

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารกำจัดแมลงกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟต

สารกำจัดแมลงกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟต เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีอะตอมของฟอสฟอรัส และมีความคงทนในสิ่งแวดล้อมต่ำ สามารถละลายได้ในน้ำ และเกิดการแยกสลายด้วยน้ำ (hydrolysis) ได้เร็ว จึงได้รับความนิยมใช้เป็นสารกำจัดแมลง อย่างไรก็ตามสารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตจัดเป็นกลุ่มที่เป็นพิษสูงสุด ทั้งต่อแมลงและสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เพราะสารในกลุ่มนี้หลายชนิดมีค่า LD₅₀ น้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สารในกลุ่มนี้แทบทุกชนิด ยกเว้นพาราไธออนจะมีพิษเฉียบพลันที่ร้ายแรงกว่ากลุ่มออร์แกโนคลอรีนมาก ระดับพิษเฉียบพลันต่อสัตว์ทดลองอยู่ในระดับมีพิษร้ายแรงถึงร้ายแรงยิ่ง (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540)

2.1.1 ประเภทของสารกำจัดแมลงกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟต

การจัดประเภทของสารกำจัดแมลงกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟต อาจแบ่งได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการจัดแบ่ง เช่น ลักษณะโครงสร้างทางเคมี ระดับความเป็นพิษ ลักษณะการใช้ในทางปฏิบัติ คุณสมบัติในการกำจัดแมลง สุภาณี พิมพ์สมาน (2540) จัดแบ่งประเภทของสารกำจัดแมลงกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตตามลักษณะการใช้ในทางปฏิบัติออกเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 เป็นสารกลุ่มที่มีพิษฆ่าแมลงโดยการสัมผัส มีความคงทนต่ำ สารกลุ่มนี้สามารถละลายน้ำได้น้อย และสลายตัวได้ง่ายโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส แต่เป็นสารกลุ่มที่ได้รับความนิยมใช้อย่างแพร่หลายในประเทศไทย เนื่องจากออกฤทธิ์ฆ่าแมลงได้อย่างรวดเร็วและราคาถูก แต่มีความเป็นพิษต่อสัตว์เลือดอุ่นสูง ตัวอย่างของสารกลุ่มนี้ ได้แก่ เมวินฟอส (mevinphos) เตทตระคลอวินฟอส (tetrachlorvinphos)

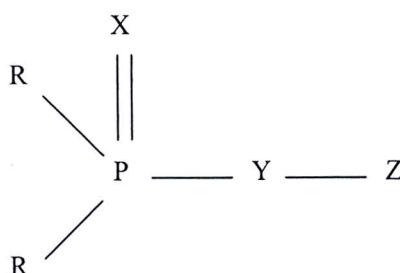
กลุ่มที่ 2 เป็นสารกลุ่มที่เป็นพิษโดยการสัมผัสเช่นเดียวกัน แต่สามารถดูดซึมผ่านเข้าไปในพืชได้บ้างเล็กน้อย แต่ไม่มีการเคลื่อนย้ายภายในต้นพืช ทำให้ออกฤทธิ์ฆ่าแมลงได้นานขึ้น มีความคงทนปานกลาง สารกลุ่มนี้ได้แก่ มาลาไรออน (malathion) พาราไรออน (parathion) เมทิลพาราไรออน (methyl parathion) ไดอะซินอน (diazinon) และเฟนิโตรไรออน (fenitrothion) สารในกลุ่มนี้มีความเป็นพิษต่อสัตว์เลือดอุ่นแตกต่างกัน เช่น มาลาไรออน เป็นพิษต่อสัตว์เลือดอุ่นต่ำ แต่เมทิลพาราไรออน และพาราไรออน (หรือเมทิลพาราไรออน) มีความเป็นพิษต่อสัตว์เลือดอุ่นสูงกว่ามาลาไรออนมาก

กลุ่มที่ 3 เป็นสารกลุ่มที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ (systemic insecticide) สามารถละลายในไขมันและละลายน้ำได้ดีด้วย สามารถซึมผ่านชั้นไขที่ผิวใบพืช เข้าสู่เนื้อเยื่อและมีการลำเลียงเคลื่อนย้ายไปยังส่วนต่างๆ ของพืช แล้วออกฤทธิ์กำจัดแมลงที่กัดกินพืชนั้นๆ ได้ นอกจากนี้ยังสามารถเคลื่อนที่ผ่านทางรากไปสู่ส่วนต่างๆ ของพืชได้ กรณีที่อยู่ในรูปเม็ดที่ใช้ใส่ทางดินตัวอย่างของสารในกลุ่มนี้ ได้แก่ โฟเรท (phorate) ไดเมโทเอท (dimethoate) และโมนโครโตฟอส (monocrotophos) นอกจากนี้ สารในกลุ่มนี้ยังไม่ถูกชะล้างโดยน้ำหรือน้ำฝน และสามารถป้องกันการทำลายของแมลงในทุกส่วนของพืชที่สารเคลื่อนย้ายไปถึง แม้ว่าจะไม่ได้รับสารดังกล่าวโดยตรงก็ตาม

กลุ่มที่ 4 เป็นสารกลุ่มที่มีพิษทางการหายใจด้วย มีค่าความดันไอค่อนข้างสูง จึงสามารถระเหยกลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิปกติ และไอระนั้นมีพิษฆ่าแมลงได้ด้วย สารกลุ่มนี้มีความเป็นพิษต่อสัตว์เลือดอุ่นสูง แต่สามารถสลายตัวได้เร็วมาก (ประมาณ 1-3 วัน ภายหลังจากใช้) ตัวอย่างสารในกลุ่มนี้ เช่น ไดโครวอส (dichlovos) เป็นต้น

2.1.2 ลักษณะทางเคมี

สารกำจัดแมลงกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟต ได้แก่สารอินทรีย์ที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบสำคัญ โดยมีสูตรโครงสร้างหลักดังรูปที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างหลักของสารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟต

ที่มา: ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา (2540)

เมื่อ X และ Y อาจเป็นกำมะถันหรือออกซิเจน R คือ ไฮโดรคาร์บอน ส่วน Z เป็นกลุ่มสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540) สารกลุ่มนี้ที่จะสามารถป้องกันกำจัดแมลงได้ ต้องมีคุณสมบัติ คือ ซัลเฟอร์หรือออกซิเจนต้องเชื่อมโดยตรงกับฟอสฟอรัส ซึ่งมี

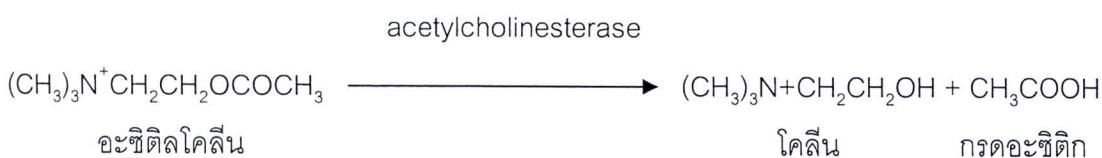
วาเลนซีเท่ากับห้า (pentavalent phosphorous) และ R อาจเป็นกลุ่ม alkoxy alkyl หรือ amino และกลุ่ม acyl ต้องเป็นกลุ่มที่มีประจุลบในกรดอินทรีย์ เช่น fluorine cyanate thiocyanate หรือ ต้องเป็นส่วนหนึ่งของกรด เช่น enol และ mercaptan (Matsumura, 1976)

2.1.3 การนำมาใช้ประโยชน์

สารกำจัดแมลงกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตเป็นสารที่มีการนำมาใช้มากขึ้นในปัจจุบัน เพื่อทดแทนสารกลุ่มออร์แกโนคลอรีน เนื่องจากสามารถใช้สารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตได้ดีกับแมลงกลุ่มที่พัฒนาความต้านทานต่อสารกลุ่มออร์แกโนคลอรีน ตลอดจนสารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตมีการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม และมีผลกระทบต่อระบบนิเวศน้อยกว่าสารกลุ่มออร์แกโนคลอรีน (พิชิต สกุลพราหมณ์, 2535; พาลาก สิงหเสนี, 2540) กว่า 100,000 ชนิด และปัจจุบันมีการนำมาผลิตในเชิงการค้ามากกว่า 100 ชนิด (สุภาณี พิมพ์สมาน, 2540)

2.1.4 กลไกการออกฤทธิ์

สารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตเป็นพิษต่อทั้งแมลงและสัตว์เลื้อยคลานด้วยนม ออกฤทธิ์ในการกำจัดแมลงโดยการยับยั้งปฏิกิริยาชีวเคมีในระบบประสาท โดยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ อะซิติลโคลีนเอสเตอเรส (acetylcholinesterase) บริเวณที่แสดงพิษคือ รอยต่อของใยประสาท ตามปกติเมื่อปลายประสาทข้างหนึ่งถูกกระตุ้น จะมีการส่งสัญญาณไฟฟ้าผ่านสารอะซิติลโคลีน (acetylcholine) ซึ่งเป็นตัวส่งผ่านสัญญาณดังกล่าวผ่านรอยต่อระหว่างใยประสาทหนึ่งไปสู่ใยประสาทที่อยู่ถัดไป และจะทำหน้าที่เช่นนี้จนกว่าสารอะซิติลโคลีนจะถูกเปลี่ยนเป็นโคลีน (choline) และกรดอะซิติก (acetic acid) โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เอนไซม์อะซิติลโคลีนเอสเตอเรส (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540) ดังสมการในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ปฏิกิริยาบริเวณรอยต่อใยประสาทเมื่อมีการสื่อกระแสประสาทตามปกติ
ที่มา: ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา (2540)

เมื่อสิ่งมีชีวิตได้รับสารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตเข้าสู่ร่างกายทางการหายใจ การกิน หรือสัมผัส จะเกิดการยับยั้งเอนไซม์อะซิติลโคลีนเอสเตอเรส (acetylcholine inhibition) ในระบบสื่อประสาท ทำให้เกิดการส่งสัญญาณประสาทช้าลงและเกิดการสะสมของอะซิติลโคลีนซึ่งเป็นสารกระตุ้นประสาทอย่างแรง อวัยวะต่างๆ จึงตื่นตัวตลอดเวลา (รพีพัฒน์ ชัดตประภาศ, 2538) ในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่ได้รับสารนี้เข้าไป จะเกิดความผิดปกติของระบบประสาท การส่งสัญญาณในสมองเสื่อมลง มีผลต่อระบบสัมผัส การเคลื่อนไหว พฤติกรรมและการทำงานของระบบหายใจ มีอาการทางระบบประสาทและกล้ามเนื้อ เกิดการชักกระตุก เสียชีวิตในที่สุด (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540) การเสียชีวิตมักเกิดจากระบบหายใจถูกกด แต่ร่างกายสามารถกลับเป็นปกติได้ เมื่อมีการสร้างเอนไซม์อะซิติลโคลีนเอสเตอเรส ไปชดเชย (สาวิตร วรรณพิน, 2529)

2.1.5 การแพร่กระจายของสารกำจัดแมลงกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตสู่สิ่งแวดล้อม

สารป้องกันและกำจัดศัตรูพืชที่มีการใช้สามารถแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกได้หลายทาง เช่น การแพร่กระจายโดยลม เมื่อมีการพ่น การชะล้างสารป้องกันและกำจัดศัตรูพืชที่ตกค้างในดินไปกับตะกอนดิน และการแพร่กระจายสู่แหล่งน้ำภายนอก เมื่อมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำกับแหล่งน้ำดังกล่าว เมื่อมีการพ่นสารป้องกันและกำจัดศัตรูพืช ละอองของสารบางส่วนจะตกลงสู่ร่องน้ำโดยตรง และเมื่อมีการให้น้ำหรือฝนตก สารที่ตกค้างบนลำต้นหรือใบของพืชและดินบนแปลงปลูกจะถูกชะล้างไปสู่ร่องน้ำต่อไป เมื่อเกษตรกรเปลี่ยนถ่ายน้ำกับแหล่งน้ำภายนอก ก็จะทำให้มีการแพร่กระจายของสารที่ตกค้างในน้ำออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกได้

2.1.6 การเปลี่ยนแปลงของสารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตในสิ่งแวดล้อม

เมื่อสารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตออกสู่สิ่งแวดล้อม เช่น ดิน อากาศ หรือน้ำ โดยการพ่นหรือใส่ทางดินของเกษตรกร จะมีกระบวนการทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ เข้ามาเกี่ยวข้องทำให้เกิดการเคลื่อนย้าย เปลี่ยนรูป หรือสลายของสารดังกล่าว กระบวนการซึ่งเข้ามาเกี่ยวข้องดังกล่าว สามารถรวบรวมได้ดังนี้

1) การเคลื่อนย้าย (transportation)

1.1) การระเหย (volatilization)

Hemond and Fechner (1993) กล่าวว่า การระเหยเป็นกระบวนการหนึ่งที่ทำให้มีการเคลื่อนย้ายของสารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตในสิ่งแวดล้อม อัตราการระเหยขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ แสงแดด ความชื้น และคุณสมบัติของสาร เช่น ความคงทน คุณสมบัติในการถูกดูดซับ การละลายน้ำ ความดันไอ โครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุล ซึ่ง Racke (1992) รายงานว่า สารที่มีความดันไอสูง เช่น ไดโครออส อีโทรโพรฟอส จะมีการเคลื่อนย้ายโดยการระเหยสูงกว่าสารที่มีความดันไอต่ำ เช่น EPN ไอระเหยของสารเหล่านี้สามารถแพร่กระจายไปได้เป็นระยะทางไกล แต่ก็จะมีการเจือจางโดยมวลอากาศและการสลายโดยแสง ซึ่งไอระเหยของสารในชั้นบรรยากาศอาจตกลงสู่พื้นดินหรือแหล่งน้ำอีกครั้ง เมื่อเกิดการรวมตัวกับหยดน้ำหรือฝน

1.2) การชะล้าง (leaching)

ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา (2540) กล่าวว่า กระบวนการชะล้างเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนย้ายของสารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตลงไปตามชั้นดิน (soil profile) หรือการเคลื่อนย้ายลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน โดยมีปัจจัยที่เข้ามาเกี่ยวข้อง คือ โครงสร้างและคุณสมบัติของสาร เช่น การถูกดูดซับ ความคงทน ปัจจัยสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณน้ำฝน และลักษณะหรือคุณสมบัติของดิน เช่น ความพรุน ส่วนใหญ่สารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตจะถูกดูดซับไว้ที่หน้าดินโดยพวกอินทรีย์วัตถุ (organic matter) การเคลื่อนย้ายโดยกระบวนการชะล้างจึงเกิดขึ้นไม่มากนักจึงพบการปนเปื้อนของสารกลุ่มนี้ในน้ำใต้ดินน้อยมาก แม้ว่าจะเป็นพื้นที่ที่มีการใช้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานก็ตาม

1.3) การพัดพา (run off)

การพัดพาทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายของสารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตที่ตกค้างลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตนอกเป้าหมายที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำต่อไป การพัดพาที่เกิดกับสารกลุ่มดังกล่าวที่สามารถละลายน้ำได้ดี (มากกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) จะเคลื่อนย้ายไปกับน้ำที่ผ่านหน้าดิน แต่สำหรับสารที่ละลายน้ำได้น้อยหรือไม่ละลายน้ำ จะเคลื่อนย้ายไปกับอนุภาคดินในรูปของตะกอน (sediment) สารกลุ่มที่สามารถละลายน้ำได้ดี อัตราการพัดพาจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสาร คือ ความคงทน และปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ปริมาณฝน การดูดซับน้ำของดิน สำหรับกลุ่มที่ไม่ละลายน้ำและดูดซับอยู่กับอนุภาคดิน อัตราการพัดพาจะขึ้นอยู่กับ การชะล้างพังทลายของดิน (soil erosion) ในธรรมชาติ สารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตเคลื่อนย้าย

โดยกระบวนการพืชน้ำน้อยมาก คาดว่า น้อยกว่าร้อยละ 0.5 ของปริมาณที่มีการใช้ทั้งหมด (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540 และ Robert, 1994)

1.4) การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับมีผลต่อการเคลื่อนย้ายและการสลายตัวของสารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตทั้งทางชีวภาพ (biological degradation) และทางกายภาพ (non-biological degradation) การดูดซับเป็นปฏิกิริยาของแรงที่บริเวณผิวของตัวดูดซับ (adsorbent) ได้แก่ คอลลอยด์ต่างๆ กระทำต่อโมเลกุลหรือไอออนของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ทำให้โมเลกุลของสารเหล่านั้นถูกยึดไว้โดยกลไกหลายกลไก เช่น การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchanged) ทั้งแคตไอออนและแอนไอออน การเกิดพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) และการเกิดโคออร์ดิเนชันเชิงซ้อน (coordination complex) เป็นต้น อัตราการดูดซับ นอกจากขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวคอลลอยด์หรือตัวดูดซับเองแล้ว ยังขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของสารแต่ละชนิด ได้แก่ ขนาดและโครงสร้างโมเลกุล สารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่และประกอบด้วยโครงสร้างในกลุ่มฟังก์ชัน OH NR₃ NH₂ NHR CONH₂ หรือ COOR จะถูกดูดซับได้ดีกว่าสารที่มีกลุ่มฟังก์ชันอื่นๆ เป็นองค์ประกอบ ดังนั้น สารในกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตที่แพร่กระจายสู่ดินและน้ำ บางส่วนจะถูกดูดซับโดยอนุภาคและคอลลอยด์ต่างๆ ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540)

1.5) การดูดซึมโดยพืช

รัชนี สุภาพ (2541) รายงานว่า สารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตหลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารในกลุ่มดูดซึม (systemic) เช่น โมโนโครโทฟอส ไดมโทโรเอท สามารถดูดซึมเข้าสู่ต้นพืชได้ทางปากใบและผิวใบ สารที่ดูดซึมผ่านเข้าไปแล้วจะเคลื่อนย้ายลงสู่ราก โดยผ่านทางลำเลียงอาหาร (phloem) เป็นการเคลื่อนย้ายที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ หลังจากนั้น จะเคลื่อนย้ายไปสู่ท่อลำเลียงน้ำ (xylem) ซึ่งจะเคลื่อนย้ายไปสู่ส่วนต่างๆ ของพืชอย่างรวดเร็ว เมื่อเข้าสู่ต้นพืชแล้ว สารเหล่านี้อาจอยู่ในรูปสารดั้งเดิม (parent compound) หรือเปลี่ยนรูปไปโดยกระบวนการทางชีวเคมีและเมตาบอลิซึมในเนื้อเยื่อพืช สารที่เปลี่ยนรูปไปอาจไม่มีความเป็นพิษต่อมนุษย์หรือสัตว์ หรือมีความเป็นพิษรุนแรงกว่าเดิมก็ได้ ดังเช่นในแมลง เมื่อสารมาลาไธออน เข้าสู่ลำตัวแมลงจะมีการเปลี่ยนรูป โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยระบบเอนไซม์โมโนออกซิจีเนส (mono-oxygenase system) ได้สารมาลาออกซอน (malaoxon) ซึ่งมีพิษสูงชันกว่ามาลาไธออนมาก ดังนั้น สารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตที่ตกค้างในส่วนต่างๆ ของพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนที่ใช้บริโภค จึงอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์ได้

2) การเปลี่ยนรูป (transformation)

2.1) การสลายตัวโดยแสง (photodegradation)

สารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตหลายชนิดสลายตัวโดยใช้แสง ซึ่งอาจเป็นการสลายตัวจากแสงโดยตรง (direct photolysis) คือ โมเลกุลของสารเมื่อได้รับแสง ก็จะถูกขับพลังงานทำให้อิเล็กตรอนอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น (excited state) จนทำให้โครงสร้างโมเลกุลของสารเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้มีความซับซ้อนน้อยลง ทำให้เกิดปฏิกิริยาอื่นๆ ต่อไป หรือถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ง่ายขึ้น สารจึงเกิดการเปลี่ยนรูปหรือสูญหายไปได้ (Dureja, 1989) การสลายตัวของสารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตโดยแสง เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลได้รับแสงอาทิตย์ที่มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 290-450 นาโนเมตร และอัตราการสลายตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแสงที่มีความยาวคลื่นสั้น เช่น แสงอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) สารบางชนิด เช่น โมโนโครโทฟอส จะไม่ดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 300 นาโนเมตร แต่จะดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ 215 นาโนเมตร มากที่สุด (Hill and Wright, 1978) นอกจากนี้ อาจเกิดการสลายตัวโดยแสงทางอ้อม (indirect photolysis) ซึ่งเกิดเนื่องจากโมเลกุลของสารแขวนลอย สารอินทรีย์ หรือรงควัตถุ (pigment) ของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในสิ่งแวดล้อม เมื่อโมเลกุลของสารแขวนลอยเหล่านี้ได้รับแสงและดูดซับพลังงานไว้ ทำให้เกิดสารใหม่ที่มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟต เช่น O_2 radical, peroxide ทำให้เกิดปฏิกิริยาอื่นๆ ตามมา เช่น การเกิด photooxidation (Miyamoto *et al.*, 1994) การเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวโดยแสงทั้งทางตรงและทางอ้อมนี้ อาจเกิดกับสารที่อยู่ในรูปของไอระเหยในบรรยากาศ สารละลายในน้ำ หรือสารที่ตกค้างอยู่ตามบริเวณผิวดินและลึกลงไปประมาณ 1-2 มิลลิเมตร นอกจากนี้ ยังเกิดได้ที่บริเวณผิวน้ำหรือส่วนของพืชที่ได้รับแสงโดยตรง (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540)

2.2) การสลายตัวทางเคมี (chemical degradation)

ปฏิกิริยาทางเคมีสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปและการสลายตัวของสารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟต ได้แก่ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ออกซิเดชัน (oxidation) ไอโซเมอไรเซชัน (isomerization) การแตกตัวเป็นไอออน (ionization) และการเกิดเกลือ (salt formation) ปฏิกิริยาที่สำคัญที่สุดในการสลายตัวของสารออร์แกโนฟอสเฟต คือ ไฮโดรไลซิส เนื่องจากกลุ่มฟังก์ชันเอสเทอร์ของสารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตเป็น phosphate ester bond ซึ่งเป็น weak link การสลายตัวโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจึงเกิดขึ้นได้ง่าย อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสขึ้นอยู่กับสภาพกรดต่างของสภาพแวดล้อม สารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตส่วนใหญ่ไวต่อปฏิกิริยาแบบ basecatalyze hydrolysis ทำให้เกิดการสลายตัวในสภาพต่าง แต่ก็มีสารในกลุ่มนี้บางชนิดเป็น

acidcatalyze hydrolysis เช่น ไดอะซินอน ซึ่งการสลายตัวจะเกิดขึ้นในอัตราสูงในสภาพกรด (Racke, 1992) การสลายตัวโดยปฏิกิริยาทางเคมีของสารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตที่สำคัญอีกประเภท คือ เกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation-reduction) ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวอาจเกิดจากการกระตุ้นโดยพลังงานแสง การกระตุ้นของสารที่เป็นองค์ประกอบในดินและน้ำตามธรรมชาติ หรือกิจกรรมของจุลินทรีย์ ทำให้เกิดสารเมทาบอลไลต์ซึ่งมีคุณสมบัติต่างๆ เช่น ความเป็นพิษ ความเสถียร แตกต่างไปจากสารดั้งเดิม สารเมทาบอลไลต์จากการสลายตัวของสารบางชนิดอาจมีความเป็นพิษสูงกว่าสารเดิม เช่น พาราออกซอน ซึ่งเป็นเมทาบอลไลต์ของพาราไธออน นอกจากนี้ เมทาบอลไลต์ของสารบางชนิดอาจมีโครงสร้างโมเลกุลที่มีความเสถียรน้อยกว่าเดิม จึงสามารถถูกทำให้สลายตัวโดยกระบวนการต่างๆ ได้ง่ายกว่าในสารที่อยู่ในรูปของสารดั้งเดิม (สุภาณี พิมพ์สมาน, 2540)

2.3) การสลายตัวทางชีวภาพ (biodegradation)

ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา (2540) กล่าวว่า การสลายตัวทางชีวภาพเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของสารประกอบในกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟต จนสูญเสียสภาพโครงสร้างโมเลกุลเดิมโดยชีวปัจจัยหรือปฏิกิริยาของสิ่งมีชีวิตต่างๆ เช่น ออกซิเดชัน-รีดักชัน ไฮโดรไลซิสปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอัตราการสลายตัวทางชีวภาพที่สำคัญ ได้แก่ ชนิดและจำนวนของจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายสารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟต และนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ เช่น รา แบคทีเรียตลอดจนปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการดำรงชีวิตและกิจกรรมของจุลินทรีย์ดังกล่าว เช่น แสงอุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ปริมาณออกซิเจน นอกจากนี้ ยังเกี่ยวข้องกับลักษณะโครงสร้างของโมเลกุลของสารด้วย สารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตส่วนใหญ่ที่มีโครงสร้างของ OH COO หรือ NH_2 เป็นองค์ประกอบ และเป็นสารมีขั้ว จะเกิดการสลายตัวทางชีวภาพได้ง่าย

Racke (1992) กล่าวถึงลักษณะการถูกย่อยสลายของสารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตโดยจุลินทรีย์ต่างๆ ว่า อาจเป็นการย่อยสลายแบบ co-metabolism ซึ่งเป็นการย่อยสลายโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์หลายกลุ่ม สารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตจะถูกเปลี่ยนเป็นสารเมทาบอลไลต์โดยจุลินทรีย์กลุ่มหนึ่ง สารดังกล่าวอาจสะสมในสิ่งแวดล้อมหรือถูกย่อยสลายต่อไปโดยจุลินทรีย์กลุ่มอื่นๆ ซึ่งสามารถนำสารดังกล่าวไปใช้เป็นปัจจัยในการเจริญเติบโตได้ อัตราการย่อยสลายจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่น มาลาไธออน จะถูกย่อยสลาย โดยจุลินทรีย์ชนิดหนึ่งที่แยกได้จากกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมให้กลายเป็นสารเมทาบอลไลต์ ซึ่งจะถูกลดสลายต่อไปโดยจุลินทรีย์อีกกลุ่มหนึ่งจนกลายเป็นเอทานอลหมดภายใน 28 ชั่วโมง นอกจากนี้ อาจมีการย่อยสลายแบบ catabolism ซึ่งเป็นการย่อยสลายที่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์โดยจุลินทรีย์เพียงกลุ่มเดียว เนื่องจากจุลินทรีย์สามารถนำสารที่ได้จากการย่อยสลายสารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตไปใช้ใน

รูปของแหล่งคาร์บอน แหล่งพลังงาน หรือแหล่งอาหารในการเจริญเติบโตได้ในหลายกรณี การย่อยสลายอย่างสมบูรณ์จะได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น จุลินทรีย์ชนิดหนึ่งซึ่งพบทั่วไปในดิน แหล่งน้ำ นาข้าวและของเสีย สามารถย่อยสลายพาราไรบอนหรือไดอะซินอนแล้วนำไปใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานในการเจริญเติบโตได้ โดยมีเอนไซม์ต่างๆ เข้ามาเกี่ยวข้องกับกระบวนการสลายตัวดังกล่าว

2.1.7 ความเป็นพิษสารของกำจัดแมลงกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟต

สารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตนับว่าเป็นสารกลุ่มที่มีพิษสูงทั้งต่อแมลงและสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม จากการจัดแบ่งระดับความเป็นพิษโดยองค์การอนามัยโลก (WHO) พบว่า สารกำจัดแมลงกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตส่วนใหญ่จัดอยู่ในระดับที่มีพิษร้ายแรงยิ่ง พิษร้ายแรง และพิษปานกลาง สำหรับความเป็นพิษต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม โดยเฉพาะมนุษย์ ของสารกลุ่มนี้ขึ้นอยู่กับความไวในการถูกเปลี่ยนแปลงโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ในร่างกาย ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ตับ ตามปกติแล้ว เมื่อมีสารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตเข้าสู่ร่างกาย จะเกิดการเปลี่ยนรูปของสารดังกล่าวไปโดยปฏิกิริยาต่างๆ ในร่างกาย โดยใช้เวลาเพียงไม่กี่ชั่วโมง นอกจากกรณีที่ได้รับในปริมาณสูงมากในครั้งเดียว หรือการทำงานของตับมีความผิดปกติไป (Cheremisinoff and King, 1994)

1) ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต

ความเป็นพิษต่อมนุษย์ สารป้องกันและกำจัดแมลงสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้ 3 ทางคือ (กรมอนามัย, 2540; ยิวดี จอมพิทักษ์, 2531)

1.1) การหายใจ สารเคมีป้องกันและกำจัดศัตรูพืชที่เข้าสู่ระบบทางเดินหายใจได้นั้น อาจอยู่ในรูปฝุ่นผงหรือสารละลาย ฝุ่นที่มีขนาดเล็กจะเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจได้มากกว่าฝุ่นที่มีขนาดใหญ่ สำหรับสารในรูปสารละลายนั้น ขึ้นอยู่กับว่าความสามารถในการระเหยเป็นไอของสารนั้นๆ สูงหรือไม่ ถ้าสูงจะเกิดอันตรายได้มากขึ้น นอกจากนี้ ยังขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายเข้าสู่ระบบเลือดในร่างกายอีกด้วย

1.2) ทางผิวหนัง การดูดซึมของสารผ่านทางผิวหนังจะเกิดขึ้นได้ดีหรือไม่ ขึ้นกับหลายปัจจัยดังนี้

- สภาพผิวหนัง ถ้าผิวหนังเกิดการฉีกขาด หรือมีบาดแผลอยู่ จะมีการดูดซึมสารได้ดีกว่าผิวหนังปกติ

- ความสามารถในการละลายซึมผ่านผิวหนังของสาร ถ้าสารละลายได้ดีในไขมัน จะถูกดูดซึมได้ดี

- ขนาดของสาร ถ้าขนาดเล็กจะถูกดูดซึมได้ดีเมื่ออยู่ในรูปสารละลาย ส่วนสารที่มีขนาดใหญ่จะไม่ถูกดูดซึมผ่านผิวหนังเลย

- อุณหภูมิ สารในกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟต จะถูกดูดซึมผ่านผิวหนังได้ดีมาก ขณะที่อากาศร้อนจัด เกษตรกรจึงไม่ควรถอดเสื้อผ้า ขณะพ่นสารเคมีป้องกันและกำจัดศัตรูพืชในเวลาแดดจัดโดยเด็ดขาด

1.3) ทางปาก สารป้องกันและกำจัดแมลงที่จะเข้าสู่ระบบทางเดินอาหารได้นั้น อาจเกิดจากอุบัติเหตุสารกระเด็นเข้าปากในขณะที่ผสมสาร หรือจากการสูบบุหรี่ หรือรับประทานอาหารโดยไม่ได้ล้างมือก่อน หรือใช้มือเปื้อนสารเซ็คตริมีปาก หรือเนื่องจากการกลืนสารที่หายใจเข้าทางระบบทางเดินหายใจ หรือเกิดจากการจงใจกินสารพิษเพื่อฆ่าตัวตาย สารที่เข้าสู่ร่างกายทางระบบทางเดินอาหารนี้ จะถูกดูดซึมผ่านผนังกระเพาะอาหารและลำไส้เข้าสู่กระแสเลือด ถ้าสารนั้นมีความแตกตัวได้ดี ก็จะละลายไขมันได้น้อยลง แต่ถ้าสารนั้นไม่สามารถแตกตัวได้ จะละลายได้ดีในไขมันก็จะถูกดูดซึมได้ดี

2) ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตนอกกลุ่มเป้าหมาย

Murty and Ramani (1992) รายงานว่า สารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำอาจทำให้เกิดพิษเรื้อรังและความผิดปกติของตัวอ่อน หรือสะสมในสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในแหล่งน้ำได้จากรายงานของนวลศรี และ Hsiung (2523) พบการสะสมของโมโนโครโตฟอสในเนื้อปลาชนิดแดงที่อาศัยอยู่ในน้ำที่มีการปนเปื้อนของสารดังกล่าว นอกจากนี้ ยังมีผลต่อสิ่งมีชีวิตนอกเป้าหมาย (Non target organisms) ได้แก่ แมลงศัตรูธรรมชาติ เช่น ตัวห้ำ ตัวเบียน ซึ่งช่วยควบคุมแมลงศัตรูพืชตามธรรมชาติ ตลอดจนจุลินทรีย์และสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติที่มีประโยชน์ ทำให้พื้นที่ที่ใช้สารดังกล่าวขาดสิ่งมีชีวิตที่มีประโยชน์และเสียสมดุลของระบบนิเวศตามธรรมชาติ (ศุภมาส พณิชศักดิ์พัฒนา, 2540)

3) ลักษณะอาการเกิดพิษ จากการได้รับสารกำจัดแมลงกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตมีรายละเอียดดังนี้ (พาลาก สิงหเสนี, 2540)

3.1) อาการพิษเฉียบพลัน

3.1.1) อาการพิษแบบมัสคารินิก (muscarinic signs and symptoms) จุดรับสัมผัสมัสคารินิก (muscarinic receptors) สำหรับอะซิติลโคลีนพบส่วนใหญ่ที่กล้ามเนื้อเรียบ หัวใจและต่อมมีท่ออาการที่เกิดขึ้นในระยะแรก คือ เบื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียน ท้องเดิน น้ำตา



ไหล เหงื่อออก ม่านตาหดตัว ถ่ายอุจจาระและปัสสาวะโดยกลั้นไม่อยู่ การเกร็งของหลอดลม หลอดลมมีเมือกและเสมหะมาก เป็นต้น

3.1.2) อาการพิษแบบนิโคตินิก (nicotinic signs and symptoms) อาการพิษแบบนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการสะสมของอะซิติลโคลีนที่ปลายประสาทมอเตอร์ และที่ซินแนปส์ของระบบประสาทอัตโนมัติ อาการที่เกิดขึ้น คือ กล้ามเนื้อถูกกระตุ้นมากกว่าปกติ มีการกระตุกของกล้ามเนื้อที่หน้าหนังตา ลิ้น ถ้าอาการรุนแรงขึ้น จะพบว่า กระตุกมากขึ้นทั่วร่างกาย ต่อมา จึงจะมีอาการอ่อนเพลียตามกล้ามเนื้อทั่วไป และเกิดเป็นอัมพาตของกล้ามเนื้อในที่สุด

3.1.3) อาการทางสมอง เนื่องจากความผิดปกติของระบบประสาทส่วนกลาง อาการที่พบได้คือ มึนศีรษะ ปวดศีรษะ งง และกระสับกระส่าย ตื่นตกใจง่าย อารมณ์พลุ่งพล่าน ถ้าอาการมากอาจชัก และหมดสติได้ผู้ป่วยที่มีอาการมาก อาจถึงตายได้ เนื่องจากระบบการหายใจล้มเหลว (respiratory failure) ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้จากหลอดลมตีบตัน กล้ามเนื้อของระบบการหายใจเป็นอัมพาต และศูนย์ควบคุมการหายใจในสมองหยุดทำงาน ในรายที่มีอาการไม่รุนแรงนัก อาการจะดีขึ้นใน 2-3 วัน แต่จะอ่อนเพลีย ไม่มีแรง เป็นเวลานานผู้ป่วยส่วนใหญ่จะฟื้นตัวภายใน 24-48 ชั่วโมง แต่ถ้าได้รับสารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตที่มีฤทธิ์นาน อาจทำให้เกิดอาการพิษนานเป็นสัปดาห์หรือเป็นเดือนผู้ป่วยที่เสียชีวิตหลังจากได้รับสารพิษ สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากระบบหายใจล้มเหลว ซึ่งเป็นผลรวมจากพิษที่แสดงอาการแบบมัสคารินิก (muscarinic action) พิษที่แสดงอาการแบบนิโคตินิก (nicotinic action) และผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง ได้แก่ หลอดลมตีบ น้ำมูกและเสมหะในทางเดินหายใจมาก กล้ามเนื้อเกี่ยวกับการหายใจล้มเหลว มีการกดศูนย์การหายใจที่สมอง ความดันโลหิตต่ำ หัวใจเต้นผิดปกติ ซึ่งผู้ป่วยจะเสียชีวิตได้ภายใน 5 นาที ถึง 24 ชั่วโมง

3.2) อาการพิษเรื้อรัง อาการพิษเรื้อรังที่เกิดจากสารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตพบได้ไม่บ่อยนักอาการพิษเรื้อรังที่พบ ได้แก่

3.2.1) delayed psychopathogenic-neurologic lesion แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ส่วนใหญ่จะพบว่า ระบบประสาทบางส่วนถูกทำลายอย่างถาวร ทำให้เกิดพิษต่อทางเดินอาหาร ระบบหัวใจและหลอดเลือด เป็นหมัน คือต่อยาหลายชนิด และแก้ก่อนวัยอันสมควร อีกกลุ่มหนึ่ง นอกจากจะพบอาการดังกล่าวข้างต้นแล้ว ยังพบอาการผิดปกติทางจิตบางประการด้วย ได้แก่ ซึมเศร้า ซึ่งอาการเหล่านี้มักจะค่อยๆ เกิดขึ้นภายในระยะเวลา 5-10 ปี

3.2.2) intermediate syndrome เป็นอาการผิดปกติทางระบบประสาทที่พบได้ภายใน 24-96 ชั่วโมง หลังจากได้รับสารกำจัดแมลงกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตบางชนิด เช่น เฟนโทอินไดเมทโรเอท โมโนโครโตฟอส เมทาไมโดฟอส โดยสังเกตอาการเริ่มแรกได้ คือ

กล้ามเนื้ออ่อนแรง โดยเฉพาะกล้ามเนื้อแขนขาและกล้ามเนื้อเกี่ยวกับการหายใจ อาการดังกล่าวนี้ จะเหมือนกับที่ได้รับพิษเฉียบพลันสำหรับพิษเรื้อรังต่อระบบประสาทที่เกิดจากสารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตบางชนิดอาการพิษจะไม่สัมพันธ์กับการยับยั้งโคลีนเอสเตอเรส และจะเกิดขึ้นหลังจากได้รับสัมผัสสารพิษแล้วเป็นเวลา 6-14 วัน ซึ่งพบว่า มีการเสื่อมสลาย (degeneration) ของแอกซอน ตามด้วยการเสื่อมสลายของเยื่อหุ้มมัยอีลิน (myelin sheath) ในระบบประสาทส่วนปลายและไขสันหลัง อาการแสดงเริ่มแรกได้แก่ กล้ามเนื้ออ่อนแรง โดยเฉพาะแขนขา เดินเซเซ กล้ามเนื้อกระตุก เกร็ง สูญเสียการรับความรู้สึก หากอาการรุนแรงอาจเป็นอัมพาตได้ การฟื้นตัวต้องใช้เวลานานกว่า 2 ปี และอาจไม่สมบูรณ์ดังเดิม เนื่องจากระบบประสาทบางส่วนถูกทำลายอย่างถาวร

2.1.8 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

สารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตส่วนใหญ่สามารถสลายตัวได้อย่างรวดเร็วในสภาพแวดล้อมเนื่องจากสามารถละลายน้ำได้ดีและสลายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้อย่างรวดเร็ว แต่การใช้ในปริมาณสูงและต่อเนื่องกันเป็นเวลานาน ย่อมก่อให้เกิดการตกค้างในพืช ดิน และน้ำ ทำให้คุณภาพของสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ จากการศึกษาของภิญญา จำรัสกุล และคณะ (2539) พบว่า เขตพื้นที่เกษตรกรรมที่ปลูกผักและผลไม้ เช่น องุ่น พุทรา ชมพู หน่อไม้ฝรั่ง ซึ่งใช้สารเคมีทางการเกษตรหลายชนิดและบ่อยครั้งตลอดฤดูกาลเพาะปลูก จะมีการแพร่กระจายของสารพิษดังกล่าวสู่สิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่งแหล่งน้ำมากกว่าเขตเกษตรกรรมที่มีการปลูกพืชชนิดอื่นๆ ที่ใช้สารเคมีทางการเกษตรน้อยกว่าทั้งชนิดและความถี่ในการใช้ เช่น พืชไร่ ข้าว สำหรับสารที่พบตกค้างในแม่น้ำท่าจีน ซึ่งเป็นแหล่งรองรับน้ำจากพื้นที่เกษตรกรรมดังกล่าว พบการตกค้างของสารหลายชนิด เช่น โมโนโครโทฟอส เมททามิโดฟอส พาราไรออน ไดอะซินอน เฟนิโตรไรออน

(ก) การตกค้างในน้ำ

สารป้องกันและกำจัดศัตรูพืชสามารถแพร่กระจายลงสู่แหล่งน้ำได้หลายทาง เช่น จากการใช้เพื่อกำจัดศัตรูพืชในแหล่งน้ำโดยตรง จากการแพร่กระจายของละอองสารเคมีที่เกษตรกรพ่นหรือจากการถูกชะล้างสารส่วนที่ตกค้างอยู่ตามส่วนต่างๆ ของพืชและพื้นดินลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้พบการตกค้างของสารดังกล่าวในน้ำเสมอ (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540)

สารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตที่มีการใช้ในพื้นที่เกษตรกรรมสามารถแพร่กระจายสู่แหล่งน้ำที่ติดต่อกับหรือรับน้ำจากพื้นที่เกษตรกรรม เช่น แม่น้ำ ลำคลอง จากการศึกษาของภิญญา จำรัสกุล และคณะ (2542) ได้ทำการศึกษาการปนเปื้อนของสารกำจัดแมลงในแม่น้ำแม่กลองและคลองแยกตลอดทั้งสาย ตรวจพบสารพิษในกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำและดินตะกอนส่วนใหญ่ (มากกว่าร้อยละ 95) ในน้ำ 7 ชนิด คือ โมโนโครโตฟอส เมทามิโดฟอส ไดอะซินอน ไดเมทโรเอท เมทิลพาราไรออน มาลาไรออน และคลอโรไพริฟอสเอทิล ปริมาณระหว่าง น้อยกว่า 0.01-1.65 ไมโครกรัมต่อลิตร ในดินตะกอน 6 ชนิด คือ โมโนโครโตฟอส ไคโครโตฟอส ไดเมทโรเอท เมทิลพาราไรออน เฟนิโตรไรออน และไพริมิฟอสเมทิล ปริมาณระหว่าง น้อยกว่า 0.01-4.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ภิญญา จำรัสกุล (2539) และดำรง เวชกิจ(2537) กล่าวว่า สารป้องกันและกำจัดศัตรูพืชที่ตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อม เช่น ดิน น้ำ จะมีการสลายตัวตามธรรมชาติเนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น การย่อยสลายของจุลินทรีย์และสิ่งมีชีวิต การดูดซับของพืชและสิ่งมีชีวิต ทำให้สิ่งแวดล้อมดังกล่าวมีโอกาสที่จะฟื้นฟูตัวเองหรือกลับสู่สมดุลธรรมชาติได้ แต่การที่มีการปนเปื้อนของสารดังกล่าวจากแหล่งกำเนิดต่างๆอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน ย่อมทำให้เกิดการสะสมจนมีปริมาณการปนเปื้อนสูงขึ้น จนสิ่งแวดล้อมไม่สามารถฟื้นฟูตัวเองได้และเสื่อมโทรมลง Laskowski (1992) กล่าวว่าคุณภาพของสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปในทางเสื่อมลง จะก่อให้เกิดผลกระทบทั้งในระยะสั้นและระยะยาวต่อระบบนิเวศและการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตต่างๆ ตลอดจนทำให้ความเสียด้านสุขภาพอนามัยของประชาชนเพิ่มมากขึ้น

สารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตส่วนใหญ่สลายตัวได้ง่าย แต่สารประเภทดูดซึม เช่น โมโนโครโตฟอส เมทามิโดฟอส เมวินฟอส ไดเมทโรเอท สามารถคงทนอยู่ในเนื้อเยื่อพืชได้ระยะหนึ่งโดยเฉพาะในกรณีที่มีการใช้ในปริมาณและความถี่สูง และเก็บเกี่ยวผลผลิตก่อนกำหนดที่สารจะสลายตัวจนอยู่ในระดับปลอดภัย ทำให้ผลผลิตทางการเกษตรมีสารเหล่านี้ตกค้าง ซึ่งมีผลกระทบต่อผู้บริโภคและการส่งออก เนื่องจากในปัจจุบัน ต่างประเทศใช้มาตรฐานทางด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัยเป็นข้อกำหนดการซื้อสินค้า และกีดกันทางการค้าเพื่อจำกัดปริมาณและมูลค่าของสินค้าเกษตร ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศอีกด้วย (สุปราณี อิมพิทักษ์ และคณะ, 2538)

2.1.9 ผลกระทบต่อเศรษฐกิจของประเทศ

การใช้สารเคมีป้องกันและกำจัดศัตรูพืชนอกจากก่อให้เกิดปัญหาหลายประการ ดังกล่าวข้างต้นแล้ว สุปราณี อิมพิทักซ์ และคณะ (2538) กล่าวว่า การใช้สารกำจัดศัตรูพืชในการผลิตพืชผลทางการเกษตรอย่างไม่ถูกต้องตามหลักวิชาการ จะทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศ ทั้งทางตรงและทางอ้อม ผลกระทบทางตรงเกิดจากการที่ต้องสูญเสียเงินตราในการนำเข้าสารเคมีดังกล่าวมาใช้เป็นจำนวนมากในแต่ละปี และมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นทุกปี ผลกระทบทางอ้อมคือ ทำให้ประสบปัญหาด้านคุณภาพและการควบคุมมาตรฐานการผลิต ผลผลิตไม่เป็นที่ยอมรับของตลาดต่างประเทศ เนื่องจากมีการปนเปื้อนหรือการตกค้างของสารเคมีทางการเกษตรในผลิตผลและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ทำให้ประเทศไทยต้องสูญเสียเงินตราต่างประเทศ และไม่เป็นที่เชื่อถือของประเทศคู่ค้าอีกด้วย ซึ่งปัญหาดังกล่าวทำให้ประเทศไทยต้องประสบกับการกีดกันทางการค้าและภาวะข้อจำกัดของการผลิตสินค้าเกษตรเพิ่มขึ้น

2.2 คลอร์ไพริฟอส (chlorpyrifos)

จากข้อมูลการนำเข้าสารกำจัดแมลงในประเทศไทยเมื่อปี พ.ศ. 2550 (ตารางที่ 2.1) พบว่า คลอร์ไพริฟอส (O,O -diethyl O-3,5,6-trichloro-2-pyridyl phosphorothioate) เป็นสารที่มีการนำเข้าสูงสุดเป็นอันดับหนึ่งของประเทศ (กองวัตถุมีพิษการเกษตร, 2550) คลอร์ไพริฟอส บริสุทธิ์มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาวมีกลิ่นคล้าย mercaptan ละลายได้ง่ายในตัวทำละลายอินทรีย์ อัตราการสลายตัวของคลอร์ไพริฟอสจะเพิ่มขึ้น เมื่อค่า pH และอุณหภูมิของน้ำสูงขึ้น อัตราการสลายตัวของคลอร์ไพริฟอสในน้ำจะลดลง 2.5 ถึง 3 เท่า เมื่ออุณหภูมิของน้ำลดลงเป็น 10 องศาเซลเซียส ในแหล่งน้ำธรรมชาติที่เป็นกรด คลอร์ไพริฟอสมีอัตราการสลายตัวคงที่ แต่อัตราการสลายตัวจะเพิ่มขึ้นในน้ำที่มีความเป็นด่าง โดยในน้ำที่มี pH 7.0 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส คลอร์ไพริฟอส มีค่าครึ่งชีวิต (half-life) 35 ถึง 78 วัน (Howard, 1989) ส่วนคลอร์ไพริฟอสในน้ำทั่วไปจะมีค่าครึ่งชีวิตประมาณ 80-100 วัน (TOXNET, 1986)

ตารางที่ 2.1 สารกำจัดแมลงที่มีการนำเข้าสูงสุด 10 อันดับแรก ในปี 2550 โดยปริมาณสารสำคัญ

ลำดับที่	ชื่อสามัญ	ปริมาณ (กก.)	มูลค่า (บาท)	สารสำคัญ (กก.)
1	chlorpyrifos	1,535,694.00	248,248,724.00	1,398,784.61
2	cypermethrin	1,094,895.00	244,541,420.00	955,926.20
3	methomyl	1,472,075.00	321,504,936.00	812,013.30
4	fenobucarb	842,160.00	102,310,368.00	773,140.00
5	carbaryl	606,500.00	179,282,279.00	508,977.50
6	cartap hydrochloride	1,277,362.00	111,966,284.00	453,470.75
7	dimethoate	1,061,582.00	77,997,029.00	447,681.40
8	omethoate	560,790.00	48,572,400.00	434,195.00
9	dichlorvos	483,628.00	35,165,031.00	422,376.50
10	carbosulfan	397,570.08	122,331,161.00	277,583.52

ที่มา: กองวัตถุมีพิษทางการเกษตร (2550)

คลอโรไพริฟอสสามารถเปลี่ยนแปลงอยู่ในรูปอื่นได้อย่างช้าๆ (Schimmel, 1983) ความคงทนต่อการสลายตัวของคลอโรไพริฟอส ขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้น และลักษณะรูปร่างของคลอโรไพริฟอส ซึ่งคลอโรไพริฟอสที่มีขนาดใหญ่ในแหล่งน้ำ จะยึดเกาะหรือถูกดูดซับโดยตะกอนดิน อินทรีย์วัตถุ สารที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ และสิ่งต่างๆที่อยู่ใต้พื้นน้ำ (USEPA, 1986) คลอโรไพริฟอสสามารถระเหยไปจากน้ำได้ การประเมินการระเหยของคลอโรไพริฟอสจากแหล่งน้ำ พบว่ามีค่าครึ่งชีวิต การระเหย ตั้งแต่ 3.5 ถึง 20 วัน (Racke, 1992)

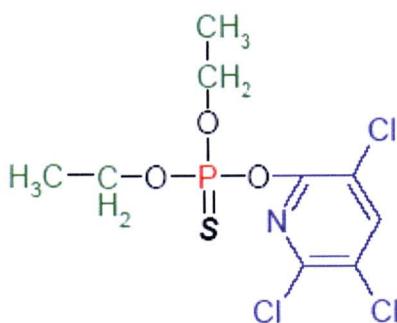
การศึกษาการแตกตัวทำปฏิกิริยากับน้ำของคลอโรไพริฟอสพบว่าที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส pH 6.1 ค่าครึ่งชีวิตในการแตกตัวทำปฏิกิริยากับน้ำเท่ากับ 120 วัน ที่ pH 7.4 ค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 53 วัน และที่ pH 7.4 อุณหภูมิเท่ากับ 37.5 องศาเซลเซียส ค่าครึ่งชีวิตในการแตกตัวทำปฏิกิริยากับน้ำเท่ากับ 13 วัน (UNEP, 1993)

การแตกตัวทำปฏิกิริยากับน้ำของคลอโรไพริฟอส พบว่าอัตราการสูญเสีย ร้อยละ 50 อยู่ในช่วง 0-6 ปี มีค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 0.04-1,930 วัน การแตกตัวทำปฏิกิริยากับน้ำของคลอโรไพริฟอสเป็นปัจจัยสำคัญในการย่อยสลายคลอโรไพริฟอสในน้ำทำให้ได้ 3,5,6-trichloro-2-pyridinol (UNEP, 1993)

คลอริไพริฟอสมีการสลายตัวด้วยแสงอาทิตย์ โดยมีค่าครึ่งชีวิต 3 ถึง 4 สัปดาห์ ในระหว่างช่วงฤดูร้อนในสหรัฐอเมริกา (Howard, 1989) การสลายตัวของคลอริไพริฟอสโดยแสงเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีผลต่อความคงทนของคลอริไพริฟอสผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ 3,5,6-trichloro-2-pyridinol และ diethylthiophosphate (Smith, 1968)

2.2.1 การบ่งลักษณะ (identification)

ชื่อสามัญ	คลอริไพริฟอส (chlorpyrifos)
ชื่อการค้า	ไพริเน็กซ์, เดก้า, ไวเปอร์, คลอลาซอน, ลอสแบน (lorsban), dursban, piridane, silrifos, talon, zidil,
ชื่อทางเคมี	O, O-diethyl O-(3, 5, 6-trichloro-2-pyridinyl) phosphorothioate O, O-diethyl O-3, 5, 6-trichloro-2-pyridinyl phosphorothioate (Systematic name): phosphorothioic acid, O, O-diethyl O-(3, 5, 6-trichloro-2-pyridinyl) ester
ชื่ออื่นๆ	lursbam; phosphorothioic acid, O, O-diethyl O-(3, 5, 6-trichloro-2-pyridinyl); chlorpyrifos; chlorpyriphosethyl; chlorpyrifos-ethyl
กลุ่มสารกำจัดแมลง	ออร์แกโนฟอสเฟต
สูตรโครงสร้าง	



สูตรโมเลกุล $C_9H_{11}Cl_3NO_3PS$

สำหรับภายในอาคารมีการใช้คลอรีนไฟรฟอสในการควบคุมแมลงตามบ้านเรือน เช่นแมลงสาบหรือไร เป็นต้น (Racke, 1992) ตลอดจนการควบคุมตัวอ่อนในแหล่งน้ำบางชนิด (Gallo and Lawryk, 1991)

2.2.4 ความเป็นพิษของคลอรีนไฟรฟอส

พิษเฉียบพลันทางการกิน (acute oral) ทดสอบโดยการกินกับหนูตัวใหญ่, หนูตะเภา, และกระต่าย มีค่า LD_{50} เท่ากับ 135-163,504, และ 1000-2000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ และมีค่า LD_{50} เฉียบพลันแบบให้ทางผิวหนังสำหรับหนูตัวใหญ่และกระต่าย >2000 และ เท่ากับ 2000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมี LD_{50} แบบสูดดมติดต่อกัน 4-6 ชั่วโมง สำหรับหนูตัวใหญ่ > 0.2 มิลลิกรัมต่ออากาศ 1 ลิตร (ดาร์รี่ รุ่งสุข, 2543)

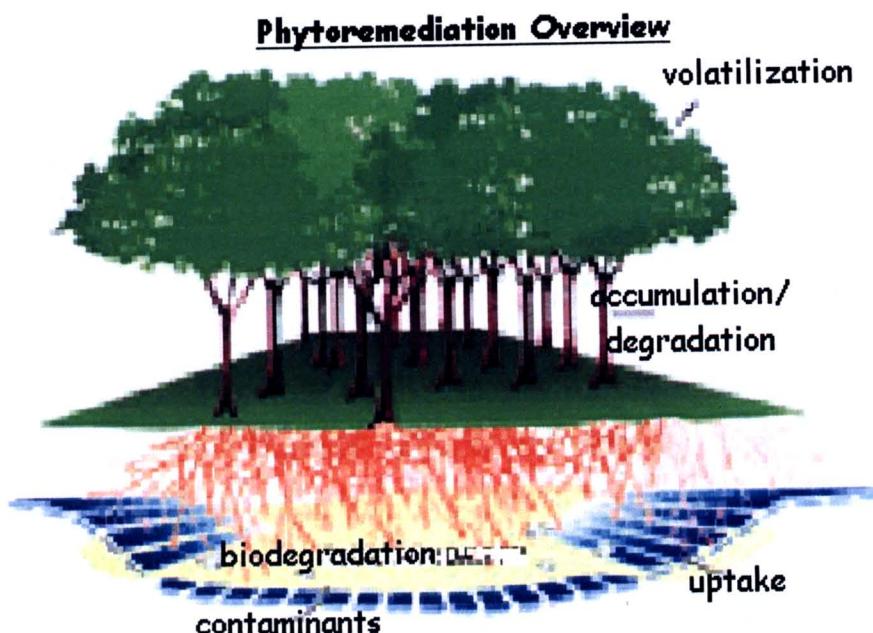
2.3 การบำบัดโดยใช้พืช (phytoremediation)

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1967 นักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบความสามารถของพืชในการดูดซึม (uptake) และการเคลื่อนย้าย (translocation) สารประกอบเคมีทั้งสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์ต่างๆจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ต้นพืช จากนั้นผลการศึกษาวิจัยต่างๆจึงนำมาสู่กระบวนการพัฒนาเป็นกระบวนการเพื่อใช้พืชในการบำบัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม

2.3.1 คำจำกัดความของการบำบัดโดยใช้พืช (definition of phytoremediation)

การบำบัดโดยใช้พืช (phytoremediation) มาจากรากศัพท์คำว่า “*phyto*” ในภาษากรีกที่หมายถึง “พืช” รวมกับคำว่า “*remedium*” ในภาษาละตินที่หมายถึง “การแก้ไขหรือการบำบัดเป่าสิ่งที่ชั่วร้าย” (Cunningham et al., 1996) เมื่อนำทั้งสองคำนี้มารวมกัน หมายถึง การนำพืชมาใช้ในการบำบัดดิน โคลน กากตะกอน หรือน้ำ ที่เกิดการปนเปื้อนโดยสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ (International Environmental Technology Centre, 2000) ซึ่งการบำบัดนี้อาศัยประโยชน์จากกระบวนการดูดน้ำและแร่ธาตุอาหารผ่านทางรากของพืช และกระบวนการคายน้ำออกทางใบของพืชในการเปลี่ยนสารปนเปื้อนเหล่านั้นให้อยู่ในรูปที่ไม่มีความเป็นพิษหรือมีความเป็นพิษลดลง ซึ่งกลไกเหล่านี้ทำหน้าที่เปลี่ยนรูปสารประกอบอินทรีย์ เช่น น้ำมัน สารกำจัดศัตรูพืช เป็นต้น หรือดูดซับและสะสมจุลธาตุที่เป็นพิษ ไว้ในลำต้น ซึ่งสารประกอบเหล่านี้จะถูกกำจัดออกจากพื้นที่เมื่อมีการเก็บเกี่ยวพืชออกไป (Sustainable Straegies, 1997; McCutcheon and Schnoor, 2003)

2.3.2 ชนิดของการบำบัดโดยใช้พืช (type of phytoremediation)



ภาพที่ 2.3 กระบวนการ phytoremediation

ที่มา: <http://arabidopsis.info/students/dom/mainpage.html>

การบำบัดโดยใช้พืชนั้นเป็นเทคนิคที่ใช้พืชในการบำบัดสารพิษต่างๆ ที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อมโดยที่จะคัดเลือกพืชที่มีคุณสมบัติเฉพาะมาใช้ในการบำบัดสารปนเปื้อนแต่ละชนิด โดยพืชที่นำมาใช้มีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะนำมาใช้บำบัดสารปนเปื้อนในแต่ละกรณี ดังนั้นจึงสามารถแยกชนิดของการบำบัดโดยใช้พืชได้ตามความสามารถของพืชที่จะนำมาใช้ในการบำบัด สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 กระบวนการหลัก (รูปที่ 2.4) ได้แก่

1) phytoaccumulation (phytoextraction) กระบวนการ phytoaccumulation หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า phytoextraction คือ กระบวนการกำจัดสารมลพิษเช่น สารประกอบเคมีอินทรีย์ โลหะหนัก และสารกัมมันตรังสี (radionuclide) ฯลฯ จากน้ำหรือดินโดยการดูดซึม (uptake) การลำเลียง (transport) การเคลื่อนย้าย (translocation) สารมลพิษนั้นเข้าสู่พืชทางรากและสะสม (storage) อยู่ในส่วนต่างๆ ของพืช เช่น ราก ใบ ลำต้น และกิ่งก้านต่างๆ สำหรับในกรณีนี้พืชจะสะสมสารมลพิษเหล่านี้โดยไม่มีการย่อยสลายต่อไป ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากการที่พืชนั้นๆขาดกลไก หรือวิถีการย่อยสลาย (degradation mechanism or pathway) ที่เหมาะสมต่อสารมลพิษเหล่านี้

จากนั้นพืชที่มีการสะสมสารมลพิษในส่วนต่างๆ เหล่านี้ จะต้องถูกนำไปบำบัดด้วยวิธีการต่างๆ ต่อไป ได้แก่ การนำไปเผา การฝังกลบหรือการย่อยสลายโดยใช้จุลินทรีย์ เป็นต้น

2) phytostimulation คือ การใช้พืชในการบำบัดสารมลพิษต่างๆ นอกเหนือจากกระบวนการข้างต้น ที่พืชใช้กลไกการสะสม การเปลี่ยนรูป และ/หรือการย่อยสลายสารมลพิษ เพื่อให้สารนั้นมีความเป็นพิษน้อยลงแล้วนั้น พืชสามารถทำงานร่วมกับจุลินทรีย์ในดินที่อาศัยอยู่บริเวณรากพืชเพื่อเร่งการย่อยสลายสารมลพิษเหล่านี้ กระบวนการเหล่านี้เรียกว่า phytostimulation หรือเรียกว่า plant-assisted bioremediation หรือ rhizodegradation และโดยไปกระบวนการนี้ จะช้ากว่าการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยพืช หรือ phytodegradation (GWRTAC, 1997; ITRC, 1999 and US EPA, 2000)

3) phytovolatilization เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปสารมลพิษอินทรีย์และโลหะหนัก บางชนิดให้อยู่ในรูปที่สามารถระเหยได้ (volatile) เป็นรูปที่มีความเป็นพิษน้อยลงและถูกกำจัดออกจากต้นพืชได้ง่ายด้วยการปลดปล่อยการปนเปื้อน และการเปลี่ยนแปลงรูปของสารปนเปื้อนออกสู่ชั้นบรรยากาศภายนอกต้นพืช

4) phytostabilization ในการบำบัด (remediation) หรือการฟื้นฟู (restoration) สิ่งแวดล้อมที่ปนเปื้อนด้วยสารมลพิษนั้น สามารถทำได้ด้วยหลายวิธีการด้วยกัน การใช้ชนิดของพืชปลูกเพื่อช่วยตรึง (immobilization) สารมลพิษที่ปนเปื้อนในดินและในน้ำไว้เพื่อไม่ให้แพร่กระจายออกไป วิธีการนี้ยังรวมถึงให้สร้างความเสถียรให้แก่สารมลพิษที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมโดยการเปลี่ยนรูปสารมลพิษให้ละลายน้ำได้น้อยลง หรือเปลี่ยนสภาวะประจุเพื่อให้ตกตะกอนบริเวณของรากพืช

5) phytodegradation (phytotransformation) หมายถึงกระบวนการเปลี่ยนรูป และ/หรือการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์โดยพืช กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายหลังที่สารมลพิษได้ถูกดูดซึมจากสิ่งแวดล้อมผ่านรากพืชและถูกลำเลียงเข้ามาในพืชแล้ว หลังจากนั้นสารมลพิษเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนรูปหรือสลายด้วยกระบวนการหรือวิถีเมแทบอลิซึมต่างๆ ในเซลล์พืชจนได้สารผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นพิษน้อยลงหรือไม่มีเลยกระบวนการที่เกี่ยวข้อง phytodegradation สามารถแบ่งได้คร่าวๆ ดังนี้

5.1) การเปลี่ยนรูปของสารมลพิษ (transformation)

การเปลี่ยนรูปของสารมลพิษโดยพืชเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปสารที่มีความเป็นพิษให้มีความเป็นพิษน้อยลง การเปลี่ยนรูปนี้นอกจากจะหมายถึงการเปลี่ยนรูปสารมลพิษไปเป็นสารตัวกลางอื่นหรือสารผลิตภัณฑ์อื่นด้วยปฏิกิริยาทางชีวภาพแล้ว ยังรวมถึงการเปลี่ยนสภาวะประจุ (ionic state) ของสารมลพิษนั้นๆ รวมทั้งการเกิดปฏิกิริยา conjugation กับสารอินทรีย์บางชนิดในเซลล์พืชซึ่งทำให้สารมลพิษเหล่านั้นมีความเป็นพิษน้อยลงหรือไม่มีเลย สารมลพิษที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมที่มีรายงานว่าสามารถเปลี่ยนรูปได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพโดยพืชนี้ ได้แก่

โลหะหนักบางชนิด เช่น สารหนู (arsenic; As) ปรอท (mercury; Hg) โครเมียม (chromium) เป็นต้น รวมทั้งสารประกอบอินทรีย์บางชนิด ได้แก่ ทีซีอี (trichloroethylene) ทีเอ็นที (tinitrotoluene) เป็นต้น

5.2) การย่อยสลายบางส่วน (partial degradation)

กระบวนการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์ในพืชอาจเกิดขึ้นในรูปแบบของการย่อยสลายบางส่วน ซึ่งหมายถึงการที่สารมลพิษตั้งต้นถูกย่อยสลายให้มีขนาดของโครงสร้างทางเคมีเล็กลง เช่น การแตกวงของสารอะโรมาติกเป็นสายไฮโดรคาร์บอน หรือมีโครงสร้างความซับซ้อนน้อยลง เช่น การแตกตัวออกของหมู่โซ่ข้าง (side chain) หรือถูกทำให้เปลี่ยนรูปไปเป็นสารผลิตภัณฑ์อื่นซึ่งรูปร่างหรือโครงสร้างแตกต่างจากสารมลพิษตั้งต้นและมีความเป็นพิษน้อยลง หรือไม่มีเลย

5.3) การเปลี่ยนรูปและแยกสารมลพิษ (sequestration) เช่น การเปลี่ยนรูปเพื่อช่วยลดความเสี่ยงสารมลพิษแยกไปเก็บไว้ในส่วนแวคคิวโอ (vacuole) ซึ่งเป็นช่องว่างในเซลล์พืช เป็นต้น

5.4) การย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ (complete degradation หรือ mineralization)

กระบวนการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์อาจเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ในกรณีนี้สารมลพิษตั้งต้นจะถูกย่อยสลายอย่างเป็นขั้นตอนผ่านวิถีเมแทบอลิซึมต่างๆ ในเซลล์พืช ซึ่งในแต่ละขั้นตอนนี้สารมลพิษและสารตัวกลางในแต่ละขั้น อาจถูกนำไปใช้เป็นที่แหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานให้แก่พืช ซึ่งท้ายสุดแล้วสารผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายจะได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ กระบวนการนี้อาจเรียกได้อีกชื่อหนึ่งว่า mineralization กระบวนการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์โดยพืชนั้นต้องเริ่มต้นมาจากการดูดซึมนำสารมลพิษจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่พืช ในธรรมชาติพืชใช้วิธีหรือระบบต่างๆ ในการดูดซึมและลำเลียงสารมลพิษ ระบบการดูดซึมสารมลพิษโดยพืชที่มีการศึกษากันอย่างมากรวมได้แก่ ระบบการลำเลียงโดยระบบปั๊มที่มีการสร้างเป็นสารประกอบร่วมกับกลูตาไธโอน (glutathione-s-conjugation pump) โดยมีตัวลำเลียง (transporter) คือ ATP-binding cassette (ABC) transporter ระบบนี้เกี่ยวข้องกับการลำเลียงสารประกอบที่อยู่ในรูปของกลูตาไธโอนในรูปออกซิไดซ์ (oxidized diglutathione, GS-SG) กลูตาไธโอนที่จับกันอยู่กับสารมลพิษอินทรีย์ (glutathione conjugates of organic or of high-molecular-weight toxic organic xenobiotics) และในรูปของสารประกอบระหว่างเพพไทด์ phytochelatin กับโลหะหนัก ซึ่งสารประกอบในรูปแบบต่างๆ เหล่านี้สามารถถูกลำเลียงเข้าสู่แวคคิวโอของพืชโดยอาศัยระบบปั๊ม ในบางกรณีการสะสมสารมลพิษในแวคคิวโอของพืชจะช่วยทำให้เกิดการย่อยสลายสารมลพิษดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในปัจจุบันข้อมูลและความรู้เกี่ยวกับกระบวนการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์โดยพืชนั้นยังมีน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลและความรู้ที่เกี่ยวกับกระบวนการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์โดยแบคทีเรียหรือรา อย่างไรก็ตามมีรายงานถึงความสามารถของพืชในการย่อยสลายสาร

มลพิษอินทรีย์เพื่อลดความเป็นพิษของสารนั้นๆ และเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต ตัวอย่างของพืชในการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์ ได้แก่ การย่อยสลายสารที่ซีอี (trichloroethylene, TCE) ซึ่งจัดเป็นสารประกอบคลอรีนอินทรีย์ ที่มีการใช้มากในอุตสาหกรรมต่างๆ ส่งผลให้มีการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมทั้งในน้ำบาดาลและในดิน เนื่องจากสารที่ซีอีนี้มีความเป็นพิษสูง เป็นสารก่อมะเร็งและพบว่าเป็นสารที่ถูกย่อยสลายได้ยากจึงจัดเป็นสารมลพิษที่อันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการบำบัดสารมลพิษนี้จึงเป็นสิ่งสำคัญในการกำจัดหรือลดความเป็นพิษนี้ (อลิสวา วังโน, 2550)

2.4 การใช้พืชเพื่อการบำบัดสารกำจัดศัตรูพืชในสิ่งแวดล้อม

phytoremediation เป็นเทคโนโลยี ที่ได้รับความสนใจ และมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีประสิทธิภาพ ประหยัด และเหมาะสมในการกำจัดสารประเภทไฮโดรคาร์บอน สารกำจัดศัตรูพืช เป็นต้น (Macek *et al.*, 2000; Susarla *et al.*, 2002; Xia *et al.*, 2003) การใช้พืชเพื่อบำบัดสารกำจัดศัตรูพืชมีการดำเนินงานมานานแล้ว ตัวอย่างเช่นงานวิจัยของ Li *et al.* (2002) ศึกษาการดูดซับ trifluralin และ lindane โดยใช้หญ้าเลี้ยงสัตว์ (rygrass) ผลการศึกษาพบว่าหญ้าเลี้ยงสัตว์เผาผลาญ trifluralin ได้ดีกว่า lindane การศึกษาของ Wang *et al.* (2006) ได้ทดลองโดยการเติมคลอรีไฟรฟอสความเข้มข้น 1-10 ไมโครกรัมต่อกรัม ลงไปในน้ำ และรดน้ำบนดินที่ปลูกข้าวสาลี และ oilseed rape ผลการศึกษาพบว่าข้าวสาลีมีความสามารถในการดูดซับคลอรีไฟรฟอส 0.257-4.50 ไมโครกรัมต่อกรัม และ oilseed rape มีความสามารถในการสะสมคลอรีไฟรฟอส 0.249-2.02 ไมโครกรัมต่อกรัม นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการลดลงของคลอรีไฟรฟอสในดินที่มีการเพาะปลูกพืชมีค่ามากกว่าในดินที่ไม่มีการเพาะปลูกพืช

การนำเอาพืชน้ำมาใช้เพื่อบำบัดน้ำเสียเป็นที่ยอมรับกันมานานกว่า 20 ปีแล้ว และพืชที่ได้นำมาใช้ในช่วงแรกๆ ได้แก่ กก ผักตบชวา ฐปฤาษีและแหนเบ็ด เป็นต้น การนำพืชมาใช้น้ำบำบัดน้ำเสียจะทำให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้นกว่าเดิม เพราะพืชน้ำสามารถดูดซับสารละลายธาตุอาหารและโลหะหนักบางอย่างจากน้ำเสีย และเป็นการประหยัดพลังงาน เช่น ค่าไฟฟ้า ค่าสารเคมี เป็นต้น (สุชาติ ศรีเพ็ญ และคณะ, 2532)

การศึกษากำจัดคลอรีไฟรฟอสโดยใช้ constructed wetland ของ Moore *et al.* (2001) พบว่าเมื่อปล่อยน้ำที่มีคลอรีไฟรฟอสที่ความเข้มข้น 73, 147 และ 733 ไมโครกรัมต่อลิตร ผ่านเข้าไปใน constructed wetland ดินตะกอน และพืชที่อยู่ในระบบจะสามารถดูดซับคลอรีไฟรฟอสได้

อย่างรวดเร็ว ผลการวัดปริมาณคลอโรไฟลล์ที่สะสมในดินตะกอนและพีชมีค่าเท่ากับ 55 เปอร์เซ็นต์ และ 25 เปอร์เซ็นต์ โดยมวล ตามลำดับ

พีชน้ำหลายชนิดมีความสามารถในการบำบัดสารกำจัดศัตรูพืช ดังเช่นงานวิจัยของ Xia และ Ma (2005) ที่ศึกษาความสามารถของผักตบชวาในการกำจัดสาร ethion ซึ่งเป็นสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟต ผลการศึกษาพบว่าอัตราการกำจัดสาร ethion ของชุดการทดลองที่ไม่มี การฆ่าเชื้อพีชก่อนปลูก ชุดที่ฆ่าเชื้อก่อนปลูก ชุดที่ไม่ฆ่าเชื้อและไม่ปลูกพีช และชุดที่ฆ่าเชื้อแต่ไม่ ปลูกพีช มีค่าเท่ากับ 0.01059 0.00930 0.00294 และ 0.00201 ไมโครกรัมต่อชั่วโมง จากผลที่ได้ นี้สามารถสรุปได้ว่าการกำจัด ethion เกิดจากการดูดดึงของพีช และการย่อยสลายโดยพีช 69 เปอร์เซ็นต์ นอกนั้นเกิดจากการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์อีก 12 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำผักตบชวามาปลูก ในสารละลายที่ไม่มี ethion เป็นเวลา 1 สัปดาห์ ความสามารถในการสะสม ethion ในส่วนที่อยู่ เหนือพื้นดิน ลดลง 55-91 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนรากลดลง 74-81 เปอร์เซ็นต์

Olette et al. (2007) ศึกษาความสามารถในการดูดดึง copper sulphate flzasulfuron และ dimethomorph ของพีชน้ำสามชนิด คือ แหนเป็ด (*Lemna minor*) สาหร่ายหางกระรอก (*Elodea Canadensis*) และสาหร่ายพวงชะโด (*Cabomba aquatica*) ผลการศึกษาพบว่าความเป็นพิษของ สารกำจัดศัตรูพืชที่มีต่อพีชน้ำทั้งสามชนิดเรียงตามลำดับดังนี้ คือ flzasulfuron > copper sulphate > dimethomorph นอกจากนี้ยังพบว่าความสามารถในการดูดดึงสารกำจัดศัตรูพืช ของพีชน้ำจะเรียงลำดับดังต่อไปนี้ คือ แหนเป็ด > สาหร่ายหางกระรอก > สาหร่ายพวงชะโด ประสิทธิภาพในการบำบัด copper sulphate flzasulfuron และ dimethomorph ของแหน มีค่า มากที่สุดเท่ากับ 30, 27 และ 11 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักสดของพีช ตามลำดับ จากงานวิจัย ข้างต้นที่กล่าวมา พบว่า วิธีใช้พีชบำบัดนี้เป็นวิธีที่สามารถใช้ในการกำจัดสารปนเปื้อนหรือสารพิษ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สิทธิชัย ตันธนะสฤทธิ (2538) รายงานว่าพีชที่จะนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียควรมีลักษณะ เป็นพีชที่สามารถปรับตัวและเจริญเติบโตได้ดีในท้องถิ่น ปรับตัวได้ดีในสภาพภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง มีอัตราการสังเคราะห์แสงสูง มีความสามารถในการส่งผ่านออกซิเจนสูง โดยนำออกซิเจนจากใน บรรยากาศที่ส่งผ่านลงมาตามใบ ลำต้น และราก สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความ เข้มข้นของสารมลพิษได้ค่อนข้างกว้าง มีความสามารถในการดูดซึมและเก็บสะสมสารต่างๆ ได้ คงทนต่อโรค และแมลงได้ดี และสามารถนำออกจากระบบได้ง่าย เนื่องจากพีชจะลดปริมาณสารที่ มีอยู่ในน้ำเสียให้ได้ผลดีที่สุดนั้น พีชต้องมีการนำออกจากระบบ เพื่อมิให้พีชอยู่หนาแน่นเกินไปจน ระบบขาดประสิทธิภาพ

2.5 พืชที่ใช้กำจัดคลอรีนไฟรฟอสในน้ำ

2.5.1 จอก



ภาพที่ที่ 2.4 จอก

ชื่อวิทยาศาสตร์

Pistia stratiotes L.

ชื่ออื่น

water lettuce จอกผักกาด ผักกอก กากอก

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

พืชลอยน้ำขนาดค่อนข้างเล็ก มีอายุหลายฤดู ลำต้นมีรูปร่างสั้น มีทั้งที่เป็นกอลอยน้ำ และเป็นไหลกลมเรียวยาวทอดไปตามพื้นน้ำ ซึ่งทำหน้าที่ขยายพันธุ์เพื่อเป็นกอใหม่หรือแตกต้นอ่อนตามซอกใบ มีรากเป็นฝอยเล็กละเอียดแตกออกคล้ายขนนกเกิดใต้กอเป็นกระจุกใหญ่ กอต้นประกอบด้วยกลุ่มของใบเกิดเรียงกันเป็นวงรอบลำต้นสั้นๆ ใบเดี่ยวไม่มีก้านใบ แผ่นใบยาวประมาณ 15 เซนติเมตร อวบน้ำแผ่กว้างผิวใบมีขนละเอียด รูปร่างกว้างคล้ายลิ้น อวบน้ำ ช้อนเกยกันอยู่บนแกนที่เป็นส่วนของลำต้น ออกเป็นกระจุกลอยเหนือน้ำ กอต้นลอยน้ำอยู่ได้ ดอกสีขาว ออกรวมเป็นช่อขนาดเล็กเกิดอยู่ตรงโคนซอกใบ ช่อดอกมีแผ่นสีเขียวคล้ายใบขนาดเล็กหุ้มไว้ มีใบรองรับช่อดอกยาวประมาณ 1.5 เซนติเมตร ช่อดอกแยกเป็นช่อดอกเพศผู้อยู่ตอนบนมีประมาณ 3-8 ดอก และช่อดอกเพศเมียอยู่ตอนล่างมีใบรองรับช่อดอกหุ้มไว้ มีเพียง 1 ดอกเท่านั้น และภายในดอกมีแตรังไขรูปคล้ายคนโทภายในมี 1 ช่องมีไขอ่อนหลายใบส่วนดอกเพศผู้ก็มีเพียงเกสรเพศผู้ 2 อันติดกัน ผลเดี่ยวขนาดเล็กแบบผลสดที่มีเปลือกนุ่ม ภายในมีหลายเมล็ด เป็นวัชพืชน้ำที่พบแพร่ระบาดได้ตามแหล่งน้ำทั่วไปตามบึง หนองน้ำหรือน้ำขุ่น ทั้งในน้ำนิ่ง และน้ำไหล

(สุชาติ ศรีเพ็ญ, 2542 และ สมชาติ หาญวงษา, 2548)

ขยายพันธุ์

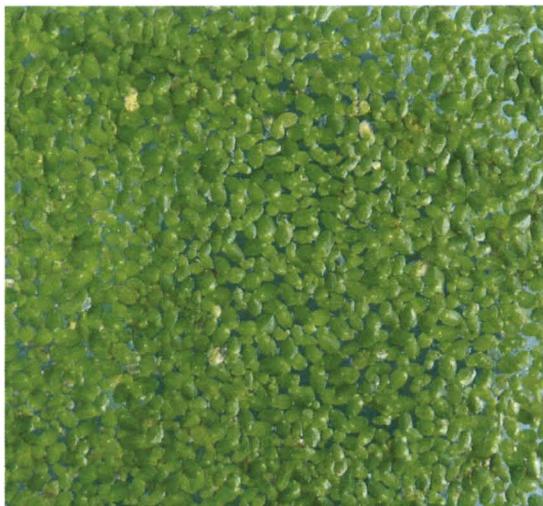
โดยการแตกไหล

ประโยชน์ของจอก

ใช้เป็นอาหารเลี้ยงสัตว์ เช่น หมู เป็ด หรือปลา และใช้เป็นพืชสมุนไพร

(สมชาติ หาญวงษา, 2548)

2.5.2 แหนเป็ด



ภาพที่ 2.5 แหนเป็ด

ชื่อวิทยาศาสตร์

Lemna minor L.

ชื่ออื่น

common duckweed lesser duckweed แหน

กาแหน แหนเล็ก แหนเป็ด

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

พืชลอยน้ำขนาดเล็ก ชอบขึ้นตามหนองบึงหรือสระน้ำทั่วไป ใบสีเขียวสดลอยปริ่มน้ำ หรือเหนือผิวน้ำเล็กน้อย ลอยเดี่ยวๆ หรืออยู่เป็นกลุ่มติดกันประมาณ 2-10 ใบ ด้านใต้มีรากเพียง 1 รากเป็นเส้นบาง แตกตรงข้อด้านล่างของใบ รากนี้ช่วยถ่วงให้ใบลอยน้ำได้ดี ลักษณะของใบมีรูปร่างกลมรีคล้ายรูปไข่ยาวประมาณ 0.5 เซนติเมตร กว้างประมาณ 0.2 เซนติเมตร ผิวด้านบนสีเขียวเป็นมัน มีเส้นใบเล็กๆ 1-5 เส้น ขอบใบเรียบ ดอกมีขนาดเล็กมากมีกาบดอกรูปทรงกระบอก หุ้มอยู่ออกเป็นช่อเล็กๆ เกิดอยู่ภายในถุงตรงขอบใบช่อดอกประกอบด้วยดอกเพศผู้ 2 ดอกที่มีเพียงเกสรเพศผู้และดอกเพศเมีย 1 ดอกที่มีแต่รังไข่เท่านั้น ช่อดอกมีเนื้อเยื่อบางๆ หุ้มไว้ เกสรเพศผู้แต่ละอันมีอับเกสร 2 ช่องรังไข่ขนาดเล็กภายในมี 1 ช่อง มีไข่อ่อน 1-7 ใบ ผลขนาดเล็กมาก

ภายในมี 1 เมล็ดที่สามารถงอกได้ทันที พบตามแหล่งน้ำทั่วไป (สุชาติ ศรีเพ็ญ, 2542 และ
สมชาติ หาญวงษา, 2548)

ขยายพันธุ์ โดยการแตกใบ

ประโยชน์ของแห่นเป็ด

ในบริเวณที่มีมาก ๆ จะนำมาใช้เป็นประโยชน์อาหารเลี้ยงสัตว์น้ำและสัตว์บกหลาย
ชนิด (สมชาติ หาญวงษา, 2548)