

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

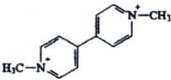
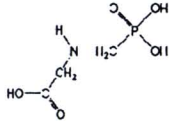
2.1 สารพาราควอต

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

2.1.1 การดูดซึมและการออกฤทธิ์ในพืช

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

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติด้านต่างๆของสารพาราควอตและสารไกลโฟเสต

Characteristic	Paraquat	Glyphosate
Molecule Structure		
Molecule Structure		
IUPAC Name	1,1'-dimethyl-4,4'-bipyridinium	N-(phosphonomethyl)glycine
Other Name		Phosphonomethyliminoacetic acid
Empirical formula	C ₁₂ H ₁₄ Cl ₂ N ₂	C ₃ H ₈ NO ₅ P
Molecular Weight	Ion 186.25 g Dichloride 257.2 g Dimethylsulfate 408.4	169.07 g
Physicochemical Properties		
Physical Feature	Crystalline powder, white, odorless and hygroscopic	White powder
Density	1.24 - 1.26 g cm ⁻³ at 20°C	1.704 g cm ⁻³
Boiling point	Decomposition 175 - 180°C	
Melting point	Above » 300°C decomposition	230, 184.5 °C, decomposition at 187°C
Vapour pressure	Very low (<10 ⁻³ Pa at 20°C)	<1x10 ⁻⁵
Water solubility	700,000 mg L ⁻¹ at 20°C	12,000 mg L ⁻¹
Solubility in Alcohol	Soluble	
Solubility in Organic solvents	Insoluble	Insoluble
Henry's constant	-	
Partition Coefficient	2.44	
Parachor, P ^b		313 cm ³ g ^{1/4} s ^{-1/2} mol
Dipole moment		9.7 μ ^b (D)
Eco-toxicology		
Adsorption Coefficient	28 - 1,000,000 μg g ⁻¹	
Log P	< 7	
Log Kow		0.0017, -4.1
Koc	15,473 - 51,856	24,000
BCF	0.3	
Environmental Toxicology		
Reference Level	ADI: 0.004 mg kg ⁻¹ day ⁻¹ MCL: Not Available RfD: 0.0045 mg kg ⁻¹ day ⁻¹	HA: 0.03 mg L ⁻¹ (lifetime) TLV: 0.1 mg m ⁻³ (8-hour) (respirable fraction) LD50 = 4320 LC50 = 86
Half-life time	16 months - 13 years	47 days

Sources: WHO (1984); The Royal Society of Chemistry (1991); Mensink and Janssen (1994);
Extension Toxicology Network (2001); Douklas et al. (2001) and Mamy and Barriuso, 2005

2.1.2 พืชต่อคนและสัตว์

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

2.1.3 ความเป็นพิษของพาราควอตในสิ่งแวดล้อมและในดิน

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

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

การดูดซับสารพาราควอตบนแร่ดินเหนียวที่ยึดติดได้เป็นการดูดซับที่แข็งแรงและไม่ย้อนกลับ เนื่องจากการดูดซับอยู่ในหลืบของผลึกแร่ (Weber and Weed, 1968) สารพาราควอตที่โมเลกุลมีลักษณะเป็นระนาบและมีความหนาเพียง 0.3 มม. สามารถแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นซิลิกาของแร่มอนต์มอริโลไนต์ได้ นอกจากนั้นระยะห่างระหว่างประจุ 0.7-0.8 นาโนเมตรทำให้โมเลกุลพาราควอตทำหน้าที่เป็นแกนยึดแผ่นผลึกแร่สองข้างให้อยู่ติดกันไว้อย่างยืดหยุ่นได้ (Rytwo et al., 1996) การดูดซับในหลืบอย่างแข็งแรงนี้ไม่สามารถถูกไล่ที่ออกไปโดยธาตุปุ๋ยหรือปุ๋ยที่ใส่ลงในดิน (Brownawell et al., 1990)

พาราควอตเป็นสารเคมีที่สามารถเปลี่ยนรูปและสลายตัวได้ในสิ่งแวดล้อม ปฏิกริยาการสลายตัวประกอบด้วย photodegradation, chemical degradation และ biological degradation (The Royal Society of Chemistry, 1991) ปฏิกริยา pyrolysis เกิดเมื่อได้รับรังสี UV ในช่วงคลื่น 285 - 310 nm. โดยช่วงคลื่นที่ดูดซับได้สูงสุดคือ 257 nm. (Funderburk, 1969) พาราควอตสลายตัวได้อย่างรวดเร็วเมื่อมีแสงแดดจ้าและอาจสลายตัวหมดไปภายในเวลา 3 สัปดาห์ (WHO, 1984) โดยทั่วไปการสลายตัวด้วยแสงเกิดภายในความลึกเพียงไม่กี่เซนติเมตรจากผิวดินและการสลายตัวในดินและบนผิวใบใช้ระยะเวลา 100 วัน (Hebert and Miller, 1990) การสลายตัวทางเคมีของสารพาราควอตในสิ่งแวดล้อมไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดเป็นกลางและมีออกซิเจน ในสภาพแวดล้อมที่มีความเป็นด่างสารพาราควอตสามารถกริวัติไปเป็นสารอนุมูลอิสระสีม่วงที่สามารถผันกลับได้ สารรีดิวซ์ในสิ่งแวดล้อม (reducing agent) บางชนิดสามารถเปลี่ยนพาราควอตไปเป็นสารอนุมูลอิสระที่ไม่ผันกลับ (Funderburk, 1969 และ Staiff et al., 1981) จุลินทรีย์หลายชนิด ทั้งแบคทีเรีย เชื้อรา แอคติโนมัยซิสและยีสสามารถใช้อาหารพาราควอตเป็นแหล่งคาร์บอนและไนโตรเจนได้ดี บางชนิดใช้พาราควอตเพียงอย่างเดียวเป็นแหล่งคาร์บอนและไนโตรเจนได้และจุลินทรีย์บางชนิดสามารถใช้

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

2.2 สารไกลโฟเสท

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

2.2.1 การดูดซึมและการออกฤทธิ์ในพืช

ไกลโฟเสทเป็นสารกำจัดวัชพืชที่ออกฤทธิ์ทำลายพืชโดยการดูดซึมทำลายพืชทั้งต้น ทำลายพืชหลังงอก และไม่เลือกชนิดวัชพืช (systemic, post-emergent non-selective herbicide) จัดอยู่ในกลุ่ม substituted amino acid ที่มีการออกฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase (EPSPS) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์กรดอะมิโนในกลุ่มอะโรมาติกใน Shikimate pathway เช่น Phe, Tyr และ Trp ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโปรตีน ลิกนิน ในพืช สารไกลโฟเสทที่สัมผัสหรือดูดซึมเข้าสู่ลำต้นพืชไม่เป็นอันตรายต่อเซลล์พืชอย่างทันทีทันใด ดังนั้นจึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านระบบลำเลียงไปสู่ target site และไม่ถูก metabolite ทำให้สามารถเคลื่อนที่ไปทุกส่วนในพืช และมีโอกาสสัมผัสกับ target site ของเอนไซม์ได้ สารไกลโฟเสทจะจับกับเอนไซม์ได้อย่างแข็งแรงทำให้เอนไซม์ไม่ทำงาน มีผลทำให้ไม่สามารถสังเคราะห์กรดอะมิโนและทำให้พืชตาย ต้นพืชที่ได้รับสารไกลโฟเสทสามารถดูดซึมสารเข้าไปได้อย่างรวดเร็วและเป็นปริมาณมาก โดยสะสมในใบได้ถึง 22-28%, 45%, 9% และ 14% ในใบกล้าของ *Populus tremuloides* ใบมันฝรั่ง (*Solanum tuberosum*) ราสเบอร์รี่และเบอร์รี่ป่า ตามลำดับ (Smid and Hiller, 1981 และ Roy et al., 1989) สารไกลโฟเสทในใบพืชสามารถแตกตัวหรือสลายไปอย่างรวดเร็วโดยมีค่าครึ่งชีวิตน้อยกว่า 14 วันในพืชป่า (Newton et. al., 1984) บนใบของต้น alder และ salmonberry มีค่าครึ่งชีวิตเพียง 8-9 วันในใบแห้ง (Feng and Thompson, 1990) และมี DT_{50} 100 วันในใบสด (Mensink and Janssen, 1994) แต่สารไกลโฟเสทมีความคงทนในเนื้อเยื่อพืชได้ เช่น สามารถคงอยู่ได้นานในถึง 270 และ 390 วันในไลเคน *Cladonia rangiferina* หรือ ใช้เวลาการสลายตัวถึง 1 ปีในต้น *Vaccinium myrtillus* (Siltanen et al., 1981)

2.2.2 พิษต่อคนและสัตว์

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

2.2.3 ความเป็นไปในสิ่งแวดล้อม

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

2.3 ผลกระทบของสารกำจัดวัชพืชต่อคุณภาพทรัพยากรดิน

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

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

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

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

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

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

นอกจากนั้น สารไกลโฟเสทยังมีผลต่อการดูดซับฟอสเฟตในดินเนื่องจากการแข่งขันบนพื้นที่ผิวดูดซับและส่งผลกระทบต่ออัตราการดูดซับจุลธาตุ สารไกลโฟเสถมีการแข่งขันการดูดซับกับฟอสเฟตในดินเนื่องจากมีลักษณะการดูดซับคล้ายกันในด้านตำแหน่งพื้นผิว กลไกและรูปแบบการดูดซับ แต่ไกลโฟเสถมีความสามารถในการแข่งขันการดูดซับได้ดีกว่าฟอสเฟตในดิน มีผลทำให้มีการปลดปล่อยฟอสเฟตออกมาสู่สารละลายดินมากขึ้น จากการศึกษาของ Gimsing et al. (2007) พบว่า ไกลโฟเสถสามารถแข่งขันในการดูดซับกับฟอสเฟตในดิน การดูดซับของไกลโฟเสถและฟอสเฟตสอดคล้องกับสมการ Langmuir โดยไกลโฟเสถมีปริมาณการดูดซับสูงสุดมากกว่าฟอสเฟต นอกจากนี้ Barrett and McBride (2006) ยังพบว่า การปลดปล่อยฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับอยู่ที่อนุภาคดิน เป็นผลมาจากการแข่งขันแย่งพื้นผิวดูดซับซึ่งไกลโฟเสถดูดซับได้ดีกว่า โดยระดับความเข้มข้นของไกลโฟเสถในดินที่สามารถแสดงอิทธิพลต่างๆคือ $50 \text{ mg.a.i. kg}^{-1}$ ซึ่งเป็นระดับที่พบเมื่อพิจารณาชั้นบางๆที่ผิวดิน ฟอสเฟตที่ถูกปลดปล่อยออกมาเป็นอิสระในสารละลายดินมีอิทธิพลในทางยับยั้ง (antagonistic effect) ความเป็นประโยชน์และการเคลื่อนย้ายจุลธาตุในดินซึ่งเกิดได้หลายปฏิกิริยา เช่น ฟอสเฟตที่เพิ่มขึ้นในสารละลายดินทำให้จุลธาตุถูกดูดซับมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประจุลบบนผิวอนุภาคดินเหนียว โดยแร่ดินเหนียวที่มีการเปลี่ยนแปลงมากคือ แร่ออกไซด์ในดิน (Saeed and Fox, 1979 และ Xie and MacKenzie, 1990) ฟอสเฟตในสารละลายดินสามารถตกตะกอนกับสังกะสีและทองแดงที่ทำให้ละลายได้น้อยลง (Jurinak and Inouye, 1962) แต่มีผลการศึกษาที่แสดงถึงความขัดแย้งกัน โดย Shuman (1988) รายงานว่า KH_2PO_4 ทำให้สังกะสีที่จับอยู่กับแร่เหล็กและแมงกานีสออกไซด์ปลดปล่อยออกมาเป็นอิสระในรูปที่แลกเปลี่ยนได้มากขึ้น