บทที่ 4

ผลการวิจัย

จากการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงและการกระจายตัวของสารพาราควอทในดิน โดยการเก็บตัวอย่างดินจากพื้นที่เกษตรกรรมในจังหวัดน่านมาใช้ในการทดลอง ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีลักษณะดังนี้

ลักษณะคุณสมบัติของดินที่ใช้ในการทดลอง

ดินที่ใช้ในการทดลองเป็นดินจากพื้นที่เกษตรกรรมจังหวัดน่าน ได้แก่ ตัวอย่างดินจากบ้านหนองรัง ตำบลท่าน้าว อำเภอกิ่งอำเภอภูเพียง จังหวัดน่าน และบ้านท่าน้าว ตำบลท่าน้าว อำเภอกิ่งอำเภอภูเพียง จังหวัดน่าน ผลการทดลองลักษณะคุณสมบัติของดินพบว่า ดินที่บ้านหนองรังมีลักษณะเป็นดินเหนียว มีร้อยละอินทรียวัตถุเท่ากับ 5.598 และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเท่ากับ 12.765 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ส่วนดินที่บ้านท่าน้าวมีลักษณะเป็นดินร่วนปนทราย มีร้อยละอินทรียวัตถุเท่ากับ 4.958 และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเท่ากับ 10.524 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ซึ่งต่ำกว่าดินบ้านหนองรัง แสดงดังตาราง 6

ตาราง 6 แสดงลักษณะคุณสมบัติของดินที่ใช้ในการทดลอง

สถานที่เก็บ	ประเภท	พีเอช	ร้อยละ อินทรียวัตถุ	ค่า CEC (เซนติโมลต่อกิโลกรัม)
บ้านหนองรัง	ดินเหนียว (clay)	6.59	5.598	12.765
บ้านท่าน้าว	ดินร่วนปนทราย (sandy loam)	5.55	4.958	10.524

1. ผลการวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด - ด่างของดิน (soil pH)

ผลการทดลองหาค่าความเป็นกรด - ด่างของที่ใช้ในการทดลองทั้งสองชนิด พบว่า ดินเหนียวมีค่าความเป็นกรด - ด่างเท่ากับ 6.59 ซึ่งมีสภาพกรดเล็กน้อย สำหรับดินร่วนปนทรายมีค่าความเป็นกรด - ด่างเท่ากับ 5.55 ซึ่งมีสภาพกรดมาก [38] ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความเป็นกรด - ด่างของดินทั้งสองชนิดอยู่ในช่วงสภาพความกรดเล็กน้อยในดินเหนียวถึงกรดมากในดินร่วนปนทราย

ซึ่งค่าความเป็นกรด - ด่างของดิน หรือระดับพีเอช (pH) ของดิน เป็นคุณสมบัติทางเคมีของดินที่มีความสำคัญต่อปฏิกิริยาทางเคมีและทางชีวภาพของดินหลายประการ อาทิ มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของพืช ช่วงพีเอช 5.6 - 7.3 ของดินเป็นระดับพีเอชที่เหมาะสมที่สุดต่อการเจริญเติบโตของพืช ระดับพีเอชของดินยังเป็นตัวควบคุมความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารโดยควบคุมการละลายและการตกตะกอน (solubility and precipitation of nutrients) ตัวอย่างเช่น ดินที่มีค่า pH ต่ำกว่า 5.5 หรือดินที่เป็นกรดจะทำให้การละลายของธาตุเหล็ก (Fe) และอะลูมิเนียม (Al) ออกมามากและอาจสูงถึงระดับที่เป็นพิษต่อพืช นอกจากนี้ระดับพีเอชในดินยังมีผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน โดยทั่วไปจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ โดยเฉพาะ แบคทีเรีย (bacteria) และแอคติโนไมซีตส์ (actinomycetes) จะเติบโตได้ดีในดินที่มีค่าพีเอชในช่วง 6.0 - 8.0 [43, 44] จะเห็นได้ว่าดินที่ใช้ในการทดลองทั้งสองชนิด ได้แก่ดินเหนียวและดินร่วนปนทราย มีช่วงค่าพีเอช 5.55 - 6.59 ซึ่งอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช

2. ผลการวิเคราะห์หาค่าปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (organic matter, O.M.)

ผลการทดลองหาค่าร้อยละอินทรียวัตถุในดินที่ใช้ในการทดลองทั้งสองชนิด พบว่าในดินเหนียวมีค่าร้อยละอินทรียวัตถุเท่ากับ 5.596 และดินร่วนปนทรายมีค่าร้อยละอินทรียวัตถุเท่ากับ 4.958 เมื่อพิจารณาจากค่าร้อยละอินทรียวัตถุในดินเปรียบเทียบกับระดับอินทรียวัตถุที่ใช้เป็นมาตรฐาน ดังแสดงในตาราง 7 จะเห็นได้ว่า ปริมาณอินทรียวัตถุในดินทั้งสองชนิดมีปริมาณที่สูงมาก และปริมาณอินทรียวัตถุในดินในดินเหนียวสูงกว่าดินร่วนปนทราย ซึ่งปริมาณอินทรียวัตถุในดินเกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ ซากพืช ซากสัตว์ มีความสำคัญต่อคุณสมบัติของดินทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ เช่น ช่วยลดช่องว่าง ความหนาแน่นของดิน ช่วยลดการระเหยของน้ำในดิน ทำให้ดินสามารถอุ้มน้ำได้มากขึ้น เพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก มีผลทำให้ธาตุอาหารของพืชทั้งที่อยู่ในธรรมชาติหรือใส่ลงไปในรูปของปุ๋ยเคมีถูกดูดซับไว้ไม่สูญเสียไปกับกระบวนการชะล้างได้ง่าย อีกทั้งยังเป็นแหล่งอาหารของพืชและจุลินทรีย์ในดิน [45]

3. ผลการวิเคราะห์หาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange capacity, CEC)

จากผลการวิเคราะห์หาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกหรือค่า CEC ของดินที่ใช้ในการทดลองพบว่า ดินเหนียวมีค่า CEC เท่ากับ 12.765 เซนติโมลต่อกิโลกรัม และดินร่วนปนทรายค่า CEC เท่ากับ 10.524 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ซึ่งเห็นได้ว่าค่า CEC ในดินทั้ง 2 ชนิดมีค่าอยู่ในช่วงที่ต่ำ [38] และในดินเหนียวมีค่าสูงกว่าค่า CEC ดินร่วนปนทราย ค่า CEC ของดินนั้นเป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณไอออนประจุบวกของดิน (cation) ทั้งหมดที่ดินสามารถยึดดูดไว้ได้ โดยที่

ค่า CEC ของดินแต่ละชนิดจะมีไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ปริมาณของสารคอลลอยด์ต่างๆ ในดิน และปริมาณอินทรียวัตถุในดิน ซึ่งโดยทั่วไปดินเนื้อละเอียดหรือดินที่มีปริมาณอินทรียวัตถุสูงจะสามารถดูดซับไอออนประจุบวกได้ดีกว่าดินเนื้อหยาบหรือดินที่มีปริมาณอินทรียวัตถุต่ำ [44] นั้นแสดงให้เห็นว่าดินที่มีค่าปริมาณอินทรียวัตถุสูงค่า CEC สูงเช่นกัน เมื่อจากพิจารณาค่า CEC ในผลการทดลองที่ได้ข้างต้นทำให้ทราบว่า ดินเหนียวมีความสามารถในการดูดซับไอออนประจุบวกได้ดีกว่าดินร่วนปนทราย

ตาราง 7 แสดงระดับอินทรียวัตถุที่ใช้เป็นมาตรฐาน [46]

ระดับ	ร้อยละอินทรียวัตถุ
ต่ำมาก	< 0.5
ต่ำ	0.5 - 1.0
ต่ำปานกลาง	> 1.0 - 1.5
ปานกลาง	> 1.5 - 2.5
สูงปานกลาง	> 2.5 - 3.5
สูง	> 3.5 - 4.5
สูงมาก	> 4.5

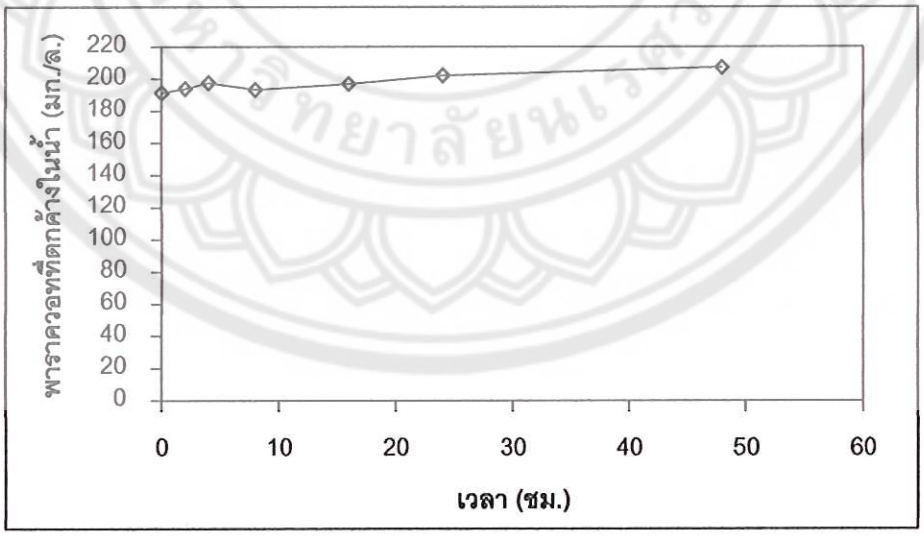
การระเหยกลายเป็นไอของสารพาราควอท (evaporation of paraquat)

จากผลการทดลองลักษณะการเปลี่ยนแปลงและการกระจายตัวของสารพาราควอทในดินพบว่า การระเหยสู่อากาศของสารพาราควอทที่สภาวะตัวกลางที่เป็นกลาง (พีเอชเท่ากับ 7) อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากภาพ 27 และภาพ 28 สังเกตได้ว่า ที่เวลาเริ่มต้นถึงเวลา 48 ชั่วโมง ค่าความเข้มข้นของสารพาราควอทที่ตกค้างอยู่ในน้ำมีค่าเพิ่มมากขึ้น สันนิษฐานว่าความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการระเหยของน้ำทำให้ความเข้มข้นของสารพาราควอทเพิ่มมากขึ้น แต่ไม่มีการระเหยของสารพาราควอท การระเหยกลายเป็นไอของสารเคมี เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงของสารเคมีเข้าสู่ชั้นบรรยากาศ โดยการระเหยจากดินหรือน้ำ คุณสมบัติที่สามารถบ่งชี้แนวโน้มการระเหยกลายเป็นไอได้มากหรือน้อยได้แก่ ค่าคงที่ของเฮนรี่ และค่าความดันไอ [47] โดยทั่วไป ค่าคงที่ของเฮนรี่ $\leq 10^{-7}$ บรรยากาศ-ลูกบาศก์เมตรต่อโมล ($\leq 10^{-2}$ ปาสกาล-ลูกบาศก์เมตรต่อโมล) สารนั้นไม่ระเหยกลายเป็นไอได้ และเมื่อพิจารณาควบคู่กับค่าความดันไอ และค่าความสามารถใน

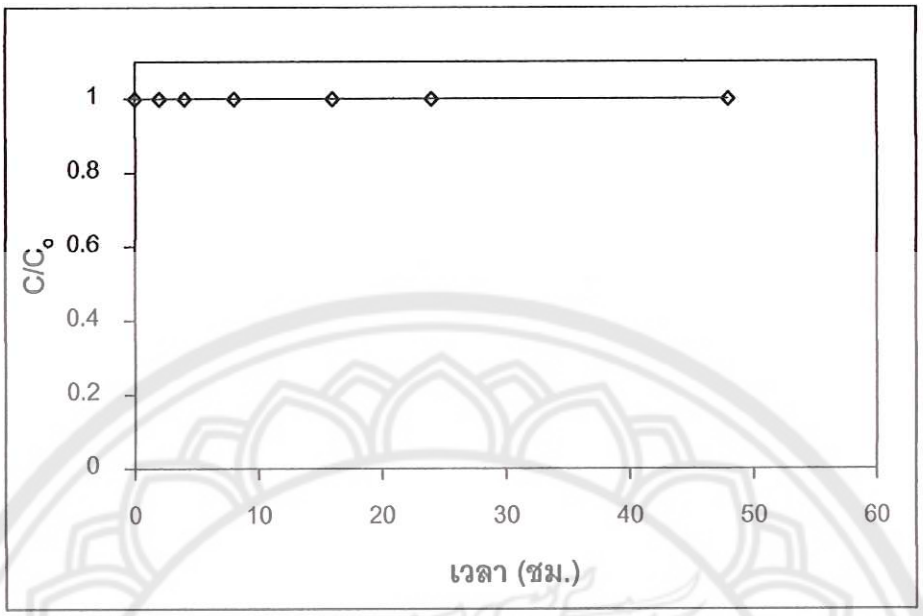
การละลายน้ำ ลักษณะการระเหยกลายเป็นไอของสารมีลักษณะดังตาราง 8 ดังนั้นเมื่อนำค่าคงที่ของเฮนรี่ ค่าความดันไอและความสามารถในการละลายน้ำของสารพาราควอทมาพิจารณาพบว่าสารพาราควอทมีค่าคงที่ของเฮนรี่เท่ากับ $4x10^{-9}$ ปาสกาล-ลูกบาศก์เมตรต่อโมล มีค่าความดันไอเท่ากับ $<1x10^{-8}$ กิโลปาสกาล ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าน้อย และมีค่าความสามารถในการละลายน้ำเท่ากับ 620 กรัมต่อลิตร [10, 48] ทำให้พาราควอทมีลักษณะไม่ระเหยกลายเป็นไอ

ตาราง 8 แสดงการพิจารณาลักษณะการระเหยกลายเป็นไอ

ลักษณะคุณสมบัติของสารประกอบ	การระเหยกลายเป็นไอ
ค่าคงที่ของเฮนรี่ ≤ 10^{-7} บรรยากาศ-ลูกบาศก์เมตรต่อโมล	ไม่ระเหย (nonvolatile)
ค่าความดันไอต่ำ,ความค่าความสามารถในการละลายน้ำสูง	ระเหยได้น้อย (less volatile)
ค่าความดันไอต่ำ,ความค่าความสามารถในการละลายน้ำต่ำ	ระเหยได้ปานกลาง (moderate volatile)
ค่าความดันไอสูง,ความค่าความสามารถในการละลายน้ำต่ำ	ระเหยได้ดี



ภาพ 27 ค่าความเข้มข้นของสารพาราควอทที่คงเหลือในน้ำที่เวลาต่าง ๆ



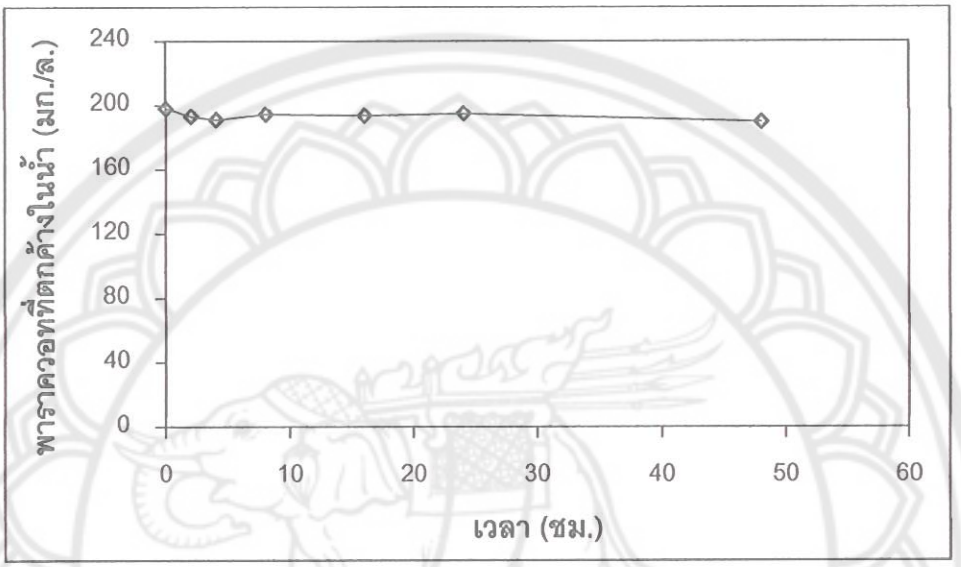
ภาพ 28 อัตราส่วนการระเหยของสารพาราควอทที่เวลา 48 ชั่วโมง

การย่อยสลายสารพาราควอทด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis)

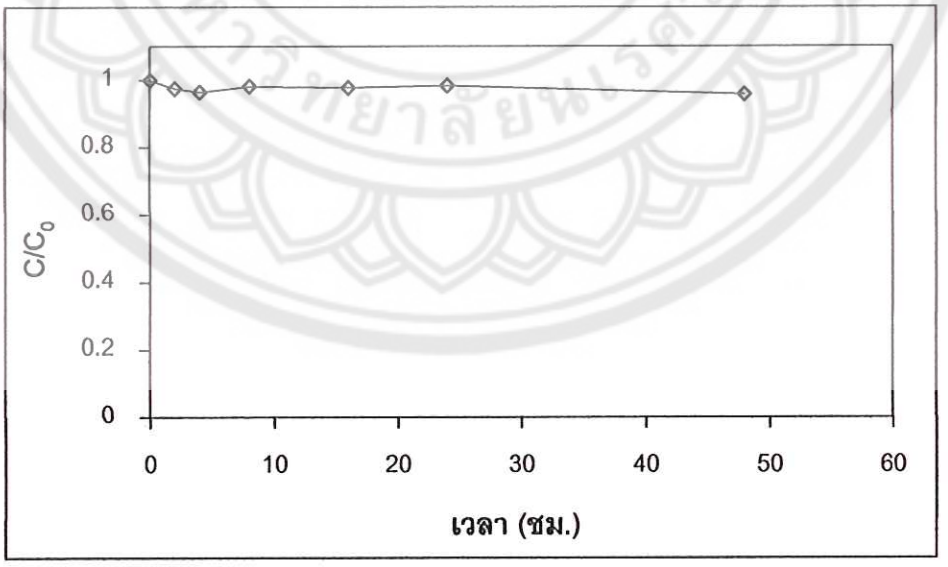
จากผลการทดลองการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารพาราควอทที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเท่ากับ 7 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง จากภาพ 29 และภาพ 30 พบว่า ที่เวลา 48 ชั่วโมง ความเข้มข้นของสารพาราควอทในน้ำมีค่าลดลงในช่วง 4 ชั่วโมงแรกและหลังจากนั้นค่าความเข้มข้นของสารพาราควอทเริ่มคงที่สู่สมดุล โดยคิดค่าความเข้มข้นของสารพาราควอทที่ลดลงเล็กน้อยคิดเป็นร้อยละ 1.57 เมื่อนำมาศึกษาอัตราการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสใน 4 ชั่วโมงแรกพบว่าค่าอัตราการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารพาราควอทในช่วงเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 1.7538 มิลลิกรัมต่อลิตร-ชั่วโมง และมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0098 ต่อชั่วโมง ดังภาพ 31 และภาพ 32

โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในสารเคมีที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดเป็นพันธะใหม่ระหว่างออกซิเจนและคาร์บอน โดยที่ออกซิเจนได้จากโมเลกุลของน้ำและคาร์บอนได้จากโมเลกุลของสารเคมี [47] คุณสมบัติของสารพาราควอทที่บ่งบอกความสามารถในการทำปฏิกิริยากับน้ำ ได้แก่ ความเสถียรภาพ (stability) ในตัวกลางที่สภาวะใดๆ จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้ทำการทดลองโดยการเตรียมสารพาราควอทความเข้มข้น 91 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ค่าพีเอช 5, 7 และ 9 เป็นระยะเวลา 30 วัน อุณหภูมิ 25 และ 40 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความเข้มข้นของ

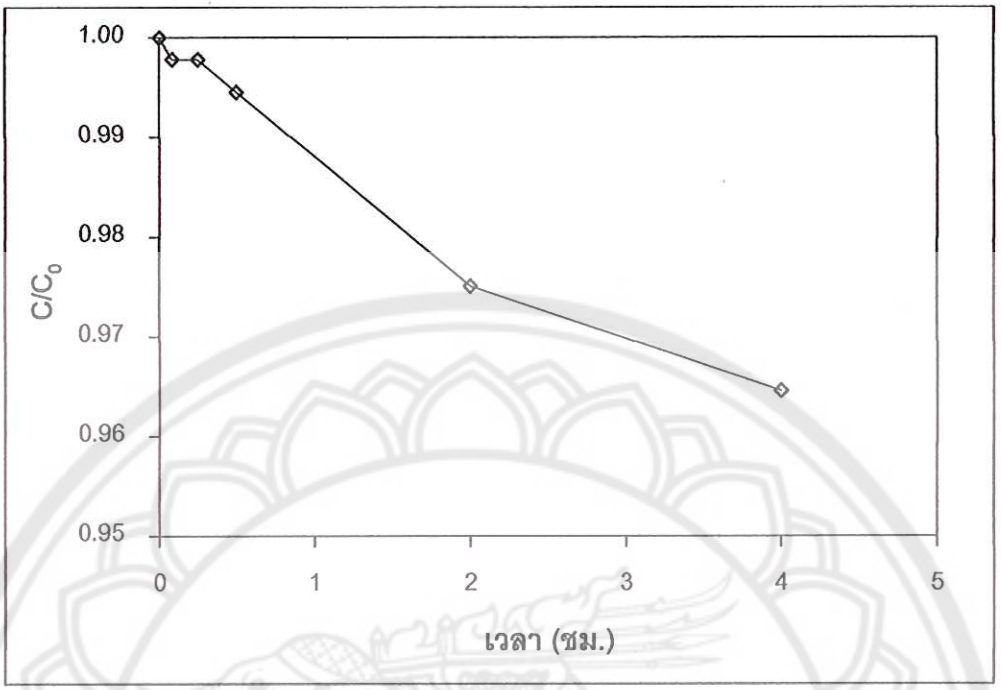
สารพาราควอทมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าสารพาราควอทเป็นสารที่เสถียรภาพกับการไฮโดรไลซิสในสภาวะตัวกลางที่เป็นกรด เป็นกลางและเป็นด่าง นั้นคือจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำที่เป็นกรด เป็นกลาง และเป็นด่าง [48]



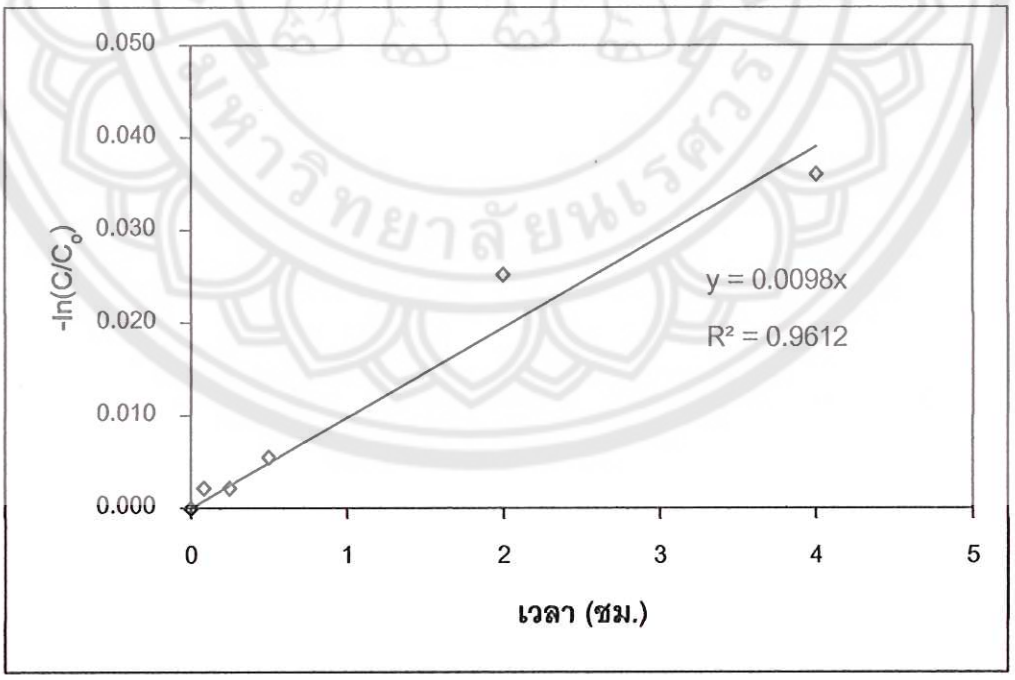
ภาพ 29 ค่าความเข้มข้นของสารพาราควอทที่คงเหลือในน้ำที่เวลาต่างๆ



ภาพ 30 อัตราส่วนการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารพาราควอทที่เวลา 48 ชั่วโมง



ภาพ 31 อัตราส่วนการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารพาราควอทที่เวลา 4 ชั่วโมง



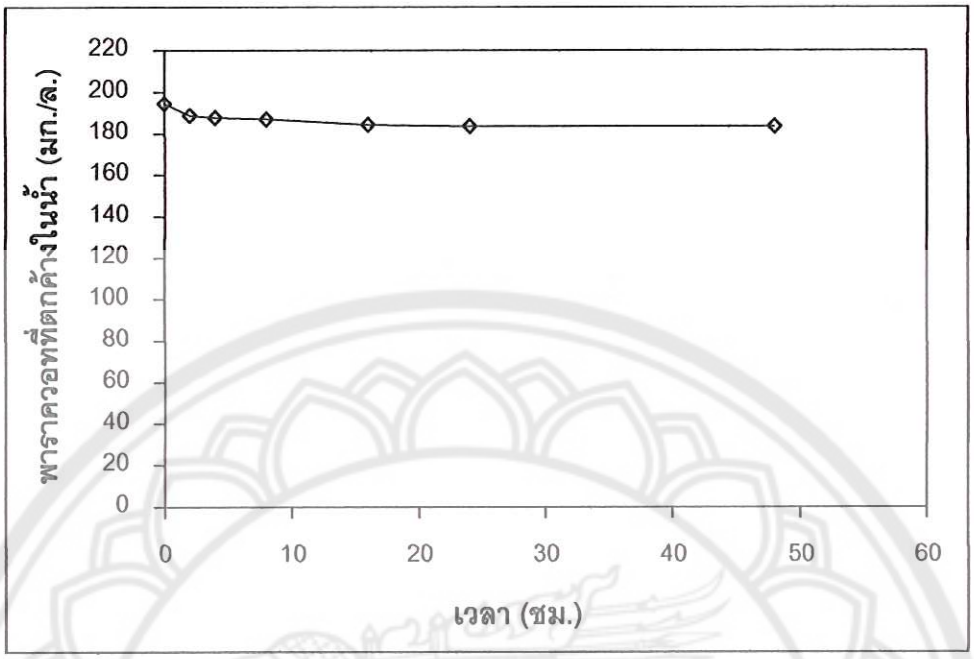
ภาพ 32 อัตราการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารพาราควอทที่เวลา 4 ชั่วโมง

การย่อยสลายสารพาราควอทด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิส (photolysis)

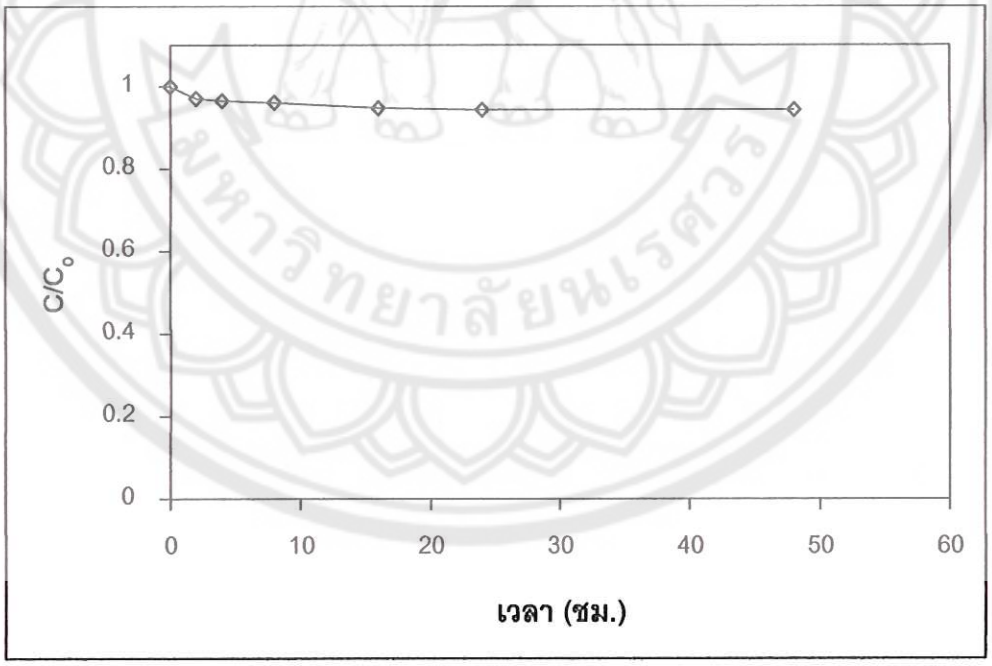
จากผลการทดลองการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิสของสารพาราควอท ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเท่ากับ 7 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยฉายแสงด้วยหลอดไฟที่มีพลังงานใกล้เคียงกับแสงอาทิตย์ เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง จากภาพ 33 และภาพ 34 พบว่า ที่เวลา 48 ชั่วโมง ความเข้มข้นของสารพาราควอทในน้ำมีค่าลดลงในช่วง 4 ชั่วโมงแรกและหลังจากนั้นค่าความเข้มข้นของสารพาราควอทเริ่มคงที่สู่สมดุล โดยคิดค่าความเข้มข้นของสารพาราควอทที่ลดลงเป็นร้อยละ 5.61 เมื่อศึกษาอัตราการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิสใน 4 ชั่วโมงแรกพบว่าค่าอัตราการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิสของสารพาราควอทในช่วงเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 1.6888 มิลลิกรัมต่อลิตร-ชั่วโมง และมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.01 ต่อชั่วโมง ดังภาพ 35 และภาพ 36

ปฏิกิริยาโฟโตไลซิสเป็นปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารเคมีด้วยพลังงานแสง [47] มีงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการย่อยสลายของสารพาราควอทด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิส ที่รัฐฟลอริดา (Florida) โดยการเตรียมสารพาราควอทที่ความเข้มข้น 28 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 7 ฉายแสงด้วยหลอดไฟซีนอน (xenon lamp) ที่มีพลังงานแสงเทียบเท่ากับแสงแดดในฤดูร้อนของรัฐฟลอริดา ทำการทดลองระยะเวลา 36 วัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่าสารพาราควอทยังคงค้างอยู่ในสารละลายคิดเป็นร้อยละ 94 - 95 เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสารพาราควอท [48] ซึ่งเห็นได้ว่า มีลักษณะสอดคล้องกับผลการทดลองในข้างต้น จึงสรุปได้ว่า สารพาราควอทเป็นสารที่มีความเสถียรภาพกับปฏิกิริยาโฟโตไลซิสในสารละลายพีเอช 7

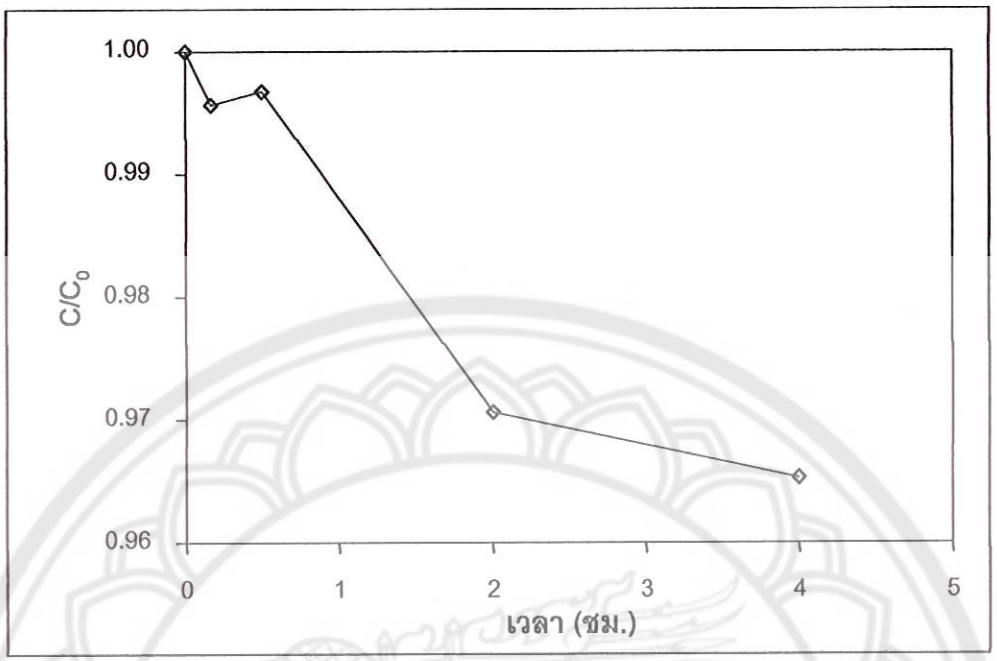
อย่างไรก็ตามยังมีงานวิจัยที่ศึกษาความเป็นไปได้ในการย่อยสลายสารพาราควอทโดยสัมผัสกับแสงยูวีจากหลอดไฟที่มีความดันปรอทปานกลาง ในระยะเวลา 3 วัน ซึ่งพบว่า มีการย่อยสลายสารพาราควอทอย่างรวดเร็ว และเมื่อมีการฉายแสงต่อจะพบว่าสารพาราควอทย่อยสลายไปเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide) และเมทิลามีน (methylamine) [36, 48]



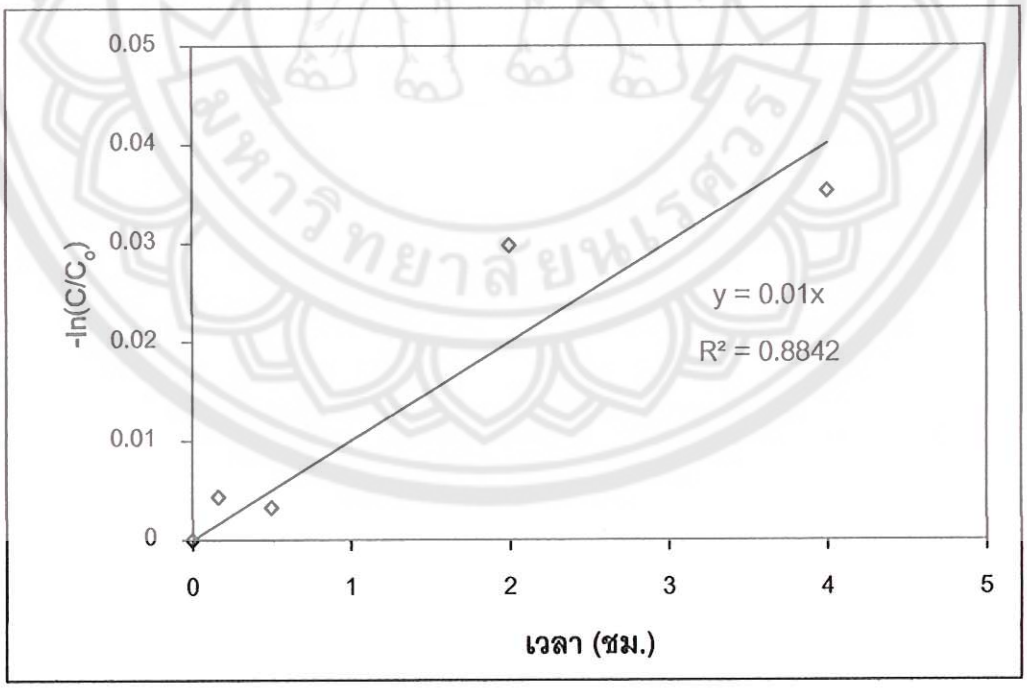
ภาพ 33 ค่าความเข้มข้นของสารพาราควอทที่คงเหลือในน้ำที่เวลาต่าง ๆ



ภาพ 34 อัตราส่วนการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิสของสารพาราควอท ที่เวลา 48 ชั่วโมง



ภาพ 35 อัตราส่วนการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิสของสารพาราควอท ที่เวลา 4 ชั่วโมง



ภาพ 36 อัตราการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิสของสารพาราควอทที่เวลา 4 ชั่วโมง

การเปรียบเทียบการย่อยสลายสารพาราควอทด้วยการระเหยกลายเป็นไอ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และปฏิกิริยาโฟโตไลซิส

จากการศึกษาการย่อยสลายสารพาราควอทด้วยการระเหยกลายเป็นไอ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และปฏิกิริยาโฟโตไลซิส ได้ค่าจากการคำนวณการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาต่างๆ ได้แก่ อัตราการย่อยสลายเริ่มต้น (initial rate) ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (rate constant) และร้อยละการลดลงของสารพาราควอท ดังตาราง 9

จากตาราง 9 เมื่อเปรียบเทียบการย่อยสลายสารพาราควอทด้วยการระเหยกลายเป็นไอ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และปฏิกิริยาโฟโตไลซิส พบว่า

1. สารพาราควอทไม่เกิดการระเหยการเป็นไอ

2. ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น (1.7538 มิลลิกรัมต่อลิตร-ชั่วโมง) จะเกิดขึ้นเร็วกว่าปฏิกิริยาโฟโตไลซิส และมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (0.0098 ต่อชั่วโมง) ที่น้อยกว่าปฏิกิริยาโฟโตไลซิส ทำให้ร้อยละการลดลงของสารพาราควอท (1.57) น้อยกว่าเช่นกัน

3. ปฏิกิริยาโฟโตไลซิส อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น (1.688 มิลลิกรัมต่อลิตร-ชั่วโมง) มีค่าน้อย แต่มีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (0.01 ต่อชั่วโมง) ที่มากกว่า ทำให้ร้อยละการลดลงของสารพาราควอท (5.61) ซึ่งเกิดการย่อยสลายสารพาราควอทมากกว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

ดังนั้นสารพาราควอทจะถูกย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิส ได้มากกว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและการระเหยกลายเป็นไอ

ตาราง 9 แสดงการเปรียบเทียบการย่อยสลายของพาราควอทด้วยการระเหยกลายเป็นไอ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และปฏิกิริยาโฟโตไลซิส

พารามิเตอร์ / ปฏิกิริยา	อัตราการย่อยสลายเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร-ชั่วโมง)	ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (ต่อชั่วโมง)	ร้อยละการลดลงของสาร
การระเหยกลายเป็นไอ (evaporation)	0	-	0
ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis)	1.7538	0.0098	1.57
ปฏิกิริยาโฟโตไลซิส (photolysis)	1.6888	0.01	5.61

การดูดซับของสารพาราควอทในดิน

1. การดูดซับของสารพาราควอทในดินเหนียว

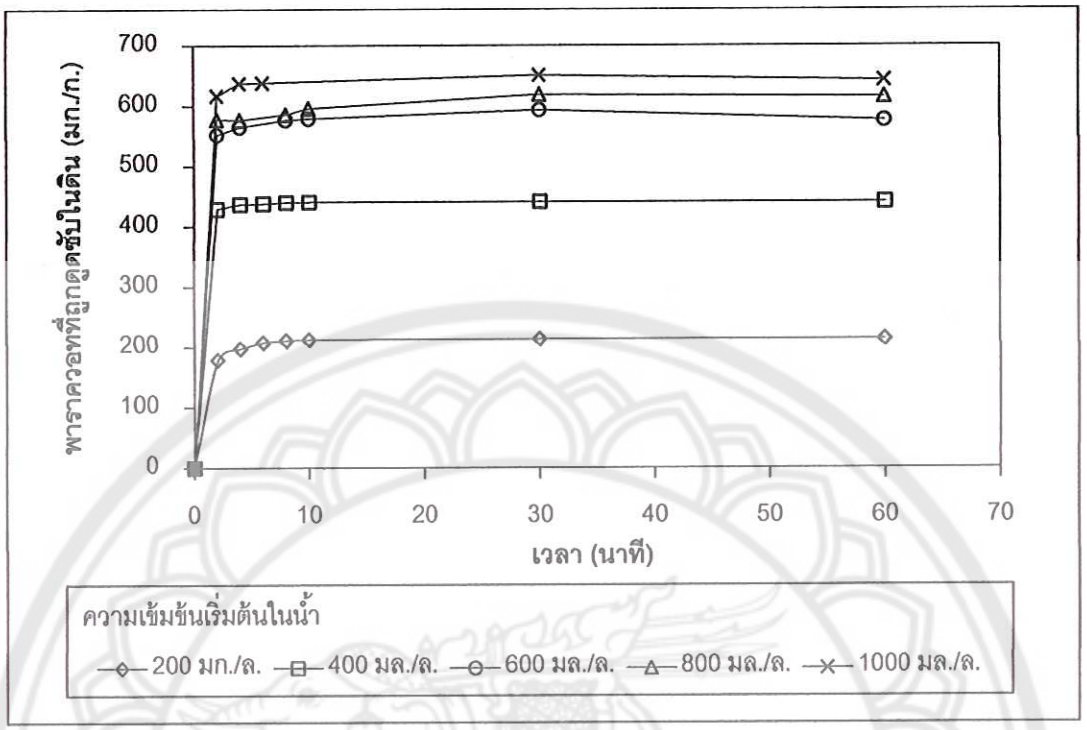
การดูดซับของสารพาราควอทในดินเหนียวแสดงดังภาพ 37 และ ภาพ 38 โดยทำการทดลองการดูดซับที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารพาราควอทในน้ำ 200, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งลักษณะการดูดซับของสารพาราควอทในดินเหนียวทั้ง 5 ความเข้มเข้นเริ่มต้นในน้ำมีลักษณะการดูดซับอย่างรวดเร็วระหว่าง 8 - 10 นาทีแรกที่เริ่มการดูดซับ หลังจากนั้นลักษณะการดูดซับเริ่มช้าลงจนเป็นเส้นตรง โดยที่มีร้อยละการดูดซับ 98, 97, 90, 78.34 และ 62.69 ตามลำดับ เห็นได้ว่าที่ความเข้มข้นของสารพาราควอทเริ่มต้นในน้ำต่ำจะมีร้อยละการดูดซับที่มากกว่าที่ความเข้มข้นของสารพาราควอทเริ่มต้นในน้ำสูง

เมื่อนำมาศึกษาไอโซเทอมการดูดซับโดยสมการการดูดซับของสารพาราควอทในดินเหนียวจะใช้สมการ 2 รูปแบบมาอธิบายได้แก่ สมการแลงเมียร์ และสมการฟรุนดิช [31] ดังสมการต่อไปนี้

สมการแลงเมียร์ $$C/(x/m) = [1/(K_1.b)]+(C/b) \quad (8)$$

สมการฟรุนดิช $$(x/m) = K_f C^{1/n} \quad (9)$$

โดยที่ x/m เท่ากับมวลของสารพาราควอทที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักดิน (มิลลิกรัมต่อกรัม), C เท่ากับความเข้มข้นสารพาราควอทที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร), K_1 เท่ากับค่าคงที่ของแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม) และ b เท่ากับความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม), K_f เท่ากับค่าคงที่ของฟรุนดิช (ลิตรต่อกรัม) และ n เท่ากับค่าคงที่ถดถอยซึ่งแสดงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย (ไม่มีหน่วย)



ภาพ 37 ลักษณะการดูดซับสารพาราควอทในดินเหนียว

เมื่อศึกษาลักษณะการดูดซับแบบแลงเมียร์ โดยนำค่าความเข้มข้นสารพาราควอทที่สภาวะสมดุลต่อมวลของสารพาราควอทที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักดิน (C_e/C_s) และค่าความเข้มข้นสารพาราควอทที่สภาวะสมดุล (C_e) มาเขียนกราฟดังภาพ 39 จะพบว่าลักษณะกราฟของดินเหนียวที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยค่าสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9998 ซึ่งเข้าใกล้ 1 สมการการดูดซับของสารพาราควอทในดินเหนียวเป็น

$$1/C_S = [0.0008/ (0.1176.C_e)] +0.0008$$

โดยที่ C_S คือมวลของสารพาราควอทที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักดิน (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ C_e= ความเข้มข้นสารพาราควอทที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

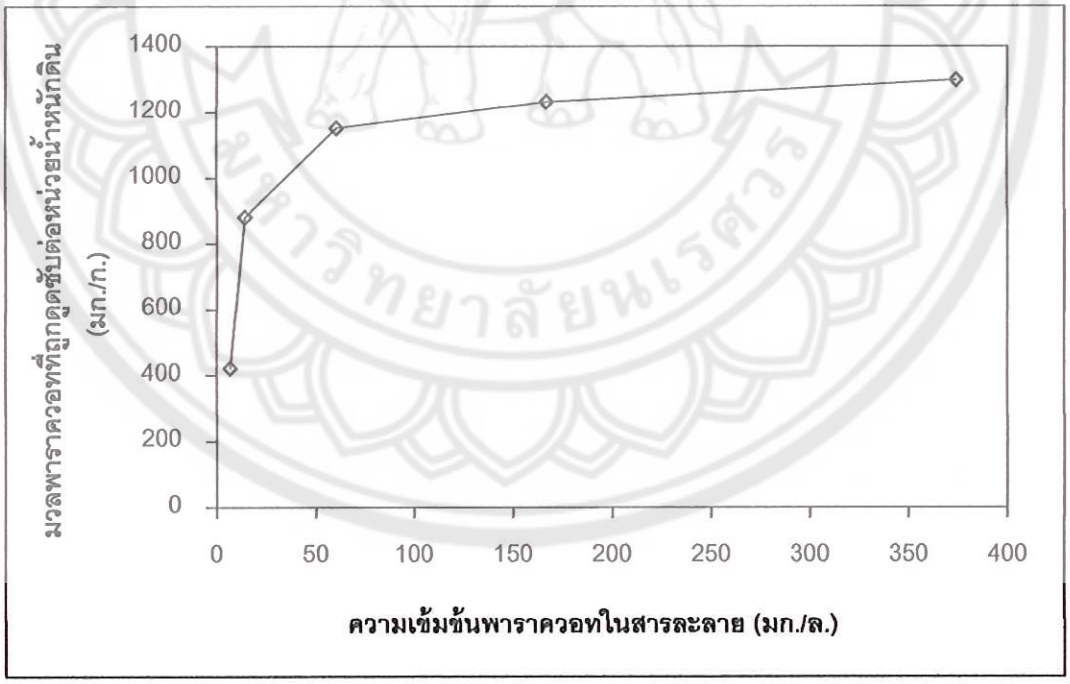
จากสมการการดูดซับสารพาราควอทในดินเหนียว นำมาคำนวณค่าคงที่ของแลงเมียร์ และค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับ พบว่ามีค่าคงที่แลงเมียร์เท่ากับ 0.1176 ลิตรต่อมิลลิกรัม และค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับเท่ากับ 1,250 มิลลิกรัมต่อกรัม

และเมื่อศึกษาลักษณะการดูดซับแบบฟรุนดิช โดยนำค่า log C_s และ log C_e มาเขียนกราฟดังภาพ 40 เพื่อหาคำนวณค่าคงที่ของฟรุนดิชและค่าคงที่ถดถอยซึ่งแสดงการขึ้นตรงกับค่า

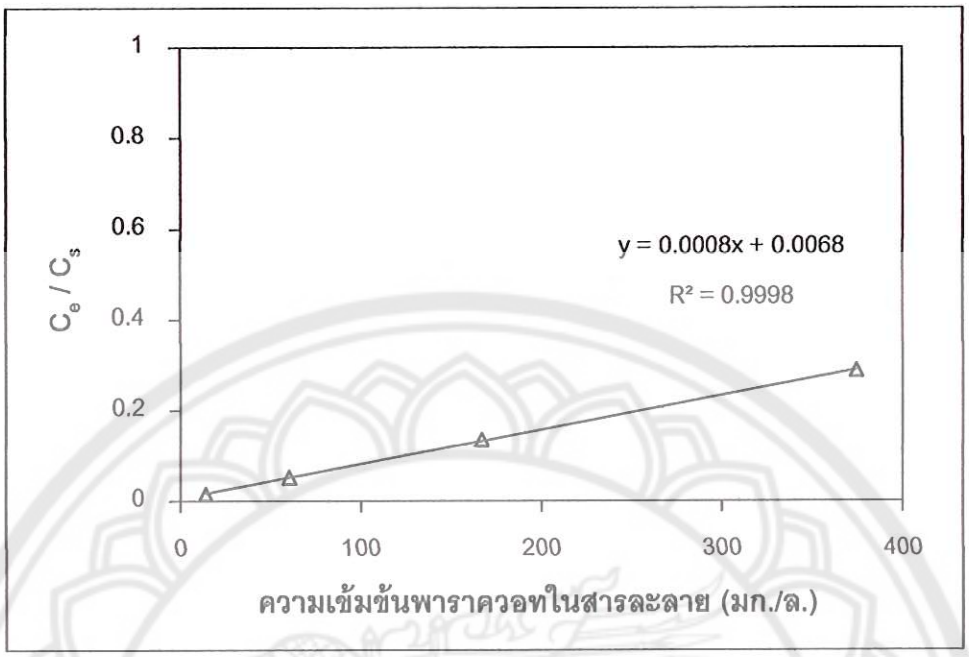
ความเข้มข้นของสารละลาย (n) โดยที่ K_f เป็นตัวชี้วัดขอบเขตการดูดซับ ในขณะที่ 1/n เป็นตัวบ่งชี้ความสัมพันธ์ของโมเลกุลสารอินทรีย์สำหรับพื้นผิวดูดซับ ถ้าค่า 1/n ต่ำกว่า 1 แสดงว่าสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับมีแรงดึงดูดต่อกัน (affinity) สูง ถ้าค่า 1/n เท่ากับ 1 แสดงว่าตัวละลาย (solute) สามารถแพร่กระจายเข้าไปในสารละลายและพื้นผิวของตัวดูดซับอย่างสมดุล และถ้าสูงกว่า 1 การดูดซับจะถูกเรียกว่า cooperative เนื่องจากการทำงานร่วมกันระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับโมเลกุลใหม่ใกล้พื้นผิวทำให้ส่งเสริมการดูดซับ จากภาพ 27 เห็นได้ว่าลักษณะกราฟเป็นเส้นตรง ค่าสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9301 มีค่าเข้าใกล้ 1 สมการดูดซับของสารพาราควอทในดินเหนียวเป็น

$$C_s = 669.2679 C_e^{0.1175}$$

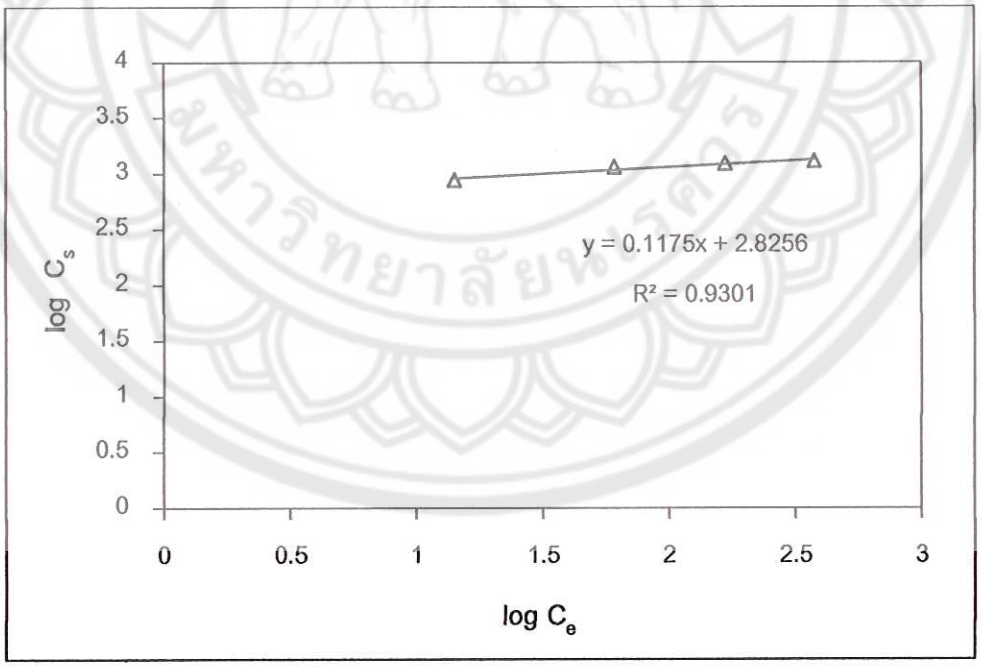
ค่าคงที่ของฟรุนดิช ที่ได้จากสมการมีค่าเท่ากับ 669.2679 ลิตรต่อกรัมและค่าคงที่ถดถอยซึ่งแสดงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย (n) เท่ากับ 8.5106 เมื่อพิจารณาค่า 1/n จะพบว่ามีค่าเท่ากับ 0.1175 ซึ่งต่ำกว่า 1 แสดงว่าสารพาราควอทกับดินเหนียวมีแรงดึงดูดต่อกัน (affinity) สูง



ภาพ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างสารพาราควอทที่ถูกดูดซับในดินเหนียวกับสารพาราควอทในสารละลายที่สภาวะสมดุล



ภาพ 39 ไอโซเทอมการดูดซับของพาราควอทในดินเหนียวในรูปแบบแลงเมียร์

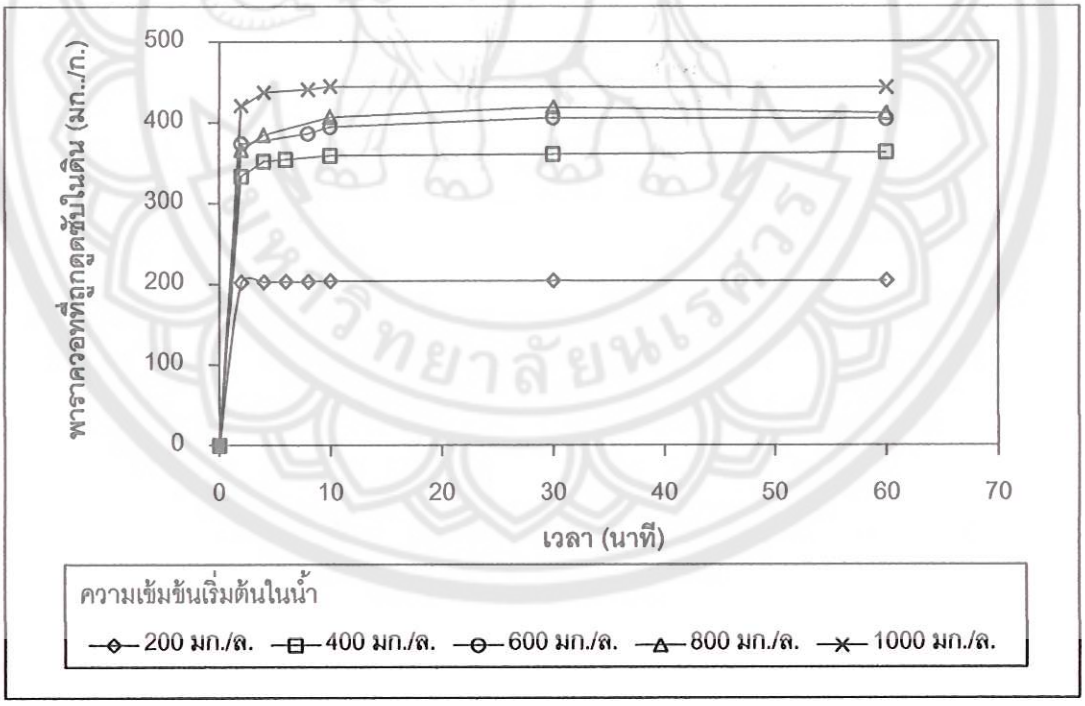


ภาพ 40 ไอโซเทอมการดูดซับของพาราควอทในดินเหนียวในรูปแบบฟรุนดิช

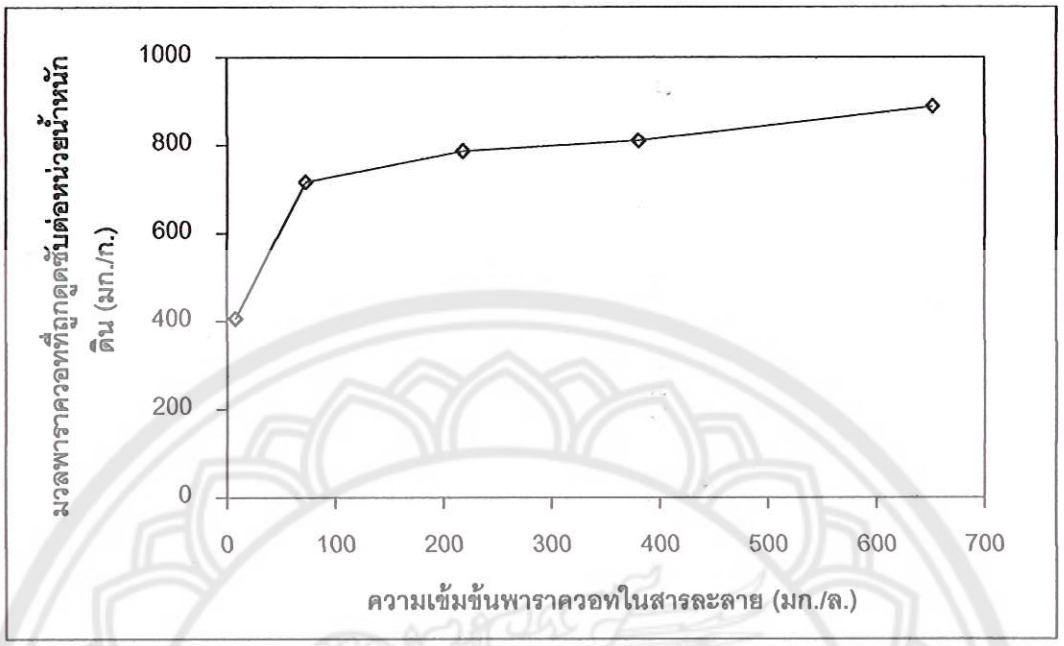
2. การดูดซับของสารพาราควอทในดินร่วนปนทราย

การดูดซับของสารพาราควอทในดินร่วนปนทรายแสดงในภาพ 41 และ ภาพ 42 โดยทำการดูดซับที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารพาราควอทในน้ำ 200, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นได้ว่าลักษณะการดูดซับของสารพาราควอทในดินร่วนปนทรายทั้ง 5 ความเข้มเข้นเริ่มต้นในน้ำ มีการดูดซับอย่างรวดเร็วใน 10 นาทีแรกที่เริ่มมีการดูดซับ และหลังจากนั้นลักษณะการดูดซับเริ่มช้าลงจนเป็นเส้นตรงเช่นเดียวกันกับดินเหนียว โดยที่มีร้อยละการดูดซับ 96.46, 84.24, 66.09, 52.29 และ 40.43 ตามลำดับ จากร้อยละการดูดซับสารพาราควอทในดิน พบว่า ความเข้มข้นของสารพาราควอทเริ่มต้นในน้ำต่ำจะมีร้อยละการดูดซับที่มากกว่าที่ความเข้มข้นของสารพาราควอทเริ่มต้นในน้ำสูง

เมื่อนำมาศึกษาไอโซเทอมการดูดซับโดยสมการการดูดซับของสารพาราควอทในดินร่วนปนทรายจะใช้สมการ 2 รูปแบบมาอธิบายเช่นเดียวกันกับดินเหนียวได้แก่ สมการแลงเมียร์และสมการฟรุนดิช [31] ดังสมการที่ 8 และ 9



ภาพ 41 ลักษณะการดูดซับสารพาราควอทในดินร่วนปนทราย



ภาพ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างสารพาราควอทที่ถูกดูดซับในดินร่วนปนทรายกับสารพาราควอทในสารละลายที่สภาวะสมดุล

จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของสารพาราควอทในดินร่วนปนทรายในรูปแบบแลงเมียร์ พบว่ามีลักษณะดังภาพ 43 โดยกราฟของดินร่วนปนทรายที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยค่าสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9969 ซึ่งเข้าใกล้ 1 สมการดูดซับของสารพาราควอทในดินร่วนปนทรายเป็น

$$1/C_S = [0.0011/ (0.0464.C_e)] +0.0011$$

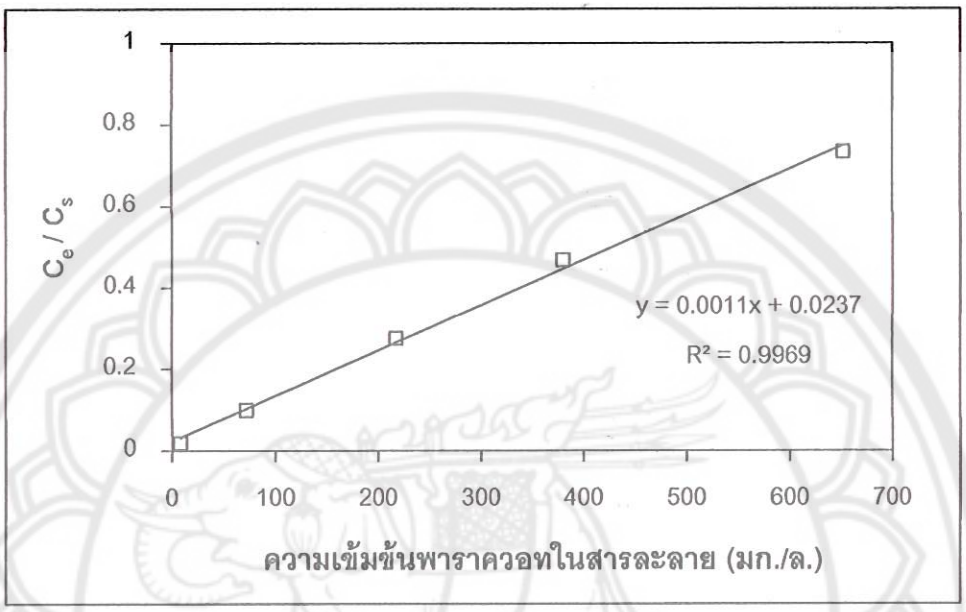
ค่าคงที่ของแลงเมียร์ และค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับที่ได้จากสมการมีค่าเท่ากับ 0.1716 ลิตรต่อมิลลิกรัมและ 909.091 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

และจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของสารพาราควอทในดินร่วนปนทรายในรูปแบบฟรุนดิช พบว่ามีลักษณะดังภาพ 44 โดยลักษณะกราฟของดินร่วนปนทรายที่ได้เป็นเส้นตรง **มีค่าสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9422 มีค่าเข้าใกล้ 1 สมการดูดซับของสารพาราควอทในดินร่วนปนทรายเป็น**

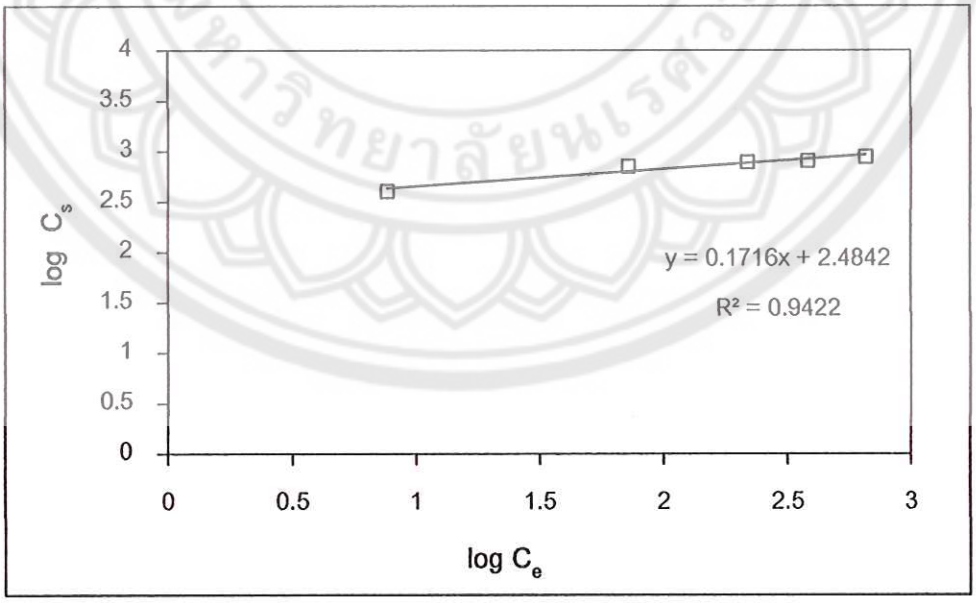
$$C_S = 304.9299C_e^{0.1716}$$

ค่าคงที่ของฟรุนดิชที่ได้จากสมการมีค่าเท่ากับ 304.9299 ลิตรต่อกรัมและค่าคงที่ถดถอยซึ่งแสดงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย (n) เท่ากับ 5.8275 เมื่อพิจารณาค่า 1/n

จะพบว่ามีค่าเท่ากับ 0.1716 ซึ่งต่ำกว่า 1 แสดงว่าสารพาราควอทกับดินร่วนปนทรายมีแรงดึงดูดต่อกัน (affinity) สูงเช่นเดียวกันกับดินเหนียว



ภาพ 43 ไอโซเทอมการดูดซับของพาราควอทในดินร่วนปนทรายในรูปแบบแลงเมียร์



ภาพ 44 ไอโซเทอมการดูดซับของพาราควอทในดินร่วนปนทรายในรูปแบบฟรุนดิช

3. การเปรียบเทียบการดูดซับของสารพาราควอทในดินเหนียวและดินร่วนปนทราย

จากลักษณะการดูดซับของสารพาราควอทในดินจะพบว่า สารพาราควอทสามารถดูดซับได้ดีในดินทั้งสองชนิด โดยที่ลักษณะการดูดซับของสารพาราควอทในดินทั้งสองชนิดนั้นมีการดูดซับเข้าสู่สมดุลการดูดซับภายใน 8 - 10 นาที โดยร้อยละการดูดซับสารพาราควอทในดินเหนียวอยู่ในช่วง 60 - 98 และร้อยละการดูดซับสารพาราควอทในดินร่วนปนทรายอยู่ในช่วง 40 - 96 ซึ่งจะเห็นว่า ดินเหนียวมีร้อยละการดูดซับสารพาราควอทมากกว่าดินร่วนปนทราย

และจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของสารพาราควอทในดินทั้งสองชนิดนี้ในรูปแบบสมการแลงเมียร์ และสมการฟรุนดิช ได้ลักษณะสมการทั้ง 2 รูปแบบดังภาพ 45 และภาพ 46 และค่าคงที่จากไอโซเทอมการดูดซับดังตาราง 10 โดยสมการการดูดซับของสารพาราควอทในดินทั้งสองชนิดตามไอโซเทอมแบบแลงเมียร์เป็น

ดินเหนียว:

$$1/C_s = [0.0008/ (0.1176.C_e)] +0.0008$$

ดินร่วนปนทราย:

$$1/C_s = [0.0011/ (0.0464.C_e)] +0.0011$$

และสมการการดูดซับของสารพาราควอทในดินทั้งสองชนิดตามไอโซเทอมแบบฟรุนดิชเป็น

ดินเหนียว:

$$C_s = 669.2679C_e^{0.1175}$$

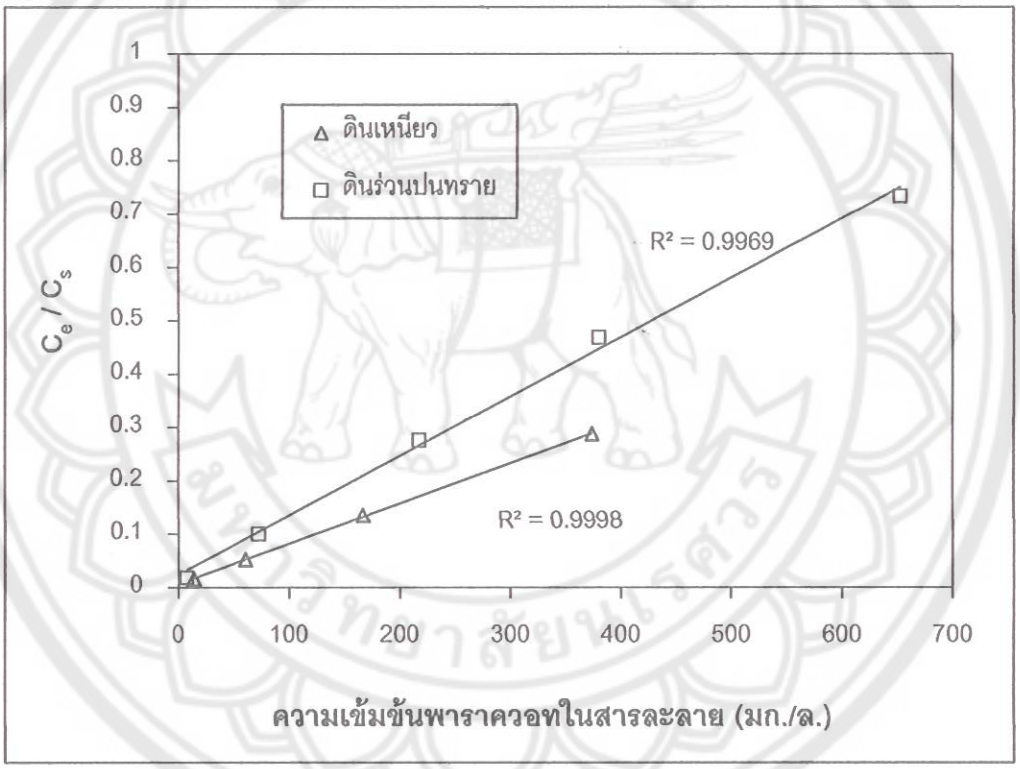
ดินร่วนปนทราย:

$$C_s = 304.9299C_e^{0.1716}$$

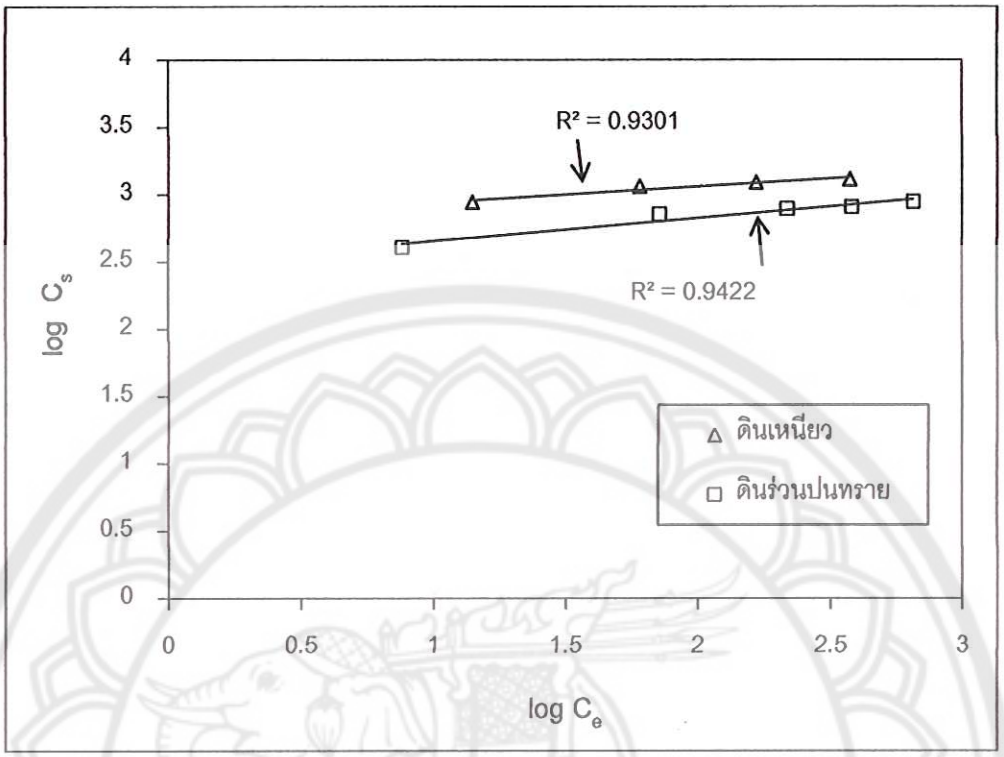
พิจารณาเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์ (R^2) จากไอโซเทอมของแลงเมียร์และไอโซเทอมของฟรุนดิช พบว่า ดินทั้งสองชนิดมีค่าสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ได้จากสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์สูงกว่าค่าสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ได้จากสมการการดูดซับแบบฟรุนดิช ดังนั้นลักษณะการดูดซับของสารพาราควอทในดินทั้ง 2 ชนิด สอดคล้องกับการดูดซับของแลงเมียร์ ซึ่งแสดงพฤติกรรมการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว โดยลักษณะการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมีที่เกิดระหว่างอนุภาคดินและสารพาราควอท โดยอนุภาคดินและสารพาราควอทนั้นจะยึดเกาะกันด้วยพันธะไอออนิก ซึ่งเป็นพันธะที่เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกและประจุลบ โดยประจุบวกในโมเลกุลของสารพาราควอทจะถูกดึงดูดด้วยแรงแร่ธาตุที่มีประจุลบในดินซึ่งจะเกิดการดึงดูดที่ผิวหน้าของดิน [49, 50] และมีการเกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cation exchange)

[29] โดยประจุบวกของสารพาราควอทจะเข้าไปแทนที่ประจุบวกในดิน (Na^{+}, Ca^{2+},Mg^{2+}, K^{+}) ทำให้ดินกับสารพาราควอทมีการดูดซับกันอย่างแข็งแรง

โดยดินเหนียวสามารถดูดซับสารพาราควอทได้ดีกว่าดินร่วนปนทรายซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (b) พบว่าดินเหนียวและดินร่วนปนทรายมีค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับเท่ากับ 1,250.00 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 909.09 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และมีค่าคงที่ของแลงเมียร์ของดินเหนียวและดินร่วนปนทรายเท่ากับ 0.1176 ลิตรต่อมิลลิกรัมและ 0.0464 ลิตรต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ



ภาพ 45 ไอโซเทอมการดูดซับของพาราควอทในดินในรูปแบบแลงเมียร์



ภาพ 46 ไอโซเทอมการดูดซับของพาราควอทในดินในรูปแบบฟรุนดิช

ตาราง 10 แสดงการเปรียบเทียบค่าคงที่จากไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดิช ของดินทั้ง 2 ชนิด

ชนิดดิน	ไอโซเทอมของแลงเมียร์			ไอโซเทอมของฟรุนดิช		
	b	K_l	R^2	n	K_f	R^2
ดินเหนียว	1,250.00	0.1176	0.9998	8.5106	669.2679	0.9301
ดินร่วนปนทราย	909.09	0.0464	0.9969	5.8275	304.9299	0.9422

จากค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับและค่าคงที่การดูดซับของดินเหนียวที่ได้จากสมการแลงเมียร์ มีค่าที่มากกว่าดินร่วนปนทรายนั้นแสดงให้เห็นว่า ดินเหนียวมีความสามารถในการดูดซับสารพาราควอทสูงกว่าดินร่วนปนทราย โดยสอดคล้องกับผลของช่วงเวลาในการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ ซึ่งพบ

ว่าดินเหนียวเข้าสู่สมดุลการดูดซับได้เร็วกว่าดินร่วนปนทราย ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากปัจจัยอื่นๆ ได้แก่ ค่าร้อยละอินทรียวัตถุในดิน และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน ซึ่งดินเหนียวมีค่าร้อยละอินทรียวัตถุเท่ากับ 5.596 และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดินเท่ากับ 12.765 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ซึ่งสูงกว่าดินร่วนปนทรายที่มีร้อยละอินทรียวัตถุ เท่ากับ 4.958 และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดินเท่ากับ 10.524 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ส่งผลให้เกิดการดูดซับได้ดีกว่า

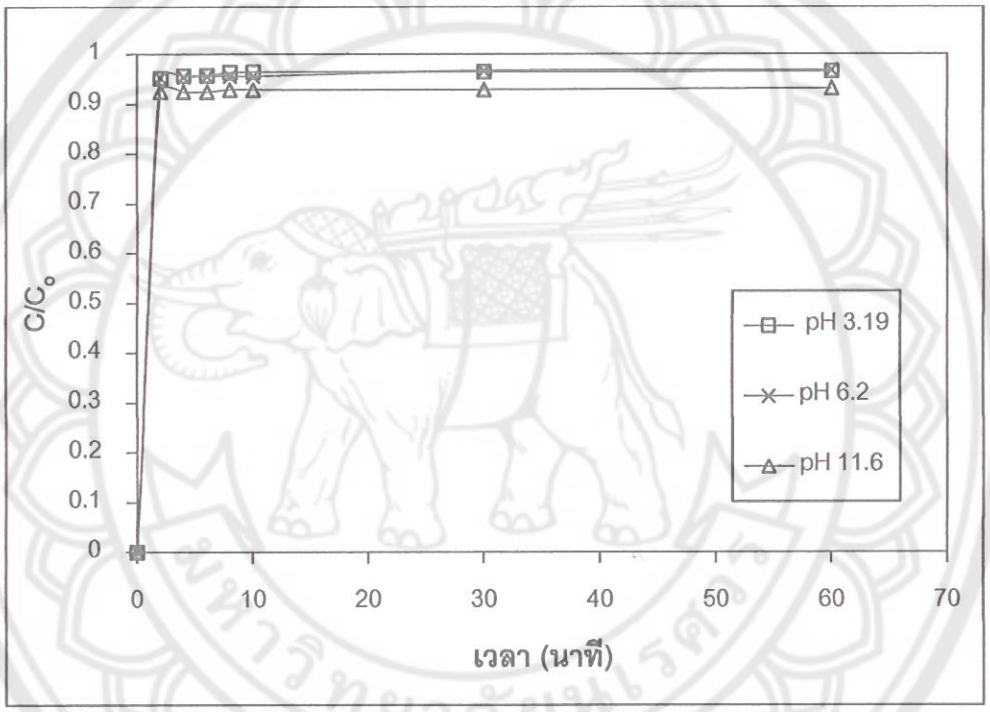
เมื่อพิจารณาจากงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการดูดซับของสารพาราควอทในดิน พบว่า สารพาราควอทสามารถดูดซับอย่างแข็งแรงในดินอินทรีย์คาร์บอน (soil organic carbon) และดินเหนียว (clay minerals) โดยการดูดซับเข้าสู่สมดุลในระยะเวลา 1 ถึง 3 ชั่วโมง [9, 51] และมีการศึกษาการดูดซับของสารพาราควอทในดินที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน โดยทำการดูดซับในดินที่เป็นดินชั้นบน (top soil) และดินชั้นล่าง (sub - soil) ซึ่งดินทั้งสองชนิดเป็นดินทรายละเอียดที่มีลักษณะคุณสมบัติที่แตกต่างกันดังตาราง 11 พบว่า การดูดซับของสารพาราควอทที่เกิดขึ้นในดินชั้นล่างน้อยกว่าดินชั้นบน เนื่องมาจากในดินชั้นล่างมีค่าร้อยละอินทรีย์คาร์บอนที่ลดลงเมื่อเทียบกับดินชั้นบน โดยดินชั้นบนมีร้อยละ 1.3 และดินชั้นล่างมีร้อยละ 0.1 [9] นั้นแสดงให้เห็นว่าร้อยละอินทรีย์คาร์บอนและสัมประสิทธิ์การดูดซับมีผลต่อการดูดซับสารพาราควอทในดิน

ตาราง 11 แสดงคุณสมบัติดิน Wabasso fine sand **ที่ใช้ในงานวิจัยที่ผ่านมา** [9]

คุณสมบัติ	**ดินชั้นบน** (top soil)	**ดินชั้นล่าง** (sub - soil)
ความลึก (cm.)	0 – 10	33 - 76
พีเอชในน้ำ	4.3	4.9
ร้อยละอินทรีย์คาร์บอน	1.3	0.1
ค่า CEC (ไมโครโมลต่อกรัม)	10.4	9.9
ร้อยละองค์ประกอบดินทราย	92.6	92.4
ร้อยละองค์ประกอบดินทรายแป้ง	4.3	4.0
ร้อยละองค์ประกอบดินเหนียว	3.1	3.2
sorption coefficient, K_d **(มิลลิลิตรต่อกรัม)**	317.73 (วัด)	24.44 (คำนวณ)
$K_{OC}=K_d/OC$	24441(คำนวณ)	

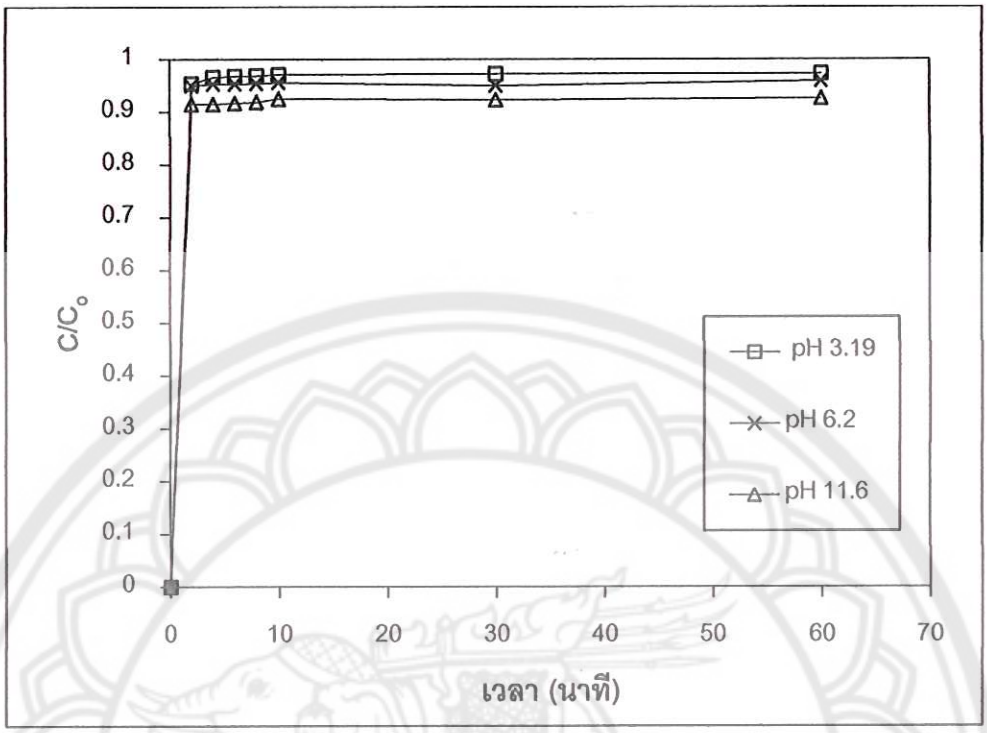
4. ผลของพีเอชต่อการดูดซับของสารพาราควอทในดิน

4.1 ผลของพีเอชต่อการดูดซับของสารพาราควอทในดินเหนียว ทำการวิเคราะห์ที่ค่าพีเอชของสารละลายพาราควอท 3.19, 6.2 และ 11.6 ดังภาพ 47 พบว่าค่าพีเอชของสารละลายมีผลต่อการดูดซับของสารพาราควอทในดินเหนียว โดยลักษณะการดูดซับของสารพาราควอทในดินทั้งสามพีเอช เข้าสู่สมดุลการดูดซับอย่างรวดเร็วและดินเหนียวสามารถดูดซับสารพาราควอทได้ดีที่พีเอช 3.19, 6.20 และ 11.60 ตามลำดับ



ภาพ 47 การดูดซับสารพาราควอทของดินเหนียวที่พีเอชต่าง ๆ

4.2 ผลของพีเอชต่อการดูดซับของสารพาราควอทในดินร่วนปนทราย โดยทำการวิเคราะห์ค่าพีเอชของสารละลายพาราควอทที่ 3.19, 6.2 และ 11.6 ดังภาพ 48 พบว่าค่าพีเอชของสารละลายมีผลต่อการดูดซับของสารพาราควอทในดินร่วนปนทรายเช่นเดียวกันกับดินเหนียว โดยลักษณะการดูดซับของสารพาราควอทในดินทั้งสามพีเอช เข้าสู่สมดุลการดูดซับอย่างรวดเร็วและสามารถดูดซับสารพาราควอทได้ดีที่พีเอช 3.19, 6.20 และ 11.60 ตามลำดับ

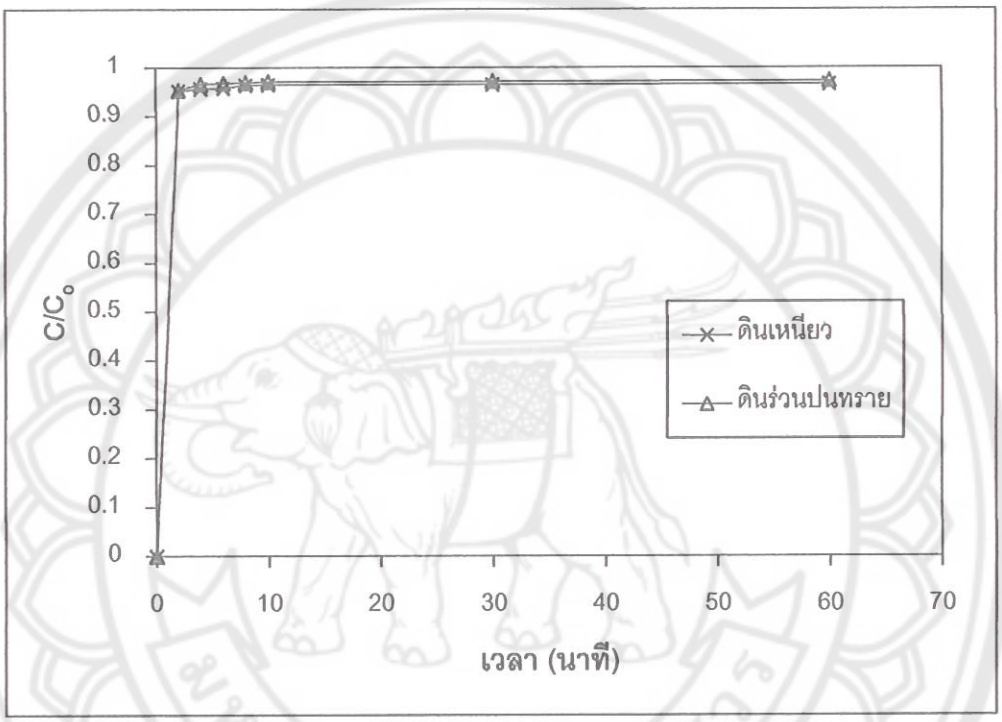


ภาพ 48 การดูดซับสารพาราควอทของดินร่วนปนทรายที่พีเอชต่างๆ

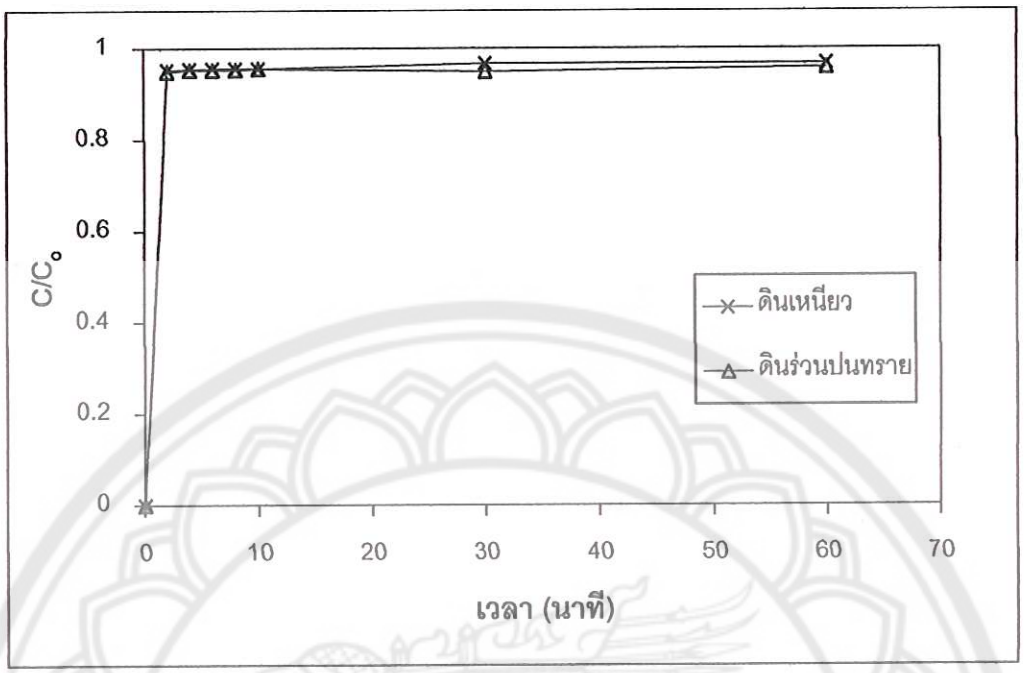
4.3 ผลของพีเอชต่อการดูดซับของสารพาราควอทในดินทั้งสองชนิด จากลักษณะการดูดซับของสารพาราควอทในดินที่ค่าพีเอช 3.19, 6.2 และ 11.6 เห็นได้ว่าในดินทั้งสองชนิดสามารถดูดซับสารพาราควอทได้ดีที่พีเอช 3.19, 6.20 และ 11.60 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากค่าคงที่ในการแตกตัวของโปรตอนของสารอินทรีย์ (pKa) พบว่าสารพาราควอทมีค่าคงที่การแตกตัวอยู่ในช่วง 9 - 9.5 [52] สารละลายพาราควอทจะมีการแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ออกมา ทำให้ความเป็นประจุบวกของสารพาราควอทน้อยลง การดูดซับของสารพาราควอทในดินที่พีเอช 9 - 9.5 ขึ้นไปจึงมีการดูดซับได้น้อยเนื่องจากความเป็นประจุบวกของสารพาราควอทน้อยลง การดึงดูดระหว่างประจุบวกของโมเลกุลพาราควอทกับประจุลบที่ผิวของอนุภาคดินลดลง ส่งผลให้การแลกเลี่ยนไอออนบวกในโมเลกุลของพาราควอทกับแร่ธาตุที่มีประจุลบในดิน (Na^+, Ca^{2+},Mg^{2+}, H^+, K^+และ H^{4+}) น้อยลงเช่นกัน

เมื่อเปรียบเทียบการดูดซับของสารพาราควอทในดินทั้งสองที่ค่าพีเอช 3.19, 6.2 และ 11.6 ดังภาพ 49, 50, และ 51 พบว่า ลักษณะการดูดซับของสารพาราควอทในดินทั้งสองชนิดที่พีเอชดังกล่าวมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน เนื่องมาจากค่าร้อยละอินทรียวัตถุในดิน และค่า

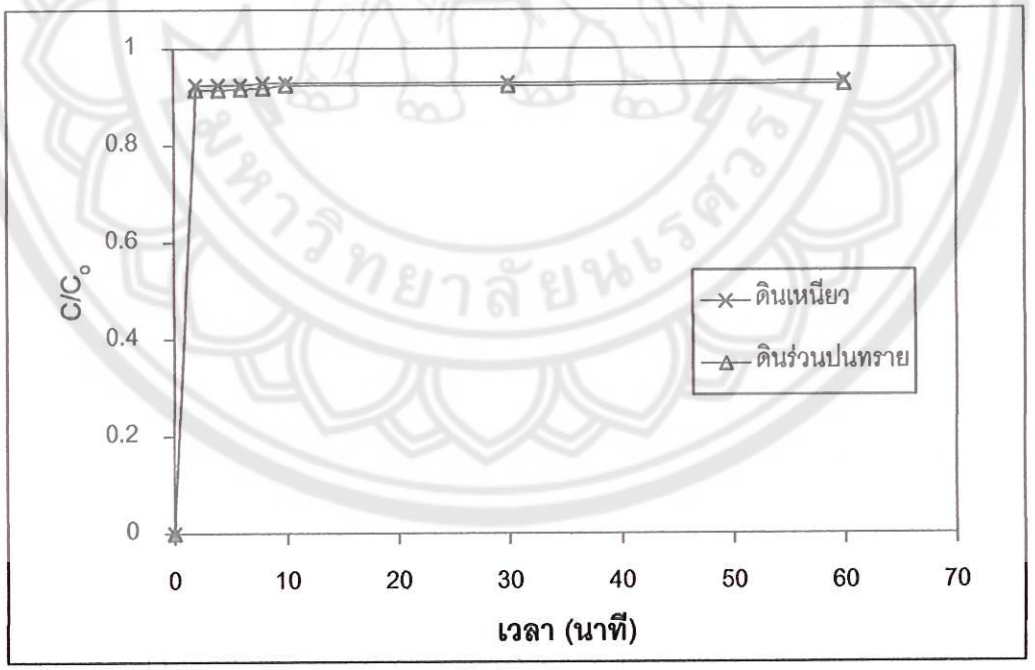
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดินของดินทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งดินเหนียวมีค่าร้อยละอินทรียวัตถุ เท่ากับ 5.596 และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดินเท่ากับ 12.765 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ส่วนดินร่วนปนทรายที่มีค่าร้อยละอินทรียวัตถุ เท่ากับ 4.958 และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดินเท่ากับ 10.524 เซนติโมลต่อกิโลกรัม



ภาพ 49 ความสามารถในการดูดซับของสารละลายพาราควอทในดินที่พีเอช 3.19



ภาพ 50 ความสามารถในการดูดซับของสารละลายพาราควอทในดินที่พีเอช 6.2



ภาพ 51 ความสามารถในการดูดซับของสารละลายพาราควอทในดินที่พีเอช 11.6

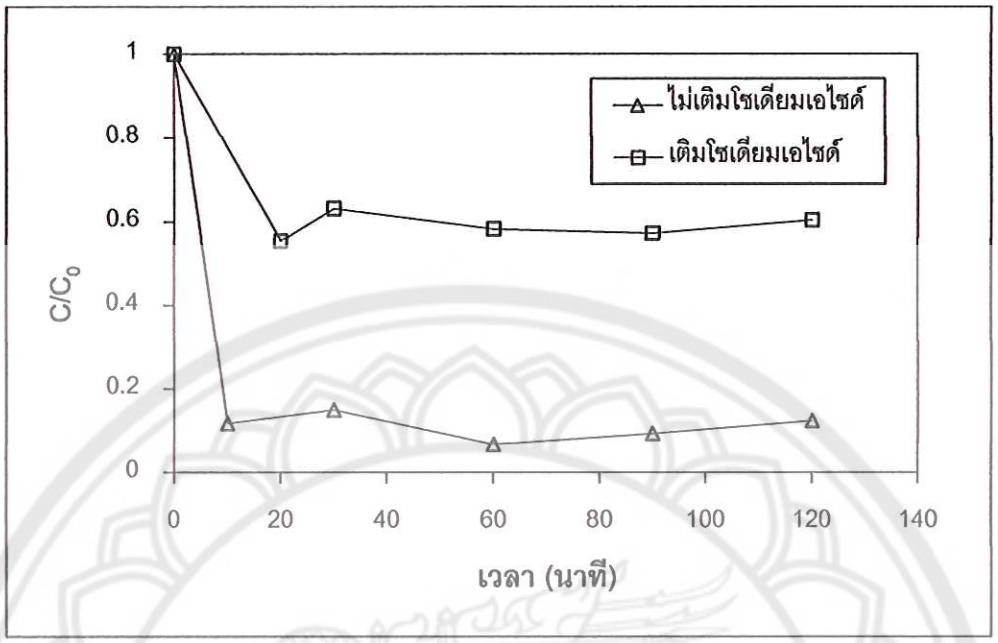
การย่อยสลายสารพาราควอทด้วยจุลินทรีย์ในดิน

1. การย่อยสลายสารพาราควอทด้วยจุลินทรีย์ในดินเหนียว

จากการทดลองการย่อยสลายสารพาราควอทด้วยจุลินทรีย์ในดินเหนียว โดยทำการทดลองเป็น 2 ชุด ชุดแรกไม่เติมโซเดียมเอไซด์ (NaN_3) ลงในดิน ชุดที่ 2 เติมโซเดียมเอไซด์ลงในดิน และหาปริมาณจุลินทรีย์ในดิน การเติมสารโซเดียมเอไซด์ เป็นการยับยั้ง (inhibitor) การทำงานของจุลินทรีย์ โดยสารโซเดียมเอไซด์นั้นเข้าไปยับยั้งการทำงานของไซโตโครมออกซิเดส (cytochrome oxidase) ในแบคทีเรีย ซึ่งไซโตโครมออกซิเดสเป็นเอมไซม์ตัวสุดท้ายของระบบถ่ายทอดอิเล็กตรอนในกระบวนการหายใจ ทำหน้าที่เร่งให้เกิดปฏิกิริยารีดักชั่นของออกซิเจนให้เป็นน้ำ [53] เมื่อสารโซเดียมเอไซด์เข้าไปยับยั้งการทำงานของไซโตโครมออกซิเดส ทำให้มีผลกระทบต่อหัวใจและสมองของจุลินทรีย์

การทดลองการย่อยสลายสารพาราควอทด้วยจุลินทรีย์ในดินเหนียวพบว่า ที่เวลาเริ่มต้นดินเหนียวมีปริมาณจุลินทรีย์ 1.17×10^7 โคโลนี เมื่อทำการทดลองเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง การทดลองที่ไม่เติมสารโซเดียมเอไซด์มีปริมาณจุลินทรีย์ 9.5×10^6 โคโลนี และมีการย่อยสลายของสารพาราควอทด้วยจุลินทรีย์ โดยการลดลงของสารพาราควอทคิดเป็นร้อยละ 89 สำหรับในการทดลองที่มีการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์โดยการเติมสารโซเดียมเอไซด์ มีปริมาณจุลินทรีย์ 7.5×10^6 โคโลนี และมีการย่อยสลายของสารพาราควอทด้วยจุลินทรีย์ โดยการลดลงของสารพาราควอทคิดเป็นร้อยละ 41 ซึ่งน้อยกว่าการทดลองที่ไม่เติมสารโซเดียมเอไซด์

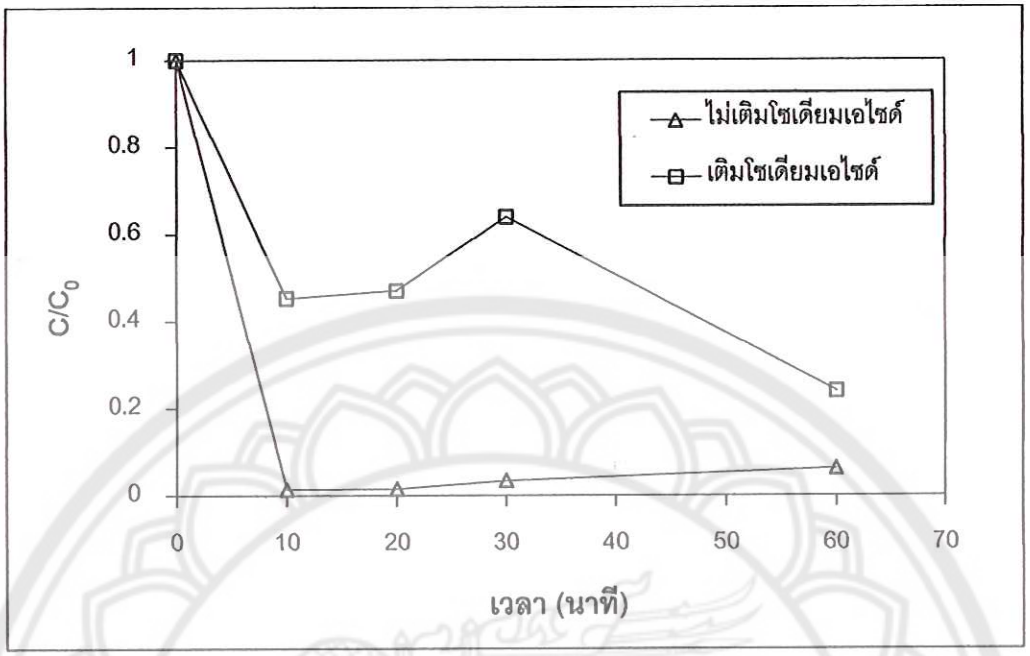
แสดงให้เห็นว่า ปริมาณจุลินทรีย์ในดินมีผลต่อการย่อยสลายสารพาราควอท จากภาพ 52 ในระยะ 60 นาทีแรก จุลินทรีย์มีการย่อยสลายสารพาราควอทหลังจากนั้นเริ่มคงที่ สังเกตได้จากค่าสัดส่วนของสารพาราควอทไม่มีการเปลี่ยนแปลงและเหลืออยู่ในสัดส่วนน้อยมาก ดังนั้นจุลินทรีย์ในดินเหนียวสามารถย่อยสลายสารพาราควอทได้ดี



ภาพ 52 ลักษณะการย่อยสลายสารพาราควอทด้วยจุลินทรีย์ในดินเหนียว

2. การย่อยสลายสารพาราควอทด้วยจุลินทรีย์ในดินร่วนปนทราย

จากการทดลองการย่อยสลายสารพาราควอทด้วยจุลินทรีย์ในดินร่วนปนทราย โดยทำการทดลองออกเป็น 2 ชุด ชุดแรกไม่เติมโซเดียมเอไซด์ลงในดิน ชุดที่ 2 เติมโซเดียมเอไซด์ลงในดิน และหาปริมาณจุลินทรีย์ในดินเช่นเดียวกันดินเหนียว พบว่าที่เวลาเริ่มต้นดินร่วนปนทรายมีปริมาณจุลินทรีย์ 1.32×10^{7} โคโลนี เมื่อทำการทดลองเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง การทดลองที่ไม่เติมสารโซเดียมเอไซด์ มีปริมาณจุลินทรีย์ 9.2×10^{6} โคโลนี และมีการย่อยสลายของสารพาราควอทด้วยจุลินทรีย์ โดยการลดลงของสารพาราควอทคิดเป็นร้อยละ 97 สำหรับการทดลองที่มีการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ โดยการเติมสารโซเดียมเอไซด์ มีปริมาณจุลินทรีย์ 5.2×10^{6} โคโลนี และมีการย่อยสลายของสารพาราควอทด้วยจุลินทรีย์ โดยการลดลงของสารพาราควอทคิดเป็นร้อยละ 54 ซึ่งน้อยกว่าการทดลองที่ไม่เติมสารโซเดียมเอไซด์ แสดงให้เห็นว่า จุลินทรีย์ในดินร่วนปนทรายมีผลต่อการย่อยสลายสารพาราควอทเห็นได้จากสารพาราควอทที่เหลืออยู่เป็นสัดส่วนน้อยมากดังภาพ 53 แสดงว่าดินร่วนปนทรายมีจุลินทรีย์ที่พร้อมย่อยสลายสารพาราควอทมาก



ภาพ 53 ลักษณะการย่อยสลายสารพาราควอทด้วยจุลินทรีย์ในดินร่วนปนทราย

จากการย่อยสลายสารพาราควอทด้วยจุลินทรีย์ในดินทั้งสองชนิด เห็นได้ว่า ปริมาณของจุลิมทรีย์มีผลต่อการย่อยสลายสารพาราควอท และภายใน 60 นาทีแรก จุลินทรีย์ภายในดินทั้งสองสามารถย่อยสลายสารพาราควอทได้อย่างรวดเร็ว โดยในดินร่วนปนทรายมีจุลินทรีย์ที่พร้อมย่อยสลายสารพาราควอทได้มากกว่าในดินเหนียว ซึ่งสังเกตจากร้อยละการลดลงของสารพาราควอทในดินทั้งสองชนิด โดยในดินเหนียวมีการลดลงของสารพาราควอทคิดเป็นร้อยละ 89 สำหรับในดินร่วนปนทรายมีการลดลงของสารพาราควอทคิดเป็นร้อยละ 97

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์สายพันธุ์ที่ชื่อว่า *Lipomyces starkeyi*. ในการย่อยสลายสารพาราควอท พบว่า จุลินทรีย์ชนิดนี้สามารถย่อยสลายสารพาราควอทได้อย่างรวดเร็วและสามารถย่อยได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจุลินทรีย์ชนิดนี้ใช้ไนโตรเจนของสารพาราควอทเป็นแหล่งอาหาร [37, 54] นั้นแสดงให้เห็นว่า ภายในดินมีจุลินทรีย์ที่**สามารถย่อยสลายสารพาราควอทได้อย่างรวดเร็ว**

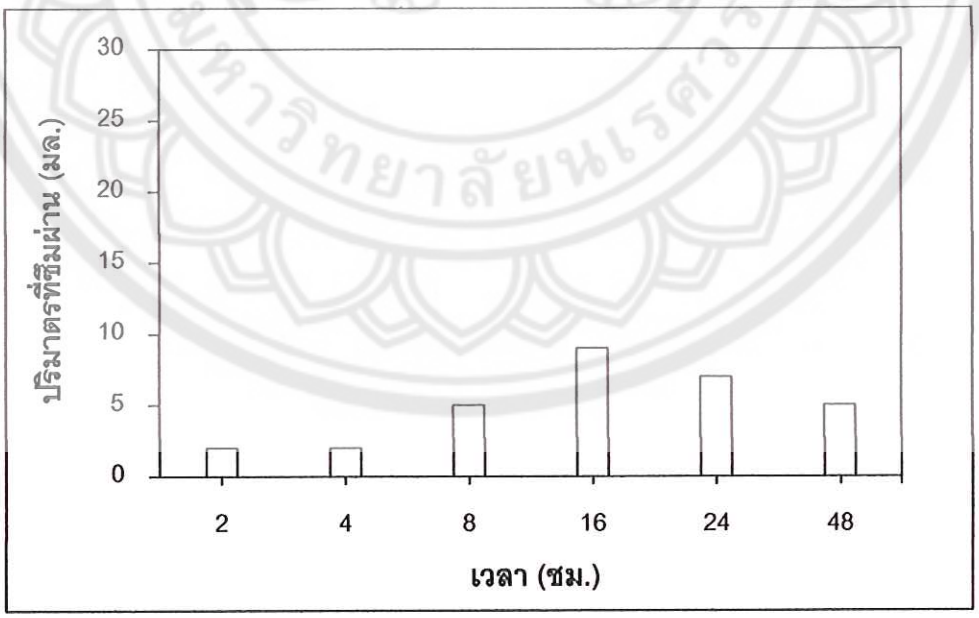
การซึมของสารพาราควอทในดิน

1. การซึมผ่านของสารพาราควอทในดินเหนียว

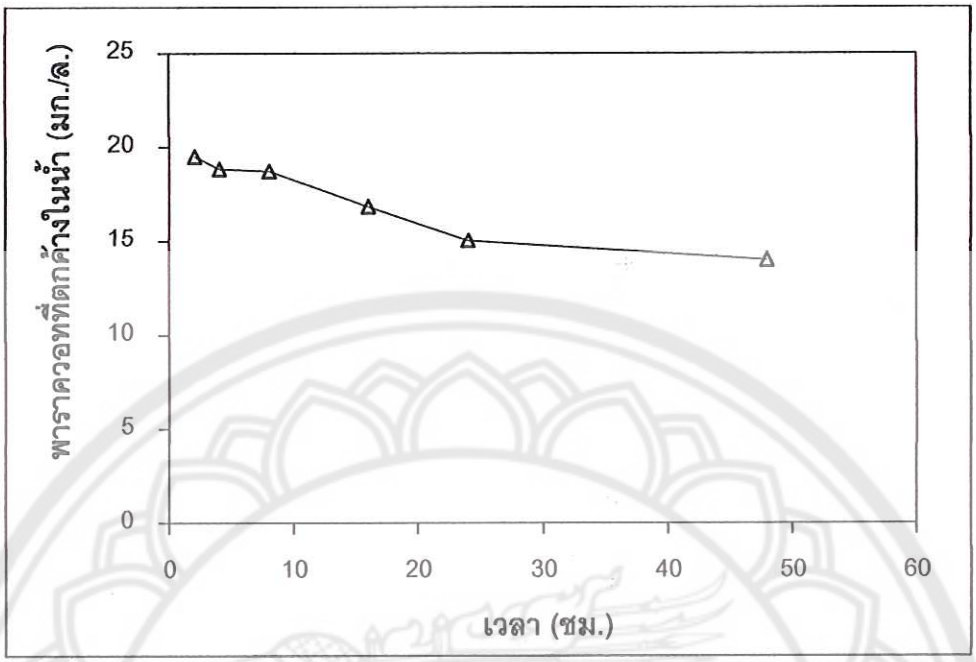
ทำการทดลองโดยจำลองการปนเปื้อนของสารพาราควอทในดินเหนียวที่ความลึก 2 เมตร ซึ่งปรับขนาดให้มีอัตราส่วน 1 เซนติเมตรต่อ 5 เซนติเมตร และให้มีฝนตกที่ความเร็วเท่ากับ 18 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ระยะเวลา 48 ชั่วโมง พบว่าปริมาตรการซึมผ่านของสารพาราควอทในชั้นดินเหนียวแต่ละช่วงเวลามีลักษณะดังภาพ 54 ซึ่งในช่วง 4 ชั่วโมงแรก มีปริมาตรของพาราควอทที่ซึมผ่านมาได้น้อย ปริมาตรที่ซึมผ่านเท่ากับ 2 มิลลิลิตร และมีปริมาตรมากถึง 16 มิลลิลิตรในช่วง 16 ชั่วโมง หลังจากนั้นปริมาตรของสารพาราควอทที่ซึมผ่านเริ่มลดลงจนคงที่

สำหรับความเข้มข้นของสารพาราควอทที่ซึมผ่านชั้นดินเหนียวแต่ละช่วงเวลามีลักษณะดังภาพ 55 และ 56 จะเห็นได้ว่า ความเข้มข้นของสารพาราควอทที่ซึมผ่านชั้นดินเหนียวมีค่าลดลงตามระยะเวลา จนถึงในช่วง 24 ชั่วโมงหลังจากนั้นจะเริ่มคงที่ โดยมวลสะสมของสารพาราควอทที่ซึมผ่านชั้นดินเหนียวมีค่าน้อยมากคิดเป็นร้อยละ 1.48 ของมวลเริ่มต้นของพาราควอท

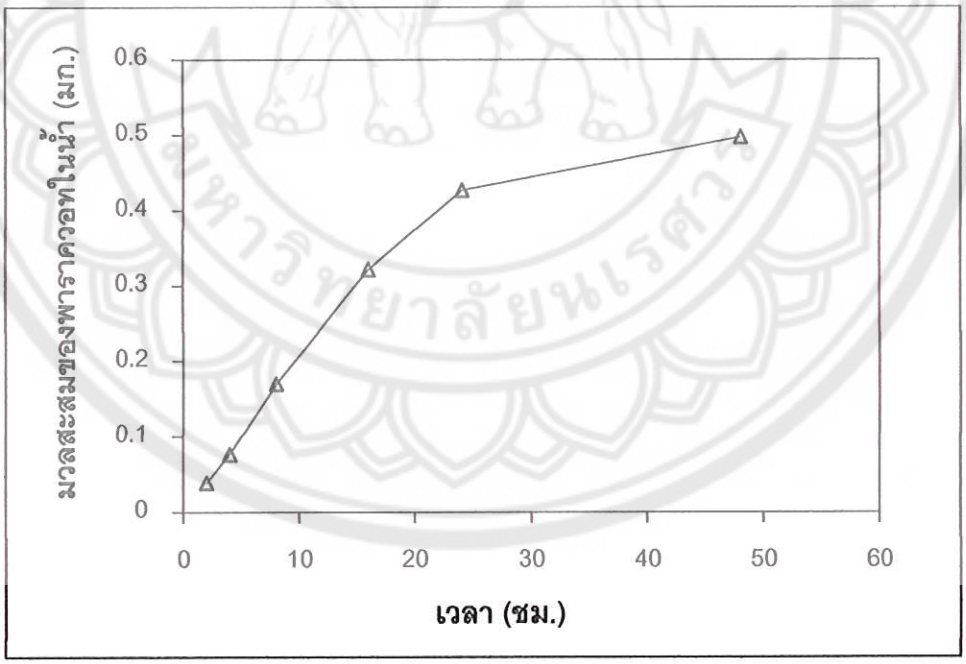
ดังนั้นในดินเหนียวที่มีความลึก 2 เมตร สารพาราควอทสามารถซึมผ่านในชั้นดินได้ปริมาตรมากที่สุด 16 มิลลิลิตรในช่วงระยะเวลา 16 ชั่วโมง และมวลของสารพาราควอทที่ซึมผ่านออกมาจะมีน้อยเนื่องจากพาราควอทถูกดูดซับอยู่ในดินเหนียว โดยมีมวลสะสมของพาราควอทในชั้นดินเหนียวคิดเป็นร้อยละ 98.52 ดังภาพ 57



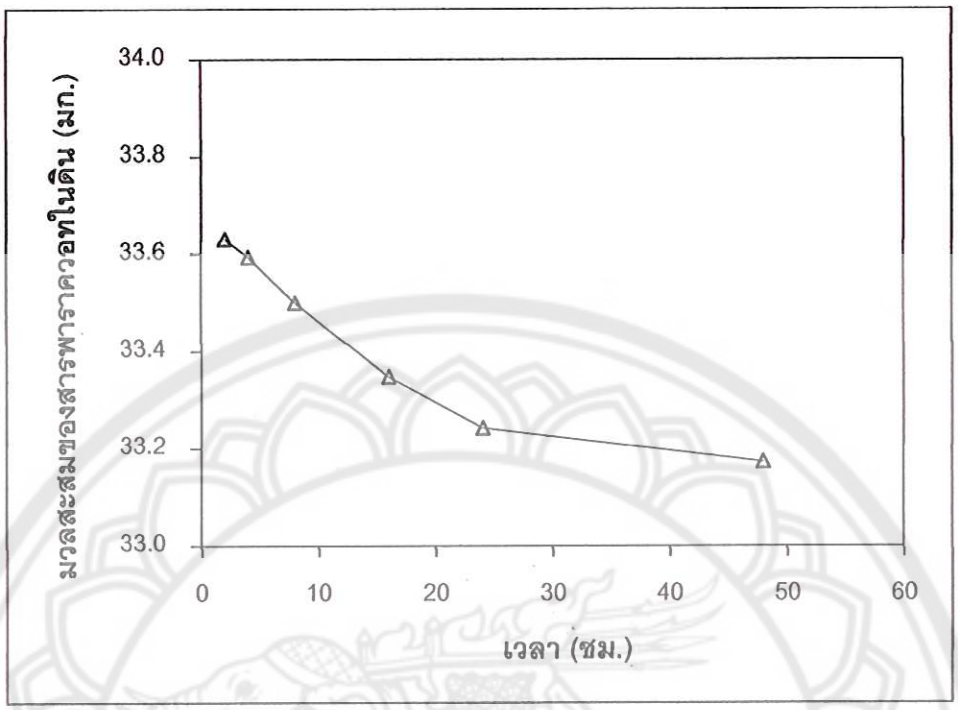
ภาพ 54 ปริมาตรของสารพาราควอทที่ซึมผ่านชั้นดินเหนียวที่เวลา 48 ชั่วโมง



ภาพ 55 ความเข้มข้นสารพาราควอทที่ซึมผ่านชั้นดินเหนียวที่เวลา 48 ชั่วโมง



ภาพ 56 มวลของสารพาราควอทที่ซึมผ่านชั้นดินเหนียวที่ระยะเวลา 48 ชั่วโมง



ภาพ 57 มวลของสารพาราควอทในดินเหนียวที่ระยะเวลา 48 ชั่วโมง

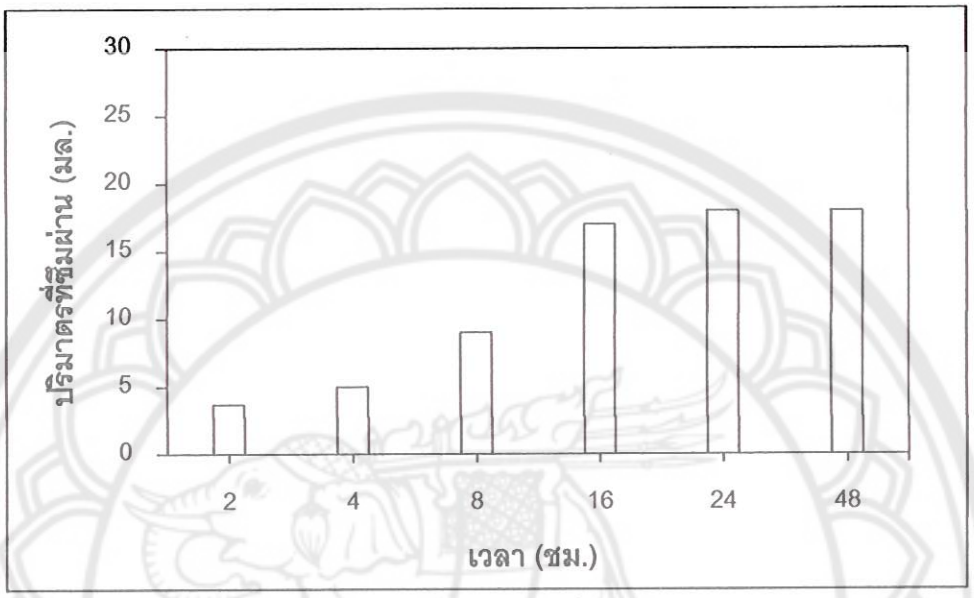
2. การซึมผ่านของสารพาราควอทในดินร่วนปนทราย

ทำการทดลองโดยจำลองการปนเปื้อนของสารพาราควอทในดินร่วนปนทรายที่ความลึก 1.18 เมตร ซึ่งปรับขนาดให้มีอัตราส่วน 1 เซนติเมตรต่อ 5 เซนติเมตร และให้มีฝนตกที่ความเร็วเท่ากับ 18 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ระยะเวลา 48 ชั่วโมง พบว่าปริมาตรซึมผ่านของสารพาราควอทในชั้นดินร่วนปนทรายแต่ละช่วงเวลาจะมีลักษณะดังภาพ 58 ซึ่งมีการซึมผ่านได้น้อยช่วง 4 ชั่วโมงแรก ในปริมาตร 3 - 5 มิลลิลิตร และมีปริมาตรมากขึ้นถึง 17 มิลลิลิตรช่วง 16 ชั่วโมงหลัง และจากนั้นปริมาตรของสารพาราควอทที่ซึมผ่านออกมาเริ่มคงที่เช่นเดียวกันกับดินเหนียว

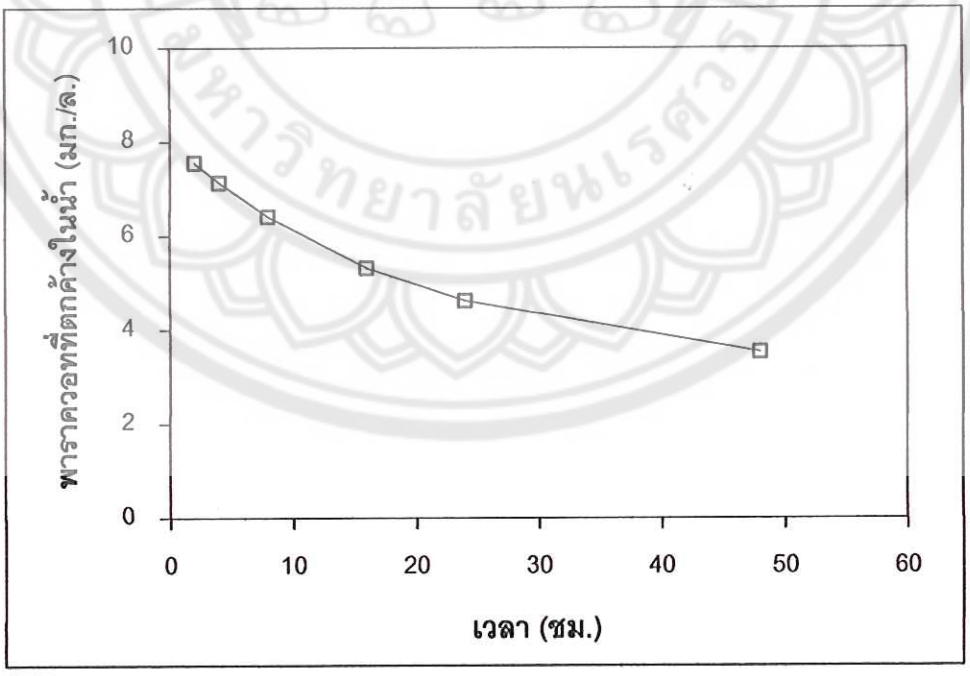
ความเข้มข้นของสารพาราควอทที่ซึมผ่านออกแต่ละช่วงเวลาจะมีลักษณะดังภาพ 59 และ 60 จะเห็นได้ว่า ความเข้มข้นของสารพาราควอทที่ซึมผ่านออกจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาจน **เริ่มคงที่ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง และมวลสะสมของสารพาราควอทที่ซึมผ่านออกมามีค่าน้อยมากคิดเป็นร้อยละ 1.07 ของมวลเริ่มต้นของสารพาราควอท**

ดังนั้นในดินร่วนปนทรายที่มีความลึก 1.18 เมตร สารพาราควอทสามารถซึมผ่านได้ในปริมาตรมากที่สุด 17 มิลลิลิตรในช่วงระยะเวลา 16 ชั่วโมง และมวลของพาราควอทที่ซึมผ่าน

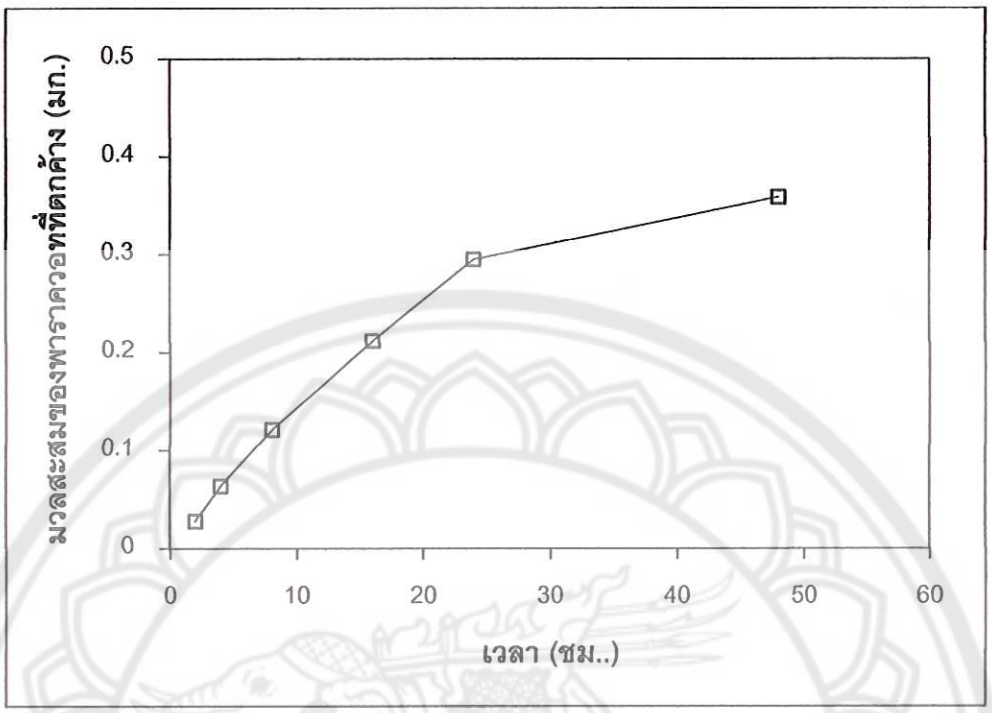
ออกมาจะมีน้อยเนื่องจากสารพาราควอทถูกดูดซับอยู่ในดินร่วนปนทรายเช่นเดียวกันกับดินเหนียว โดยมีมวลสะสมของในชั้นดินร่วนปนทรายคิดเป็นร้อยละ 99.93 ดังภาพ 61



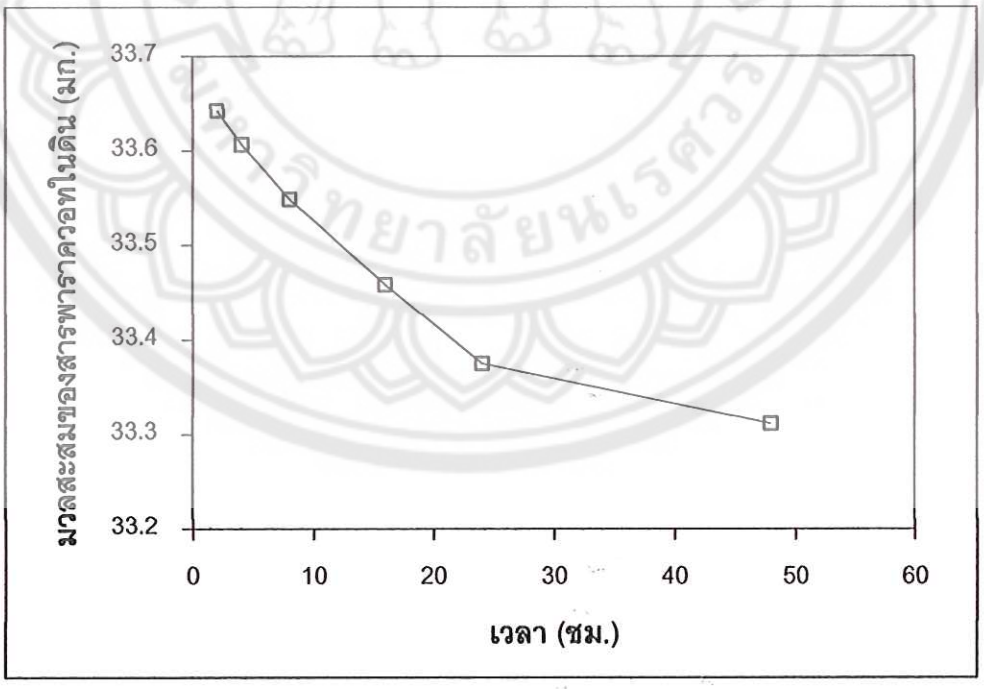
ภาพ 58 ปริมาตรของสารพาราควอทที่ซึมผ่านชั้นดินร่วนปนทรายที่เวลา 48 ชั่วโมง



ภาพ 59 ความเข้มข้นสารพาราควอทที่ซึมผ่านชั้นดินร่วนปนทรายที่เวลา 48 ชั่วโมง



ภาพ 60 มวลของสารพาราควอทที่ซึมผ่านชั้นดินร่วนปนทรายที่ระยะเวลา 48 ชั่วโมง

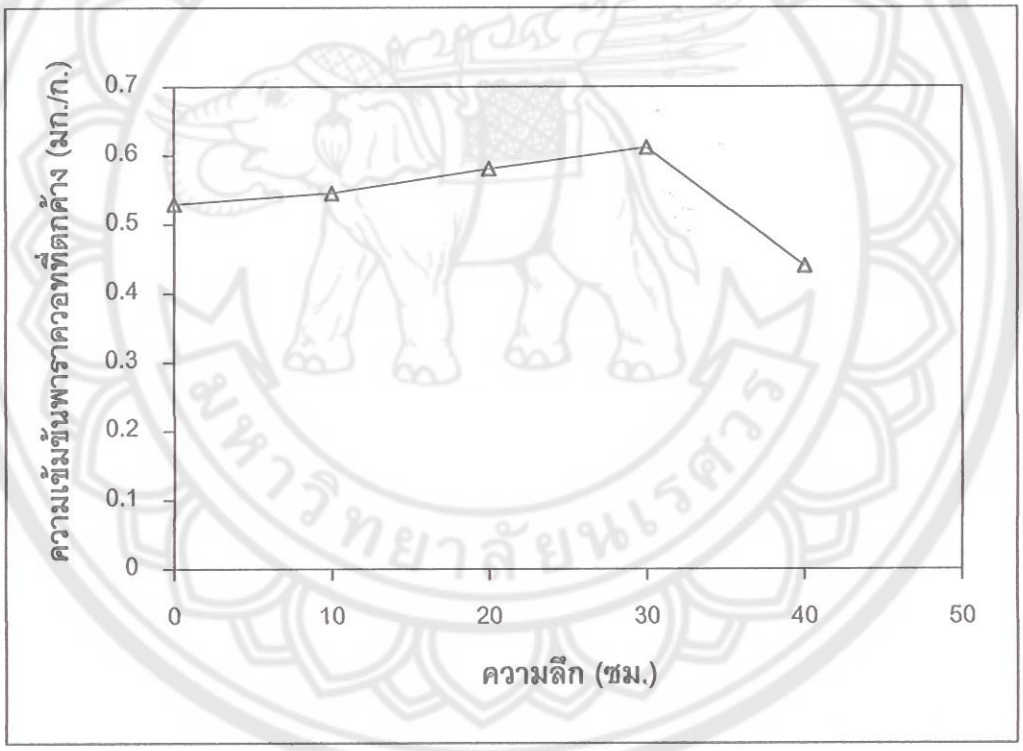


ภาพ 61 มวลของสารพาราควอทในชั้นดินร่วนปนทรายที่ระยะเวลา 48 ชั่วโมง

การตกค้างของสารพาราควอทในดิน

1. การตกค้างของสารพาราควอทในดินเหนียว

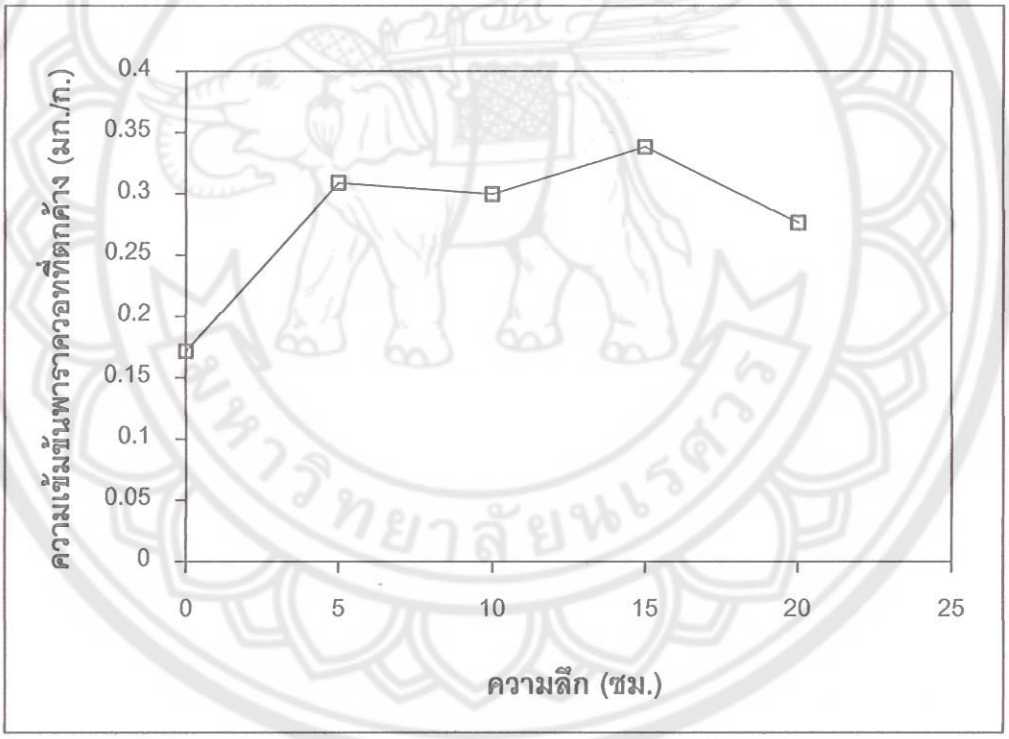
ทำการทดลองโดยการจำลองการปนเปื้อนของสารพาราควอทในดินเหนียวที่ความลึก 2 เมตร ซึ่งปรับขนาดให้มีอัตราส่วน 1 เซนติเมตรต่อ 5 เซนติเมตร และให้มีฝนตกที่ความเร็วเท่ากับ 18 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ระยะเวลา 48 ชั่วโมง จากภาพ 62 พบว่า ในชั้นดินเหนียวที่ความลึก 2 เมตร สารพาราควอทสามารถเคลื่อนที่ได้โดยการชะล้างของน้ำฝน ทำให้มีการตกค้างของสารพาราควอทในดินเป็นไปอย่างสม่ำเสมอในระดับความลึก 1.5 เมตร คิดเป็นร้อยละ 61.2 และเมื่อลึกลงไปการตกค้างของสารพาราควอทลดลง นั้นแสดงให้เห็นว่าที่ช่วงระดับความลึก 0 - 1.5 เมตร พาราควอทถูกยึดติดกับดินเหนียวด้วยกระบวนการดูดซับ ทำให้ถูกชะล้างออกจากดินเหนียวได้ต่ำ



ภาพ 62 ลักษณะการตกค้างของสารพาราควอทในดินเหนียว

2. การตกค้างของสารพาราควอทในดินร่วนปนทราย

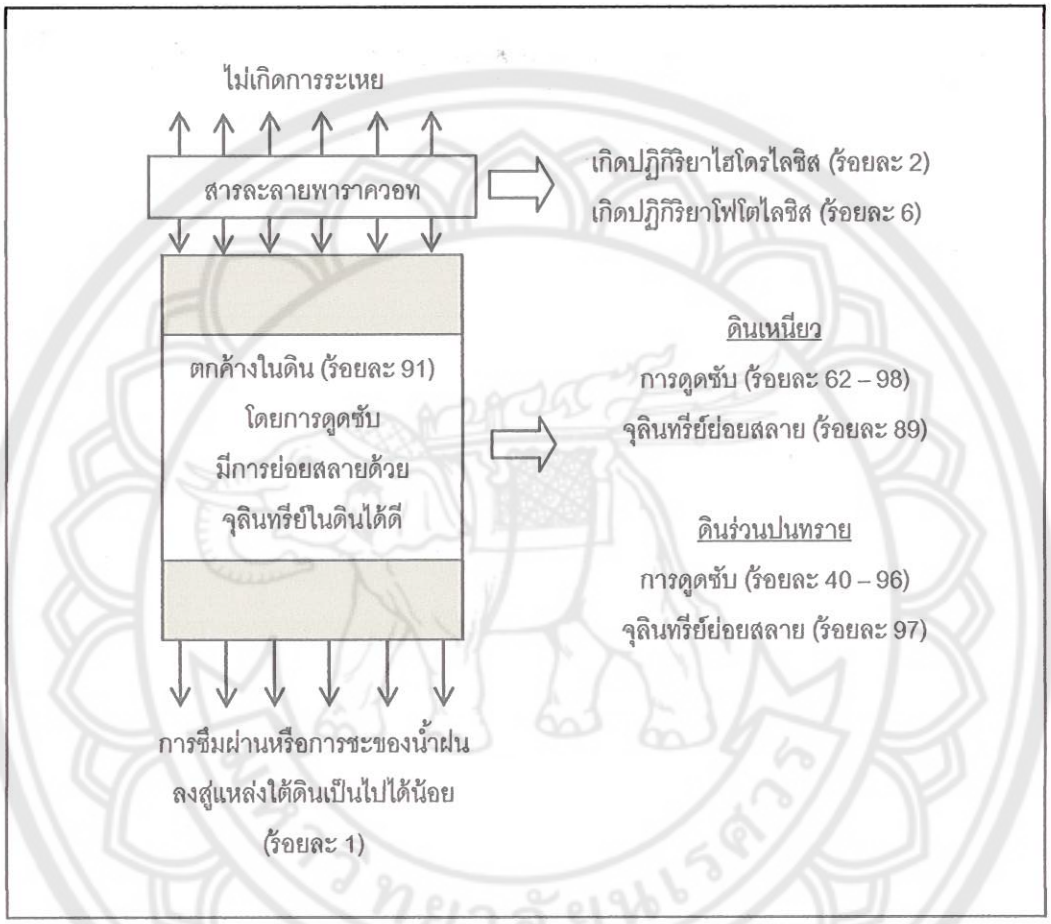
ทำการทดลองโดยการจำลองการปนเปื้อนของสารพาราควอทในดินร่วนปนทรายที่ความลึก 1.18 เมตร ซึ่งปรับขนาดให้มีอัตราส่วน 1 เซนติเมตรต่อ 5 เซนติเมตร และให้มีฝนตกที่ความเร็วเท่ากับ 18 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ระยะเวลา 48 ชั่วโมงเช่นเดียวกับดินเหนียว จากภาพ 63 พบว่า ในชั้นดินร่วนปนทรายที่มีความลึก 1.18 เมตร มีการตกค้างของสารพาราควอทในดินอยู่ในช่วงระดับความลึก 0.25 - 1.0 เมตร โดยมีการตกค้างที่มากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 33.8 นั้นแสดงให้เห็นว่า ที่ช่วงระดับความลึกของดินร่วนปนทราย 0.25 - 1.0 เมตร ซึ่งสารพาราควอทถูกยึดติดกับดินร่วนปนทรายด้วยกระบวนการดูดซับ ทำให้ถูกชะล้างออกจากดินร่วนปนทรายได้น้อยเช่นเดียวกับดินเหนียว



ภาพ 63 ลักษณะการตกค้างของสารพาราควอทในดินร่วนปนทราย

การเปลี่ยนแปลงและการกระจายตัวของสารพาราควอท

จากผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของสารพาราวอท พบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงและการกระจายตัวของสารพาราควอทในดินมีลักษณะดังภาพ 64

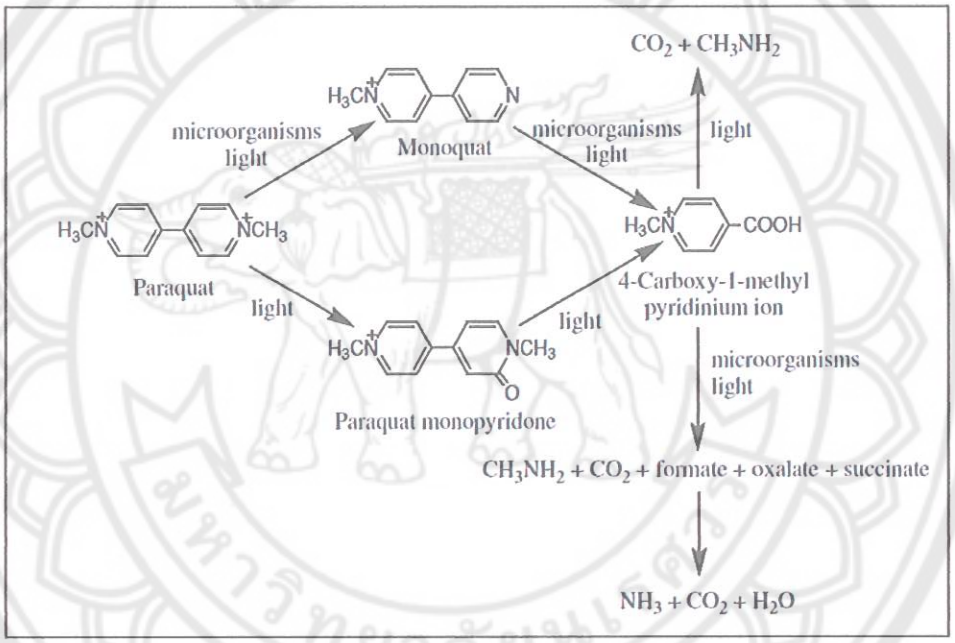


ภาพ 64 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงและการกระจายตัวของสารพาราควอทในดิน

โดยสารพาราควอทเป็นสารที่ไม่เกิดการระเหย เสถียรภาพกับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาโฟโตไลซิส นั้นคือ สารพาราควอทเกิดการย่อยสลายได้น้อยในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาโฟโตไลซิส ในทางตรงกันข้ามเป็นสารสารพาราควอทเป็นที่สามารถถูกดูดซับได้ดีในดินด้วยกระบวนการแลกเลี่ยนไอออนบวก (cation exchange) [29] และสามารถย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ในดินได้ ซึ่งจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์จำพวกแบคทีเรียและเชื้อรา ซึ่งการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ของสารพาราควอทเกิดขึ้นโดยกระบวนการ ดีเมทิลเลชั่น (demethylation) ทำให้เกิด

การแยกของวงแหวนเนื่องจากมีคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ถูกปล่อยออกมาจากวงแหวนของสารพาราควอท ดังภาพ 65 และเชื้อราที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารพาราควอทมากที่สุดได้แก่ *Lipomyces starkeyi.* ซึ่งเป็นเชื้อราที่อยู่ในดิน โดยเชื้อรานี้ใช้ไนโตรเจนของสารพาราควอทเป็นแหล่งอาหาร [37, 48, 54]

การที่สารพาราควอทสามารถดูดซับได้ดีในดินซึ่งการดูดซับเป็นการดูดซับที่แข็งแรง ทำให้การซึมผ่านของสารพาราควอทในชั้นดินน้อยและถูกชะล้างสู่แหล่งน้ำใต้ดินของสารพาราควอทเป็นไปได้น้อย



ภาพ 65 ลักษณะการย่อยสลายของสารพาราควอทในดินและน้ำ [48]