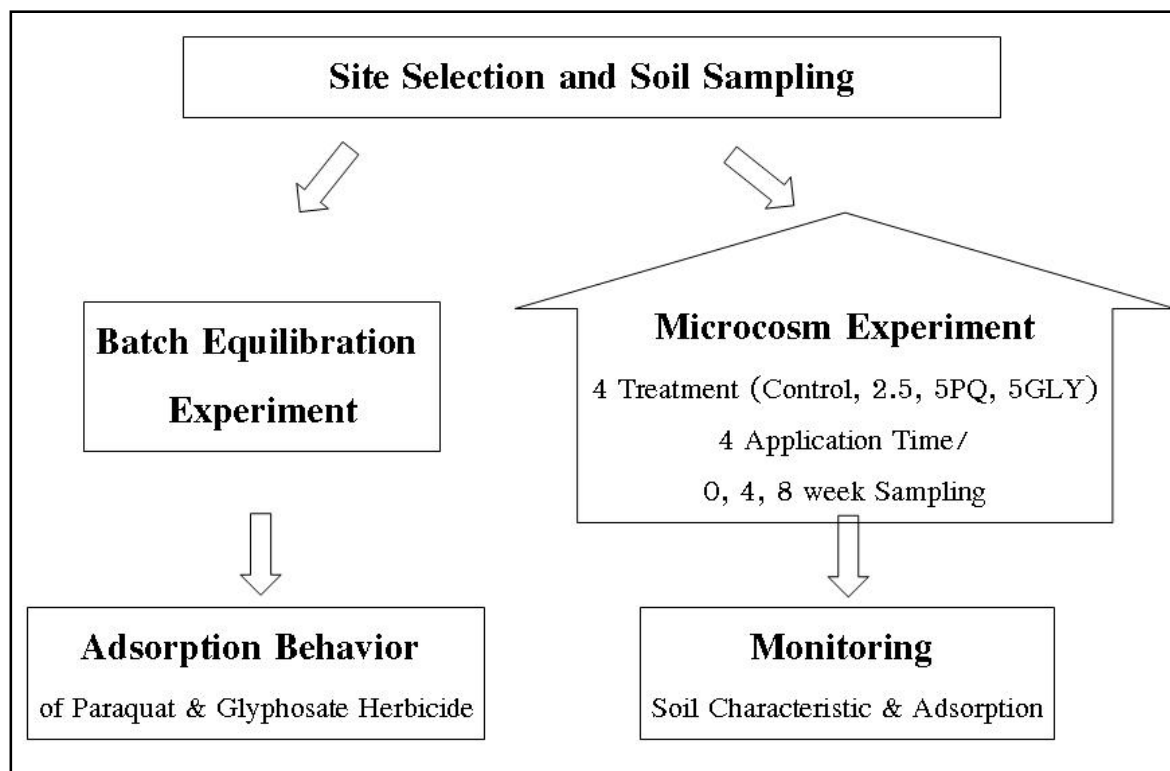
กรอบการศึกษาของโครงการวิจัยนี้ ประกอบด้วย การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับสารพาราควอตและไกลโฟเสทในดินในห้องปฏิบัติการ และการทดลองในแปลงทดลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงการดูดซับของดินใน microcosm experiment ตามกรอบและแผนผังการวิจัยในภาพที่ 3.1

การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับ (adsorption behavior) สารพาราควอตและไกลโฟเสทใช้เทคนิควิธี batch equilibration experiment ทำการทดสอบการดูดซับสารไกลโฟเสทในตัวอย่างดินหลากหลายชนิดที่เป็นตัวแทนของภูมิภาคเพื่ออธิบายพฤติกรรมและความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับสารไกลโฟเสทกับคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของดินซึ่งเป็นข้อมูลที่ยังไม่เพียงพอในภูมิภาค สำหรับสารพาราควอตนั้นศึกษากับตัวอย่างดินของโครงการวิจัยนี้เท่านั้น

การศึกษามูลของสารกำจัดวัชพืชต่อความสามารถในการดูดซับของดินในแปลงทดลอง (microcosm experiment) เน้นศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการดูดซับสารประกอบและไอออนชนิดต่าง ๆ ในดิน ทั้งที่เป็นอิทธิพลเชิงเดี่ยว (single effect) และอิทธิพลร่วม (interaction) ที่เกิดจากสารกำจัดวัชพืชแต่ละชนิด โดยมีการใส่สารกำจัดวัชพืชซ้ำกัน 4 ครั้งแต่ละครั้งห่างกัน 8 สัปดาห์ ทำการติดตาม (monitoring) การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติดินและการดูดซับในดินในระยะเวลา 8 สัปดาห์หลังการใส่สารแต่ละครั้งและติดตามต่อเนื่องต่อไปอีกตามระยะเวลา 16, 24, 32 และ 40 สัปดาห์หลังจากการใส่สารกำจัดวัชพืชครั้งสุดท้าย

3.2 การคัดเลือกตัวอย่างดินและคุณสมบัติของดินที่ใช้ในการศึกษา

เก็บตัวอย่างดินต่าง ๆ จากพื้นที่เกษตรกรรมที่กระจายอยู่ในหลายจังหวัด อาทิ พิจิตร พิษณุโลก อุตรดิตถ์ สุโขทัย พิจิตรและนครสวรรค์ ทำการคัดเลือกตัวอย่างดินมา 10 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบเพื่ออธิบายพฤติกรรมการดูดซับสารไกลโฟเสท และคัดเลือกตัวอย่างดินเพียงหนึ่งตัวอย่างคือตัวอย่างดิน SIT ไปใช้สำหรับการศึกษาตามวัตถุประสงค์ต่าง ๆ ของโครงการวิจัย ตัวอย่างดิน SIT เก็บจากแปลงพืชสวนของเกษตรกรบริเวณหมู่บ้านกรทอง ในเขตอำเภอสว่าง จังหวัดสุโขทัย ซึ่งมีการปลูกไม้ผลแบบผสมผสานมีสภาพพื้นที่ดังแสดงในภาพที่ 3.2 และมีคุณสมบัติของตัวอย่างดินต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 กรอบและแผนผังการทดลองภายใต้กรอบโครงการวิจัย

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติต่างๆของดิน 10 ตัวอย่าง

Soil Samples	Soil Characteristics					Exchangeable Base, $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$				
	Clay, %	1:1 H_2O	1:2 CaCl_2	OM, %	CEC, $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$	Na	Ca	Mg	K	Base
RBR	57.9	4.51	4.14	3.62	11.70	0.153	1.193	0.514	0.246	2.106
CHU51	24.8	4.63	3.92	1.95	4.20	0.094	0.244	0.728	0.086	1.152
MS10	36.0	4.71	4.20	1.73	8.50	0.197	0.856	0.470	0.217	1.740
SR13	44.6	4.88	4.22	3.99	10.00	0.181	0.730	0.516	0.120	1.547
CHU52	13.9	4.96	4.26	1.32	2.90	0.101	0.247	0.031	0.072	0.450
KR4	9.3	5.01	4.05	0.75	2.40	0.070	0.180	0.024	0.082	0.356
NK12	32.2	5.12	4.31	1.51	5.70	0.191	0.394	0.083	0.154	0.822
TL2	34.8	6.02	5.61	2.55	9.60	0.055	1.275	2.319	0.120	3.769
SIT	39.3	6.13	5.85	3.27	8.60	0.035	1.187	0.461	0.343	2.027
TL1	32.5	6.31	5.28	2.68	8.40	0.086	0.808	1.166	0.099	2.159

3.3 การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับพาราควอตและไกลโฟเสทในดิน

การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับสารกำจัดวัชพืชทั้งสองชนิดในดินเป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยวิธี batch equilibration technique ตามแนวทางการทดสอบสารเคมีหมายเลข 106 ของ OECD (OECD Guideline for the testing of chemicals 106) (OECD, 1993) ในช่วงความเข้มข้นที่สามารถอธิบายได้โดยสมการของ Freundlich Adsorption Isotherm และคำนวณค่าคงที่การดูดซับประกอบด้วย adsorption capacity (K_f) และ adsorption intensity ($1/n$) ตาม ดังสมการ

$$Q = K_f C_e^{1/n}$$

เมื่อ Q = คือปริมาณพาราควอตที่ถูกดูดซับบนดิน, mg kg^{-1}
 C_e = ค่าความเข้มข้นของพาราควอตที่จุดสมดุล, mg L^{-1}
 K_f = Freundlich Adsorption Capacity, $(\text{mg kg}^{-1}) (\text{mg L}^{-1})^{-1}$
 $1/n$ = Adsorption Intensity

สารละลายพาราควอตที่ใช้ในการทดลองเตรียมจากสาร paraquat dichloride ซึ่งมีชื่อ IUPAC ว่า 1,1'-dimethyl-4,4'-bipyridinium ความบริสุทธิ์ 98% ของ Sigma-Aldrich การทดลองการดูดซับสารพาราควอต ใช้สัดส่วนของดินต่อสารละลาย 1:25 และ ระยะเวลาในเขย่าจนถึงจุดสมดุล 24 ชั่วโมง ตามที่รายงานโดย Amondham (2006)

สารละลายไกลโฟเสทเตรียมจากสาร N-(phosphonomethyl)glycine ความบริสุทธิ์ 98% ของ Sigma-Aldrich และทำการทดสอบเงื่อนไขต่าง ๆ ก่อนการทดลอง เพื่อหาสัดส่วนระหว่างดินต่อสารละลาย และระยะเวลาเขย่าจนถึงจุดสมดุล

3.4 การศึกษาอิทธิพลของสารกำจัดวัชพืชต่อการเปลี่ยนแปลงการดูดซับของดิน

การทดลองในเรือนทดลองเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติดินและความสามารถในการดูดซับของดินใช้ตัวอย่างดิน SIT ที่บรรจุใน soil microcosm ซึ่งทำจากท่อพีวีซี (เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความยาว 15 เซนติเมตร) การบรรจุดินใช้วิธีการเก็บแบบไม่รบกวนโครงสร้างดิน (undisturbed soil) โดยตอกท่อพีวีซีลงไปในดินให้เหลือขอบด้านบน 3 เซนติเมตรจากผิวดิน ขุดท่อพีวีซีที่มีดินบรรจุอยู่สูงประมาณ 12 เซนติเมตรออกไปใช้ในการทดลอง ดังภาพที่ 3.2 และภาพที่ 3.3

Soil microcosm ที่มีดินลึกประมาณ 12 เซนติเมตรถูกนำไปจัดเรียงในเรือนทดลองซึ่งเป็นโรงเรือนที่มีหลังคาพลาสติกใสป้องกันน้ำฝน โดยทำการจัดผังการทดลองแบบสุ่มภายในบล็อก (randomized block design) ประกอบด้วย 3 บล็อก โดยมีการควบคุมให้มีความชื้นในช่วง 20-80% ของความจุความชื้นที่เป็นประโยชน์ตลอดการทดลองโดยวิธีการให้น้ำจากด้านล่าง ดังภาพที่ 3.4

3.4.1 แผนการทดลอง

การศึกษาอิทธิพลของสารพาราควอตและไกลโฟเสทประกอบด้วยอิทธิพลเชิงเดี่ยว (single effect) ของสารแต่ละชนิดและอิทธิพลร่วม (interaction) ระหว่างสารพาราควอตและสารไกลโฟเสท การใส่สารกำจัดวัชพืชในการทดลองประกอบด้วย 4 ตำรับทดลอง คือ

- การไม่ใส่สารกำจัดวัชพืช
- การใส่สารพาราควอตร่วมกับสารไกลโฟเสท
(ปริมาณอย่างละ 2.5 เท่าของอัตราที่แนะนำแก่เกษตรกร)
- การใส่สารพาราควอต (ปริมาณ 5 เท่าของอัตราที่แนะนำแก่เกษตรกร)
- การใส่สารไกลโฟเสท (ปริมาณ 5 เท่าของอัตราที่แนะนำแก่เกษตรกร)

สารกำจัดวัชพืชที่ใช้ในการทดลองเป็นสารละลายที่เตรียมจากสารมาตรฐาน คือ สารพาราควอต 1,1'-dimethyl-4,4'-bipyridinium, 98% (Sigma-Aldrich) และ สารไกลโฟเสท N-(phosphonomethyl)-glycine, 96% (Sigma-Aldrich) เพื่อกำจัดอิทธิพลของส่วนผสมตัวเดิมที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์กำจัดวัชพืช โดยใช้สารละลายพาราควอตเข้มข้น 982 mg L^{-1} และสารไกลโฟเสทเข้มข้น $1,964 \text{ mg L}^{-1}$ การใส่สารกำจัดวัชพืชลงในดินตามตำรับการทดลองต่างๆ ในแต่ละครั้งใช้ปริมาตรของสารละลายพาราควอตและไกลโฟเสทตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ปริมาณสารพาราควอตและไกลโฟเสทที่ใส่ในดินตามตำรับการทดลองในแต่ละครั้ง

Treatment	Symbol	Volume of Standard Solution, mL.	
		Paraquat	Glyphosate
การไม่ใส่สารกำจัดวัชพืช	Control	0	0
การใส่พาราควอตและไกลโฟเสท (ชนิดละ 2.5 เท่าของอัตราแนะนำแก่เกษตรกร)	2.5PQ2.5GLY	1.5	1.5
การใส่สารพาราควอต (5 เท่าของอัตราแนะนำแก่เกษตรกร)	5PQ	3	0
การใส่สารไกลโฟเสท (5 เท่าของอัตราแนะนำแก่เกษตรกร)	5GLY	0	3



ภาพที่ 3.2 สภาพพื้นที่เก็บตัวอย่าง



ภาพที่ 3.3 การบรรจุตัวอย่างดินแบบไม่รบกวนโครงสร้างใน Soil Microcosm



ภาพที่ 3.4 สภาพโรงเรือนทดลองและลักษณะการให้น้ำ

3.4.2 การใส่สารกำจัดวัชพืช การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ตัวอย่าง

การใส่สารพาราควอตและไกลโฟเสทลงดินทำโดยการใส่สารละลายมาตรฐานอย่างทั่วถึงบนผิวดิน ภายใน microcosm จำนวน 4 ครั้ง คือ T1, T2, T3 และ T4 แต่ละครั้งห่างกัน 8 สัปดาห์ และทำการเก็บตัวอย่างดินหลังจากใส่สารทันที หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างเมื่อระยะเวลา 8 สัปดาห์หลังจากการใส่สารกำจัดวัชพืชแต่ละครั้งและที่ระยะเวลา 16, 24, 32 และ 40 สัปดาห์หลังจากการใส่ครั้งสุดท้าย

การเก็บตัวอย่างดินจากแต่ละ microcosm เป็นการเก็บตัวอย่างดินรวมภายในระดับความลึก 5 เซนติเมตรจากผิวดิน หลังจากการผึ่งแห้งในที่ร่ม บดและร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 2 มิลลิเมตรแล้ว นำตัวอย่างดินไปวิเคราะห์คุณสมบัติของดินและความสามารถในการดูดซับ ประกอบด้วย ค่าความเป็นกรดต่างของดิน โดยวิธี ดิน:น้ำ 1:1 และ ดิน : CaCl_2 1:2 ความหนาแน่นรวมของดินโดย cylindrical core และ ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน โดยวิธี oxidation with $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (Walkley-Black, 1934)

การวัดผลของสารกำจัดวัชพืชต่อปริมาณการดูดซับธาตุประจุบวก ประกอบด้วย แคลเซียม แมกนีเซียม ทองแดงและสังกะสี ทำโดยใช้ตัวอย่างดินแห้งจากการเก็บตัวอย่างดินแต่ละครั้งไปทดสอบการดูดซับในห้องปฏิบัติการโดยวิธี batch equilibration technique (OECD, 1993) โดยแต่ละรอบการทดลองใส่สารละลายมาตรฐานของแคลเซียม แมกนีเซียม ทองแดงและสังกะสีที่ระดับความเข้มข้น 250, 50, 2000 และ 2,000 mg L^{-1} ตามลำดับลงดินในสัดส่วนดินต่อสารละลาย 1: 10 หลังจากเขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปวัดความเข้มข้นที่เหลือในสารละลาย ค่าความเข้มข้นและสัดส่วนที่ใช้ได้จากการทดสอบก่อนการทดลอง

ตารางที่ 3.3 แผนการใส่สารกำจัดวัชพืช

Application Time	Sampling Time	Symbol	Date
First	0 wk	T1/WK0	21 July 2551
	8 wks	T1/WK8	15 September 2551
Second	8 wks	T2/WK8	15 September 2551
			17 November 2551
Third	8 wks	T3/WK8	24 November 2551
			12 January 2552
Fourth	0 wks	T4/WK0	19 January 2552
	8 wks	T4/WK8	4 May 2552
	16 wks	T4/WK16	22 June 2552
	24 wks	T4/WK24	17 August 2552
	32 wks	T4/WK32	12 October 2552
	40 wks	T4/WK40	7 December 2552

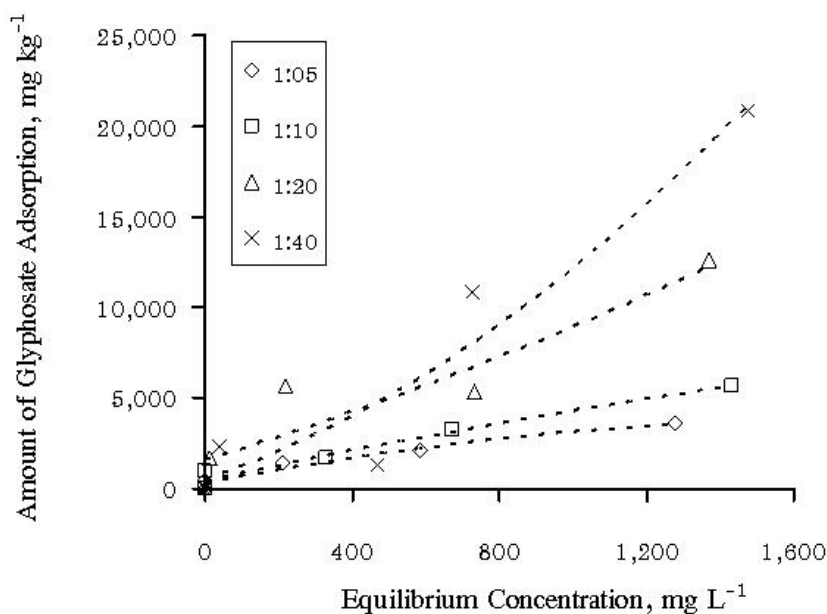
บทที่ 4

ผลการศึกษาวิจัย

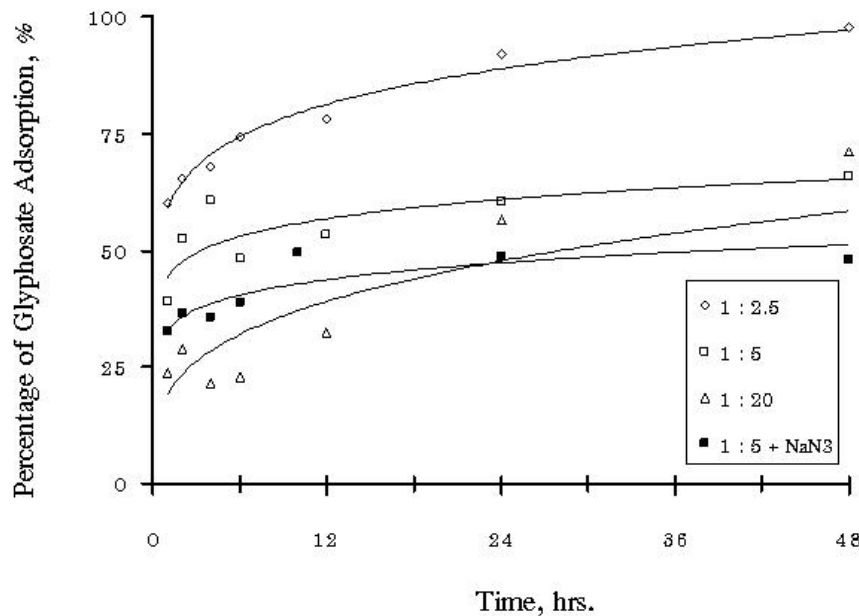
4.1 พฤติกรรมการดูดซับสารไกลโฟเสทและพาราควอตในดิน

4.1.1 การดูดซับสารไกลโฟเสทของดิน

การทดสอบเบื้องต้นของการดูดซับสารไกลโฟเสทในดินตัวอย่าง พบว่า ความสัมพันธ์ของการดูดซับมีรูปแบบ L-curve เมื่อใช้สัดส่วนดินต่อสารละลาย 1:5 และ 1:10 และความสัมพันธ์มีรูปกราฟแบบ S-curve เมื่อใช้สัดส่วนระหว่างดินต่อสารละลาย 1:10 และ 1:20 (ภาพที่ 4.1) การใช้สัดส่วน 1:5 จะมีปริมาณการดูดซับ 33 – 66% และ 33 – 50% เมื่อใช้และไม่ใช้ NaNO_3 ตามลำดับ ส่วนการใช้สัดส่วน 1 : 2.5 มีปริมาณการดูดซับ 60 – 98% และการใช้สัดส่วน 1: 20 เป็นสัดส่วนที่กว้างมากจนปริมาณการดูดซับไกลโฟเสทเพิ่มขึ้นตลอดเวลาและไม่สามารถถึงจุดคงที่ได้ในระยะเวลาของการทดลอง (ภาพที่ 4.2) ดังนั้น สัดส่วนดินต่อสารละลาย 1:5 จึงจัดเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมเนื่องจากปริมาณสารไกลโฟเสทที่เหลือเพียงพอที่จะวัดได้อย่างถูกต้องและการใช้ NaNO_3 เป็นสาร biocide ไม่มีผลต่อการทดลอง และระยะเวลาการเขย่าถึงจุดสมดุลที่ 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นที่จุดสมดุลเมื่อใช้สัดส่วนดินต่อสารละลายต่างกัน



ภาพที่ 4.2 ปริมาณการดูดซับสารไกลโฟเสตตามระยะเวลาเมื่อใช้สัดส่วนดินต่อสารละลายต่างกัน

ปริมาณการดูดซับและปริมาณสารไกลโฟเสตที่จุดสมดุลของดิน 10 ตัวอย่างเมื่อใช้สัดส่วนของดินต่อสารละลาย 1:5 และเขย่าที่ให้อุณหภูมิที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมงแสดงในตารางที่ 4.1 เส้นกราฟ Adsorption Isotherm ของ 10 ตัวอย่างดินแสดงในภาพที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณการดูดซับไกลโฟเสตในดินมีค่าขึ้นกับความเข้มข้น (concentration dependence) ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (coefficient of determination, R^2) ของสมการเส้นตรงลอการิทึมของทุกตัวอย่างดินในตารางที่ 4.2 มีค่าสูงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้โดย Freundlich Adsorption Isotherm โดยค่าคงที่การดูดซับที่ได้คำนวณจากสมการ Freundlich Adsorption Isotherm ประกอบด้วย ค่า adsorption capacity (K_f) ระหว่าง 40 – 550 และ adsorption intensity ($1/n$) มีค่าระหว่าง 0.40 – 0.68

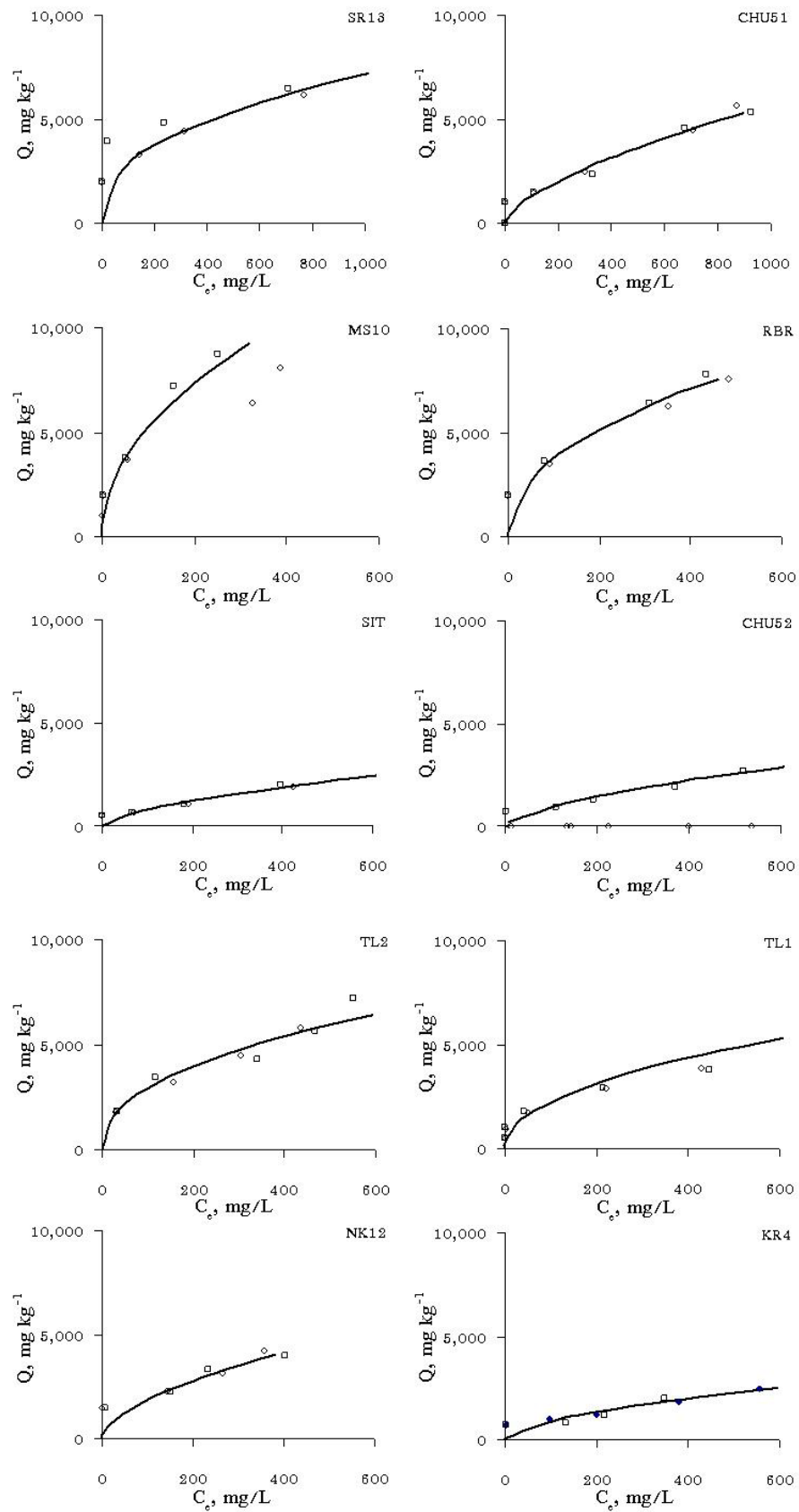
การดูดซับไกลโฟเสตในดินมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติด้านต่างๆของดิน โดยคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับประจุในดิน เช่น ปริมาณดินเหนียว ปริมาณอินทรีย์วัตถุและค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนบวก ให้ค่าสหสัมพันธ์กับค่า adsorption capacity (K_f) และ adsorption intensity ($1/n$) ที่สูงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนั้น ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินเป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับไอออนบวกในดินที่มีความสัมพันธ์กับความมากน้อยของการดูดซับไกลโฟเสตในดิน (ตารางที่ 4.3)

ตารางที่ 4.1 ปริมาณการดูดซับและปริมาณความเข้มข้นของไกลโฟเสตที่จุดสมดุลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น
ระดับต่าง ๆ ของตัวอย่างดิน 10 ชนิด

Soil	Initial concentration of glyphosate, mg L ⁻¹	Equilibrium Concentration of glyphosate, mg L ⁻¹			Amount of glyphosate Adsorption, mg kg ⁻¹		
		I	II	AVG	I	II	AVG
MS10	0	0	0	0	0	0	0
	200	0	0	0	1,000	1,000	1,000
	400	3	3	3	1,987	1,986	1,987
	800	56	51	54	3,718	3,745	3,732
	1600	325	155	240	6,374	7,225	6,800
	2000	386	252	319	8,069	8,741	8,405
CHU51	0	0	0	0	0	0	0
	200	0	1	0	1,000	997	999
	400	108	108	108	1,458	1,458	1,458
	800	301	327	314	2,497	2,363	2,430
	1600	704	677	690	4,481	4,616	4,548
	2000	868	925	897	5,661	5,373	5,517
RBR	0	0	0	0	0	0	0
	400	0	0	0	1,000	1,000	1,000
	800	0	0	0	1,999	2,000	1,999
	1600	91	80	86	3,545	3,600	3,572
	2000	350	311	330	6,252	6,444	6,348
Soil# 12	0	0	0	0	0	0	0
	300	0	0	0	750	750	750
	600	0	7	3	1,500	1,467	1,484
	900	144	150	147	2,280	2,249	2,264
	1200	264	235	250	3,178	3,326	3,252
KR4	0	0	0	0	0	0	0
	150	1	1	1	743	743	743
	300	97	131	114	1,014	843	929
	450	200	219	209	1,252	1,155	1,203
	750	378	349	363	1,859	2,007	1,933
	1050	556	633	594	2,470	2,086	2,278
TL2	0	0	0	0	0	0	0
	400	31	32	32	1,843	1,841	1,842
	800	158	117	137	3,212	3,416	3,314
	1200	303	340	322	4,484	4,299	4,391
	1600	435	468	452	5,823	5,661	5,742
	2000	634	552	593	6,831	7,240	7,035

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

Soil	Initial concentration of glyphosate, mg L ⁻¹	Equilibrium Concentration of glyphosate, mg L ⁻¹			Amount of glyphosate Adsorption, mg kg ⁻¹		
		I	II	AVG	I	II	AVG
CHU52	0	0	0	0	0	0	0
	150	14	3	9	678	734	706
	300	143	112	127	785	942	864
	450	224	192	208	1,130	1,289	1,209
	750	398	371	384	1,762	1,893	1,828
	1050	535	520	528	2,574	2,650	2,612
TL1	0	0	0	0	0	0	0
	200	2	0	1	991	1,000	996
	400	51	43	47	1,747	1,787	1,767
	800	220	215	217	2,901	2,926	2,914
	1200	429	447	438	3,857	3,767	3,812
	2000	703	905	804	6,484	5,477	5,981
	2800	1,259	1,283	1,271	7,704	7,585	7,645
	3600	1,643	1,785	1,714	9,786	9,074	9,430
	4000	1,891	1,927	1,909	10,543	10,367	10,455
SR13	0	0	0	0	0	0	0
	400	0	0	0	2,000	2,000	2,000
	800	141	19	80	3,297	3,904	3,601
	1200	312	235	273	4,440	4,825	4,633
	2000	764	708	736	6,180	6,461	6,320
	2800	1,199	1,195	1,197	8,005	8,024	8,014
	3600	1,622	1,612	1,617	9,891	9,939	9,915
	4000	1,420	1,840	1,630	12,901	10,802	11,852
SIT	0	0	0	0	0	0	0
	100	0	0	0	500	500	500
	200	70	66	68	651	671	661
	400	191	183	187	1,046	1,086	1,066
	800	424	397	410	1,881	2,015	1,948
	1200	722	636	679	2,388	2,822	2,605
	2000	1,236	1,233	1,234	3,822	3,836	3,829
	2800	2,017	1,687	1,852	3,915	5,565	4,740
	3600	2,277	2,431	2,354	6,613	5,846	6,230
	4000	2,699	2,665	2,682	6,507	6,675	6,591



ภาพที่ 4.3 Adsorption Isotherm ของไกลโฟเสตใน 10 ตัวอย่างดิน

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ของสมการ Freundlich Adsorption Isotherm และค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดของสมการเส้นตรงของการดูดซับไกลโฟเสทใน 10 ตัวอย่างดิน

Soil Types	Isotherm constant for glyphosate adsorption		Coefficient of Determination (R^2)
	K_f	$1/n$	
RBR	485	0.448	0.997
CHU51	71	0.634	0.999
MS10	550	0.490	0.989
SR13	441	0.404	0.906
CHU52	40	0.675	0.868
KR4	67	0.566	0.738
NK12	133	0.574	0.997
TL2	403	0.433	0.982
SIT	49	0.607	0.991
TL1	267	0.467	0.935

ตารางที่ 4.3 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่จากสมการการดูดซับกับคุณสมบัติต่างๆของดิน

Adsorption Constant	Correlation coefficient (r) with difference soil characteristics ^{1/}			
	% Clay	%OM	CEC	Exchangeable Ca
K_f	0.688**	0.488	0.782**	0.600*
$1/n$	-0.617*	-0.591*	-0.775**	-0.594*

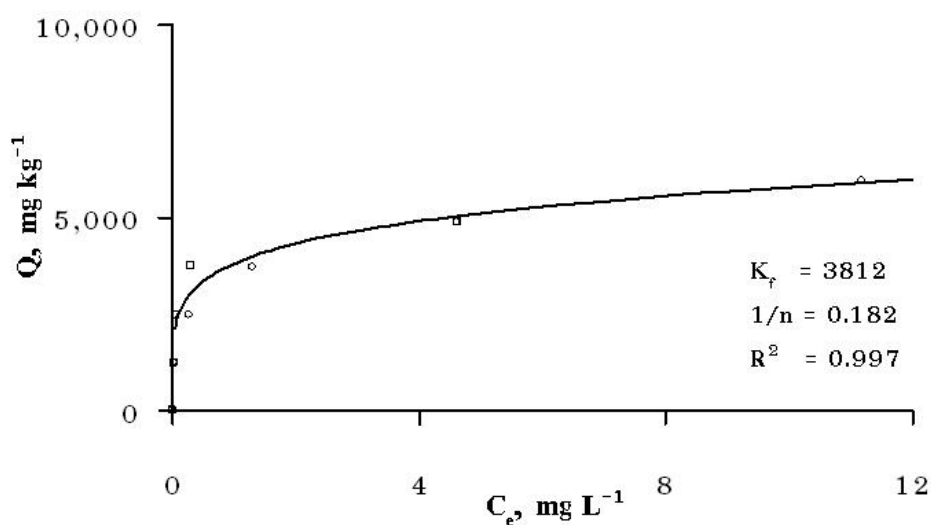
Note: ^{1/} * and ** = significant correlation between soil characteristic and isotherm constant for glyphosate adsorption at 90 and 95% confidence interval, respectively.

4.1.2 การดูดซับสารพาราควอตของดิน

ข้อมูลการดูดซับสารพาราควอตในดิน SIT ตามตารางที่ 4.4 จากการทดสอบโดยวิธี batch equilibration technique เมื่อใช้สัดส่วนของดินต่อสารละลาย 1:25 และระยะเวลาถึงจุดสมดุลย์ 24 ชั่วโมงตาม Amondham (2006) แสดงให้เห็นว่า ปริมาณการดูดซับสารพาราควอตในดินตัวอย่างมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นและสอดคล้องกับสมการ Freundlich Adsorption Isotherm ค่า adsorption capacity (K_f) และ adsorption intensity ($1/n$) มีค่า 3812 และ 0.182 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ปริมาณการดูดซับและปริมาณความเข้มข้นของพาราควอตของตัวอย่างดิน SIT ที่ทำการศึกษา

Initial concentration of paraquat, mg L^{-1}	Equilibrium concentration of paraquat, mg L^{-1}			Amount of paraquat adsorption, mg kg^{-1}		
	I	II	AVG	I	II	AVG
50	0	0	0	1,249	1,249	1,249
100	0	0	0	2,494	2,499	2,496
150	1	0	1	3,718	3,743	3,730
200	5	5	5	4,885	4,884	4,884
250	11	12	12	5,970	5,943	5,957
300	27	27	27	6,830	6,829	6,829
350	43	46	44	7,679	7,610	7,645



ภาพที่ 4.4 Adsorption Isotherm ของสารพาราควอตในตัวอย่างดิน SIT

4.2 อิทธิพลของสารพาราควอตและไกลโฟเสทในดิน

การศึกษาอิทธิพลของสารกำจัดวัชพืช 4 ดำรับการทดลอง คือ การไม่ใส่สาร (Control) การใส่สารพาราควอตร่วมกับไกลโฟเสท (2.5PQ2.5GLY) การใส่สารพาราควอตชนิดเดียว (5PQ) และการใส่สารไกลโฟเสทชนิดเดียว (5GLY) จำนวน 4 ครั้งต่อเนื่องกันและเก็บตัวอย่างดิน SIT ใน microcosm ที่ระยะเวลาต่างๆ ไปวิเคราะห์ ได้ผลการทดลอง ประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆของดิน เช่น ค่าพีเอช ความหนาแน่นรวมและปริมาณอินทรีย์วัตถุ และการเปลี่ยนแปลงปริมาณการดูดซับในดิน เช่น ปริมาณการดูดซับแคลเซียม ปริมาณการดูดซับแมกนีเซียม ปริมาณการดูดซับทองแดงและปริมาณการดูดซับธาตุสังกะสี

4.2.1 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆของดิน

ค่าพีเอชของดินจากการทดลองมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาของการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ แต่ไม่พบว่าการลดลงเนื่องจากอิทธิพลของสารกำจัดวัชพืชอย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 4.5) โดยค่าเฉลี่ยของค่าพีเอชดินจากทุกการทดลองเป็น 6.11, 6.01, 6.09, 5.89, 5.95, 5.86, 5.96, 5.83 และ 5.92 เมื่อเวลา T1/WK0, T1/WK8, T2/WK8, T3/WK8, T4/WK8, T4/WK16, T4/WK24, T4/WK32 และ T4/WK40 ตามลำดับ การลดลงของค่าพีเอชดินไม่สามารถสรุปได้ว่าเป็นอิทธิพลจากสารกำจัดวัชพืชที่ใส่ลงในดิน แต่การเปลี่ยนแปลงอาจเป็นผลจากปฏิกิริยาทางเคมีตามธรรมชาติภายในดินหรืออาจเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินดังภาพที่ 4.6

ปริมาณอินทรีย์วัตถุของดินที่ได้จากการทดลองแสดงในตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงให้เห็นว่าการทดลองไม่มีอิทธิพลต่อปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินอย่างมีนัยสำคัญ แต่ระยะเวลาและปฏิสัมพันธ์ของการทดลองกับระยะเวลามีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ โดยการตอบสนองของปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินตามระยะเวลามีความแตกต่างกันในแต่ละการทดลอง ในสารกำจัดวัชพืชทุกตัว คือ 2.5PQ2.5GLY, 5PQ และ 5GLY พบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุดินมีค่าลดลงตามระยะเวลาอย่างมีนัยสำคัญ (ที่ระดับ $\alpha = 0.05$) ส่วนในการที่ไม่ใส่สารกำจัดวัชพืช (control) พบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินไม่มีการเปลี่ยนแปลง (ภาพที่ 4.7) ผลจากการทดลอง แสดงให้เห็นว่าดินที่ได้รับสารพาราควอตและไกลโฟเสทเป็นระยะเวลานานจะมีปริมาณอินทรีย์วัตถุลดลง โดยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินอาจมีสาเหตุมาจากการที่สิ่งมีชีวิตในดินสามารถใช้สารพาราควอตและไกลโฟเสทเป็นแหล่งอาหารและพลังงานจึงมีการเจริญเติบโตได้มากส่งผลต่อการย่อยสลายอินทรีย์สารที่มีอยู่ในดินได้มากกว่าดินที่ไม่ได้รับสารกำจัดวัชพืช

ค่าความหนาแน่นของดินที่ได้จากการทดลองแสดงในตารางที่ 4.7 จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนไม่พบว่ามีอิทธิพลของการทดลอง แต่ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ระยะเวลาต่างๆกันมีแนวโน้มขึ้นลงซึ่งไม่สามารถอธิบายได้ โดยดินมีค่าความหนาแน่นรวมอยู่ระหว่าง 1.11 -1.29 mg cm^{-3} ตลอดการทดลอง (ภาพที่ 4.8)

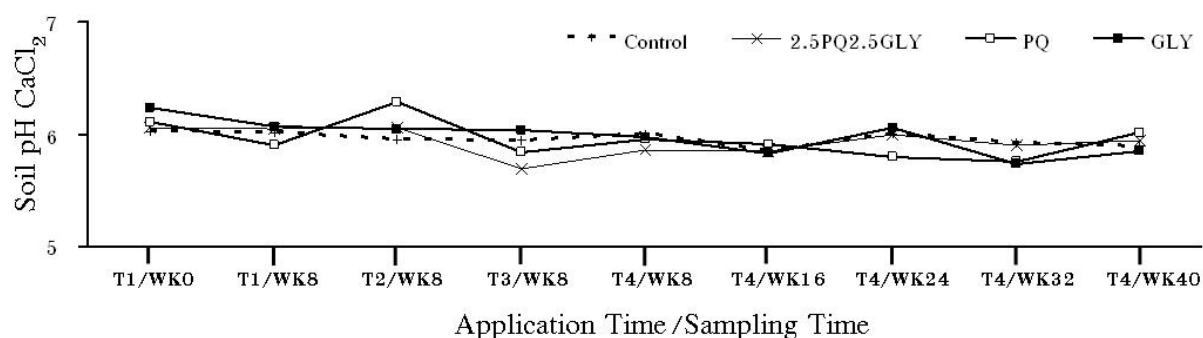
ตาราง 4.5 ค่าพีเอชของดินที่ระยะเวลาต่างๆ หลังจากได้รับสารกำจัดวัชพืชแต่ละตัวรับการทดลอง

Treatment	pH (CaCl ₂) of soil at each application/sampling time									Treatment Average ^{1/}
	T1/WK0	T1/WK8	T2/WK8	T3/WK8	T4/WK8	T4/WK16	T4/WK24	T4/WK32	T4/WK40	
Control	6.03	6.02	5.96	5.95	6.01	5.85	6.01	5.93	5.89	5.96 ns
2.5PQ2.5GLY	6.06	6.05	6.06	5.69	5.86	5.85	5.99	5.90	5.94	5.93 ns
5PQ	6.11	5.90	6.29	5.83	5.95	5.91	5.79	5.75	6.01	5.95 ns
5GLY	6.24	6.06	6.05	6.04	5.98	5.82	6.06	5.73	5.85	5.98 ns
Time Average ^{2/}	6.11a	5.99ab	6.09a	5.88b	5.95ab	5.86b	5.96ab	5.83b	5.92ab	

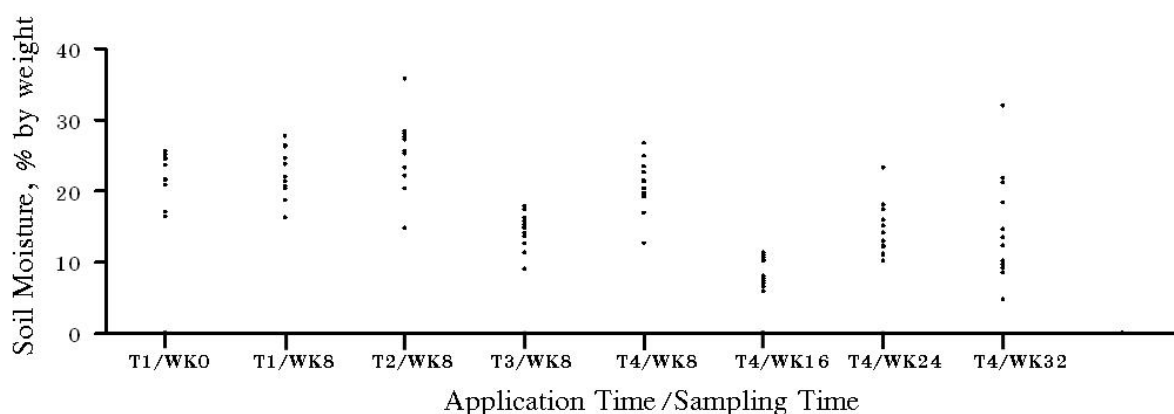
Note: ANOVA; $MS_{\text{Treatment}} = 0.012^{\text{ns}}$, $MS_{\text{Time}} = 0.113^{**}$, $MS_{\text{Time} \times \text{Treatment}} = 0.036$, $MS_{\text{Error}(df=70)} = 0.049$

^{1/} ns = not significant different between each treatment at $\alpha < 0.05$

^{2/} The different lowercase letters mean a significant different mean between each time by Duncan's multiple range test at $\alpha < 0.05$



ภาพที่ 4.5 ค่าพีเอชของดินที่ระยะเวลาต่างๆ หลังจากได้รับสารกำจัดวัชพืชแต่ละตัวรับการทดลอง



ภาพที่ 4.6 ความชื้นของดินใน microcosm ตลอดระยะเวลาการทดลอง

ตารางที่ 4.6 ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินที่ระยะเวลาต่างๆ หลังจากได้รับสารกำจัดวัชพืชแต่ละตำรับการทดลอง

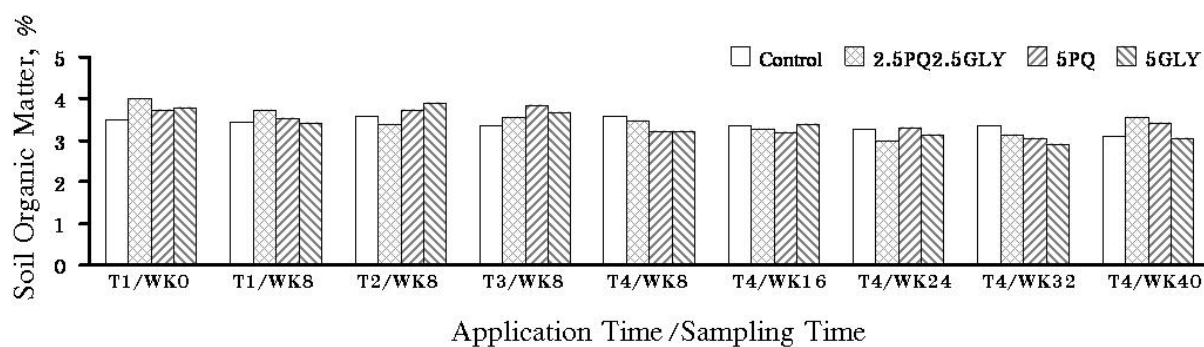
Treatment	Soil organic matter, %, at each application/sampling time									Treatment
	T1/WK0	T1/WK8	T2/WK8	T3/WK8	T4/WK8	T4/WK16	T4/WK24	T4/WK32	T4/WK40	Average ^{1/}
Control ^{2/}	3.49ns	3.45 ns	3.59 ns	3.36 ns	3.59 ns	3.36 ns	3.27 ns	3.36 ns	3.10 ns	3.40 ns
2.5PQ2.5GLY ^{3/}	4.00 a	3.72 ab	3.39 bcd	3.56 abc	3.46 bcd	3.27 bcd	3.00 d	3.12 cd	3.57 abc	3.45 ns
5PQ ^{2/}	3.73 ab	3.53 abc	3.73 ab	3.83 a	3.21 b	3.20 c	3.31 bc	3.04 c	3.42 abc	3.44 ns
5GLY ^{2/}	3.79 a	3.41 ab	3.88 a	3.68 ab	3.22 bc	3.39 bc	3.14 bc	2.91 c	3.04 c	3.39 ns
Time Average	3.75	3.53	3.65	3.61	3.37	3.30	3.18	3.11	3.28	

Note: ANOVA; MS_{Treatment} = 0.050^{ns}, MS_{Time} = 0.502***, MS_{Treatment x Time} = 0.107, MS_{Error(df=70)} = 0.061

^{1/} ns = not significant different between each treatment at $\alpha < 0.05$

^{2/} ns = not significant difference between each time in the Control treatment at $\alpha < 0.05$

^{3/} Mean comparison in the same treatment, the different lowercase letters show a significant difference between average of each time by Duncan's Multiple Range Test at $\alpha < 0.05$

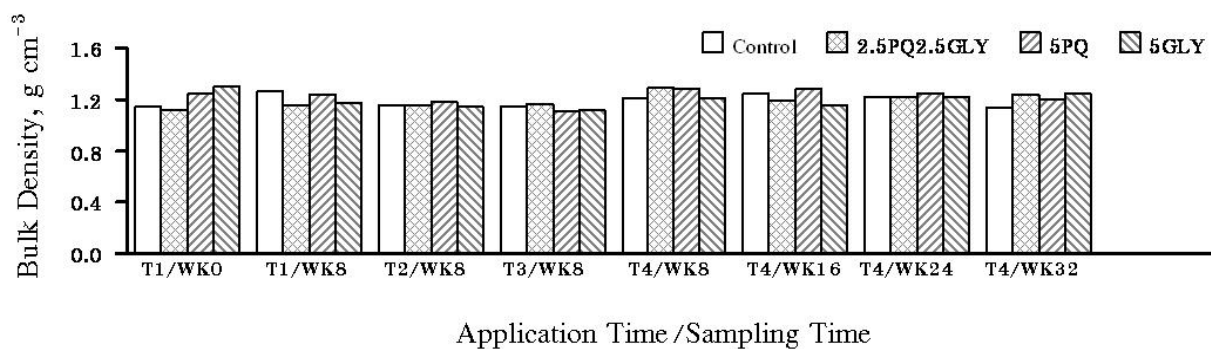


ภาพที่ 4.7 ปริมาณอินทรีย์วัตถุของดินใน microcosm หลังจากได้รับสารกำจัดวัชพืชในแต่ละตำรับการทดลอง ระยะเวลาต่างๆ

ตารางที่ 4.7 ค่าความหนาแน่นของดินที่ระยะเวลาต่างๆหลังจากได้รับสารกำจัดวัชพืชแต่ละตำรับการทดลอง

Treatment	Bulk density, mg cm^{-3} , of soil at each application/sampling time								Treatment
	T1/WK0	T1/WK8	T2/WK8	T3/WK8	T4/WK8	T4/WK16	T4/WK24	T4/WK32	Average
Control	1.14	1.26	1.16	1.15	1.20	1.24	1.21	1.13	1.19
2.5PQ2.5GLY	1.12	1.15	1.15	1.16	1.29	1.19	1.21	1.24	1.19
5PQ	1.24	1.24	1.18	1.11	1.28	1.28	1.24	1.20	1.22
5GLY	1.29	1.17	1.15	1.11	1.21	1.15	1.22	1.25	1.19
Time Average	1.20	1.21	1.16	1.13	1.25	1.22	1.22	1.20	

Note: ANOVA; $MS_{\text{Treatment}} = 0.004^{\text{ns}}$, $MS_{\text{Time}} = 0.023^{***}$, $MS_{\text{Treatment} \times \text{Time}} = 0.007$, $MS_{\text{Error}(\text{df}=70)} = 0.004$



ภาพที่ 4.8 ความหนาแน่นรวมของดินใน microcosm ที่ระยะเวลาต่างๆหลังจากได้รับสารกำจัดวัชพืชแต่ละตำรับการทดลอง

4.2.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณการดูดซับธาตุแคลเซียมของดิน

ปริมาณแคลเซียมที่ถูกดูดซับในตัวอย่างดินตามระยะเวลาต่างๆหลังจากได้รับสารกำจัดวัชพืชแต่ละชนิดแสดงในตาราง 4.8 ผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าได้รับการทดลองไม่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ แต่ระยะเวลามีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญโดยปริมาณการดูดซับแคลเซียมของดินโดยที่ระยะเวลา T1/WK0 และ T4/WK0 มีค่าต่ำกว่า ระยะเวลาอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนั้นปฏิสัมพันธ์ของระยะเวลากับได้รับการทดลองยังมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ

ข้อมูลในภาพที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบอิทธิพลของสารกำจัดวัชพืชในแต่ละระยะเวลา พบว่า ที่ระยะเวลา T1/WK0 ปริมาณแคลเซียมที่ถูกดูดซับของตำรับ 2.5PQ2.5GLY, 5PQ และ 5GLY มีความแตกต่างจากตำรับ control โดยมีปริมาณลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และ ที่ระยะเวลา T4/WK0 ปริมาณแคลเซียมที่ถูกดูดซับของตำรับ 5PQ และ 5GLY มีความแตกต่างจากตำรับ control โดยมีปริมาณลดลงอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับระยะเวลาอื่นๆไม่พบความแตกต่าง จากผลการทดลอง สรุปได้ว่า สารพาราควอตและไกลโฟเสทที่ใส่ในดินในระดับ 5 เท่าของอัตราแนะนำทำให้ปริมาณแคลเซียมที่ถูกดูดซับในดินมีค่าลดน้อยลงกว่าการไม่ใส่สารกำจัดวัชพืช โดยอิทธิพลดังกล่าวเกิดขึ้นในทันทีหลังจากเติมสารพาราควอตและไกลโฟเสทลงในดินและอิทธิพลหมดไปภายใน 8 สัปดาห์หลังจากการใส่สารกำจัดวัชพืชครั้งแรก ส่วนสารพาราควอตและไกลโฟเสทอัตรา 2.5 เท่าของอัตราแนะนำแก่เกษตรกรให้ผลไม่สม่ำเสมอ

ตารางที่ 4.8 ปริมาณการดูดซับแคลเซียมในดินที่ระยะเวลาต่างๆหลังจากใส่สารกำจัดวัชพืชตามตำรับการทดลอง

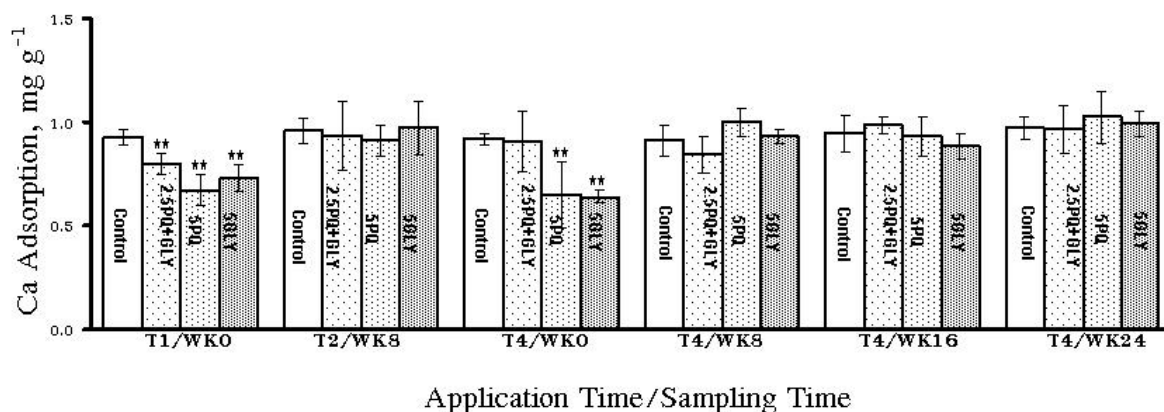
Treatment	Amount of calcium adsorption, mg g ⁻¹ , at each application/sampling time						
	T1/WK0	T2/WK8	T4/WK0	T4/Wk8	T4/WK16	T4/WK24	Average
Control	0.926	0.958	0.919	0.913	0.944	0.972	0.939
2.5PQ2.5GLY	0.799	0.934	0.908	0.847	0.987	0.966	0.907ns ^{1/}
5PQ	0.670	0.913	0.648	1.000	0.931	1.024	0.864ns ^{1/}
5GLY	0.731	0.973	0.637	0.933	0.885	0.995	0.859ns ^{1/}
Average ^{2/}	0.782a	0.945b	0.778a	0.923b	0.937b	0.989b	

Note: ANOVA; MS_{Treatment} = 0.018, MS_{Time} = 0.093, MS_{Treatment x Time} = 0.03, MS_{Error(df=46)} = 0.012

^{1/} ns = the mean value of entried treatment is not significantly difference when compare to the mean value of control treatment as calculated by LDS, $\alpha < 0.05$

^{2/} The same lowercase letter means no significant different mean among each time calculated by Duncan's Multiple Range

Test, $\alpha < 0.05$



ภาพที่ 4.9 ปริมาณการดูดซับแคลเซียมในตัวอย่างดินที่ระยะเวลาต่างๆหลังจากได้รับสารกำจัดวัชพืชตาม

ตำรับทดลอง (Error bar แสดงค่า standard deviation ของข้อมูล 3 ซ้ำ ** แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเมื่อเปรียบเทียบกับตำรับ control ที่ α 0.05)

4.2.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณการดูดซับธาตุแมกนีเซียมของดิน

ปริมาณแมกนีเซียมที่ถูกดูดซับในดินที่ได้รับสารกำจัดวัชพืชต่างกันตามสิ่งทดลอง ตามระยะเวลาต่างๆหลังการใส่สารกำจัดวัชพืชแสดงในตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยของปริมาณการดูดซับแมกนีเซียมมีค่าเป็น 18.18, 18.19, 18.18 และ 18.16 mg g⁻¹ ซึ่งเป็นปริมาณที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการทดลองแสดงว่าการใส่สารพาราควอตและไกลโฟเสตลงในดินในการทดลองนี้ไม่มีผลต่อความสามารถของดินในการดูดซับแมกนีเซียม

ตารางที่ 4.9 ปริมาณการดูดซับแมกนีเซียมในดินตามตำรับการทดลองและตามระยะเวลาใส่และเก็บตัวอย่าง

	Amount of magnesium adsorption, mg g ⁻¹ , at each application/sampling time						
Treatment	T1/WK0	T2/WK8	T4/WK0	T4/Wk8	T4/WK16	T4/WK24	Average
Control	0.400	0.383	0.372	0.367	0.344	0.378	0.374 ns ^{1/}
2.5PQ2.5GLY	0.387	0.372	0.367	0.370	0.326	0.390	0.369 ns ^{1/}
5PQ	0.405	0.376	0.352	0.386	0.354	0.347	0.370 ns ^{1/}
5GLY	0.369	0.382	0.334	0.370	0.346	0.344	0.357 ns ^{1/}
Average ^{2/}	0.390c	0.378bc	0.356ab	0.373bc	0.342a	0.365ab	

Note: ANOVA; MS_{Treatment} = 0.001, MS_{Time} = 0.003, MS_{Treatment x Time} = 0.001, MS_{Error(df=46)} = 0.001

^{1/} ns = the mean value of entried treatment is not significantly difference when compare to the mean value of control treatment as calculated by LDS, α < 0.05

^{2/} The same letter means no significant different mean among each time calculated by Duncan, α < 0.05

4.2.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณการดูดซับธาตุทองแดงของดิน

ปริมาณการดูดซับทองแดงในตัวอย่างดินที่ระยะเวลาต่างๆ หลังจากได้รับสารกำจัดวัชพืชตามตำรับ ทดลองแสดงในตาราง 4.10 จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลข้อมูลพบอิทธิพลของตำรับการทดลอง และระยะเวลาหลังจากการใส่สารกำจัดวัชพืชอย่างชัดเจน การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตำรับต่างๆ กับตำรับ control พบว่าตำรับ PQ มีความแตกต่างจากตำรับ control อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนตำรับ 2.5PQ2.5GLY และ GLY ไม่มีความแตกต่างจาก control การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณการดูดซับทองแดงในระยะเวลาต่างๆ พบว่า ปริมาณการดูดซับทองแดงในตัวอย่างดินที่ระยะเวลา T1/WK0 และ T4/WK0 มีค่าต่ำที่สุดและแตกต่างจากระยะเวลาอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ

ข้อมูลในภาพที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบในแต่ละระยะเวลา พบว่า ที่ระยะเวลา T1/WK0, T4/WK0 และ T4/WK8 ปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับของตำรับ 5PQ มีค่าน้อยกว่าตำรับ control อย่างมีนัยสำคัญ และไม่พบความแตกต่างในระยะเวลาอื่น จากผลการทดลอง สรุปได้ว่า สารพาราควอตที่ใส่ในดินในระดับ 5 เท่าของอัตราแนะนำมีผลทำให้ปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับในดินมีค่าน้อยลงกว่าการไม่ใส่สารกำจัดวัชพืช อิทธิพลของสารพาราควอตเกิดขึ้นในทันทีหลังจากเติมสารพาราควอตลงในดิน ผลของสารพาราควอตต่อปริมาณการดูดซับทองแดงจะหมดไปก่อน 8 สัปดาห์หลังจากการใส่สารกำจัดวัชพืชครั้งแรกและก่อน 16 สัปดาห์หลังจากการใส่สารพาราควอตครั้งที่ 4

ตารางที่ 4.10 ปริมาณการดูดซับทองแดงในดินตามตำรับการทดลองและตามระยะเวลาใส่และเก็บตัวอย่าง

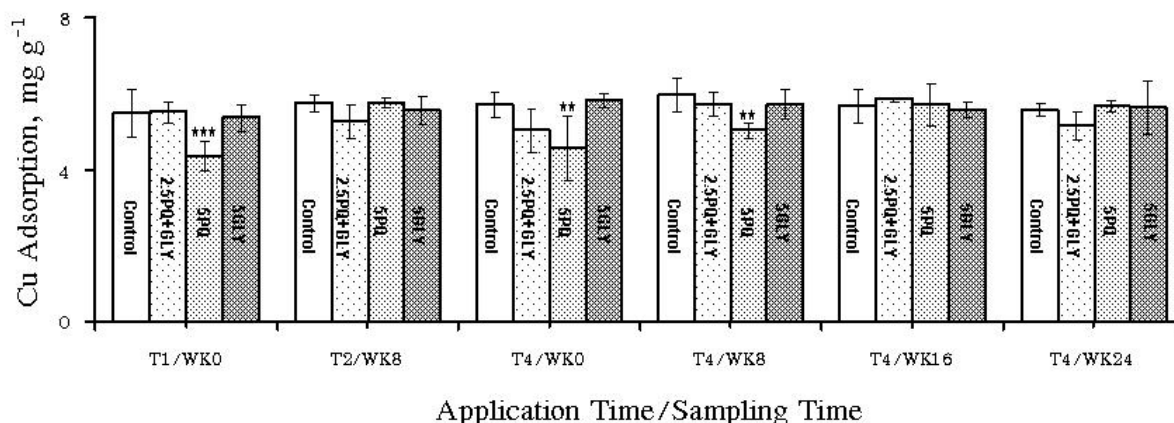
	Amount of copper adsorption, mg g ⁻¹ , at each application/sampling time						
Treatment	T1/WK0	T2/WK8	T4/WK0	T4/Wk8	T4/WK16	T4/WK24	average
Control	5.49	5.76	5.72	5.96	5.68	5.59	5.7
2.5PQ2.5GLY	5.53	5.27	5.04	5.73	5.85	5.16	5.43ns ^{1/}
PQ	4.37	5.76	4.57	5.04	5.73	5.67	5.19** ^{2/}
GLY	5.37	5.56	5.83	5.73	5.58	5.64	5.62ns
Average ^{3/}	5.19a	5.59ab	5.29a	5.61ab	5.71ac	5.51a	

Note: ANOVA; MS_{Treatment} = 0.931, MS_{Time} = 0.487, MS_{Treatment x Time} = 0.379, MS_{Error(df=46)} = 0.182

^{1/} not significant different when compare to control treatment calculated by LDS, $\alpha < 0.05$

^{2/**} significant different when compare to control treatment calculated by LDS, $\alpha < 0.05$

^{3/}The same letter means no significant different mean among each time calculated by Duncan's Multiple Test $\alpha < 0.05$



ภาพที่ 4.10 ปริมาณการดูดซับทองแดงในตัวอย่างดินที่ระยะเวลาต่างๆหลังจากได้รับสารกำจัดวัชพืชตาม

ตำรับทดลอง (Error bar แสดงค่า standard deviation ของข้อมูล 3 ซ้ำ ** แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ α 0.05 จากตำรับ control)

4.2.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณการดูดซับธาตุสังกะสีของดิน

ปริมาณสังกะสีที่ถูกดูดซับในดินที่ได้รับสารกำจัดวัชพืชตามสิ่งทดลอง ตามระยะเวลาต่างๆหลังการใส่สารกำจัดวัชพืชแสดงในตาราง 4.11 ค่าเฉลี่ยของปริมาณการดูดซับสังกะสีมีค่าเป็น 18.18, 18.19, 18.18 และ 18.16 mg g^{-1} ซึ่งเป็นปริมาณที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการทดลองแสดงว่าการใส่สารพาราควอตและไกลโฟเสทลงในดินในการทดลองนี้ไม่มีผลต่อความสามารถของดินในการดูดซับสังกะสี

ตารางที่ 4.11 ปริมาณการดูดซับสังกะสีในดินตามตำรับการทดลองและตามระยะเวลาใส่และเก็บตัวอย่าง

	Amount of Zinc Adsorption, mg g^{-1} , at each application/sampling time						
Treatment	T1/WK0	T2/WK8	T4/WK0	T4/Wk8	T4/WK16	T4/WK24	average
Control	18.22	18.18	18.17	18.22	18.17	18.14	18.18
2.5PQ2.5GLY	18.19	18.20	18.13	18.15	18.22	18.23	18.19 ns ^{1/}
5PQ	18.15	18.29	18.09	18.20	18.24	18.13	18.18 ns ^{1/}
5GLY	18.11	18.26	18.12	18.13	18.14	18.17	18.16 ns ^{1/}
Average	18.17	18.23	18.13	18.17	18.19	18.17	

Note: ANOVA; $MS_{\text{Treatment}} = 0.004$, $MS_{\text{Time}} = 0.014$, $MS_{\text{Treatment} \times \text{Time}} = 0.006$, $MS_{\text{Error(df=46)}} = 0.005$

^{1/} not significant different when compare to control treatment calculated by LDS, $\alpha < 0.05$

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและวิจารณ์

การวิจัยเพื่อศึกษาอิทธิพลของสารกำจัดวัชพืชสองชนิด คือ สารพาราควอตและสารไกลโฟเสต ต่อความสามารถในการดูดซับของดิน เป็นการศึกษาทั้งในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาพฤติกรรมการดูดซับสารพาราควอตและไกลโฟเสตในดินโดยวิธี batch equilibration technique และการศึกษาทดลองใน soil microcosm ภายใต้โรงเรือนทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของสารกำจัดวัชพืชทั้งสองชนิดในแง่ต่างๆ เช่น อัตราการใส่สารและระยะเวลาหลังจากการใส่สารกำจัดวัชพืชที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณการดูดซับธาตุต่างๆในดิน การศึกษาวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การทดสอบการดูดซับสารไกลโฟเสตในตัวอย่างดินของโครงการวิจัยพบว่า ปริมาณการดูดซับไกลโฟเสตในดินมีค่าขึ้นกับความเข้มข้นเป็นรูปแบบ L-curve และสอดคล้องกับสมการ Freundlich Isotherm ค่า $1/n$ ของสมการมีค่าระหว่าง 0.40 – 0.63 ซึ่งแสดงถึงความไม่เป็นเส้นตรงของสมการการดูดซับ สรุปได้ว่าการดูดซับสารไกลโฟเสตบนอนุภาคดินเกิดขึ้นได้หลายกลไกเนื่องจากความสามารถในการแตกตัวที่หลากหลายและความไม่สม่ำเสมอขององค์ประกอบดินที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ ค่าความสามารถในการดูดซับสารไกลโฟเสตดินที่คำนวณจากสมการ (K_F) มีค่าระหว่าง 40 – 550 โดยค่าคงที่การดูดซับไกลโฟเสตมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติดินที่เกี่ยวข้องกับปริมาณประจุและการแลกเปลี่ยนไอออนของดิน ได้แก่ ปริมาณดินเหนียว ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนบวกและปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน

2. การดูดซับสารพาราควอตในตัวอย่างดินของโครงการวิจัยอธิบายได้ว่า เป็นการดูดซับที่มีปริมาณขึ้นกับค่าความเข้มข้น ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้โดย Freundlich Adsorption Isotherm และมีค่า adsorption capacity (K_F) เป็น 3812 และ มีค่า adsorption intensity ($1/n$) เป็น 0.182

3. การใส่สารกำจัดวัชพืชไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นรวมของดินและระดับพีเอชของดิน แต่ระดับพีเอชของดินที่ศึกษามีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาของการทดลองอย่างมีนัยสำคัญจาก 6.11 เมื่อเริ่มต้นการทดลองเป็น 5.92 ในการเก็บตัวอย่างครั้งสุดท้าย การเปลี่ยนแปลงระดับพีเอชดังกล่าวไม่สามารถสรุปได้ว่ามีอิทธิพลจากการใส่สารกำจัดวัชพืชในการทดลอง แต่อาจมีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีตามธรรมชาติภายในดิน หรือ อาจเป็นผลจากการลดลงของความชื้นในดินเมื่อน้ำในดินระเหยออกไป ได้มากขึ้นในช่วงเวลาที่มีสภาพอากาศแห้งแล้ง

4. ปริมาณอินทรีย์วัตถุของดินในการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีค่าลดลงตามระยะเวลาอย่างมีนัยสำคัญในทุกตำรับการทดลองที่ได้รับสารกำจัดวัชพืช แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาอย่างมีนัยสำคัญในตำรับที่ไม่มีการใส่สารกำจัดวัชพืช (control) การเปลี่ยนแปลงของปริมาณอินทรีย์วัตถุอาจเนื่องมาจากการที่สิ่งมีชีวิตในดินสามารถใช้สารพาราควอตและไกลโฟเสทเป็นแหล่งอาหารและพลังงานจึงมีการเจริญเติบโตได้มากส่งผลต่อการย่อยสลายอินทรีย์สารที่มีอยู่ในดินได้มากกว่าดินที่ไม่ได้รับสารกำจัดวัชพืช

5. การใส่สารพาราควอตลงในดินในปริมาณสูงมีอิทธิพลต่อความสามารถในการดูดซับของดิน โดยมีผลทำให้ปริมาณการดูดซับแคลเซียมและทองแดงของดินลดลงอย่างชัดเจน

การลดลงของปริมาณการดูดซับแคลเซียมและทองแดงของดินสามารถอธิบายได้จากการแข่งขันระหว่างสารพาราควอตกับธาตุไอออนบวกอนินทรีย์บนพื้นผิวดูดซับในดิน โดยสารพาราควอตซึ่งโมเลกุลมีลักษณะเป็นสารอินทรีย์ในรูปไอออนบวก (organic cation) จึงมีแรงดึงดูดบนอนุภาคดินเหนียวสูงกว่าไอออนบวกที่เป็นอนินทรีย์มาก (Rytwo and Margulies, 1996) นอกจากนั้น Brownawell et al. (1990) รายงานว่าการไล่ที่พาราควอตบนแรมมอนต์มอริลโลไนต์โดยไอออนอื่นมีลำดับเป็น $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{K}^{+}$ ดังนั้นพาราควอตที่ดูดซับบนผิวอนุภาคดินจึงไม่ถูกไล่ที่ได้โดยธาตุไอออนบวกอื่นๆ และการมีพาราควอตบนผิวจึงทำให้พื้นที่ผิวการดูดซับธาตุไอออนบวกอื่นลดลง

อิทธิพลของสารพาราควอตที่มีต่อปริมาณการดูดซับทองแดง สามารถอธิบายได้จากรูปแบบการดูดซับของสารประกอบต่างๆ ของดิน (speciation) ได้แก่ อินทรีย์วัตถุ แร่ออกไซด์ คาร์บอเนต การแลกเปลี่ยนไอออนและภายในหลิบทองแดงดินเหนียว Amondham 2006 รายงานว่า สารพาราควอตในดินส่วนใหญ่จะถูกดูดซับไว้ในหลิบทองแดงดินเหนียวซึ่งเป็นส่วนที่ไม่สามารถสกัดและเคลื่อนที่ได้ถึง 84.3% ส่วนอื่นนอกจากนั้นทั้งหมดจะถูกดูดซับโดยอินทรีย์วัตถุในดินถึง 15.6% โดยการดูดซับโดยการแลกเปลี่ยนไอออนและบนแร่ออกไซด์เกิดขึ้นน้อยมาก ในทางเดียวกัน ธาตุทองแดงเป็นไอออนที่ถูกดูดซับอยู่กับอินทรีย์วัตถุในดินเป็นส่วนใหญ่ โดยมีรายงานว่าการดูดซับทองแดงบนอนุภาคดินมีสัดส่วนเป็นการดูดซับโดยแรงยึดทางอินทรีย์ 40.2% แรงยึดของแร่ออกไซด์ (oxide bound) 25.6% แรงยึดคาร์บอเนต (carbonate-bound) 24.7% ตกค้างในหลิบทองแดงดินเหนียว (residual) 7.1% และส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable fraction) เพียง 2.4% (Yobouet, et al, 2010) ดังนั้น อิทธิพลของสารพาราควอตต่อทองแดงน่าจะเกิดจากที่สารพาราควอตเข้าครอบครองพื้นผิวแลกเปลี่ยนไอออนบวกบนอินทรีย์คอลลอยด์ทำให้พื้นที่ที่เหมาะสมต่อการดูดซับทองแดงของดินลดลง ส่วนในกรณีของธาตุสังกะสีแม้จะเป็นธาตุโลหะหนักที่มีจำนวนประจุเท่ากับทองแดง แต่ธาตุสังกะสีถูกดินดูดซับในรูปแร่ออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ โดยมีลำดับคือ oxide-bound 34.7%, organically bound 22.9%, carbonate-bound 23.3% residual 13.4% และ exchangeable 5.7% (Yobouet, et al, 2010) ธาตุสังกะสีจึงได้รับอิทธิพลจากสารพาราควอตน้อยจนไม่สามารถสังเกตเห็นได้จากการทดลองนี้

6. สารไกลโฟเสทมีผลทำให้ปริมาณการดูดซับแคลเซียมลดลงอย่างชัดเจน แต่ไม่มีผลต่อปริมาณการดูดซับแมกนีเซียม ทองแดงและสังกะสี

อิทธิพลของไกลโฟเสทที่มีต่อปริมาณการดูดซับแคลเซียมในดิน สามารถอธิบายได้จากการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารไกลโฟเสทกับไอออนบวกที่เป็นอิสระสามารถดูดซับได้น้อยลง โดยไอออนบวกสองประจุ (divalent cation) เช่น calcium (Ca), magnesium (Mg), manganese (Mn) and iron(Fe) สามารถยึดกับกลุ่มอนุมูล carboxyl and phosphonate บนโมเลกุลของสารไกลโฟเสทได้อย่างดี (Lundager-Madsen et al., 1978; Motekaitis and Martell, 1985; Barja et al., 2001) โดยเฉพาะอย่างยิ่งแคลเซียมสามารถตะกอนเป็น 1:1 complex กับสารไกลโฟเสท (Gauvrit et al., 2001; Schoenherr and Schreiber, 2004) (Nalewaja et al., 1991; Thelen et al., 1995) ดังนั้นการมีสารไกลโฟเสทในดินจึงขัดขวางกระบวนการดูดซับแคลเซียมโดยอนุภาคดินได้เป็นอย่างมากเนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารไกลโฟเสทกับแคลเซียมมีความสามารถในการดูดซับลดลง

อิทธิพลของสารไกลโฟเสทต่อการดูดซับธาตุโลหะทองแดงและสังกะสีในดินจากโครงการวิจัยนี้ไม่สอดคล้องกับสมมติฐานและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอื่นที่พบว่าสารไกลโฟเสทสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนอิสระกับทองแดงและสังกะสีได้ที่มีอิสระต่อดูดซับซึ่งเกิดในดินที่มีค่าพีเอชสูงกว่า 5 (Morillo, et al., 2002; Wang, et al., 2004; Wang, et al., 2006; Gimsing et al., 2007 และ Wang, et al., 2008) ความไม่สอดคล้องนี้สามารถอธิบายได้ว่า อิทธิพลทางลบของไกลโฟเสทต่อการดูดซับธาตุโลหะจะเกิดอย่างชัดเจนในดินที่มีอินทรีย์วัตถุต่ำ ค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนบวก เนื่องจากเป็นกลไกที่เกิดบนแร่ออกไซด์ (Wang, et al., 2006) แต่ตัวอย่างดินของโครงการวิจัยนี้มีปริมาณอินทรีย์วัตถุและค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนบวกสูงถึง 3.27% และ 8.60 cmol_c kg⁻¹ จึงไม่สามารถเห็นอิทธิพลได้อย่างชัดเจน

7. อิทธิพลของสารพาราควอตและไกลโฟเสทต่อปริมาณการดูดซับต่างๆ เกิดอย่างชัดเจนเมื่อใช้สารในอัตราสูงถึง 5 เท่าของปริมาณที่แนะนำแก่เกษตรกร ผลของการใช้สารทั้งสองชนิดร่วมกันในอัตรา 2.5 เท่าของปริมาณที่แนะนำไม่มีผลต่อปริมาณการดูดซับต่างๆ ยังไม่มีความชัดเจนจากโครงการวิจัยนี้

8. อิทธิพลของสารพาราควอตและไกลโฟเสทที่มีต่อปริมาณการดูดซับต่างๆ ในดินเป็นอิทธิพลที่เกิดขึ้นอย่างไม่ถาวร โดยจะพบหลังจากการใส่สารกำจัดวัชพืชลงในดินทันทีหรืออาจพบต่อเนื่องไปในสัปดาห์ที่ 8 เท่านั้น

ผลของสารพาราควอตต่อการดูดซับแคลเซียมและทองแดงสามารถพบได้ทันทีหลังจากการใส่สารพาราควอตลงดิน และสำหรับอิทธิพลต่อธาตุทองแดงยังสามารถพบได้ที่ระยะเวลา 8 สัปดาห์หลังจากการใส่สารกำจัดวัชพืช สารพาราควอตเป็นสารที่ถูกดูดซับได้อย่างรวดเร็วถึง 90% ภายใน 24 ชั่วโมง และเมื่ออยู่ในดินสามารถสลายตัวหมดไปอย่างรวดเร็ว โดยมีค่า DT₅₀ เพียง 46 วัน (Amondham, 2006) ดังนั้น อิทธิพลการแข่งขันแย่งพื้นผิวดูดซับกับธาตุแคลเซียมจึงไม่สามารถพบต่อเนื่องไปในสัปดาห์ที่แปด สารพาราควอตที่ถูกดูดซับจะสลายตัวได้จำกัดและมีความคงทนอยู่บนผิวดินได้ยาวนานขึ้น ดังนั้นผลของสารพาราควอตที่ถูกดูดซับบนอนุภาคอินทรีย์คอลลอยด์ที่ทำให้มีพื้นที่ผิวการดูดซับทองแดงได้ลดลงจึงคงอยู่ไปได้ถึง 8 สัปดาห์

อย่างไรก็ตามการดูดซับบนอนุภาคอินทรีย์เป็นการดูดซับไม่ถาวรและปลดปล่อยออกมาได้ (Khan, 1973) ดังนั้นอิทธิพลดังกล่าวจึงไม่พบในสัปดาห์ที่ 16 และการลดลงของพื้นที่ผิวดูดซับที่ยาวนานถึงในสัปดาห์ที่แปดจะพบเฉพาะเมื่อมีการใส่สารพาราควอตต่อเนื่องเป็นครั้งที่สี่

ผลของสารไกลโฟเสทที่มีต่อการดูดซับแคลเซียมพบเฉพาะหลังจากการใส่สารไกลโฟเสททันทีเท่านั้น เนื่องจากสารไกลโฟเสทถูกดูดซับบนผิวดินได้มากถึง 50% ภายใน 24 ชั่วโมง และมีค่า DT_{50} เพียง 13-19 วัน ความสามารถในการสร้างเป็นสารเชิงซ้อนกับแคลเซียมหมดไปอย่างรวดเร็ว โดยการใส่สารไกลโฟเสทต่อเนื่องหลายครั้งติดต่อกันไม่ทำให้เกิดผลสะสม

9. ปริมาณการดูดซับธาตุแคลเซียมและทองแดงเป็นตัวแปรที่ได้รับอิทธิพลจากการใส่สารพาราควอตและไกลโฟเสทลงในดิน การลดลงของการดูดซับมีผลต่อคุณภาพทรัพยากรดินในหลายด้าน เช่น มีผลต่อสมดุลธาตุอาหารในดิน นอกจากนั้นยังมีผลต่อการเคลื่อนย้ายของธาตุโลหะหนักไปสู่สิ่งแวดล้อมต่างๆ ได้มากขึ้น ดังนั้นอิทธิพลของสารกำจัดวัชพืชที่มีต่อปริมาณและพฤติกรรมการดูดซับต่างๆ โดยเฉพาะธาตุแคลเซียมและทองแดงจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมให้สามารถใช้เป็นตัวบ่งบอกผลกระทบของสารกำจัดวัชพืชต่อคุณภาพของทรัพยากรดินต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร, กรมวิชาการเกษตร. 2553. ข้อมูลสถิติการนำเข้าวัตถุอันตราย. สืบค้นวันที่ 14 มิถุนายน 2553. URL: <http://as.doa.go.th/ard/stat2.php?cat=2>
- Agricultural Toxic Substances Division. 1994. Registration of Agricultural Toxic Substances in Thailand (Thai). Department of Agriculture, Bangkok.
- Amondham, W. 2006. Paraquat Adsorption and Distribution in Soils of Yom River Basin. Doctoral Dissertation. Asian Institute of Technology, Pathumthani. Thailand.
- Araújo, A. S. F., Monteiro, R. T. R. and Abarkeli, R. B. 2003. Effect of Glyphosate on The Microbial Activity of Two Brazilian Soils. *Chemosphere*. 52(5): 799-804.
- Barrett, K. A. and McBride, M.B. 2006. Trace Element Mobilization in Soils by Glyphosate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1882-1888.
- Barja, B. C., Herszage, J. and M. dos Santos Afonso. 2001. Iron(III)-phosphonate complexes. *Polyhedron*. 20(15-16): 1821-1830.
- Blaejaert, V., Samson, R. and Deschamps, L. 2006. Effect of 2,4-D Contamination on Soil Functional Stability Evaluated using the Relative Soil Stability Index (RSSI). *Chemosphere*. 64(10):1713-1721.
- Brownawell, B. J., Chen, H., Collier, J. M. and Westall, J. C. 1990. Adsorption of Organic Cations to Natural Materials. *Environ. Sci. Technol.* 24(8): 1234-1241.
- Chia, L. S., Thompson, J. E and Dumbroff, E. B. 1981. Simulation of The Effects of Leaf Senescence on Membranes by Treatment With Paraquat. *Plant. Physiol.* 67: 415-420.
- Chia, L. S., McRae, D. G. and Thompson, J. E. 1982. Light-dependence of Paraquat- initiated Membrane Deterioration in Bean Plants. Evidence for The Involvement of Superoxide. *Plant Physiol.* 56: 492-499.
- Cheah, U. Kirkwood, R. and Lum, K. 1997. Adsorption, Desorption and Mobility of Four Commonly Used Pesticides in Malaysian Agricultural Soils. *Pestic. Sci.* 50: 53-63.
- Cheng, S. F., Hseu, Z. Y. and Jien, S. H. 2002. The Influence of Soil Colloidal Components on Paraquat Adsorption in the Different Soils of Taiwan. In: Proceeding of the 17th of World Congress of Soil Science. 14-21 August 2002. Queen Sirikit National Convention Center.
- Douglas, G., Dykstra, R. and Varey, M. 2001. "Paraquat". URL:<http://www.inweh.unu.edu/biology447/modules/intro/assignments/grm.htm> [Downloaded: Nov, 2001].

- Duah–Yentumi, S. Johnson, D.B. 1986. Changes in Soil Microflora in Response to Repeated Applications of Changes in Soil Microflora in Response to Repeated Applications of Some Pesticides. *Soil Biology & Biochemistry* 18(6): 629–635.
- Eisler. 1990. Paraquat Hazards to Fish, Wildlife, and Invertebrates: A Synoptic Review, Biological Report 85(1.22). U.S. Fish and Wildlife Service, Patuxent Wildlife Research Center, Maryland. 38 p.
- Extension Toxicology Network, Cornell University. 2001. “Paraquat, Pesticide Information Profile”. Available Online : <http://ace.orst.edu/info/extoxnet/pips/paraquat.htm> [Download: January, 2001].
- Feng, J. C ' and D. G. Thompsoni, 1990. Fate of Glyphosate in a Canadian Forest Watershed. 2. Persistence in Foliage and Soils. *J. Agric. Food Chem.* 38: 1118–1125.
- Funderburk, H. H. 1969. Diquat and Paraquat. In Kearney, P. C.; Kaufman, D.D. (Eds.). *Herbicides: Chemistry, Degradation, and Mode of Action*. Marcel Dekker. New York. pp. 283–298.
- Gangolli, S. (ed.) 1999. *The Dictionary of Substances and Their Effects V.6(0–5)*, 2nd ed. Royal Society of Chemistry. 925 p.
- Gauvrit, C., Gaudry, L–C., Lucotte, T. and F. Cabanne. 2001. Biological Evidence for a 1:1 Ca^{2+} : Glyphosate Association in Deposit Residuals on the Leaf Surface of Barley. *Weed Research*. 41(5): 433 – 445.
- Gevao, B., Semple, K. T. and Jones, K. C. 2000. Bound Pesticide Residues in Soils: a Review. *Environmental Pollution*. 108: 3–14.
- Giesy, J.P., Dobson, S., Solomon, K.R. 2000. Ecotoxicological assessment for Roundup herbicides. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 167. 35–120.
- Gimsing, A. L., Szilas, C. and Borggaard, O. K. 2007. Sorption of glyphosate and phosphate by variable–charge tropical soils from Tanzania. *Geoderma*, 138: 127–132
- Gonzalez–Pradas, E., Sanchez, M. V., Rey–Bueno, F. D., Urena–Amate, M. D. and Fernandez–Perez, M. 2000. Removal of Paraquat and Atrazine from Water by Montmorillonite–(Ce or Zr) Phosphate Cross–linked Compounds. *Pest Management Science*. 56: 565–570.
- Gustafson, D. I. 1989. Groundwater Ubiquity Score: A Simple Method for Assessing Pesticide Leachability. In Brown, C. D., Carter, A. D. and Hollis, J. M. *Environmental Behavior of Agrochemicals: Progress in Pesticide Biochemistry and Toxicology*, V.9. John Wiley & Sons, New York.
- Hassan, H. M. and Fridovich, I. 1979. Paraquat and the exacerbation of oxygen toxicity. *Trends in Biochemistry Sciences*. 4:113–115.

- Hebert, V. R. and Miller, G. C. 1990. Depth Dependence of Direct and Indirect Photolysis on Soil Surfaces. *J. Agric. Food. Chem.* 38:913–918.
- Juo. A.S.R. and Oginni, O.O. 1978. Adsorption and Desorption of Paraquat in Acid Tropical Soils. *JEQ.* 7(1). 9–12.
- Jurinak, J. J and T. S. Inouye. 1962. Some Aspects of Zinc and Copper Phosphate Formation in Aqueous Systems. *SSSA.* 26:144–147.
- Karickhoff, S. W. and Brown, D. S. 1978. Paraquat Sorption as a Function of Pesticide Size in Natural Sediments. *J. Environ. Qual.* 7(2): 246–252.
- Khan, S. U. 1973. Interaction of Bipyridylum Herbicides with Organo–Clay Complex. *J. Soil Sci.* 24(2): 244–248.
- Khan, S. U. 1980. Determinating the Role of Humic Substances in The Fate of Pesticides in the Environment. *J. Environ. Sci. Health.* B15(6): 1071–1090.
- Kookana, R. S. and Aylmore, L. A. G. 1993. Retention and Release of Diquat and Paraquat Herbicide in Soils. *Aust. J. Soil. Res.* 31: 97–109.
- Laitinen, P., Siimesb, K., Rämä, S., Jauhiainen, L., Eronen, L., Oinonen, S. and H. Hartikainen. 2008. Effects of Soil Phosphorus Status on Environmental Risk Assessment of Glyphosate and Glufosinate–Ammonium. Technical Reports on Organic Compounds in the Environment. *JEQ.* 37:830–838.
- Logani, M.K. and Davies, R.E. 1979. Lipid Oxidation: Biologic Effects and Antioxidants—A Review. *Lipids.* 15:485–495.
- Lundager Madsen, H. E., Christensen, H. H. and C. G. Gottlieb–Petersen. 1978. Stability Constants of Copper(II), Zinc, Manganese(II), Calcium, and Magnesium Complexes of N–(phosphonomethyl)glycine (Glyphosate). *Acta Chem. Scand A.* 32:79–83.
- Mamy L and Barriuso E. 2005. Glyphosate Adsorption in Soils compared to Herbicides Replaced as a Result of the Introduction of Glyphosate Resistant Crops. *Chemosphere*, 61: 844–855.
- Mensink, H. and P. Janssen. 1994. Glyphosate: Environmental Health Criteria 159. World Health Organization. Geneva. 161p.
- Morillo, E., Undabeytia, T., Maqueda, C. and Ramos, A. 2002. The Effect of Dissolved Glyphosate upon The Sorption of Copper by Three Selected Soils. *Chemosphere.* 47(7): 747–752.
- Motekaitis, R. J. and A. E. Martell. 1985. Metal Chelate formation by N–phosphonomethylglycine and Related Ligands. *J. Coord. Chem.* 14: 139–149.
- Nalewaja, J. D., Devilliers, B. and R. Matysiak. 1991. Surfactant and Salt affect Glyphosate Retention and Absorption. *Weed Research.* 36(3): 241 – 247.

- Narine, D. J. and Guy, R. D. 1982. Binding of Diquat and Paraquat to Humic Acid in Aquatic Environments. *Soil Science*. 133(6): 356–363.
- Newton, M., Howard, K. Kelsas, B. Danhaus, R. Lottman, P. and S. Dubelman. 1984. Fate of Glyphosate in an Oregon forest ecosystem. *J. Agric. Food Chem.* 32: 1144–1151.
- OECD. 1993. OECD Guideline for testing of Chemicals. 106. OECD Publication Service, France.
- Pessagno, R. C., Torres Sañchez, R. M. and Marañón dos Santos Afonso. 2008. Glyphosate Behavior at Soil and Mineral Water Interfaces. *Environmental Pollution* 153: 53–59.
- Priem, A. and Ekelund, 2001. Five Pesticides Decreased Oxidation of Atmospheric Methane in a Forest Soil. *Soil Biology and Biochemistry*. 33(6):831–835. 9
- Ricketts, D. C. 1999. The Microbial Biodegradation of Paraquat in Soil *Pesticide Science*. 55(5): 596–614.
- Riley, D. Wilkinson, W. and Tucker, B.V. 1976. Biological Unavailability of Bound Paraquat Residues in Soils. *In Bound and Conjugated Pesticide Residues*. ACS Symposium Series, American Chemical Society. Washington, DC. pp. 302–351.
- Rickey, T. 2001. Combination of Two Widely Used Pesticides Linked to Parkinson's Disease URL: <http://www.urmc.rochester.edu/pr/News/park.html>. [Download: November, 2001].
- Roy, D.N., S.K. Konar, S. Banerjee, D.A. Charles, D.G. Thomson, and R. Prasad. 1989. Persistence, movement, and degradation of glyphosate in selected Canadian boreal forest soils. *J. Hydrol.* 37:437–440
- Ruggiero, P. and Radogna, V. M. 1985. Inhibition of Soil Humus–Laccase Complexes by Some Phenoxyacetic and S-Triazine Herbicides. *Soil Biology & Biochemistry*. 17(3):309–312.
- Rytwo, G. Nir, S. and Margulies. 1996. Adsorption and Interaction of Diquat and Paraquat with Montmorillonite. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 601–610.
- Saeed, M., and R.L. Fox. 1979. Influence of phosphate fertilization on zinc adsorption by tropical soils. *Soil Sci. Soc. Am. Jour.* 43: 683–686.
- Schreffler, A. M. and Sharpe, W. E. 2003. Effects of Lime, Fertilizer, and Herbicide on Forest Soil and Soil Solution Chemistry, Hardwood Regeneration, and Hardwood Growth Following Shelterwood Harvest. *Forest Ecology and Management*. 177:471–484.
- Schoenherr, J. And Schreiber, L., 2004. Interactions of Calcium ions with Weakly Acidic Active Ingredients Slow Cuticular Penetration: A Case Study with Glyphosate. *J. Agric. Food Chem.* 52, 6546–6551.
- Singh, R., Gerritse, R. G. and Aylmore, L. A. G. 1990. Adsorption–desorption Behavior of Selected Pesticides in Some Western Australian Soils. *Aust. J. Soil Res.* 28: 227–243.

- Siltanen, H., Rosenberg, C., Raatikainen, M. and T. Raatikainen. 1981. Triclopyr, Glyphosate and Phenoxyherbicide Residues in Cowberries, Bilberries and Lichen. *Bull Environ Contam Toxicol*, 27(5): 731–737.
- Smith S., Willis G.H. 1985. Movement of Pesticides in Soil Columns as Affected by Anhydrous Ammonia. *Environ. Toxicol. Chem.* 4: 425–434
- Sojo, L. E., Gamble, D. S., Langford, C. H. and Zienius, R. H. 1989. The Reactions of Paraquat and Divalent Metal Ions with Humic Acid: Factors Influencing Stoichiometry. *J. Environ. Sci. Health. B24*(6): 619–646.
- Stahlman, P. W. and W. M. Phillips. 1979. Effects of water quality and spray volume on glyphosate toxicity. *Weed Sci* 27:38–41.
- Staiff, D. C., Butler, L. C. and Davis, J. E. 1981. A Field Study of the Chemical Degradation of Paraquat Following Simulated Spillage on Soil. *Bulletin of Environmental contamination and Toxicology*. 26:16–21.
- Summers, L. A. 1980. The Bipyridinium Herbicides. Academic Press, London. pp. 69–129.
- Shuman, L.M. 1988. Effect of Phosphorus Level on Extractable Micro nutrients and their distribution among Soil Fractions. *SSSA*. 52:136–141.
- Talbot A., Shiaw M., Huang J. S. and Yang S. 1991. Acute poisoning with a glyphosate–surfactant herbicide (Roundup): a review of 93 cases. *Hum. Exp. Toxicol.* 10(1): 1–8.
- The Royal Society of Chemistry. 1991. The Agrochemicals Handbook, 3rd. Royal Society of Chemistry. UK.
- Thelen, K.D., E.P. Jackson, and D. Penner. 1995. 2,4-D Interactions with Glyphosate and Sodium Bicarbonate. *Weed Technology* 9:301–305.
- United State Department of Agriculture. 2001. The ARS Pesticide Properties Database. URL: http://www.arsusda.gov/acsl/services/ppdb/textfiles/PARAQUAT_DICHLORIDE.
- Wang, Y., Zhou, D., Sun, R., Cang, L. and Hao, X. 2006. Cosorption of Zinc and Glyphosate on Two Soils with different Characteristics. *Journal of Hazardous Materials*. 137(1):76–82 .
- Wang, Y-J., Zhou, D-M., Sun, R. J., Jia, D-A., Zhua, H. A. and Wang, S. Q. 2008. Zinc Adsorption on Goethite as affected by Glyphosate. *Journal of Hazardous Materials*, 151(1): 179–184.
- Weber, J. B., Perry, P. W. and Upchurch, R. P. 1965. The Influence of Temperature and Time on the Adsorption of Paraquat, Diquat, 2,4-D and Prometone by Clays, Charcoal, and an Anion-Exchange Resin. *Soil Sci. Soc. Amer.* 678–688.
- Weber, J. B. and Weed, S. B. 1968. Adsorption and Desorption of Diquat, Paraquat and Prometone by Montmorillonite and Kaolinite Clay Minerals. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 32: 485–487.

- Wehtje, G., Dickens, R., Wilcut, J.W., Hajek, B.F., 1987. Sorption and Mobility of Sulfometuron and Imazapyr in Five Alabama Soils. *Weed Sci.* 35:858–864.
- World Health Organization. 1984. Paraquat and Diquat: Environmental Health Criteria 39. WHO, Geneva. 181 p.
- Walkley, A. and Black, I. A. 1934. An Examination of the Degtijereff Method for Determinating of Soil Organic Matter and Proposed Modification Of the Chromic Acid Titration Methods. *Soil Sci.* 37: 29–38.
- Yeomans, J. C. and Bremner, J. M. 1985. Denitrification in Soil: Effects of Herbicides. *Soil Biological and Biochemistry.* 17(4):447–452.
- Yobouet Y. A., Adouby K., Trokourey A. and Yao B. 2010. Cadmium, Copper, Lead and Zinc speciation in contaminated soils. *International Journal of Engineering Science and Technology* Vol. 2(5): 802–812.
- Zhou, D-M, Wang, Y-J, Cang, L. Hao, X-Z and Luo, X-S . 2004. Adsorption and Cosorption of Cadmium and Glyphosate on Two Soils with Different Characteristics. *Chemosphere*, 57(10); 1237–1244.

ภาคผนวก

การดูดซับสารพาราควอทและไกลโฟเสท

ตารางผนวก 1 ปริมาณการดูดซับไกลโฟเฟสของดินเมื่อมีค่าสัดส่วนของดินต่อสารละลายต่างๆ

Soil : Solution Ratio	Initial Conc. (mg L ⁻¹)	Soil weight (g)	Equilibrium Conc. (mg L ⁻¹)	Q (mg L ⁻¹)	Adsorption Amount (%)
1:5	0	2	0	0	0
	100	2	1.66	0.5	98.3
	500	2	211.41	1.4	57.7
	1000	2	585.84	2.1	41.4
	2000	2	1,277.12	3.6	36.1
1:10	0	1	0	0	0
	100	1	0	1.0	100.0
	500	1	328.56	1.7	34.3
	1000	1	674.05	3.3	32.6
	2000	1	1,431.89	5.7	28.4
1:20	0	0.5	0	0.0	0
	100	0.5	13.34	1.7	86.7
	500	0.5	217.85	5.6	56.4
	1000	0.5	733.50	5.3	26.7
	2000	0.5	1,370.75	12.6	31.5
1:40	0	0.25	0	0	0
	100	0.25	41.33	2.4	58.7
	500	0.25	467.72	1.3	6.5
	1000	0.25	728.78	10.9	27.1
	2000	0.25	1,477.75	20.9	26.1

ตารางผนวก 2 ปริมาณการดูดซับของสารไกลโฟเฟสที่ระยะเวลาการเขย่า 1 – 48 ชั่วโมง

Shaking Time (hrs.)	Adsorption Amount (%)			
	Ratio 1:2.5	Ratio 1:5	Ratio 1:5 with NaN ₃ 200 mg L ⁻¹	Ratio 1 :20
1	59.8	39.2	32.7	23.8
2	65.5	52.4	36.5	28.8
4	68.1	60.7	35.5	21.5
6	74.2	48.3	38.8	23.0
10			49.5	
12	78.1	53.3		32.2
24	92.0	60.5	48.6	56.5
48	97.7	65.6	48.0	71.2
72			49.5	