

บทที่ 2

บททวน เอกสาร

2.1 พาราควอต

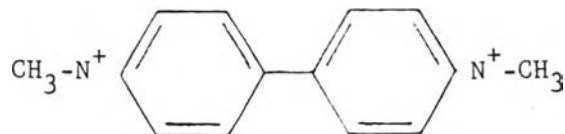
พาราควอตเป็นสารเคมีกำจัดวัชพืชที่มีความสำคัญและใช้กันแพร่หลาย โดยเฉพาะใน ส่วนอย่างทราในแถบจังหวัดภาคใต้ และไร่สับปะรด บริษัทที่นำเข้ามาเป็นประเทศแรกในประเทศไทย ได้แก่ บริษัท ไอซีไอ เอเชียติก (เกษตร) จำกัด ในปี พ.ศ. 2504 และในปัจจุบันมีโรงงาน ผลิตพาราควอตในประเทศไทย 2 แห่งคือ

1. บริษัท ไอซีไอ เอเชียติก (เกษตร) จำกัด
2. บริษัท เขียวไต่ ส่งเสริมเกษตรกรรม จำกัด

2.1.1 ลักษณะทางเคมีและกายภาพของพาราควอต

พาราควอตมีชื่อสามัญว่า 1,1'-ไดเมทิล-4,4' ไบไพริดีเนียม (1, 1' -dimethyl -4, 4' bipyridinium ion) หรือชื่อทางการค้าว่า Gramoxone (ผลิตโดย ICI Plant Protection Division ประเทศอังกฤษ) Orthoparaquat (ผลิตโดยบริษัท Chevron Chemical Company ประเทศสหรัฐอเมริกา) นอกจากนี้ยังมีชื่ออื่น ๆ อีก ได้แก่ Dextron Esgram Weedol Dexwron Herboxone Gramona (5)

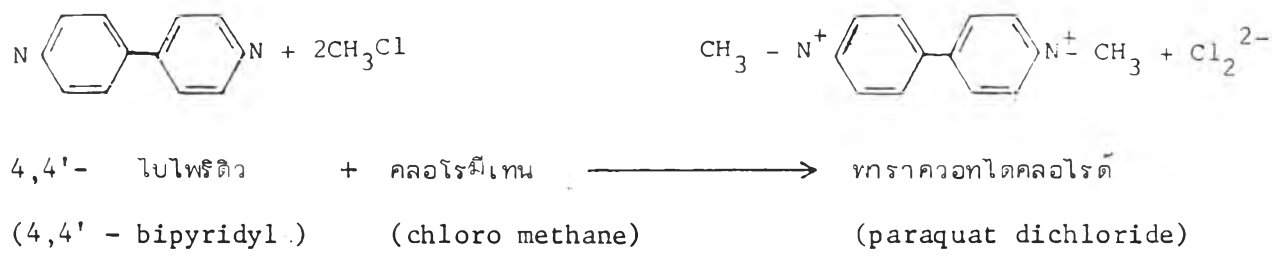
พาราควอตมีสูตรเคมีเป็น $C_{12}H_{14}N_2^+$ มีโครงสร้างดังแสดงในรูป 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของอนุกรมพาราควอต(6)

พาราควอตอยู่ในรูปของเกลือไดเมทิลซัลเฟต (dimethyl sulfate salt) ซึ่งมีสูตรเคมีเป็น $C_{12}H_{14}N_2(CH_3SO_4)_2$ มีน้ำหนักโมเลกุล 408.5 และอยู่ในรูปเกลือไดคลอไรด์ ซึ่งมีสูตรเคมีเป็น $C_{12}H_{14}N_2Cl_2$ มีน้ำหนักโมเลกุล 186.3

พาราควอตไดคลอไรด์ เกิดจากปฏิกิริยา quaternization ระหว่าง 4,4'-ไบไพริดีน (4,4'-bipyridyl) และคลอโรมีเทน (chloro methane) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ผลิตขึ้นครั้งแรกโดย Dyestuffs Division ICI Ltd. ใช้ครั้งแรกในปี พ.ศ. 2504



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาการผลิตพาราควอต

พาราควอตไดคลอไรด์บริสุทธิ์ มีคุณสมบัติเป็นผลึก ใส ไม่มีสี มีกลิ่นอ่อน ๆ คล้ายแอมโมเนีย ไม่ระเหยและมีความดันไอต่ำประมาณ 1×10^{-7} มม.ปรอท และจะละลายตัวที่อุณหภูมิ 300 °ซ มีความคงตัวในกรดหรือสารละลายที่เป็นกลาง แต่จะไม่ละลายในสารทำละลายประเภทไฮโดรคาร์บอน แนวโน้มของความสามารถในการละลาย (Solubility) โดยตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.1

พาราควอตไดคลอไรด์ที่ผลิตทางการค้าจะเป็นของเหลวสีน้ำตาล โดยทั่วไปจะมีปริมาณพาราควอตอิสระ 20-25% (5)

พาราควอตเป็นอินดิเคเตอร์ของปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันในสิ่งมีชีวิต โดยจะให้สีที่แตกต่างกันตามค่า พีเอช พาราควอตที่ถูกรีดิวซ์โดย รีดิวส์ซิ่ง เอเจนต์ ที่มีอำนาจสูง เช่น สังกะสี (zinc) หรือโซเดียม ไดโรไอไนด์ (sodium dithionite) ให้สารละลายสีฟ้า ซึ่งต่อมาได้มีการพบว่าสารสีฟ้าที่เกิดขึ้นจากการไตเตรตกับโซเดียม ไดโรไอไนด์เป็นอนุมูลอิสระ (one-electron reduction product หรือ free radical) และมีอำนาจแม่เหล็ก

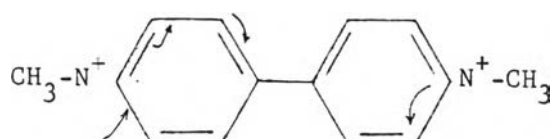
(paramagnetic)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 แนวโน้มของความสามารถในการละลาย (Solubility) ของพาราควอท ไตคลอไรด์ ที่อุณหภูมิ 20 °C (g)

ตัวทำละลาย	แนวโน้มของความสามารถในการละลาย (Solubility)
อะซีโตน	น้อยมาก
คาร์บอน ไตซัลไฟด์	ใกล้เคียงศูนย์
โตเมทริล ฟอรัมมาย	น้อย
เอทริล แอลกอฮอล์	น้อย
คีโรซีน	ใกล้เคียงศูนย์
น้ำ	เกือบทั้งหมด

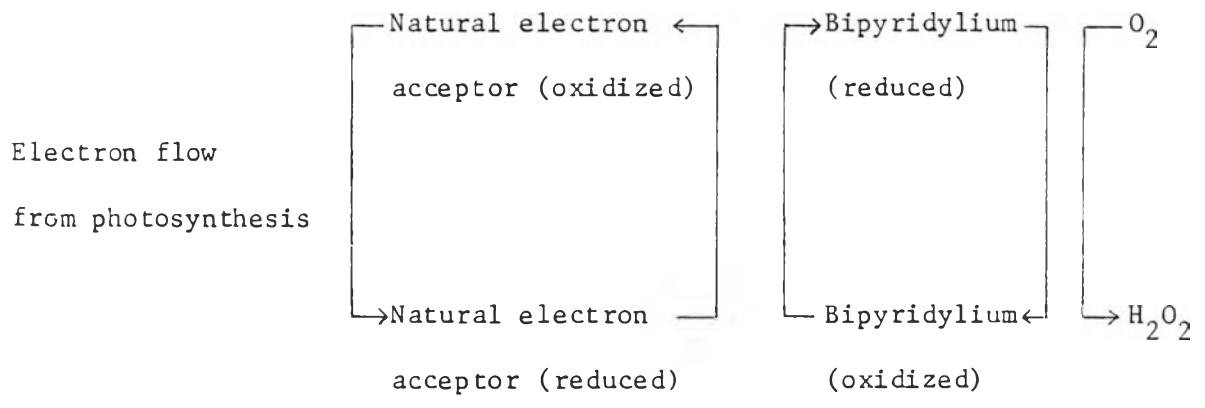
การที่พาราควอทให้อนุมูลที่เสถียร (stable radicals) เนื่องจากมีอิเล็กตรอนอยู่ในวงแหวนของไนโตรเจนเพื่อที่จะทำให้ประจุเป็นกลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 อนุมูลอิสระในพาราควอท (9)

2.1.2 คุณสมบัติในการกำจัดวัชพืชของพาราควอท

พาราควอทเป็นสารกำจัดวัชพืชโดยการสัมผัส (contact herbicide) ปฏิบัติการกำจัดวัชพืชของพาราควอท จะอยู่ในรูปของประจุบวกซึ่งจะรบกวนระบบการเคลื่อนของอิเล็กตรอนในขบวนการสังเคราะห์แสงในคลอโรพลาสต์ และในขบวนการนี้จะผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) ซึ่งเป็นพิษในการทำลายเนื้อเยื่อของพืช ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ขบวนการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) (10)

ปฏิกิริยาในการเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยพืชจะแสดงอาการภายใน 30 นาที ปฏิกิริยาในการสร้างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นี้จะเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อเกลือของ 2, 2' และ 4, 4' ไบไพริดีน (bipyridyl) อยู่ในรูปไบไพริดีเนียม (bipyridinium) และวงแหวนไพริดีน (pyridine) 2 ตัว ต้องอยู่ในระนาบเดียวกันด้วย สารกำจัดวัชพืชสังเคราะห์จะมีปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox) เกิดขึ้น เพื่อเพิ่มความเสถียรให้แก่อนุภาคโดยเกิดอนุมูลอิสระ (free radical) ให้อิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์ (reduction) ส่วนเกลือที่เป็น 2, 5' และ 3, 3' ไบไพริดีนไม่สามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้นได้ (9)

สารกำจัดวัชพืชที่เป็นไบไพริดีเนียม เช่นเดียวกับพาราควอตจะทำปฏิกิริยาได้เร็วในที่สว่างและอุณหภูมิสูง เนื่องจากเมตาบอลิซึมของพืชจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูง โดยใช้พลังงานจากการสังเคราะห์แสง

การใช้พาราควอตไดคลอไรด์ในการกำจัดวัชพืชในพื้นที่การเกษตร จะใช้วิธีการฉีดให้กระจายทั่วพื้นที่ โดยอาจจะใช้ร่วมกับ X-77 surfactant หรือ nonionic และ cationic ในปริมาณ 16-32% ของ X-77 (8) ส่วนอัตราการใช้พาราควอตในการกำจัดวัชพืชประเภทต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 อัตราการใช้ทรากวอทดิลคัลโรดีนในการกำจัดวัชพืช (8)

ประเภทของวัชพืช	ปริมาณทรากวอท (กรัม/ไร่)
หญ้า	90
Desiocation (วัชพืช)	45-135
วัชพืชทั่วไป	90-180

นอกจากทรากวอทจะใช้เป็นสารกำจัดวัชพืชบนบกแล้วในบางประเทศยังยอมให้ทรากวอทใช้เป็นสารกำจัดวัชพืชในน้ำ (11) เนื่องจากทรากวอทสามารถกำจัดวัชพืชน้ำที่ลอยหรืออยู่ใต้น้ำโดยใช้ความเข้มข้นต่ำ นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดวัชพืชที่อยู่ริมน้ำ

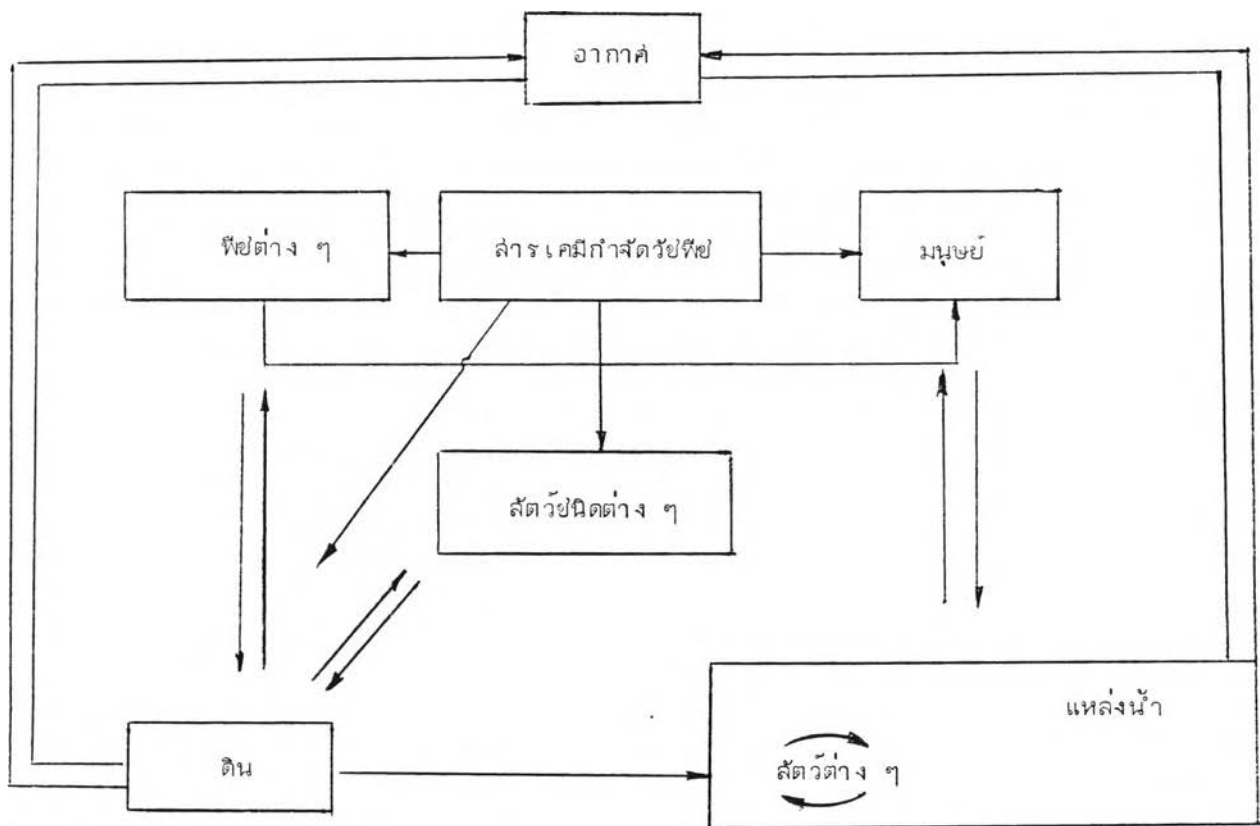
ปริมาณของทรากวอทที่ใช้กับพืชน้ำประมาณ 0.1-1.5 ส่นล. โดยน้ำหนัก ส่วนพืชที่อยู่ในน้ำประมาณ 360-720 (กรัม/ไร่) หรือ 0.18-0.36 ส่นล. โดยน้ำหนัก ทรากวอทเหมาะที่จะใช้กับบริเวณที่น้ำค่อนข้างนิ่ง ผลของทรากวอทจะไม่เพียงพอดต่อพืชน้ำหากน้ำนั้นมีอัตราการไหลปานกลางถึงสูง (11)

2.1.3 การแพร่กระจายของทรากวอทในสิ่งแวดล้อม

สารกำจัดวัชพืชมีโอกาสมุนเวียนในสภาพแวดล้อมหรือเข้าสู่สิ่งแวดล้อมในทิศทางตรงและทางอ้อม โดยการแพร่กระจายที่สำคัญ 4 ทาง ได้แก่

1. ทางอากาศ (Atmosphere)
2. ทางดิน (Lithosphere)
3. ทางน้ำ (Hydrosphere)
4. ทางสิ่งมีชีวิต (Biosphere)

และการแพร่กระจายเป็นไปตามทิศทางที่แสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ทิศทางการแพร่กระจายของสารกำจัดวัชพืช (12)

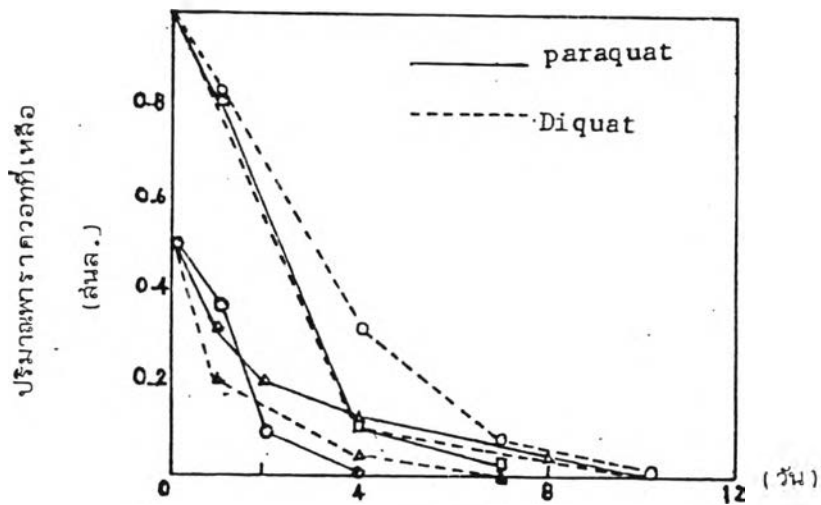
2.1.4 การแพร่กระจายของสารกำจัดวัชพืช

สารกำจัดวัชพืชประเภทโบไฟริตีเนียม โดยเฉพะพาราควอทและไดควอท จะไม่เกิดการตกค้างแต่อย่างใด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเคมีดังกล่าวไม่ได้พ่นที่พืชอาหารโดยตรง แต่เป็นการกำจัดวัชพืชที่ไม่ต้องการ (12)

2.1.4.1 พาราควอทในน้ำ

จากการศึกษา (5) พาราควอทไม่มีผลในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของน้ำทั้งค่าออกซิเจนละลายน้ำ ค่าความเป็นกรดต่าง ค่าความกระด้าง และความ เป็นต่าง

พาราควอทสามารถละลายน้ำได้ดีมาก พาราควอทที่หลงเหลือ
อยู่ในน้ำจะลดลงโดยเร็วและส่วนใหญ่จะลดต่ำกว่า 0.1 ส่วนล. ในช่วงระยะเวลาอันสั้น
และลดต่ำลงจนไม่สามารถตรวจพบภายใน 14 วัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงอัตราการลดลงของพาราควอท และไดควอท (5)

ปริมาณพาราควอทที่ลดลงอย่างรวดเร็วสืบเนื่องมาจากการดูดซับ
(absorption) ของพื้หน้า และการดูดติดผิว (adsorption) ของดินได้แก่หน้า ดังผลจาก
การทดลองในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ปริมาณพาราควอทที่เหลือในพืชน้ำและดินใต้แม่น้ำ (11)

		เวลาหลังจากการใช้พาราควอทในน้ำ					
		(วัน)					
		1	4	16	32	175	420
ปริมาณพาราควอท (ส่วนล) ในการทดลองที่ 1	น้ำ	0.01	0.12	N.D.	-	-	-
	พืชน้ำ	13.7	25.8	21.0	0.55	-	-
	ดินตะกอน	3.7	-	-	-	57.1	20.2
ปริมาณพาราควอท (ส่วนล) ในการทดลองที่ 2	น้ำ	0.37	N.D.	N.D.	N.D.	-	-
	พืชน้ำ	25.5	40.0	37.8	27.8	-	-
	ดินตะกอน	N.D.	0.97	0.28	0.32	6.6	0.96

หมายเหตุ N.D. = ตรวจไม่พบหรือปริมาณพาราควอทต่ำกว่า 0.003 ส่วนล.

จากตารางที่ 2.3 สามารถสรุปได้ว่า พืชจะดูดซับพาราควอทและสะสมไว้ในเนื้อเยื่อเมื่อเกิดการย่อยสลายขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนที่ย่อยสลายจะลงสู่ใต้แม่น้ำ ซึ่งพาราควอทจะถูกดูดติดผิว โดยดินตะกอนในน้ำทำให้ปริมาณพาราควอทในน้ำต่ำ และการดูดติดผิวโตควอทและพาราควอท ของดินตะกอนมีอำนาจค่อนข้างสูง จึงไม่เกิดการชะออก (desorption) กลับเข้าสู่ น้ำอีก และจากการศึกษา (11) ไม่พบหลักฐานเกี่ยวกับการชะออกของโตควอทและพาราควอท ฉะนั้น ปริมาณพาราควอทในน้ำจึงมีค่าใกล้เคียงกับในช่วง 47-109 วัน สำหรับพาราควอท และ 60-71 วัน สำหรับโตควอท

และจากการศึกษาชนิดและปริมาณของสารพิษในน้ำ จากแหล่งน้ำที่พบปัญหาโรคระบาดปลา ในประเทศไทยในช่วงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2525 ถึงมีนาคม พ.ศ. 2526 (3) จากตัวอย่างที่มา จากแหล่งน้ำต่าง ๆ ใน 17 จังหวัดของประเทศไทย โดยเป็นตัวอย่างน้ำ 60 ตัวอย่าง ได้พบ พาราควอทสะสมอยู่ในตัวอย่างน้ำในปริมาณระหว่าง 0.002-0.007 ส่วนล. และตัวอย่างดิน 0.78-1.52 ส่วนล.

2.1.4.2 พุทธาควอทในดิน

สารกำจัดวัชพืชที่เป็นไบโพรดิเนียม โดยเฉพะพุทธาควอทจะมีอนุภาคเป็นประจุบวก (cation) และจะถูกดูดติดผิวโดยอนุภาคของดินเหนียวไว้อย่างเหนียวแน่น ทำให้โอกาสที่จะถูกน้ำชะออกเป็นไปได้ยาก และโอกาสที่พุทธาควอทจะถูกดูดซึมโดยรากของพืชเกิดขึ้นได้น้อย การใช้พุทธาควอทในการกำจัดวัชพืชจึงใช้ก่อนการหว่านเมล็ดหรือปลูกพืชเล็กน้อย หรือ 2-3 วัน ก่อนที่พืชจะงอก นอกจากนั้นดินแต่ละชนิดยังมีความสามารถในการดูดติดผิวพุทธาควอทได้ไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ผลการทดลองการดูดติดผิวพุทธาควอทของดินชนิดต่าง ๆ (12)

ประเภทของดิน	อัตราการดูดติดผิว (มก.พุทธาควอทต่อกรัมดินเหนียว)
Sandy loam Soil	0
Grade Hydrite 10	0 - 0.3
Georgia Kaolinite	2.0 - 2.5
National Standard Bentonite	80 - 100

แม้ว่าโอกาสที่พุทธาควอทจะหลุดออกจากการดูดติดผิวของอนุภาคดินเหนียวในสภาพธรรมชาติเกิดขึ้นได้น้อย อย่างไรก็ตามพุทธาควอทที่ถูกดูดติดผิวโดยอนุภาคสารอินทรีย์แขวนลอยจะมีโอกาสหลุดออกมาได้ แต่ก็จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์และยีสต์ในดิน

2.1.4.3 พุทธาควอทในผัก ผลไม้ และน้ำมันวัว

ก. ผัก ผลไม้

ส่วนใหญ่สารกำจัดวัชพืชประเภทไบโพรดิเนียม ล่าพวกพุทธาควอท ไม่มีผลตกค้างต่อผัก ผลไม้ เนื่องจากกรใช้สารเคมี ดังกล่าวไม่ได้พ่นใส่พืชอาหาร

โดยตรง จากการวิเคราะห์ผลไม้ (13) จำพวก แอปเปิล สตรอเบอร์รี่ เชอร์รี่ แอปเปิ้ล ฝรั่ง องุ่น
ไม่พบการตกค้างของพาราควอต และจากการทดลองใช้พาราควอต 1776 กรัม ต่อไร่ (13)
พื้นที่โคนต้นและเปลือกของผลไม้ไม่พบพาราควอตตกค้าง ส่วนในธัญพืชมีธัญพืชพาราควอต
ตกค้างอยู่ 0.2-10 ส่นล. และผลในบางกรณีอาจพบ พาราควอตตกค้างในพืชน้ำมัน

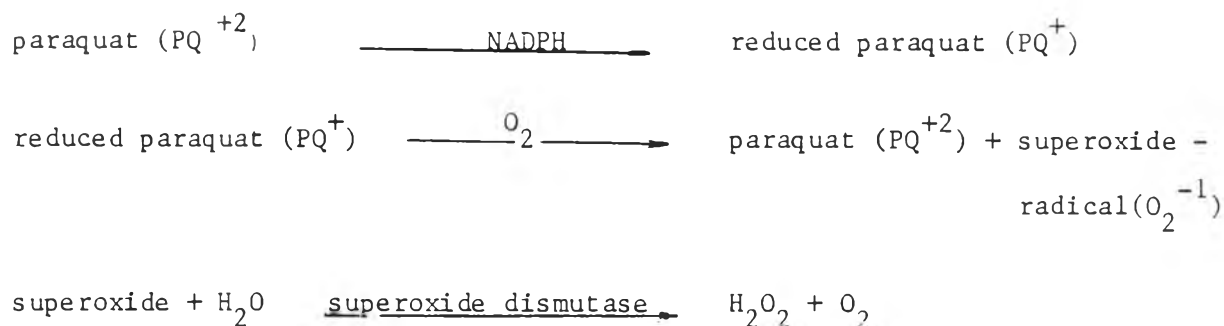
ข. น้ํานมวัว

จากการทดสอบพิษตกค้างของพาราควอตในน้ํานมวัว (14)
โดยให้พาราควอตในปริมาณ 8 มก/กก. จำนวน 1 ครั้ง แก่วัวนม และตรวจสอบปริมาณ
พาราควอตที่ออกมากับน้ํานมวัว พบว่ามีพาราควอตน้อยกว่า 0.01% และในการทดลองให้วัวกิน
อาหารที่มีสารพาราควอต 150 ส่นล. อย่างต่อเนื่องกันหลายสัปดาห์ ไม่ปรากฏว่ามีฤทธิ์ตกค้างใน
น้ํานม แต่พบพาราควอตในเนื้อเยื่อ 0.1 ส่นล. และจากการทดลอง (13) ให้พาราควอต 200-
400 ส่นล. กับวัวต่อเนื่องเป็นเวลา 1 เดือน ไม่สามารถตรวจพบพาราควอตในน้ํานมวัว

2.1.5 ผลของพาราควอต

2.1.5.1 ผลของพาราควอตต่อมนุษย์

ผลของพาราควอตที่มีต่อมนุษย์ยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด แต่พบว่า
มีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโมเลกุลที่ไหลเวียนอยู่ในเซลล์โดยฟลาโวกโพรตีน (flavoprotein)
และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในเรคดิคัลของพาราควอต (paraquat radical) ด้วยโมเลกุล
ของออกซิเจน นอกจากนี้ยังพบว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดขึ้นโดยซูเปอร์ออกไซด์
(super-oxide) ซึ่งซูเปอร์ออกไซด์นี้เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของอิเล็กตรอนเดี่ยว (Single
electron reduction) ของออกซิเจนโดยเรคดิคัลของพาราควอต เรคดิคัลของซูเปอร์
ออกไซด์นี้ว่องไวมาก สามารถแพร่กระจายผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ของ
เรคดิคัลอิสระ (free radical) ที่ยุ่งเหยิง ซึ่งช้้นนำไปสู่การทำลายเนื้อเยื่อในที่สุด
แต่ จากการทดลองในปักเตอรีและสัตว์พบว่าผลไม่ได้เกิดจากเรคดิคัลอิสระ หากเกิดจากความผิดปกติ
ของการส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังโมเลกุลของออกซิเจน (5) และในรูปที่ 2.7 แสดงกลไกของ
ผลจากพาราควอตที่มีต่อมนุษย์และสัตว์



รูปที่ 2.7 แสดงกลไกของผลจากพาราควอทที่มีต่อมนุษย์และสัตว์ (6)

ผลของพาราควอททำให้เกิดความผิดปกติในระบบปัสสาวะ แขนและ
 หนักที่สังจากได้รับเข้าสู่ร่างกาย และติดตามด้วยอาการระบบหายใจล้มเหลว ไตวาย ปอดถูก
 ทำลาย บวม และตกเลือด นอกจากนั้นจะมีการสร้างเนื้อเยื่อที่ผิดปกติในปอดที่เรียกว่า "paraquat
 lung" ภายใน 2-3 สัปดาห์ ซึ่งอาการนี้ทำให้การให้ออกซิเจนแก่คนไข้เป็นไปได้ยากและ
 อันตราย (5)

พาราควอทเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์ได้ 2 ทางคือ 1) โดยการ
 สัมผัสทางผิวหนัง ซึ่งมักพบในผู้ใช้สารนี้เป็นประจำ ไร่ ไต้แก๊ว ชาวไร่ ชาวสวน และพนักงาน
 ที่ต้องทำงานใกล้ชิดกับสารนี้ 2) โดยการกินหรือสูดเข้าไปในร่างกายในปริมาณที่มากพอ
 หรือในปริมาณประมาณ 4-5 มิลลิกรัม ต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม(6) และจากสถิติทางการแพทย์(6)
 ผู้ป่วยที่มีระดับความเข้มข้นของพาราควอทในเลือดภายใน 48 ชั่วโมงแรกมากกว่า 0.1-0.2 ส่นล.
 คนไข้มักจะตาย และหากความเข้มข้นของพาราควอทในเลือดไม่มากกว่า 2.0, 0.6, 0.16,
 0.1 ส่นล. ในเวลา 4, 6, 10, 16 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับอาจมีชีวิตอยู่ได้

พาราควอทยังมีผลต่อพันธุกรรม(6) โดยสามารถยับยั้งการ
 สังเคราะห์ดีเอ็นเอ (DNA) และไซคลิก นิวคลีโอไทด์ (cyclic nucleotide) และยังมีผล
 ต่อสารพันธุกรรมในเซลล์เม็ดเลือดของมนุษย์ โดยทำให้เกิดช่องว่างบนโครมาติดทั้งสองเส้น
 การหักของโครมาติดหนึ่งเส้น การเกิดโครโมโซมมีสองชิ้นโครโมโซม และการหักของโครโมโซม

2.1.5.2 ผลของพาราควอตต่อสัตว์บก

จากการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับผลของพาราควอตที่มีต่อสัตว์บก(6) พบว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญ 3 แห่งคือ ตับ ไต และปอด Weed Science Society of America รายงานค่า LD₅₀ ที่ให้หนู (rat) มีค่า 120 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม และมีผู้ทดลองให้หนูขาว (mice) ตัวผู้กินพาราควอต 4 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม เป็นเวลา 5 วัน ไม่พบความผิดปกติในระยะโดยของขบวนการสร้างอสุจิ (spermatogenesis)

จากรายงานของ Worthing(6) พบว่าจากการผสมพาราควอตลงในอาหารปริมาณ 34 และ 170 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม แก่สุนัขและหนู ตามลำดับ ให้กินเป็นเวลานาน 2 ปี ผลปรากฏว่าพาราควอตไม่มีผลต่อสัตว์ทั้งสองชนิด ซึ่งสอดคล้องกับ Weed Science Society of America (1979) ที่ได้รายงานเกี่ยวกับการผสมพาราควอตในอาหารปริมาณ 170 ส่นล. ให้กระต่ายกินเป็นเวลา 2 ปี ผลปรากฏว่าไม่เกิดความผิดปกติ และผสมพาราควอตลงในอาหารความเข้มข้น 34 ส่นล. ให้สุนัขกินเป็นเวลานานถึง 27 เดือน ก็ไม่ปรากฏความผิดปกติเช่นกัน

2.1.5.3 ผลของพาราควอตต่อปลาและสัตว์น้ำ

ผลของพาราควอตต่อสัตว์น้ำที่มีการศึกษากันในรูปของพิษ
เขียนพจน์ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ความเป็นพิษเฉียบพลัน (LC₅₀) ของพืชรากวอดต่อสัตว์น้ำ(๕)

ชนิด (Species)	พิษเฉียบพลัน (LC ₅₀)				อ้างอิง
	24 ชม	48 ชม	72 ชม	92 ชม	
1. Cladocera					Sanders and Cope
<i>Simocephalus serrulatus</i>	-	4.0	-	-	(1966)
<i>Daphnia pules</i>	-	3.7	-	-	
2. Copepod รวม 2 ชนิด	10	5.3	-	-	Nagvi et al
Calanoid : <i>Diaptomus</i> sp					(1980)
90%					
Cyclopoid : <i>Eucyclops</i> sp. 10 %					
3. Crayfish :					Leung et al.
<i>Procambarus clarkii</i>					(1980)
ระยะ juvenile	-	5.2	2.4	1.4	
ระยะ adult	-	88	17	-	
4. <i>Macrobrachium</i>	-	-	0.045	0.037	Utayopas (1983)
<i>rosenbergii</i>					
5. Rainbow trout ;					Carter and
<i>Salmo gairdneri</i>	110	62	-	32	Williams (1968)
Brown trout :					
<i>S. trutta harlequins</i>	-	-	-	25	
<i>Rasbora heteromorpha</i>					
6. <i>Rasbora trilineata</i>	-	-	-	6.99	Kam-Wing and
<i>Pocilia reticulata</i>	-	-	-	11.5	Furtado (1977)
7. <i>Gambusia affinis</i>	-	-	-	604	Johnson (1978)

ตารางที่ 2.5 (ต่อ)

ชนิด	พิษ เหยียบพลาตัน (LC ₅₀)				อ้างอิง
	24 ชม	48 ชม	72 ชม	92 ชม	
8. Coho salmon :					Lorz et al.
<i>Oncorhynchus Kisutch</i>	-	-	-	76	(1979)
9. Grass carp :					Tooby et al.
<i>Ctenopharyngodon idella</i>	116	106	-	66	(1980)
10. Carp :					Hashimoto and
<i>Cyprinus carpio</i>	-	40	-	-	Nishiuchi (1981)
Goldfish :					
<i>Cerassius suratus</i>	-	10	-	-	
Medaka :					
<i>Oryzias latipes</i>	-	7	-	-	
Bond loach :					
<i>Misgurnus</i>	-	35	-	-	
<i>anguillicaudatus</i>					
11. <i>Clarias batrachus</i>	-	0.0082	-	-	จารุวรรณ สิมศิริ (2525)
12. <i>Poeoilia reticulata</i>	-	-	-	2.65	เปี่ยมศักดิ์ เมนะแก้วต
<i>Tilapia nilotica</i>	-	-	-	7.6	และคณะ (2526)
<i>Ophicephalus striatus</i>	-	-	10	-	

และจากการศึกษาพิษเฉียบพลันและพิษแบบกึ่งเรื้อรังของพาราควอตต่อปลา mullet (*Mugil cephalus*) (5) พบว่าหลังจาก 24 ชั่วโมง ปลาที่เลี้ยงในน้ำที่มีพาราควอตความเข้มข้น 10 ส่วนล้าน มีอาการผิวหนังอักเสบ (inflammation) มีเมือกมาก นอกจากนั้นบริเวณผิวหนังจะบวมขึ้นเนื่องจากมีเลือดมาคั่งกันมาในบริเวณนั้น เหงือกถูกทำลายมีเมือกปกคลุมมาก ส่วนของตับและไตตกละเอียด ส่วนผลจากพิษแบบกึ่งเรื้อรังที่ความเข้มข้น 1 ส่วนล้าน เป็นเวลานาน 15 วัน ทำให้เกิดการเสื่อมของตับชนิดมีน้ำเพิ่มมากขึ้น (hydropic degeneration) เซลล์ที่บุท่อไตวาย (necrosis) และเกิด hyaline degenerate ขึ้นเมือกที่ปกคลุมทางเดินอาหาร สึกกร่อน (mucosal erosion) ซีเหงือก (gill filament) หนาขึ้นบริเวณผิวหนังที่บุมี secondary lamella ถูกทำลาย และที่ปลายซีเหงือกมีการขยายออกไปพร้อมที่ฐานมีเนื้อเยื่อเกี่ยวพันเกิดขึ้น

Butle (11) รายงานว่าไม่ปรากฏผลของพาราควอตต่อตัวอ่อนของกุ้งและปลาในน้ำที่มีพาราควอต 1 ส่วนล้าน แต่จะมีผลต่อการลดจำนวนของแพลงตอนพืช (phytoplankton) และ Way et al. (11) พบว่า การใช้พาราควอตไม่มีผลต่อสัตว์น้ำที่ไม่มีกระดูกสันหลัง

ปริมาณพาราควอตที่เหลือในเนื้อเยื่อของปลาและสัตว์น้ำมีผลเกี่ยวเนื่องมาจากความเข้มข้นของพาราควอตในแหล่งน้ำที่ปลาอาศัยอยู่ (11) โดย

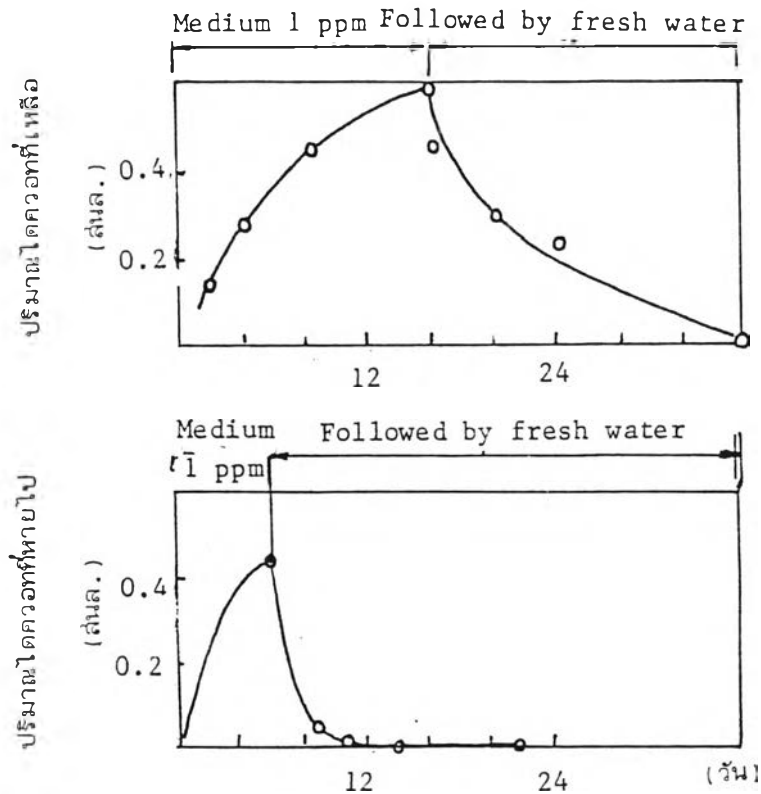
1. ความเข้มข้นของพาราควอตในเนื้อเยื่อของปลาจะมีค่าประมาณเท่ากับความเข้มข้นของพาราควอตในน้ำ และจะไม่มีการสะสมในปริมาณที่สูงกว่าความเข้มข้นของพาราควอตในแหล่งน้ำ
2. พาราควอตจะไม่สะสมอย่างมีนัยที่สำคัญในเนื้อเยื่อของปลา แต่จะสะสมในผิวหนัง เหงือก และอวัยวะภายในของปลา ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ปริมาณโดควอทและพาราควอทที่พบในเนื้อเยื่อของปลาเทราท์ (Trout)
 เพื่อให้พาราควอทและโดควอทในปริมาณ 1 ส่นล. เป็นเวลา 7 วัน (11)

ส่วนของอวัยวะที่วิเคราะห์ (Tissue analysed)	ปริมาณที่เหลืออยู่ (ส่นล.)
เนื้อเยื่อ	N.D.
ลำไส้	0.4
ตับและไต	0.8-0.4
เหงือก	0.1-1.3
ม้ามและหัวใจ	N.D.
ผิวหนัง	0.1-0.2

หมายเหตุ N.D. = ตรวจไม่พบ หรือปริมาณต่ำกว่า 0.001 ส่นล.

3. หากพาราควอทและโดควอทที่ตกค้างในน้ำลดลง พาราควอทและโดควอทที่อยู่ในเนื้อเยื่อของปลาจะลดลงด้วย โดยจากการทดลองกับปลา Rainbow trout ที่ได้รับโดควอท 1 ส่นล. เป็นเวลา 16 วัน จะพบปริมาณโดควอทในเนื้อเยื่อ 0.5-0.6 ส่นล. แต่จะค่อย ๆ ลดลงเมื่อปล่อยปลานั้นกลับลงสู่แม่น้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การสะสมและการลดลงของไดควอท (diaquat) ของปลา Rainbow trout ที่มีความเข้มข้นของสารละลายไดควอท 1 ส่วนล. (11)

และจากการทดลอง Beasley et al (11) พบว่า พาราควอทไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อระบบโภชนาการ และหลังจากช่วงเวลาหนึ่งจะไม่พบในสัตว์น้ำ

2.1.5.4 ผลของพาราควอทต่อการเกษตรและการเลี้ยงสัตว์

พาราควอทที่มีอยู่ในน้ำจะถูกดูดติดผิว โดยอนุภาคของดินและโคลนอย่างรวดเร็ว และจะไม่ย้อนกลับออกมาสู่น้ำกับน้ำ สิ่งนี้ทำให้สามารถใช้น้ำที่มีพาราควอทในการเกษตรได้โดยไม่มีผลต่อรากพืช เนื่องจากพาราควอทจะถูกดูดติดผิวโดยดินจนหมดก่อนที่จะทำอันตรายต่อรากพืช

จากการทดลองใช้ไดควอทซึ่งเป็นสารกำจัดวัชพืชในตระกูลเดียวกับพาราควอทกับพืชชนิดต่าง ๆ ได้สรุปผลการทดลองไว้ในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ผลการทดลองใช้น้ำที่มีไดควอท (diquat) ในการปลูกพืชชนิดต่าง ๆ (11)

ชนิดของพืช (crop)	อัตราที่ใช้ในการทดลอง (ส่วนล.) (Rate of application (ppm))	จำนวนการทดลอง (No. of application)	ช่วงเวลาระหว่างการให้สารเคมีครั้งสุดท้าย และการเก็บเกี่ยว (วัน) (Interval between last application and harvest (day))	ปริมาณที่หลงเหลือ (ส่วนล.) (Residue found (ppm))
มะเขือเทศ (mato fruit)	0.1	1	51	N.D.
	0.1	2	37	N.D.
	0.5	1	36	N.D.
	0.5	2	23	N.D.
พืชหัวน้ำตาล (ลำต้น) (gar beet) (tops)	0.1	1	96	0.04
	0.1	2	82	0.07
	0.5	1	81	0.04
	0.5	2	68	0.05
พืชหัวน้ำตาล (ราก) (gar beet) (roots)	ทดลอง เช่นเดียวกับลำต้น			N.D.
	0.1	1	1	0.06
	0.1	1	9	0.06
	0.5	1	1	0.18

หมายเหตุ N.D. = ตรวจไม่พบหรือปริมาณต่ำกว่า 0.01 ส่วนล.

ด้านการใช้น้ำจากแหล่งน้ำที่มีการกำจัดฝน้ำโดยใช้พาราควอท เป็นแหล่งน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์ จากการทดลองให้น้ำที่มีพาราควอท 20 ส่นล. ซึ่งพาราควอท ในปริมาณดังกล่าว เป็นปริมาณใกล้เคียงกับในแหล่งน้ำที่ใช้พาราควอทในการกำจัดฝน้ำ เป็นน้ำดื่มแก้ และเป็นเวลา 1 เดือนต่อเนื่องกัน ไม่ปรากฏอาการป่วยใด ๆ ในฝูงแกะที่ทดลอง (11)

2.1.5.5 ผลของพาราควอทต่อจุลินทรีย์ในดิน

สารกำจัดวัชพืชพาราควอทมีผลต่อจุลินทรีย์ในดินน้อย (9) จากการวัดปริมาณการทำงานของจุลินทรีย์ในดินโดยการวัดการหายใจหรือการถ่ายเทอากาศในดิน (Soil respiration) และการผลิตไนโตรดและไนเตรต พบว่าความเข้มข้นของโดควอทและ พาราควอทในดินสูงถึง 1000 ส่นล. มีผลต่อจุลินทรีย์ในดินอย่างไม่มีนัยที่สำคัญ แต่ที่ความเข้มข้น 10,000 ส่นล. จะมีผลต่อระบบหายใจ อย่างไรก็ตามไม่ปรากฏว่าปริมาณของจุลินทรีย์ในดินลดลง

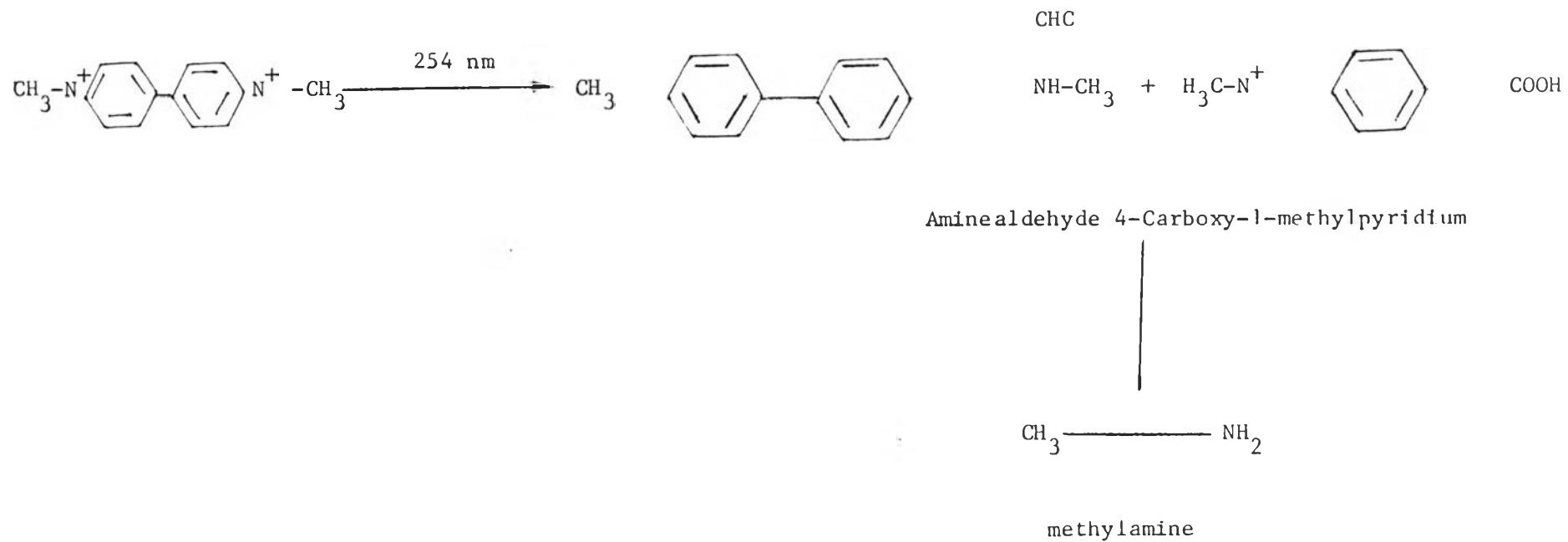
2.1.6 การสลายตัวของพาราควอท

การสลายตัวของพาราควอทสามารถเกิดขึ้นโดยวิธีทาง 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. การเปลี่ยนแปลงโดยสิ่งไม่มีชีวิต
2. การเปลี่ยนแปลงโดยสิ่งมีชีวิต

2.1.6.1 การเปลี่ยนแปลงโดยสิ่งไม่มีชีวิต

พาราควอทเป็นสารที่สลายตัวหากอุณหภูมิสูงถึง 300 องศาเซลเซียส (20) และสามารถสลายตัวเมื่อถูกแสงอุตราไวโอเลต (UV) (10) ซึ่งมีอยู่ในแสงแดด การสลายตัวจะเกิดขึ้นมากน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแสงและระยะเวลาที่ได้รับ เมื่อพื่ออยู่ใน ช่วงที่มีแสงมากพาราควอทที่ติดค้างบนใบไม้สามารถสลายตัวได้ถึง 2 ใน 3 ในระยะเวลา 3 สัปดาห์ การเปลี่ยนแปลงของพาราควอทเป็นไปตามรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9

การเปลี่ยนแปลงของพลาควอทเมื่อได้รับแสงอุตราไวโอเลตจะมีการเปลี่ยนแปลงดังรูป (10)

อนุภาคของดินเหนียวที่มีสารอินทรีย์ต่าง ๆ อยู่มากจะดูดซึม พหุราควอทได้ดี และมีโอกาสที่จะถูกน้ำชะออกมา น้อยกว่าพหุราควอทที่ดูดซึมไว้ในสารอินทรีย์ Calderbank (15) พบว่า เนื่องจากพหุราควอทอออนมีประจุบวก จึงสามารถถูกดูดติดโดยอนุภาค ของดินซึ่ง เป็นประจุลบและจะทำให้เกิดการสลายตัวโดยแสงหรือจุลินทรีย์ในดิน ขณะที่ Pasi (8) พบว่าพหุราควอทสามารถจะดูดซึมโดยสารซักฟอกที่มีประจุลบ (anionic surfactants) และ ได้เสนอแนะการกำจัดพหุราควอทโดยการผสมกับสารซักฟอกแล้วฝังในส่วนผสมของดินเหนียว

Coats และ Funderburk (13) ได้มีการศึกษาถึงการดูดติดผิวพหุราควอทในดิน Sandy loam soil, Grade Hydrite 10, Georgia Kaolinite และ National Standard Bentonite พบว่ามีค่าเป็น 0, 0.03, 2.0-2.5, 80-100 มิลลิกรัม/กรัม แสดงให้เห็นว่า เบนโทไนท์ (Bentonite) มีศักยภาพในการกำจัดพหุราควอทออกจากน้ำได้มากที่สุด ในดิน 4 ประเภทที่ศึกษา

จากการศึกษาของ Zarin (16) พบว่าสามารถกำจัดพหุราควอทในน้ำโดยใช้ activated carbon หรือแร่ดินเหนียว โดยได้คำนวณว่าคาร์บอน 7 มิลลิกรัม หรือเบนโทไนท์ 1 มิลลิกรัม สามารถลดความเข้มข้นของพหุราควอทที่มีอยู่ 0.05 ส่นล. ลงเหลือความเข้มข้น 0.005 ส่นล. ในปริมาณน้ำ 1 ลม.ตม.

2.1.6.2 การเปลี่ยนแปลงโดยสิ่งมีชีวิต

สิ่งมีชีวิตโดยทั่วไปสามารถเปลี่ยนรูปของพหุราควอทให้อยู่ในรูป ที่มีพิษน้อยลงได้ (14) โดยสิ่งมีชีวิตเหล่านี้จะสร้างน้ำย่อยและขบวนการต่าง ๆ ได้มีรายงาน (11) ว่าจุลินทรีย์ *Limpomyces starkeyi* และ *Neocosmopora vasinfecta* สามารถย่อย พหุราควอทในดินได้ และจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายพหุราควอทได้ดีที่สุด คือ ยีสต์ *Limpomyces starkeyi* ซึ่งพบในดินทั่วไป โดยยีสต์ชนิดนี้สามารถย่อยพหุราควอทที่ความเข้มข้น 20 ส่นล. หมดภายใน 2-3 วัน โดยใช้ไนโตรเจนจากพหุราควอทเป็นแหล่งพลังงาน

หีบน้ำสามารถดูดซับพหุราควอทในแหล่งน้ำใต้ (11) นอกจากนี้ พหุราควอทยังสามารถดูดติดโดยดินตะกอนและอนุภาคของดินที่แขวนลอยในน้ำได้ พหุราควอทจะ สลายตัวได้อย่างรวดเร็วในน้ำ แต่พบว่ายังคงตกค้างในดินตะกอนและหีบน้ำในแหล่งน้ำภายใน

ระยะเวลา 48 ชั่วโมง และยังพบปริมาณพืชรากาอินเนื้อเยื่อของปลาหลังจากใส่พืชรากาอินลงในแหล่งน้ำเพียง 1 วัน

2.2 แร่ดินเหนียว

แร่ดินเหนียว (clay mineral) เป็นแร่ที่พบในหินตะกอน และการสลายตัวของแร่ภูเขาไฟ (volcanic ash) และดินเบนโทไนต์ สัตอยู่ในกลุ่มแร่ซิลิเกตที่เป็นแผ่น (phyllosilicate) อยู่ในสภาพของคอลลอยด์ที่มีขนาดเล็กกว่า 2 ไมครอน และเป็นผลึกแร่ดินเหนียวแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ (17)

1. ดินเหนียวซิลิเกต (Silicate Clays) ได้แก่แร่ที่มีอลูมิเนียมและซิลิเกตเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ มีโครงสร้างเป็นแผ่นซ้อน ๆ กัน
2. ดินเหนียวที่มีส่วนผลสมของเหล็กและอลูมิเนียม (Iron and aluminum Clays) ได้แก่ แร่ดินเหนียวที่มีเหล็กและอลูมิเนียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบ

แร่ดินเหนียวซิลิเกต (Silicate clays) แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่

1. กลุ่มแร่ดินขาว (Kaolinite group) เป็นดินเหนียวแบบ 1:1 คือมีแผ่นอลูมินาและแผ่นซิลิกาอย่างละแผ่นประกอบเป็นหนึ่งหน่วย
2. กลุ่มสเมคไทต์ (Smectite or Montmorillonite) เป็นดินเหนียวแบบ 2:1 คือ มีแผ่นซิลิกา 2 แผ่นต่อแผ่นอลูมินา 1 แผ่นใน 1 หน่วย
3. กลุ่มแร่ไมกา (Illite or Hydrated mica) สัตว์แบบ 2:1 เช่นเดียวกับสเมคไทต์ (Smectite) แต่ในโครงสร้างมีโปตัสเซียมผลสมอยู่ทำให้ขยายตัวได้น้อย

แร่ดินเหนียวที่มีส่วนประกอบของเหล็กและอลูมิเนียม (Iron and aluminum clays) เป็นดินเหนียวประเภทที่มีเหล็กและอลูมิเนียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบที่เรียกว่า sesqui oxide มีสูตรเป็น $R_2O_3 \cdot H_2O$ R - หมายถึงเหล็กหรืออลูมิเนียม แร่ประเภทนี้จะปรากฏสีแดงหรือสีเหลืองของเหล็กอย่างเห็นได้ชัด

2.2.1 คุณสมบัติที่สำคัญของแร่ดินเหนียวซิลิเกต (Silicate clays)

แร่ดินเหนียวซิลิเกต มีคุณสมบัติแตกต่างจากแร่ดินเหนียวที่มีเหล็กและอลูมิเนียมในด้านคุณสมบัติการขยายตัว การหดตัว การดูดซับไอออน โดยแร่ดินเหนียวที่มีเหล็กและอลูมิเนียม

ผลมอยุ่จะมีการขยายตัว และหดตัว ตลอดจนความเหนียวน้อยกว่าแร่ดินเหนียวซิลิเกต อำนวย
ในการดูดซับไอออนน้อยกว่า แต่ความคงทนต่อการชะล้างมากกว่าแร่ดินเหนียวซิลิเกต

แต่อย่างไรก็ตามในกลุ่มของแร่ดินเหนียวซิลิเกต เองยังมีคุณสมบัติแตกต่างกัน
ในแต่ละกลุ่ม ทั้งนี้เนื่องมาจากการจัดตัวซึ่งแตกต่างกันโดยแร่ดินเหนียวที่มีการจัดตัวประเภท
2:1 มีการขยายตัวและอำนาจการดูดติดมากกว่าประเภท 1:1 ตารางที่ 2.8 แสดงประเภท
โครงสร้างที่แตกต่างกันของดินเหนียวซิลิเกตประเภทต่าง ๆ

ตารางที่ 2.8 ประเภทของ โครงสร้างในดินซิลิเกตชนิดต่าง ๆ (18)

แร่	สูตรเคมี	ชนิดของ Lattice
Chlorite	$Mg_6(Si_4O_{10})(OH)_6$	2:2
Illite	Variable	2:1
Kaolinite	$Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$	1:1
Montmorillonite	$M_8(Si_4O_{10})_3(OH)_{10}$	2:1
Saponite	$M_6(Si_4O_{10})_2(OH)_4$	2:1
Vermiculite	Variable	2:1

2.2.1.1 รูปร่างและขนาดของแร่ดินเหนียวซิลิเกต

ขนาดของอนุภาคแร่ดินเหนียวซิลิเกต (Silicate Clays)
มีขนาดตั้งแต่ 0.01 ถึง 5.0 ไมครอน แปรตามชนิดและลักษณะองค์ประกอบทางแร่
(mineralogical organization) รูปร่างของแร่ดินเหนียวซิลิเกตจะมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ
(flake-like) ประกอบด้วยผลึกของแร่ที่มีโครงสร้างแบน เช่น แร่ไมกา และอนุภาคของ
ดินเหนียว บางชนิดจะอยู่ในรูปผลึกหกเหลี่ยมมองเห็นเป็นมุมอย่างชัดเจน

2.2.1.2 พื้นที่ผิว (Surface area)

อนุภาคของแร่ดินเหนียวซิลิเกต มีพื้นที่ผิวจำเพาะต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักหรือ specific surface สูงมาก เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กและเป็นแผ่นแบนและบาง พื้นที่ผิวจะแตกต่างกันไปตามรูปร่างลักษณะ ในอนุภาคที่มีน้ำหนักเท่ากัน อนุภาคที่เป็นรูปทรงกลมจะมีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด ส่วนอนุภาคที่เป็นรูปแบบหรือแผ่นจะมีพื้นที่ผิวมากที่สุด

นอกจากเหนือจากพื้นที่ผิวภายนอก (external surface) ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น อนุภาคของแร่ดินซิลิเกตบางชนิดยังมีพื้นที่ผิวภายใน (internal surface) ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวที่อยู่ในหลืบระหว่างแผ่นผลึกของแร่ดินซิลิเกต ที่ซ้อนทับกันเป็นอนุภาคหรือ micelle ของดินเหนียว

พื้นที่ผิวของดินเหนียวโดย เฉพาะในแร่ดินเหนียวซิลิเกตจะมีผลเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาของดินทั้งทางด้านเคมีและฟิสิกส์ (18) และตารางที่ 2.9 แสดงพื้นที่ผิวในดินเหนียวชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 2.9 พื้นที่ผิวของดินเหนียวประเภทต่าง ๆ (18)

แร่	สูตรเคมี	พื้นที่ผิว(ตารางเมตร/กรัม)
Chlorite	$Mg_6(Si_4O_{10})(OH)_6$	25 - 40
Illite	Variable	65 - 100
Kaolinite	$Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$	7 - 30
Montmorillonite	$M_8(Si_4O_{10})_3(OH)_{10}$	700 - 800
Saponite	$M_6(Si_4O_{10})_3(OH)_4$	700 - 800
Vermiculite	Variable	700 - 800

2.1.1.3 ความเหนียว (cohesion) และอ่อนตัว (plasticity)

ความเหนียวหมายถึง ความสามารถในการเกาะยึดกันระหว่างอนุภาคของดินเหนียวและความอ่อนนุ่มบีบขึ้นให้ เป็นรูปต่าง ๆ และคงสภาพเช่นนั้นอยู่ได้ เมื่อดินมีความชื้นที่เหมาะสม คุณสมบัติด้านความเหนียวและความอ่อนตัวนี้จะเกี่ยวข้องกับพื้นที่ผิวของดินเหนียว โดยดินเหนียวที่มีความเหนียวและความอ่อนตัวสูงจะเป็นดินเหนียวที่มีพื้นที่ผิวมากที่สุดจึงมีโอกาสดูดยึดอนุภาคของน้ำไว้ในผิวได้มาก ทำให้การยึดเกาะกันเหนียวมากขึ้นด้วย

2.1.1.4 การขยายตัว (swelling) และการหดตัว (shrinking)

อนุภาคดินเหนียวที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นผลึกที่ซ้อนทับกันเป็น clay micelle จะมีช่องหรือหลืบระหว่างแผ่นค่อนข้างกว้างและการยึดเกาะไม่เหนียวแน่นนัก ทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกเข้าไปได้ง่าย ขึ้นระหว่างอนุภาคจึงกว้างขึ้นเรื่อย ๆ เป็นผลทำให้อนุภาคดินเหนียวที่เปียกน้ำมีการพองตัวและขยายตัวมากขึ้น และจะหดตัวเมื่อเผาไล่น้ำที่อยู่ภายในอนุภาคนั้นให้หมดไป

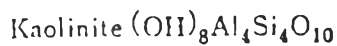
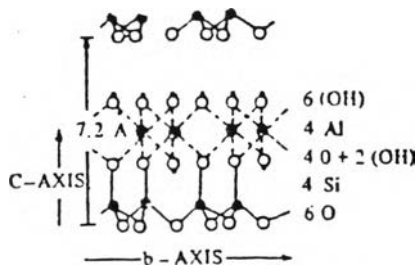
2.1.1.5 ประจุลบและการดูดยึดไอออนบวก

ตามปกติอนุภาคดินเหนียวในธรรมชาติจะมีประจุลบ และสามารถดึงดูดไอออนบวก ทำให้เกิดสภาพของประจุ 2 ชั้น หรือ ionic double layer โดยอนุภาคของดินเหนียวเป็นอนุโมลลบที่มีกลุ่มไอออนบวกล้อมอยู่ ไอออนบวกเหล่านี้จะถูกดูดติดอยู่ที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวและสามารถถูกแทนที่โดยไอออนบวกชนิดอื่น หรือที่เรียกว่า (exchangable cation)

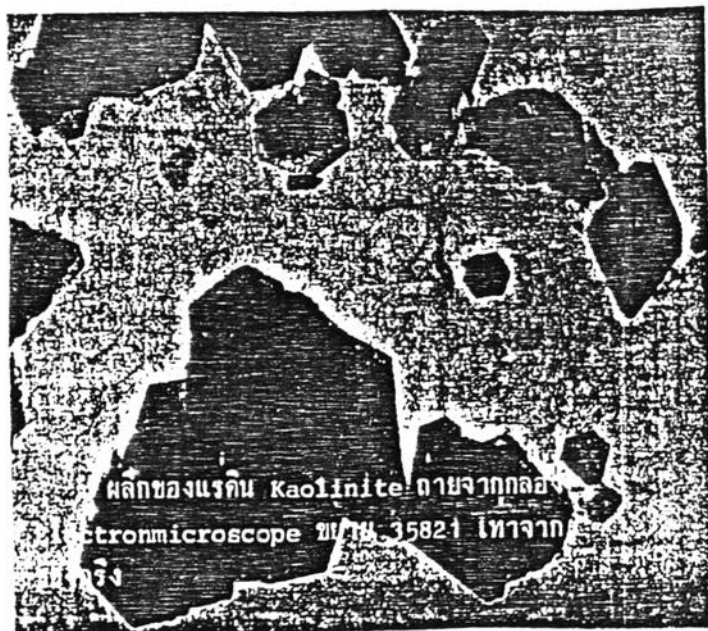
ในดินทั่วไปจะสามารถดูดติดผิวอนุโมลไฮโดรเจน (H^+) อนุโมลแคลเซียม (Ca^{++}) อนุโมลแมกนีเซียม (Mg^{++}) อนุโมลโพแทสเซียม (K^+) และอนุโมลโซเดียม (Na^+) ในปริมาณสัดส่วนมากน้อยลดลงตามลำดับ

2.2.1.6 โครงสร้างและชนิดของดินเหนียวซิลิเกต

1. แร่ดินขาว (Kaolinite) มีโครงสร้างทางแร่เป็นแผ่นซิลิกาหนึ่งแผ่นประกบกับแผ่นอลูมินัม โดยที่ซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) จะเกาะออกซิเจนตัวเดียวกันในค้ำที่ประกบเข้าหากัน ทำให้แผ่นทั้งสองประสานกันเป็นผลึก รูปร่างของผลึกเป็นรูปหกเหลี่ยม มีขอบชัดเจน มีสูตรเคมีเป็น $Si_4Al_4O_{10}(OH)_8$ ผลึกของแร่ดินขาวจะมีช่องว่าง (internal layer) กว้างประมาณ 7 อังสตรอม (Å) และถูกยึดไว้ด้วยพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ที่เกิดขึ้นระหว่างออกซิเจนอะตอมของแผ่นซิลิกาและไฮโดรเจนอะตอมของแผ่นอลูมินา ทำให้โมเลกุลของน้ำและประจุบวกต่าง ๆ ไม่สามารถแทรกเข้าไปภายในได้ ทำให้อนุภาคดินขาวมีการขยายตัวและหดตัว ตลอดจนความสามารถในการดูดซับอนุมลไว้ภายในของอนุภาค (internal surface) อยู่ในเกณฑ์ต่ำ



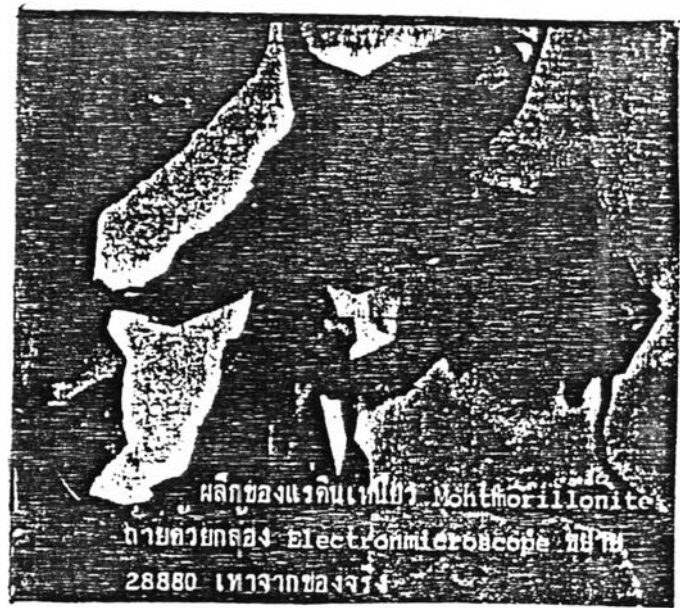
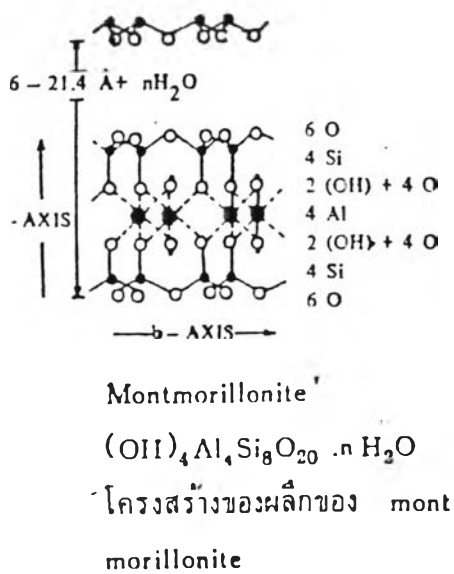
โครงสร้างของผลึกของ kaolinite



รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างของแร่ดินขาว (Kaolinite) และในรูปที่ 2.11 แสดงผลึกของดินขาว (Kaolinite) ถ่ายจากกล้อง electromioroscope (18)

2. แร่มอนท์โมริลโลไนท์ (Montmorillonite)

ดินมอนท์โมริลโลไนท์ มีโครงสร้างประกอบด้วยแผ่นซิลิกา สองแผ่นและแผ่นอลูมินาหนึ่งแผ่นลอคอยู่ระหว่างกลางของแผ่นซิลิกา และเกาะยึดออกซิเจนร่วมกัน ผลึกจะเชื่อมต่อกันในแนวระดับเป็นชั้น ๆ มีสูตรทั่วไปเป็น $Si_8Al_4O_{20}(OH)_4$ - pyrophyllite มีความกว้างระหว่างชั้น 9-21 อังสตรอม และสามารถขยายตัวได้เนื่องจากไม่มีพันธะไฮโดรเจน มีเพียง oxygen linkage ซึ่งเป็นแรงที่เบาบางมาก ทำให้อนุภาคประจุบวกต่าง ๆ สามารถแทรกเข้าได้ง่าย อนุภาคดินชนิดนี้จึงมีความสามารถในการดูดซับสูง และเกิดการแตกสลายของผลึกได้ง่าย จึงทำให้อนุภาคที่พบมีขนาดเล็กคือมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 1.0 ไมครอน ทำให้พื้นที่จำเพาะสูงตามไปด้วย



รูปที่ 2.12 แสดง โครงสร้างของแร่มอนท์โมริลโลไนท์ และรูปที่ 2.13 แสดงรูปถ่ายผลึกของดินมอนท์โมริลโลไนท์จากกล้อง electromicroscope (18)

3. แร้อิลไลต์ (Illite)

แร้อิลไลต์มีความคล้ายคลึงกับแร่มอนทโมริลโลไนท์มาก แตกต่างกันที่ซิลิกา อะตอมในแผ่นซิลิกา บางส่วนถูกแทนที่โดยอลูมิเนียมและประจุที่เหลือค้างอยู่ เนื่องจากการแทนที่กันจะถูกดูดยึดขัดเขยให้โป่งสลายเชื่อมอะตอม ทำให้ช่องว่างระหว่างผลึกที่ซ้อนทับกันมีระยะคงที่เท่ากับ 10 อังสตรอม และมีสูตรเป็น $K_{1.33} (Si_{6.66} Al_{1.33}) (Al_4 O_{20} (OH)_4$ จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงทำให้อิลไลต์ (Illite) มีพื้นที่ผิวภายในน้อยมาก แต่มากกว่าแร่ดินขาวจึงทำให้คุณสมบัติต่าง ๆ อยู่ระหว่างแร่มอนทโมริลโลไนท์ และแร่ดินขาว

2.2.2 คุณสมบัติที่สำคัญของแร่มอนทโมริลโลไนท์

แร่มอนทโมริลโลไนท์เป็นแร่ที่มีรูปผลึก ระบบโมโนคลินิก เกิดเป็นผลึกแบบเกล็ด (flaky crystal) มีสูตรเคมีเป็น $Al_4Si_8O_{20}(OH)_4$ มีส่วนของ SiO_2 66.7%, Al_2O_3 28.3%, H_2O 5% แร่มอนทโมริลโลไนท์อาจอยู่ในรูปแคลเซียมมอนทโมริลโลไนท์ (Ca-montmorillonite : $Ca 0.5 (Mg Al_3) Si_8O_{20}(OH)_4 \cdot H_2O$) หรือเป็นโซเดียมมอนทโมริลโลไนท์ (Na-montmorillonite : $Na 0.5 (MgAl_3) Si_8O_{20} (OH)_4 \cdot H_2O$) ทั้งนี้ เพราะแร่อัลคาไลมีการแทนที่กันได้ เรียกว่า การแลกเปลี่ยนไอออนที่เป็นเบส (base exchange) โดยโซเดียมเข้าไปแทนที่แคลเซียม นอกจากนี้ในโครงสร้างของแร่มอนทโมริลโลไนท์ ยังมีการแทนที่อลูมิเนียมด้วยแมกนีเซียม

แร่มอนทโมริลโลไนท์มีลักษณะที่แปรผันมาก เนื่องจากองค์ประกอบที่แปรผันไป โดยเฉพาะน้ำ ค่าดัชนีหักเหของแสงจะเปลี่ยนแปลงในพิสัย 1.50 ถึง 1.64 แร่ชนิดนี้ถ้าดูหน้าแล้วจะสั้นเหมือนลู่ ลักษณะเหมือนวันเมื่อแช่น้ำ ลักษณะโดยทั่วไปของแร่มอนทโมริลโลไนท์ แสดงไว้ในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 แสดงลักษณะโดยทั่วไปของแร่มอนทโมริลโลไนท์ (17)

ชื่อแร่	มอนทโมริลโลไนท์ (montmorillonite)
สีและสีผง	ปกติสีเทา สีเทาปนเขียว แต่อาจจะสีขาวเหลือง เขียวปนเหลือง ข้มพูหรือน้ำตาล สีผงสีขาว
ความถ่วงจำเพาะ	2.0-2.7 ลดลงเมื่อน้ำเพิ่ม
ระบบผลึกและรูปร่าง	โมนอคลินิก (monoclinic) ปกติพบเป็นกลุ่มแน่นกับ และจะมองไม่เห็นผลึกเดี่ยว ๆ ชัดเจน แม้จะดูด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน
รอยแตกตามธรรมชาติ	1 ทาง ไม่เห็นโดยวิธีปกติ
ค่าดัชนีหักเหของแสง	1.5 - 1.64
ความแวววาวและลักษณะอื่น ๆ	ความแวววาวเป็นแบบไข (greasy) หรือด้านดูดซับน้ำ แล้วขยายตัว เมื่อเปียกน้ำจับดูลื่นมือเหมือนลู่

จากการศึกษา (19) พบว่า โมเลกุลของน้ำที่แทรกอยู่ระหว่างหน่วยเซลล์ หรือเข้าไปอยู่ในหน่วยเซลล์จะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของแร่มอนทโมริลโลไนท์ กรณีแร่ โขไต้ยมมอนทโมริลโลไนท์ พบว่าสามารถขยายตัวตามแนวแกนซี¹ ของหน่วยเซลล์ได้มาก หน่วยเซลล์ ที่มีขนาดเล็กประมาณ 1 อังสตรอม อาจจะขยายตัวได้ถึง 40 อังสตรอม ดินที่มีโขไต้ยมมอนทโมริลโลไนท์ปนอยู่จึงมีการพองตัวสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับดินที่มีแคลเซียมมอนทโมริลโลไนท์ ซึ่งมีการขยายตัวได้มากที่สุดเพียง 18 อังสตรอม

¹ แกนซี แกนของผลึกแร่ที่อยู่ในแนวตั้ง

2.2.3 การดูดติดผิวของดิน

การดูดติดผิวในดิน หมายถึงการดูดยึดไว้ในระดับโมเลกุล (molecular attachment) ระหว่างสารละลายชนิดที่หน่วยแสดงตน (unit of identify) (17) ของสารชนิดที่ท่อน้ำที่เป็นตัวดูดติดผิวใหญ่กว่าหน่วยแสดงตนของสารชนิดที่เป็นตัวถูกดูดติดผิว (adsorbate) เป็นอย่างมาก และในขณะที่เกิดการดูดติดผิวนั้น หน่วยแสดงตนของตัวถูกดูดติดผิวจะดึงดูดโมเลกุลของน้ำที่เกาะอยู่บนผิวในลักษณะของเยื่อบาง ๆ ที่เรียกว่า น้ำเยื่อ (film water) เช่นเดียวกับการที่มีประจุไฟฟ้าของดินดึงดูดไอออนให้เกาะอยู่กับผิวของดิน

ความสามารถในการดูดติดผิวของดินจะแปรตามพื้นที่ผิวที่มากขึ้นหรือพื้นที่ผิวจำเพาะโดยปกติของอนุภาคของดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง นอกจากนั้นประจุไฟฟ้าของอนุภาคดินจะไม่สมดุลโดยมักจะแสดงความเป็นประจุลบมากกว่าประจุบวก ทำให้ดินเกิดการดูดติดผิวโดยโมเลกุลควบคู่กับการดึงดูดจากประจุไฟฟ้า

2.2.4 การแลกเปลี่ยนประจุหรือไอออน

Hendricks และ Fry (19) พบว่าแร่ดินเหนียวและอิวมัลในดินมีคุณสมบัติเฉพาะที่สำคัญคือมีจำนวนประจุลบ (electronegative charge) (21) ซึ่งสำหรับกรณีแร่ดินเหนียวนั้นประจุลบมีกำเนิดได้หลายทาง เช่น จากบริเวณขอบของผลึก (exposed crystal edges) ที่แตกหัก หรือจากกระบวนการที่เรียกว่า isomorphous substitution ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดในหัวข้อต่อไป ส่วนกรณีของอิวมัลประจุลบส่วนใหญ่มาจากการแตกตัว (dissociation) ของกลุ่มคาร์บอกซิล และกลุ่มฟีนอลิก

ประจุที่ปรากฏอยู่ในแร่ดินเหนียว มีสมบัติในการดูดติดผิว ประจุหรือไอออนบวก เช่น NH^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , H^+ และไอออนบวกอื่น ๆ แต่ไม่ดูดติดผิวสารที่มีไอออนลบ เช่น NO_3^- , SO_3^- และไอออนลบอื่น ๆ ความสามารถในการดูดติดประจุแตกต่างกันตามชนิดของแร่ดินเหนียว แร่ดินเหนียวแต่ละชนิด จะมีความสามารถในการดูดติดผิวไม่เท่ากัน และเนื่องมาจากการที่ไอออนบวกที่ถูกดูดติดสามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวกที่อยู่ภายนอกของโมเลกุลของดินเหนียวได้ จึงอาจเปรียบเทียบความสามารถในการดูดติดผิวไอออนบวกในรูปของความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ หรือไอออน (cation exchange capacity, C.E.C.)

ตามปกติความสามารถในการดูดติดผิวหรือแลกเปลี่ยนประจุหรือไอออน จะมีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีในดิน อันได้แก่ การดูดสารอาหารต่าง ๆ ในดิน และมีผลต่อการรักษาความเป็นกรดต่างในดิน เช่น เมื่อดินได้รับสารที่ก่อให้เกิดกรดขึ้น ดินจะดูดยึดไฮโดรเจนไอออน (H^+) ทำให้ไฮโดรเจนในสารละลายมีน้อยเป็นเหตุให้ความเป็นกรดในดินไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งเรียกคุณสมบัติดังกล่าวนี้ว่า *buffer capacity*

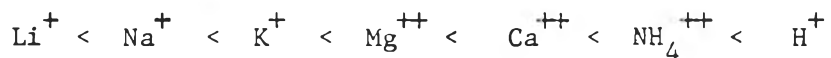
ดินเหนียวจะดูดยึดอนุภาคที่เป็นประจุบวกได้มากน้อยลดหลั่นกันไปดังนี้คือ



โดยอนุภาคประจุบวกจะโคจรอยู่ในระยะใกล้ชิดกับพื้นผิวของดินเหนียวภายใต้อำนาจดึงดูดซึ่งกันและกัน ทำให้การชะล้าง (*leaching*) ไม่สามารถจะเอาประจุบวกเหล่านี้ออกไปได้ และสามารถถูกแทนที่โดยประจุบวกอื่น ๆ ที่มีอำนาจลุ่มกว่า

2.2.4.1 ปัจจัยที่ควบคุมการแลกเปลี่ยนไอออนในดิน

ก. ชนิดของตัวประจุบวกที่ถูกดูดยึด (*adsorbed cation*) และประจุที่แทนที่ (*replacing cation*) โดยประจุบวกแต่ละชนิดมีอำนาจในการแทนที่ (*replacing cation*) ตามลำดับดังนี้



โดย Na^+ สามารถแทนที่ Li^+ ได้

การที่ประจุบวกมีการหลือมล้ำกันในแต่ละลำดับ (*replacing power*) มีสาเหตุ 2 ประการคือ (17)

1) รัวเลนซ์ของประจุบวก ประจุที่มีรัวเลนซ์สูงจะมีอำนาจในการแทนที่สูงและเกาะยึดอยู่บนผิวของแร่ดินเหนียวได้เหนียวแน่นกว่าในอนุภาคประจุบวกที่มีรัวเลนซ์ต่ำ ส่วนอนุภาคประจุบวกที่มีรัวเลนซ์เท่ากันความหลือมล้ำในลำดับการแทนที่ (*replacing power*) จะเนื่องมาจากขนาดของไอออน

2) ขนาดของไอออน หมายถึงขนาดของประจุบวกที่มีน้ำห่อหุ้ม (*hydrated cation*) หากมีฟิล์มของน้ำห่อหุ้มหนา การดูดยึดจะเบาบางลงและจะถูกแทนที่ได้ง่ายกว่าประจุที่มีน้ำห่อหุ้มอยู่บาง

แรงดึงดูดระหว่างประจุของดินและสารที่ถูกดูดติดผิวสามารถ
จะอธิบายโดยกฎของ Coulomb (17) ดังนี้

$$F = \frac{Ke^+ \cdot e^-}{d^2}$$

โดยที่ F = แรงดึงดูดซึ่งกันและกันระหว่างประจุบวกและลบ
 e^+ และ e^- = จำนวนประจุของประจุบวกและลบตามลำดับ
 d = ระยะระหว่างศูนย์กลางของประจุทั้งสอง
 K = ค่าคงที่

แรงดึงดูดระหว่างประจุและแปรตามผลคูณของประจุทั้งสอง และ
จะเป็นปฏิภาคผกผันกับระยะห่างระหว่างประจุทั้งสอง

ข. ความเข้มข้นของประจุบวกที่เข้าแทนที่ (replacing cation) ถ้าปริมาณของประจุบวกที่เข้าแทนที่ มีมาก อำนาจในการแทนที่ประจุบวกที่อยู่บนผิวของแร่ดินเหนียวจะเพิ่มมากขึ้นด้วย เช่น หาก Na^+ สามารถแทนที่ Ca^{++} ได้น้อย แต่ถ้า Na^+ มีปริมาณมากอาจจะสามารถแทนที่ Ca^{++} ได้

ค. ปริมาณการอิ่มตัว (degree of saturation) ประจุบวกบางชนิด เช่น Ca^{++} , Na^+ จะมีอำนาจการแลกเปลี่ยนประจุบวกแปรตามปริมาณการอิ่มตัว แต่อำนาจการแลกเปลี่ยนประจุของประจุบวกบางชนิด เช่น K^+ และ Mg^{++} ไม่ขึ้นกับปริมาณการอิ่มตัว

ง. ประจุบวกอื่น ๆ ที่อยู่ร่วมด้วยบนผิวของดินเหนียว (complementary exchangeable cations) ประจุบวกบางตัวที่อยู่ร่วมกับตัวอื่นบนผิวของดินเหนียวอาจทำให้เกิดการแทนที่ได้อ่อนหรือเลวลง

2.2.5 ที่มาของประจุลบในดินเหนียวซิลิเกต

อำนาจประจุลบในอนุภาคของดินเหนียวโดยทั่วไป เกิดจากกระบวนการใหญ่ ๆ

2 ประการคือ

ก. เกิดขึ้นจากบริเวณขอบของผลึก (exposed crystal edges)

1. เกิดจากการแตกหักของขอบผลึก ทำให้แร่ซิลิกา และ อลูมิเนียมหลุดหายไป ออกซิเจนซึ่ง เดิมเคยยึดอยู่กับซิลิกาและอลูมิเนียมเกิดจำนวนประจุ โฟลิว (electro negative charge) ตกค้างอยู่ ส่วนอีกด้านหนึ่งของออกซิเจนยังยึดเกาะกับซิลิกา และอลูมิเนียม หากมีการแตกหักเพิ่มมากขึ้นอำนาจประจุไฟฟ้า (electro negative charge) จะมีมากพอที่จะดึงดูดประจุบวกได้ การเกิดประจุโดยวิธีนี้มักเกิดขึ้นกับอนุภาคของดินประเภท 2 : 1 และ 1 : 1

2. เกิดจากการถ่ายเทประจุ (ionization) ของไฮโดรเจน อีออน (H^+) ที่เกาะอยู่กับออกซิเจน (O) บนผิวของดินส่วนที่เป็นแผ่นอลูมินา ทำให้ออกซิเจน อีออนที่ผิวของอนุภาคดินมีอำนาจประจุไฟฟ้า (electro negative charge) ตกค้างอยู่ เมื่อ ไฮโดรเจนเกิดการถ่ายเทประจุ (ionization) มากขึ้นอำนาจประจุไฟฟ้าลบที่ตกค้างจะมาก พอที่จะดึงดูดประจุบวกได้ การเกิดประจุลบในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นเฉพาะในอนุภาคดินประเภท 1:1

ข. เกิดจากกระบวนการ isomorphous substitution

กระบวนการนี้เกิดขึ้นจากอะตอมของธาตุที่มีขนาดใกล้เคียงกัน แต่มีอนุภาคประจุที่วาเลนซ์ (valence) ไม่เท่ากับอนุภาคที่มีอยู่เดิมเข้าไปแทนที่ในโครงสร้าง ของแร่ดินเหนียวมักเกิดขึ้นกับดินเหนียวซิลิเกต (silicate clay) ประเภท 2:1 โดยที่ประจุบวก ที่มีวาเลนซ์ต่ำเข้าไปแทนที่ประจุบวกอีกตัวหนึ่งซึ่งมีอยู่เดิมในโครงสร้างที่มีวาเลนซ์สูงกว่า ทำให้ มีประจุลบตกค้างอยู่ในโครงสร้าง แต่ถ้าธาตุที่วาเลนซ์สูงเข้าไปแทนที่ประจุที่มีวาเลนซ์ต่ำใน โครงสร้างจะทำให้เกิดอำนาจประจุบวกขึ้น เช่น ในดินมอนท์โมริลโลไนท์จะมี Mg^{++} 0.60 อะตอมเข้าไปแทนที่อลูมิเนียมไอออนในแผ่นอลูมินา และเนื่องจากแมกนีเซียมมีวาเลนซ์ต่ำกว่า อลูมิเนียม อะตอมจึงมีประจุลบตกค้างอยู่เท่ากับ 0.66 และถ้าหากมีการแทนที่เพิ่มมากขึ้นจะมี อำนาจลุ่มพอที่จะดึงดูดประจุบวกได้

จากการศึกษาของ Birell (19) พบว่าความสามารถใน การแลกเปลี่ยนประจุในดินมอนท์โมริลโลไนท์ทั้งหมดเกิดขึ้นโดยกระบวนการบริเวณขอบผลึก และ 80% ของแร่ดินเหนียวสเมคไทต์ (Smectite) จะเกิดจากกระบวนการ isomorphous substitution

2.2.6 ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cation exchange capacity) (C.E.C.)

ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (C.E.C.) หมายถึงปริมาณอนุภาคประจุบวกทั้งหมดที่ดินหรือสารคอลลอยด์สามารถยึดเกาะไว้ได้โดยจะมีหน่วยเป็น me/100 g clay ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนของดินชนิดต่าง ๆ ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (C.E.C.) ของดินเหนียว โดยทั่วไป (18)

แร่	สูตรเคมี	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (C.E.C.) (me/100 g)
Chlorite	$Mg_6 (Si_4O_{10})(OH)_6$	100 - 150
Illite	Variable	15 - 40
Kaolinite	$Al_4 (Si_4O_{10})(OH)_8$	3 - 20
Montmorillonite	$M_8 (Si_8O_{10})_3 (OH)_{10}$	90 - 120
Saponite	$M_6 (Si_4O_{10})_2 (OH)_4$	80 - 120
Vermiculate	Variable	100 - 150

Birell (19) พบว่าค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกจะสูงขึ้นเมื่อความเป็นกรด-ด่างลดลง และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์ และแปรตามความเข้มข้นของดินเหนียวโดยเฉพะที่ความเข้มข้นสูง ๆ

Mering และ Glaeser (19) พบว่าอำนาจประจุลบบนผิวของดินจะถูกทำให้เป็นกลางโดยอนุภาคประจุบวกที่เป็นโมโนวาเลน

2.2.7 ซีตาโพเทนเชียล (Zeta potential) ของดินเหนียวซิลิเกต

ซีตาโพเทนเชียลของดินเหนียว หมายถึง ประจุลบหรืออำนาจของดินเหนียวที่เหลือค้างอยู่ภายหลังจากดินเหนียวได้ดูดซับประจุบวกไว้เต็ม

สภาพในการดูดซับของแร่ดินเหนียวเป็น electric double layer ล้อมรอบอนุภาคดินเหนียวซึ่งชั้นในจะมีประจุลบ ส่วนชั้นนอกเป็นประจุบวก

ตามหลักการของ Helmholtz (17) เมื่ออนุภาคดินเหนียวมีประจุลบมากขึ้น อำนาจจะมีมากขึ้นและอนุภาคประจุบวกที่มีวาเลนซ์สูงจะมีค่าซีตาโพเทนเชียลต่ำกว่าอนุภาคประจุบวกที่เป็นโมนิวาเลนและดินที่มีซีตาโพเทนเชียลสูง เมื่ออยู่ในระบบแขวนลอยจะพึงกระจายได้อย่างถาวร โอกาสที่ตกตะกอนจึงไม่เกิด แต่ถ้าซีตาโพเทนเชียลต่ำโอกาสที่เกิดการตกตะกอนจะสูง

จึงอาจจะกล่าวได้ว่า ดินเหนียวที่ดูดซับประจุบวกแล้วยังเหลืออำนาจของประจุที่เป็นลบในตัวอยู่สูง จะมีแนวโน้มที่เกิดการแขวนลอยมากกว่าดินเหนียวที่เหลืออำนาจประจุลบ หรือซีตาโพเทนเชียลต่ำ

2.2.8 ชนิดของดินเหนียวซิลิเกตที่พบในประเทศไทย

ดินเหนียวประเภทซิลิเกตที่พบในประเทศไทยมักจะมีในภาคเหนือ และภาคกลางของประเทศ โดยรายละเอียดของดินแสดงไว้ในตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 ชนิดของดินเหนียวซิลิเกต (Silicate clay) ที่ตรวจพบในดินตัวอย่าง
ที่เก็บจากภาคต่าง ๆ ของประเทศไทย (Identification of silicate
clay minerals in the clay fraction (<math><2 \mu</math>) of Soils in
Thailand) (17)

Locations of Soil sample	Clay mineral identified	C.E.C. me/100 g.	% Clay
Northern Thailand			
Chiangrai	KMIV ?---	11.7	17.3
Chiangmai	KMIV ?---	1.5	3.8
Lampang	KMI ---	22.5	37.5
Lampang	KMI ? ---	18.5	53.3
Lampang	KMI --- Is	24.6	40.0
Lampang	KMI ---	23.7	65.3
Srisamrong	KMIV ? - Ig ? -	12.1	17.8
Central Thailand			
Nakornnayok	KMI ---	21.7	54.3
Lopburi	KMI ?---	47.6	53.7
Rungsit	KMIV ? ---	20.0	53.4
Bangkhen	KMIV ? ---	29.7	64.9
Tabkwang	KMIV ? ---	18.9	26.5
Northeastern Thailand			
Udom	KM -- C ? --	2.2	2.4

K = Kaolinite

M = Montmorillonite

V = Vermiculite

C = Chlorite

I = Illite

? = Probably present

Ig = Intergrade

Is = Interstratified minerals

2.3 การดูดติดผิวด้วยผงถ่าน

2.3.1 การดูดติดผิวของถ่านแอ็กทีเวตเต็ดคาร์บอน

การดูดติดผิวของถ่านแอ็กทีเวตเต็ดคาร์บอนเป็นความสามารถของแอ็กทีเวตเต็ดคาร์บอนในการดึงดูดโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซ ให้มาเกาะสับหรือติดผิวของคาร์บอน (Z_1) เป็นปรากฏการณ์ที่สัดเป็นการเคลื่อนย้ายของมวลสาร (Mass transfer) จากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของคาร์บอน

แอ็กทีเวตเต็ดคาร์บอนเป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นให้มีพื้นที่ผิวมาก อันเนื่องมาจากรูพรุนภายในเนื้อคาร์บอน รูพรุนนี้จะมีขนาดตั้งแต่ 20 ถึง 20,000 อังสตรอม ทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตร/กรัม) สูง ซึ่งจะมีอำนาจหรือความสามารถในการดูดติดผิวสูงตามไปด้วย แอ็กทีเวตเต็ดคาร์บอนแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

- แบบผง (Powder Activated Carbon หรือ PAC)
- แบบเกล็ด (Gradular Activated Carbon หรือ GAC)

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดติดผิวของแอ็กทีเวตเต็ดคาร์บอน (Z_1)

ก. ความปั่นป่วน

อัตราเร็วในการดูดติดผิวจะขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์มของน้ำที่ห่อหุ้มตัวถูกละลายหรือความสามารถในการแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างภายในคาร์บอน (Pore Diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ โดยหากระบบมีความปั่นป่วนต่ำความหนาของน้ำที่ห่อหุ้มจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว แต่ในทางตรงกันข้ามหากระบบมีความปั่นป่วนสูง ความหนาของชั้นน้ำที่ห่อหุ้มจะบางลงอัตราเร็วของการดูดติดผิวจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรงของคาร์บอนของตัวทำละลาย

ข. ขนาดและพื้นที่ผิวของคาร์บอน

อัตราการดูดติดผิวเป็นสัดส่วนที่ผกผันกับขนาดของคาร์บอนกล่าวคือ คาร์บอน PAC จะมีอัตราการดูดติดผิวเร็วกว่าคาร์บอนแบบเกล็ด (GAC) ส่วนพื้นที่ผิวของคาร์บอนจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดติดผิว

ค. ขนาดของสารที่ถูกดูดติดบนผิวของคาร์บอน

การดูดติดผิวจะเกิดได้ดีที่สุด เมื่อมีสารขนาดเล็กกว่าในโพรงเล็กน้อย (พอดีเข้าไปในโพรงได้) โดยโมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในโพรงก่อน แล้วจึงตามด้วย โมเลกุลขนาดใหญ่กว่า

ง. ความเป็นกรด-ด่าง

ความเป็นกรด-ด่างมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำ ซึ่งมีผลกระทบต่อ การดูดติดผิว นอกจากนี้ไฮโดรเจนยังเป็นไอออนที่สามารถเกาะติดผิวคาร์บอนได้ดี

จ. อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราความเร็วและความสามารถในการดูดติดผิว โดยที่อัตราเร็วของการดูดติดผิวจะเพิ่มตามการเพิ่มของอุณหภูมิ และลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ความสามารถในการดูดติดผิวจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูง และเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ

ฉ. ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดติดผิว

สารที่ละลายน้ำได้ (แตกตัวเป็นไอออน) จะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำ ได้เหนียวแน่น ทำให้แนวโน้มในการดูดติดผิวเป็นไปได้ยาก แต่ในสารบางชนิดอาจเกิดการดูดติดผิวคาร์บอนได้ดีในสารที่ละลายน้ำได้มาก ซึ่งไม่อาจสรุปแนวโน้มของความสัมพันธ์อย่างแน่นอน ในเชิงปริมาณระหว่างความสามารถในการดูดติดผิว และความสามารถในการละลายน้ำ

จากการศึกษา (19) ประสิทธิภาพในการกำจัดสารกำจัดศัตรูพืชเป็นสารอินทรีย์ (organic pesticide) โดยใช้แอ็กทิเวตเต็ดคาร์บอน จะมีผลจาก 1) เวลาสัมผัส 2) ความเหมาะสมของสารที่ถูกดูดติด 3) ความเข้มข้นของแอ็กทิเวตเต็ดคาร์บอน และ 4) ความเข้มข้นของสารกำจัดศัตรูพืช

ตารางที่ 2.13 ความสามารถของคาร์บอนในการดูดสารไฮโดรคาร์บอนบางชนิด (22)

Compound	Adsorbility		Remarks
	Molecular Weight	(g compound / g carbon)	
Alcohols :			
Methanol	32.0	0.007	Compounds highly polar and highly soluble, resulting in low amenability of compounds to adsorption. Polarity decreases as molecular weight increases, resulting in increased adsorbility with increasing molecular weight.
Ethanol	46.1	0.020	
Propanol	60.1	0.038	
Butanol	74.1	0.107	
n-Amyl alcohol	88.2	0.155	
n-Hexanol	102.2	0.191	
Aldehydes :			
Formaldehyde	30.0	0.018	Aldehydes, like alcohols, are highly polar compounds. Polarity decrease as molecular weight increases, resulting in increased amenability to adsorption.
Acetaldehyde	44.1	0.022	
Propionaldehyde	58.1	0.057	
Butyraldehyde	72.1	0.106	

ตารางที่ 2.13 (ต่อ)

Compound	Molecular Weight	Adsorbility		Remarks
		(g compound/	g carbon)	
Amines :				
Di-N-Propylamine	101.2	0.174		Amenability to adsorption
Butylamine	73.1	0.103		again limited by polarity
Di-N-Butylamine	129.3	0.174		and solubility.
Allylamine	57.1	0.063		
Ethylenediamine	60.1	0.021		
Diethylenetriamine	103.2	0.062		
Aromatics :				
Benzene	78.1	0.080		Low polarity and low
Toluene	92.1	0.050		solubility of compounds
Ethyl benzene	106.2	0.019		makes them relatively
Phenol	94	0.161		easy to remove by adsorption
Hydroquinone	110.1	0.167		onto carbon. Removal is
Aniline	93.1	0.150		also enhanced by in bonding
				between compound and
				carbon surface.
Glycols :				
Ethylene glycol	62.1	0.0134		These compounds have
Diethylene glycol	106.1	0.053		multiple sites for hydrogen
Triethylene glycol	150.2	0.105		bonding, which gives them
Tetraethylene glycol	194.2	0.116		a hydrophilic nature.
Propylene glycol	76.1	0.024		Hydrophilic property makes
				compounds difficult to
				remove by adsorption.

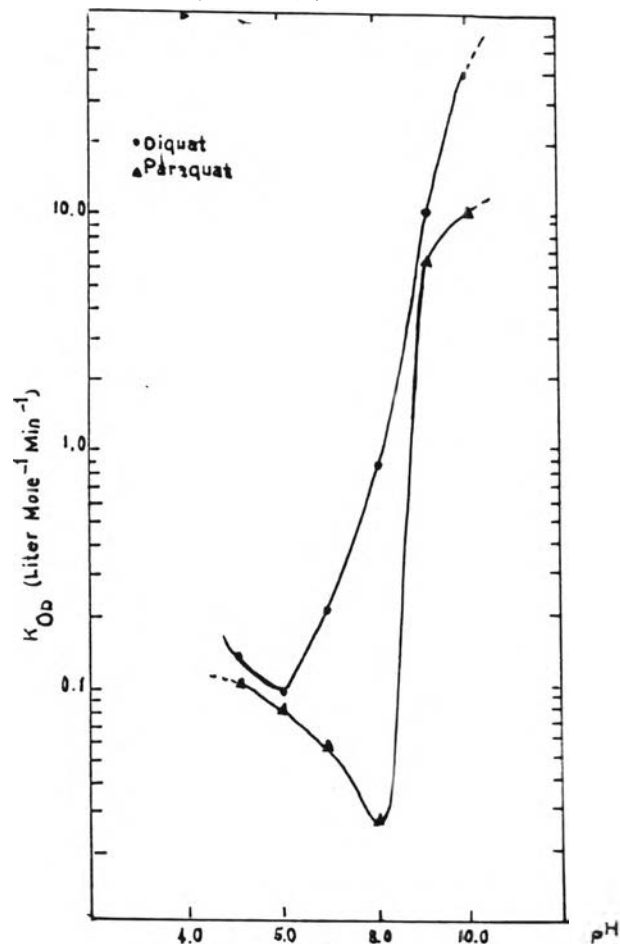
2.4 การกำจัดพาราควอทเท่าที่มีการศึกษา

การกำจัดพาราควอทในน้ำสามารถทำได้โดยกระบวนการใหญ่ ๆ 3 ประการคือ

- กระบวนการออกซิเดชัน (oxidation)
- กระบวนการดูดติดผิว (Adsorption)
- การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange)

ก. กระบวนการออกซิเดชัน (oxidation)

Gomao และ Faust (19) ได้ศึกษาการใช้โพตัสเซียมเปอร์แมงกาเนตและคลอรีนในการกำจัดพาราควอทที่สภาวะความเป็นกรด-ต่าง ๆ กัน ปรากฏผลว่าโพตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต จะเป็นตัวออกซิเดนต์ที่ดีในสารละลายที่เป็นต่างมากกว่าในสารละลายที่เป็นกรด และพบว่าคลอรีนจะไม่มีผลในการกำจัดพาราควอทในสภาวะที่เป็นกรดดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ผลของความเป็นกรด-ต่าง (pH) ในการกำจัดพาราควอทโดยใช้โพตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) (19)

นอกจากนี้ยังพบว่าการ เติมของความเป็นกรด-ด่าง จะมีผลต่อการ เติม อัตราเร็วในปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังปรากฏในตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.14 ผลของความเป็นกรด-ด่าง ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพาราควอท(19)

ความเป็นกรด-ด่าง	พาราควอท
5.1	ไม่เกิดปฏิกิริยา
6.2	ไม่เกิดปฏิกิริยา
7.1	ไม่เกิดปฏิกิริยา
8.1	0.019
9.0	0.056
10.0	0.099

ข. กระบวนการดูดติดผิว

Weber et al (19) ได้ศึกษาการกำจัดพาราควอทโดยใช้ถ่านไม้ดูดติดผิว พบว่าพาราควอทสามารถถูกดูดติดไว้บนถ่านไม้จนถึงสมดุลและพร้อมที่จะคลายออกสู่ภายนอกหากอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีน้ำอยู่ เช่น ในแหล่งน้ำ

Faust และ Zarins (19) ได้ศึกษาการกำจัดพาราควอทและไดควอท โดยทดลองใช้วิธีต่างๆ ดังนี้คือ 1) การดูดติดผิวโดยใช้แอ็กทิเวทเต็ดคาร์บอน 2) การตกผลึก (coagulation) และ 3) การใช้ดินเหนียว และสรุปผลได้ว่า การใช้แอ็กทิเวทเต็ดคาร์บอนสามารถกำจัดพาราควอทได้ดีกว่าไดควอท โดยใช้ปริมาณคาร์บอนในการกำจัด 5.9 มล/ลิตร คาร์บอน รายละเอียดในการกำจัดแสดงไว้ในตารางที่ 2.15

ตารางที่ 2.15

ผลของ เวลาสัมพัทธ์และปริมาณคาร์บอนในการกำจัดพาราควอทและไดควอท
ในน้ำ (19)

ความเข้มข้นของสารกำจัดวัชพืช (ส่นล.)	ปริมาณคาร์บอน			
	ไดควอท		พาราควอท	
	30 นาที	60 นาที	30 นาที	60 นาที
	มก./ลบ.ดม			
1	82	57	44	41
2	173	121	92	87
3	264	184	140	133
5	445	311	238	225
7	627	438	335	317
10	900	629	480	456

หมายเหตุ - พาราควอทที่เหลือในน้ำ 0.1 ส่นล. ที่ความเป็นกรด-ด่าง
7.2 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

และรายละเอียดของการใช้ดินเหนียว (clay minerals) ในการกำจัดหกราควอห
ดังรายละเอียดในตารางที่ 2.16

จากการศึกษาสรุปได้ว่า การใช้แเอ็กทิวเท็ดคาร์บอนในการกำจัดหกราควอห
เป็นการกำจัดหกราควอหที่เสียค่าใช้จ่ายสูงและไม่เหมาะสมในการทางปฏิบัติ ส่วนการกำจัด
หกราควอหโดยใช้สารส้มไม่มีผลอย่างมีนัยที่สำคัญต่อการกำจัดหกราควอห และการกำจัดหกราควอห
โดยใช้แร่ดินเหนียวเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2.16 การกำจัดพาราควอทโดยการใส่ดินเหนียว (clay mineral) และตามด้วยการตกผลึก (coagulation) (19)

ความเข้มข้นของสารกำจัดวัชพืช ส่นล	ไดควอท (diquat)			พาราควอท (Paraquat)		
	แคลเซียม-เบนโทไนท์	% การกำจัด	ปริมาณที่เหลือ	แคลเซียม-เบนโทไนท์	% การกำจัด	ปริมาณที่เหลือ
	มก/ลบ.ดม.	%	ส่นล	มก/ลบ.ดม.	%	ส่นล
0.0	17.0	100.0	-	180.0	100.0	-
1.0	15.4	99.0	0.04	16.3	97.2	0.11
2.5	41.0	99.5	0.02	-	-	-
5.0	84.0	97.5	0.11	89.0	98.8	0.05
7.5	127.0	99.5	0.02	-	-	-
10.0	170.0	98.0	0.09	100.0	99.8	0.01

หมายเหตุ ปริมาณของสารส้ม ($Al_2(SO_4)_3$ dosage) = 50 มก/ลบ.ดม.
 ปริมาณปูนขาว ($Ca(OH)_2$ dosage) = 20 มก/ลบ.ดม.
 ความเป็นกรด-ด่าง 7.5
 และในการสัมผัสดิน (Initial contact time with clay mineral) = 10 นาที
 ตามด้วยการตกผลึก (coagulation) 15 นาที