บทที่ 2
แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สวนผลไม้ในจังหวัดจันทบุรีและปัญหาด้านวัชพืช

จังหวัดจันทบุรีมีสภาพภูมิประเทศและลักษณะภูมิอากาศที่เอื้ออำนวยต่อการทำเกษตรกรรม เนื่องจากมีปริมาณฝนตกชุก สอดคล้องกับข้อมูลปริมาณฝนเฉลี่ยย้อนหลังปี พ.ศ. 2558-2562 อยู่ที่ 2,960 มิลลิเมตร จากลักษณะดังกล่าวทำให้พื้นที่จังหวัดจันทบุรีเหมาะสมต่อการเป็นแหล่งผลิตผลไม้และสินค้าทางการเกษตรที่มีคุณภาพและมีมูลค่าสูง สอดคล้องกับข้อมูลที่รายงานในปีพ.ศ. 2564 ว่าทุเรียนสร้างมูลค่ารายได้ประมาณ 70,000 ล้านบาท (กาญจนา จินตกานนท์, 2564) ในด้านพื้นที่เพาะปลูกพบว่าจังหวัดจันทบุรีมีพื้นที่ปลูกไม้ผลยืนต้น จำนวน 1,689,279 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 73.93 โดยในปีพ.ศ. 2563 มีปริมาณผลผลิต 1,806,884 ตัน ประกอบด้วย ทุเรียน 380,446 ตัน มังคุด 146,375 ตัน เงาะ 98,063 ตัน และลำไย 1,182,000 ตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2563) ในปี 2562 มีผลผลิตรวม 760,316 ตัน มีมูลค่ารวม 196,929 บาทต่อตัน สอดคล้องกับข้อมูลสรุปจังหวัดจันทบุรี ปี 2563 ระบุว่าสถิติผลิตภัณฑ์มวลรวมจังหวัด (GPP) ณ ราคาประจำปี ภาคการเกษตร ในปี พ.ศ. 2561 ของสำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ มีมูลค่า 65,117 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 54.19 เป็นอันดับสูงสุดของประเทศ และเมื่อพิจารณาประเด็นยุทธศาสตร์รายปีจากแผนพัฒนาจังหวัด 5 ปี (พ.ศ. 2561 – 2565) ของจังหวัดจันทบุรี พบว่าในภาพรวมให้ความสำคัญด้านการเกษตรและการท่องเที่ยวเป็นอันดับแรก ซึ่งสอดคล้องกับศักยภาพของจังหวัดที่เป็นเมืองผลไม้ ซึ่งมีชื่อเสียงในระดับประเทศ จึงมุ่งส่งเสริมการผลิตสินค้าเกษตรให้ได้มาตรฐานสากลและขยายฐานการตลาดนานาชาติ โดยกำหนดมาตรฐานด้านคุณภาพ คือ มาตรฐานการปฏิบัติทางการเกษตรที่ดี GAP (Good Agricultural Practices) และมาตรฐานการปฏิบัติที่ดีสำหรับโรงคัดบรรจุ GMP (Good Manufacturing Practice) มาตรฐานสารพิษตกค้าง มกษ. 9002-2556 (กาญจนา จินตกานนท์, 2564) จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเพาะปลูกไม้ผลในจังหวัดจันทบุรีสามารถสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรผู้ปลูกและทำรายได้เข้าประเทศจากการส่งออกเป็นมูลค่ามหาศาล อย่างไรก็ตามปัญหาเรื่องวัชพืชในสวนผลไม้นับเป็นปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งนอกจากโรคและแมลงศัตรูพืช เนื่องจากไม้ผลเป็นไม้ยืนต้นที่มีระยะปลูกห่าง จึงมีปริมาณแสงแดดเหมาะสม ประกอบกับการให้ปุ๋ยและน้ำแก่พืชปลูกมีผลไปถึงวัชพืชในสวนผลไม้อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ มีผลทำให้วัชพืชเจริญได้ดีและแพร่กระจายได้รวดเร็ว หากไม่มีวิธีการป้องกันและกำจัดที่เหมาะสม วัชพืชที่อยู่ในสวนผลไม้จะไปมีผลลดการเจริญพืชปลูกและส่งผลกระทบต่อปริมาณผลผลิตในที่สุด

วัชพืช

วัชพืชสำคัญในสวนผลไม้มีความหลากหลายทั้งชนิดและปริมาณ โดยขึ้นกับสภาพพื้นที่ที่ปลูก ฤดูกาล ขนาดและทรงพุ่มของต้น รวมถึงการจัดการดูแลของเจ้าของสวน โดยจะพบวัชพืชล้มลุกที่ขยายพันธุ์โดยเมล็ดเป็นส่วนใหญ่และเป็นวัชพืชฤดูเดียว วัชพืชในสวนทุเรียนมีทั้งวัชพืชฤดูเดียว ได้แก่ หญ้าขจรจบ หญ้าตีนนก และวัชพืชข้ามปี ได้แก่ หญ้าคา หญ้าชันกาด แห้วหมู (กรมวิชาการเกษตร, 2564) และจากข้อมูลในปี พ.ศ. 2548 มีรายงานการรวบรวมชนิดวัชพืชในแปลงมังคุดทั้งหมด 41 ชนิด สามารถจัดแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ (1) วัชพืชประเภทใบแคบมีลักษณะที่สำคัญคือลำต้นเป็นข้อปล้องชัดเจน ใบรูปเรียวยาว เส้นใบขนานกัน อาจกล่าวได้ว่าเป็นพืชที่อยู่ในวงศ์หญ้า เช่น หญ้านมหนอน หญ้าตีนกำ และหญ้าโขย่ง (2) วัชพืชประเภทใบกว้าง มีลักษณะใบที่แผ่กว้างและขนาดใหญ่กว่าวัชพืชใบแคบและกก เช่น กระดุมใบใหญ่ สาบม่วง และสาบแร้งสาบกา (3) วัชพืชประเภทกก ลักษณะใบคล้ายวัชพืชใบแคบ ลำต้นอาจกลมหรือเป็นสามเหลี่ยม แต่ไม่มีข้อปล้อง เช่น แห้วหมูนา กกดอกตุ้ม และพรงกลมน้อย (กรมวิชาการเกษตร, 2564)

วัชพืชเป็นพืชที่ขึ้นตามธรรมชาติ มีชนิด การแพร่กระจายและความหนาแน่น เปลี่ยนแปลงไปตามกาลเวลาและสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะปริมาณและความเข้มแสงที่เกิดจากร่มเงาของไม้ผล กลุ่มวัชพืชที่เจริญงอกงามได้ดีอาจเจริญมาจากเมล็ดหรือลำต้นใต้ดินซึ่งมักเป็นวัชพืชดั้งเดิมในพื้นที่ ผลจากการเตรียมดินในระหว่างการเพาะปลูกและการบำรุงรักษาไม้ผลอาจทำให้มีการเจริญแพร่พันธุ์ของวัชพืชที่กระจายพันธุ์โดยเมล็ด เช่น สาบแร้งสาบกา สาบเสือ ซึ่งเป็นวัชพืชปีเดียว (annual weeds) สวนที่มีการไถพรวนน้อยอาจพบการแพร่กระจายของหญ้าคาซึ่งเป็นวัชพืชหลายปี (perennial weeds) การเกิดวัชพืชในสวนผลไม้ของจังหวัดจันทบุรี ส่วนใหญ่จะพบได้ตามบริเวณพื้นที่ระหว่างพุ่มไม้ที่มีระยะปลูกค่อนข้างห่าง แสงแดดส่องถึง ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะกับการเจริญของวัชพืช ดังภาพที่ 2.1 ที่แสดงลักษณะการแพร่กระจายของวัชพืชในสวนทุเรียน

วัชพืชมักเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยลมหรือน้ำพัดพามา หากปล่อยให้มีการเจริญแพร่กระจายออกไปโดยขาดการควบคุม อาจสร้างความเสียหายให้กับสวนไม้ผล และเป็นอุปสรรคต่อการเข้าไปดูแลจัดการสวนหรือเก็บเกี่ยวผลผลิต เป็นที่หลบซ่อนของแมลงหรือศัตรูของไม้ผล แก่งแย่งน้ำ ธาตุอาหาร แสง และพื้นที่ ซึ่งทำความเสียหายโดยตรงแก่ไม้ผล หากเป็นต้นที่ปลูกใหม่จะมีลักษณะแคระแกร็น ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ตามปกติ ถ้าเป็นต้นที่โตแล้ว ก็ทำให้ปริมาณผลผลิตและคุณภาพลดลง นอกจากนี้วัชพืชอาจเป็นสาเหตุของไฟไหม้สวนในฤดูแล้ง รวมถึงเพิ่มค่าใช้จ่ายของเกษตรกรเจ้าของสวนในการควบคุมกำจัดวัชพืช (ดวงพร สุวรรณกุล, 2543 : 41)

ภาพที่ 2.1 ลักษณะการแพร่กระจายของวัชพืชในสวนผลไม้จังหวัดจันทบุรี

แนวทางการกำจัดวัชพืช

จากรายงานของคณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (2556) กล่าวถึงแนวทางในการจัดการวัชพืช ซึ่งจะทำให้วัชพืชมีผลกระทบต่อระบบต่าง ๆ โดยเฉพาะต่อระบบการผลิตทางการเกษตรน้อยที่สุดมีหลักในการจัดการที่ประกอบด้วย การป้องกัน (prevention) การควบคุม (control) และการกำจัด (eradication) โดยการป้องกัน หมายถึง การดำเนินการใด ๆ อันเป็นการขัดขวางมิให้วัชพืชซึ่งปรากฏอยู่แล้วในบริเวณใดบริเวณหนึ่งเจริญเติบโตสร้างส่วนขยายพันธุ์เพิ่มมากขึ้น หรือเป็นการขัดขวางมิให้วัชพืชแพร่กระจายเข้าสู่พื้นที่หรือบริเวณที่ยังไม่เคยมีวัชพืชชนิดนั้นมาก่อน การควบคุม หมายถึง การดำเนินการใด ๆ ที่จะทำให้จำนวนวัชพืชซึ่งแพร่ระบาดอยู่ในบริเวณพื้นที่นั้น ๆ แล้ว ลดจำนวนลงจนถึงระดับที่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายแก่พืชปลูก การกำจัด หมายถึง การดำเนินการใด ๆ ที่ทำให้วัชพืชหมดไปจากพื้นที่หนึ่งโดยสิ้นเชิง มักจะเน้นกับวัชพืชที่เป็นปัญหาอย่างรุนแรง หรือกับบริเวณที่ได้รับผลกระทบอย่างรุนแรงจากวัชพืช สำหรับวิธีการกำจัดวัชพืชแบ่งได้เป็น

วิธีทางกายภาพ

การกำจัดวัชพืชโดยวิธีทางกายภาพ เช่น การเตรียมดินก่อนการปลูกพืช โดยการขุดรากเหง้าวัชพืชข้ามปีเพื่อป้องการการแพร่กระจายในภายหลัง การไถกำจัดวัชพืชแซมเพื่อทำลายรากของวัชพืช การตัดด้วยอุปกรณ์เพื่อยับยั้งการเจริญของวัชพืช การใช้วัสดุคลุมดินเพื่อป้องกันวัชพืชบริเวณทรงพุ่ม การเผาเพื่อทำลายวัชพืชที่งอกเป็นต้นแล้ว การปล่อยน้ำท่วมให้วัชพืชขาดออกซิเจน

วิธีทางชีวภาพ

การกำจัดวัชพืชด้วยวิธีทางชีวภาพ เช่น การใช้น้ำหมักชีวภาพเนื่องจากมีความเป็นกรดสูง เมื่อกรดสัมผัสกับใบของวัชพืชจะไปทำลายระบบสังเคราะห์แสง

วิธีทางเคมี

การกำจัดวัชพืชด้วยวิธีทางเคมี โดยการใช้สารเคมีที่มีผลในการควบคุมและกำจัดวัชพืชที่เรียกว่า สารกำจัดวัชพืช (herbicide) ผลการใช้อาจแสดงในลักษณะการทำลายหรือยับยั้งการเจริญเติบโต โดยอาจเกิดขึ้นระหว่างที่ส่วนขยายพันธุ์กำลังงอกเป็นต้นกล้า หรือเป็นต้นสมบูรณ์แล้ว ขึ้นอยู่กับชนิดของสารกำจัดวัชพืช ปริมาณการใช้ วิธีฉีดพ่น และเวลาที่ใช้

สารเคมีกำจัดศัตรูพืช

สารกำจัดศัตรูพืช (pesticides) หมายถึงสารเคมีที่ผลิตขึ้นเพื่อทำลายสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นที่มาแก่งแย่ง ขัดขวางการผลิตอาหาร เป็นสารที่ใช้เพื่อป้องกันโรคพืชโดยสามารถลดประชากรศัตรูพืชได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ความเสียหายของพืชที่อาจเกิดขึ้นจากศัตรูพืชลดลง หรือไม่เสียหายเลย โดยที่สารเคมีกำจัดศัตรูพืชมีวิธีการใช้งานที่ค่อนข้างง่าย ราคาไม่แพง ทำให้เกษตรกรใช้งานสารเคมีดังกล่าวอย่างรวดเร็ว จนมีการใช้ในปริมาณที่มากเกินความจำเป็น จนส่งผลกระทบในด้านลบต่อสุขภาพของเกษตรกร ผู้บริโภค และสิ่งแวดล้อมในที่สุด (สุธาสินี อั้งสูงเนิน, 2558 : 52-53) สอดคล้องกับข้อมูลจาก กรมวิชาการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ที่ระบุว่าตั้งแต่ปี พ.ศ. 2551-2561 ประเทศไทยนำเข้าวัตถุอันตรายทางการเกษตร ได้แก่ สารกำจัดวัชพืช สารกำจัดแมลง และสารป้องกันและกำจัดโรคพืช ปริมาณรวม 1,663,780 ตัน มูลค่ารวม 246,715 ล้านบาท โดยปริมาณและมูลค่าการนำเข้าวัตถุอันตรายทางการเกษตรของประเทศไทยมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อพิจารณาสัดส่วนการนำเข้าปี พ.ศ. 2561 พบว่าสารกำจัดวัชพืชมีสัดส่วนสูงสุดประมาณ 3 ใน 4 หรือประมาณร้อยละ 73 รองลงมาคือ สารป้องกันและกำจัดโรคพืช คิดเป็นร้อยละ 12 ตามมาด้วยสารกำจัดแมลง คิดเป็นร้อยละ 11 และสารอื่น ๆ อีกร้อยละ 4

ประเภทของสารเคมีกำจัดศัตรูพืช

สารเคมีกำจัดศัตรูพืชในทางการเกษตรซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ตามชนิดของสิ่งมีชีวิตที่ใช้ในการควบคุมและกำจัด คือ สารเคมีกำจัดแมลง สารป้องกันกำจัดวัชพืช สารป้องกันกำจัดเชื้อราสารกำจัดหนูและสัตว์แทะ สารเคมีกำจัดหอยและปู เป็นต้น โดยสารกำจัดแมลงที่ใช้บ่อย คือ สารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟต (organophosphate) คาร์บาเมต (carbamate) และไพรีรอยด์ (pyrethroid) และสารกำจัดวัชพืชที่ใช้บ่อย คือ พาราควอท (paraquat) และไกลโฟเสท (glyphosate) (สุธาสินี อั้งสูงเนิน, 2558 : 53)

ผลกระทบจากการใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืช

กองโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข (ม.ป.ป.) ระบุว่าเกษตรกรส่วนใหญ่ใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชอย่างแพร่หลายเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร โดยส่วนใหญ่มีพฤติกรรมการใช้ที่ไม่ถูกต้อง ปลอดภัย ทำให้เกิดอันตราย

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

ต่อสุขภาพทั้งแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง โดยอาการแสดงเฉียบพลันมีตั้งแต่ระดับเล็กน้อยจนรุนแรงถึงแก่ชีวิต ขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้น ความเป็นพิษ และปริมาณที่ได้รับ ส่วนอาการเรื้อรังเกิดได้จากสารเคมีกำจัดศัตรูพืชที่สะสมในระบบต่าง ๆ ของร่างกายทำให้เกิดความผิดปกติและโรคต่าง ๆ เช่น มะเร็ง ซึ่งสารเคมีกำจัดศัตรูพืชสามารถเข้าสู่ร่างกายได้หลายทาง โดยการสัมผัสทางผิวหนัง การสูดหายใจละอองที่ฟุ้งกระจายในอากาศ และการรับประทานอาหารและน้ำดื่มที่มีสารเคมีปนเปื้อน ซึ่งพฤติกรรมการใช้สารเคมีที่ไม่ปลอดภัยนั้นทำให้เกษตรกรผู้อาศัยในชุมชน และผู้บริโภคมีความเสี่ยงจากการได้รับอันตรายจากสารเคมีเพิ่มขึ้น

สถานการณ์โรคและภัยสุขภาพจากสารเคมีกำจัดศัตรูพืช

จากรายงานของศูนย์ข้อมูลและข่าวสืบสวนเพื่อสิทธิพลเมือง (2562 : 1) ระบุว่าเกษตรกรไทยนิยมใช้ยากำจัดศัตรูพืชในการทำการเกษตรเป็นจำนวนมาก จากความเชื่อที่ว่าการใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชมีต้นทุนต่ำประกอบกับมีวิธีการใช้ที่ง่ายและสะดวก แต่มีข้อมูลเชิงประจักษ์ว่าการใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชที่มากเกินความจำเป็นดังกล่าวได้ส่งผลต่อสุขภาพของเกษตรกรด้วยเช่นกัน โดยในปีพ.ศ. 2559-2561 มีรายงานจำนวนผู้เจ็บป่วยจากการรับสารเคมีกำจัดศัตรูพืชเฉลี่ยปีละกว่า 4 พันกว่าราย ในช่วงปีพ.ศ. 2559-2562 มีผู้เสียชีวิต 2,193 ราย ประกอบกับจากข้อมูลการเข้ารับบริการในระบบหลักประกันสุขภาพแห่งชาติ ในช่วง 10 เดือนของปีงบประมาณ 2562 (1 ต.ค. 2561 - 17 ก.ค. 2562) ได้รายงานผู้ป่วยที่เข้ารับการรักษาในโรงพยาบาลต่าง ๆ ทั่วประเทศ ในจำนวนนี้เป็นผู้ป่วยที่เข้ารับการรักษาโดยมีสาเหตุจากการได้รับสารเคมีกำจัดศัตรูพืช จำนวน 3,067 ราย เสียชีวิต 407 ราย เบิกจ่ายค่ารักษากว่า 14.64 ล้านบาท โดยข้อมูลนี้แยกผู้ป่วยตามประเภทของสารเคมีที่ได้รับ ดังนี้ (1) ยาฆ่าแมลงกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตและคาร์บาเมต (organophosphate and carbamates insecticides) จำนวน 705 ราย เสียชีวิต 58 ราย เบิกจ่ายค่ารักษา 4.27 ล้านบาท (2) ยาฆ่าหญ้าและยาฆ่าเชื้อรา (herbicides and fungicides) จำนวน 1,337 ราย เสียชีวิต 336 ราย เบิกจ่ายค่ารักษา 6.79 ล้านบาท และ (3) สารเคมีทางการเกษตรประเภทอื่น ๆ จำนวน 1,025 ราย เสียชีวิต 13 ราย เบิกจ่ายค่ารักษา 3.57 ล้านบาท ทั้งนี้เมื่อดูข้อมูลโดยแยกรายเขตบริการ 13 เขต พบว่า เขตเชียงใหม่มีผู้ป่วยเข้ารับบริการมากที่สุด จำนวน 506 ราย รองลงมาเขตราชบุรี จำนวน 390 ราย เขตนครสวรรค์ จำนวน 340 ราย และนครราชสีมา จำนวน 338 ราย ซึ่งหากรวมจำนวนผู้เสียชีวิตที่มีสาเหตุจากการได้รับสารเคมีกำจัดศัตรูพืชในช่วง 4 ปี ตั้งแต่ปี 2559-2562 มีจำนวนถึง 2,193 ราย รวมถึงงบประมาณค่ารักษาพยาบาลกว่า 20 ล้านบาทต่อปี

สารกำจัดวัชพืช

ตามรายงานของกองโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข (ม.ป.ป. : 1) แบ่งประเภทของสารเคมีกำจัดวัชพืชออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ จำแนกตาม

การเลือกทำลาย ได้แก่ (1) สารชนิดเลือกทำลาย (selective herbicide) โดยทำลายเฉพาะวัชพืช แต่ไม่เป็นอันตรายต่อพืชที่ปลูก เช่น 2,4-D กำจัดวัชพืชใบกว้างโดยไม่เป็นพิษต่อต้นข้าวที่เป็นพืชใบแคบ เป็นต้น (2) สารชนิดไม่เลือกทำลาย (non-selective herbicide) ทำลายวัชพืชใบแคบ ใบกว้าง หรือกก แนะนำให้ใช้กำจัดวัชพืชในที่ที่ไม่มีการปลูกพืช หรือถ้าจะพ่นในที่ที่มีพืชขึ้นอยู่หรืออยู่ใกล้เคียงต้องพ่นอย่างระมัดระวัง เช่น พาราควอท ไกลโฟเสท

สารกำจัดวัชพืช มีชื่อเรียกทั่วไปหลายแบบ เช่น ยาฆ่าหญ้า ยาปราบวัชพืช ยากำจัดวัชพืช และสารเคมีกำจัดวัชพืช สมาคมวิทยาการวัชพืชแห่งประเทศไทย และกองพฤกษศาสตร์และวัชพืช กรมวิชาการการเกษตร นิยมใช้คำว่า สารกำจัดวัชพืช ซึ่งหมายถึง สารเคมีใด ๆ ก็ตามที่นำมาใช้เพื่อฆ่า ทำลาย หรือยับยั้งการเจริญเติบโตของวัชพืช ทั้งในขณะที่วัชพืชงอกขึ้นมาแล้วหรือยังเป็นเมล็ดอยู่ ตลอดจนชิ้นส่วนต่าง ๆ ของวัชพืชที่ขยายพันธุ์ได้ ทั้งที่อยู่ในดินหรืออยู่บนดิน (ทศพล พรพรหม, 2545 : 6) ซึ่งสารกำจัดวัชพืชจัดเป็นวัตถุอันตรายชนิดหนึ่ง ซึ่งได้ระบุไว้ในพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 (ฝ่ายข้อมูลเครือข่ายเตือนภัยสารเคมีกำจัดศัตรูพืช, 2556 : 3)

ทศพล พรพรหม (2545 : 15) สรุปว่า โดยทั่วไปสารกำจัดวัชพืชจะมีผลในทางยับยั้งในกระบวนการทางสรีรวิทยาและชีวเคมีต่าง ๆ ภายในพืช ซึ่งสามารถจำแนกชนิดของสารได้ตามลักษณะโครงสร้างพื้นฐานทางเคมีและกลไกการทำปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่สำคัญ ได้แก่ สารที่ยับยั้งการสังเคราะห์กรดอะมิโนบางชนิด สารสัมผัสหรือทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ สารที่มีคุณสมบัติคล้ายฮอร์โมนพืช สารที่ยับยั้งการสังเคราะห์กรดไขมัน สารที่ยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง สารที่ยับยั้งการสังเคราะห์รงควัตถุต่าง ๆ และสารที่ยับยั้งการแบ่งเซลล์บริเวณเนื้อเยื่อเจริญของพืช

สารกำจัดวัชพืชที่เกษตรกรไทยนิยมใช้กันมาก ได้แก่ ไกลโฟเสท (glyphosate) พาราควอท (paraquat) ทูโฟร์ดี (2,4-D) และอะทราซีน (atrazine) ดังจะเห็นได้จากปริมาณการนำเข้าสารกำจัดวัชพืชของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2558–2559 (ตารางที่ 2.1) ซึ่งสารกำจัดวัชพืชชนิดไกลโฟเสทเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากสามารถออกฤทธิ์ทำลายวัชพืชได้หลากชนิด ราคาถูก ใช้ในปริมาณน้อยก็สามารถกำจัดวัชพืชได้เป็นวงกว้าง พาราควอทเป็นสารประเภทสัมผัสตาย สามารถออกฤทธิ์กำจัดวัชพืชได้ทันที ทูโฟร์ดีนิยมนำมาใช้กำจัดวัชพืชใบกว้าง และอะทราซีนที่มีพิษทำลายเฉพาะพืชปลูก สามารถใช้เพื่อปรับหน้าดินการเพาะปลูก ใช้ป้องกันการงอกของวัชพืชในแปลงปลูกได้

ตารางที่ 2.1 ปริมาณการนำเข้าสารกำจัดวัชพืชของประเทศไทย 4 อันดับสูงสุด

ชื่อสามัญ	ปี พ.ศ. 2558		ปี พ.ศ. 2559	
	ปริมาณ (กก.)	มูลค่า (บาท)	ปริมาณ (กก.)	มูลค่า (บาท)
glyphosate-isopropylammonium	58,078,201	3,083,660,911	61,801,859	2,994,921,262
paraquat dichloride	30,440,671	2,692,522,593	31,525,596	2,110,162,094
2,4-D-dimethylammonium	5,929,474	372,839,897	6,987,888	398,054,630
atrazine	3,983,749	519,063,596	3,606,988	438,349,001

ที่มา : (สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร, 2560)

ไกลโฟเสท

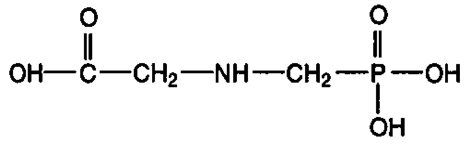
ไกลโฟเสท (glyphosate, $C_3H_8NO_5P$) เป็นสารกำจัดวัชพืชชนิดหนึ่งที่จัดอยู่ในกลุ่มฟอสโฟโนไกลซีน (phosphonoglycine) มีชื่อทางการค้าที่รู้จักกันโดยทั่วไปคือ ราวด์อัพ (roundup) นิยมใช้เป็นสารกำจัดวัชพืชก่อนทำการเพาะปลูก เป็นสารชนิดดูดซึม ออกฤทธิ์ช้า เพื่อควบคุมหญ้า เป็นสารประเภทไม่เลือกทำลาย เกษตรกรจึงนิยมนำมาใช้กำจัดหญ้าที่มีอายุค้างปี มีการใช้งานโดยการฉีดพ่นทางใบ และใช้ภายหลังการงอกของพืช สามารถเคลื่อนย้ายภายในต้นพืช ใช้ควบคุมได้ทั้งวัชพืชใบแคบและใบกว้าง วัชพืชล้มลุกและยืนต้น (พันทวี แข็งขัน และคนอื่น ๆ, 2563 : 517) โดยคุณสมบัติเคมีของไกลโฟเสทแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางเคมีของสารไกลโฟเสท

คุณสมบัติ	ข้อมูล
ชื่อสามัญ	ไกลโฟเสท (glyphosate)
CAS number	1071-83-6
ชื่อทางเคมี	*เอ็น* ฟอสโฟโนเมทธิล ไกลซีน (*N* – phosphonomethyl glycine)
สูตรเคมี	$C_3H_8NO_5P$
ชื่อทางการค้า	ราวด์อัพ, ไกลโฟเสท

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

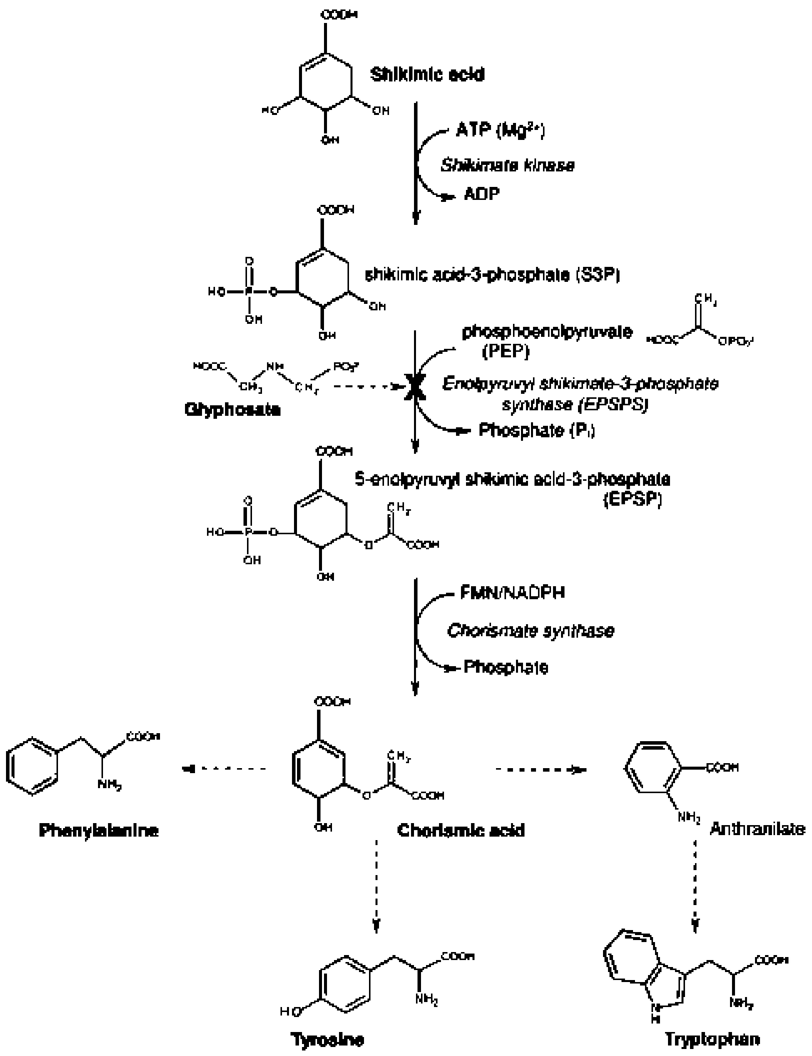
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางเคมีของสารไกลโฟเสท (ต่อ)

คุณสมบัติ	ข้อมูล
สูตรโครงสร้าง	
น้ำหนักโมเลกุล	169.07 (กรัมต่อโมล)
สภาพทางฟิสิกส์	ของแข็ง สีขาวไม่มีกลิ่น
จุดหลอมเหลว	200 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	109 องศาเซลเซียส
การละลายน้ำ	10,000 - 15,700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ที่มา : (ทศพล พรพรหม, 2545 : 8)

กลไกการออกฤทธิ์ในพืช

ไกลโฟเสท เป็นสารกำจัดวัชพืชที่มีคุณสมบัติในการยับยั้งการสังเคราะห์กรดอะมิโนที่จำเป็นต่อกระบวนการสังเคราะห์โปรตีนและจำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ ฟีนิลอะลานีน (phenylalanine) ทริปโตแฟน (tryptophan) และไทโรซีน (tyrosine) โดยไกลโฟเสทจะยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ 5-enolpyruvylshikimic acid-3-phosphate synthase (EPSPs) ซึ่งอยู่ในวิถีชิคิเมท (shikimate pathway) ทำให้ไม่สามารเปลี่ยนชิคิเมท-3-ฟอสเฟต (shikimate-3-phosphate ; PEP) เป็น 5-อีนอลไพรูวิลชิคิมิก แอซิด-3-ฟอสเฟต (5-enolpyruvylshikimic acid-3-phosphate ; EPSP) และโคริสเมท (chorismite) วิถีชิคิเมทยังเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารทุติยภูมิประเภทอะโรมาติกชนิดอื่น ๆ ในต้นพืชด้วย เช่น ลิกนิน (lignins) แอลคาลอยด์ (alkaloids) ฟลาโวนอยด์ (flavonoids) และกรดเบนโซอิก (benzoic acids) เป็นต้น สารกลุ่มนี้มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตและอาจจะมีอันตระกิริยากับสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ อีกด้วย การออกฤทธิ์ของไกลโฟเสทในพืชสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 วิถีชิคิเมทในพืชซึ่งนำไปสู่การสังเคราะห์กรดอะมิโนที่มีโครงสร้างเป็นวงอะโรมาติกและกลไกการยับยั้งเอนไซม์ EPSPs ของสารกำจัดวัชพืชไกลโฟเสท

ที่มา: (Pollegioni, Schonbrunn & Siehl, 2011 : 2754)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

สารไกลโฟเสทที่อยู่ในรูปเกลือจะสามารถเข้าสู่พืชได้เร็วกว่าในรูปกรด ซึ่งจะถูกดูดซึมเข้าสู่พืชโดยผ่านทางคิวติเคิล (cuticle) ของใบ และจะเคลื่อนย้ายจากบริเวณส่วนของใบไปสู่เนื้อเยื่อแบบซิมพลาสต์ (symplast) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของสารผ่านส่วนที่มีชีวิต โดยเข้าทางโปรโตพลาซึม (protoplasm) ของชั้นเอพิเดอร์มิส (epidermis) และชั้นคอร์เทกซ์ (cortex) โมเลกุลของไกลโฟเสทซึ่งละลายอยู่ในน้ำจะผ่านไปทางท่อเชื่อมระหว่างโปรโตพลาสซึมของเซลล์ที่เรียกว่า พลาสโมเดสมาตา (plasmodesmata) และต่อไปจนถึงท่ออาหาร (phloem) (คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัย

สงขลานครินทร์, 2556) หลังจากที่พืชได้รับสารภายใน 4-7 วัน พืชจะแสดงลักษณะอาการเป็นพิษ โดยพืชจะมีใบเหลืองซีด ที่เรียกว่าคลอโรซิส (chlorosis) (ภาพที่ 2.3) และทำให้เกิดการตายของเซลล์ ที่เรียกว่า นีโครซิส (necrosis) วัชพืชจะแสดงอาการได้รับพิษภายใน 10-20 วัน ทำให้ใบที่ยังไม่แก่เต็มที่ (immature leaves) และจุดเจริญจะถูกทำลายไป ซึ่งจุดเจริญนี้คือ ส่วนที่ตอบสนองต่อสารเคมีได้มากที่สุด จะแตกต่างกันไปในพืชแต่ละชนิด เช่น จุดเจริญของพืชใบกว้างมักจะอยู่ที่ตา และที่ยอด ในซอกใบหรือซอกกิ่ง โอกาสที่จะถูกรับสารไกลโฟเสทก็จะมากกว่าพืชใบแคบ ไกลโฟเสทจะเคลื่อนย้ายไปสะสมอยู่ที่บริเวณเนื้อเยื่อที่อยู่ใต้ดิน (underground tissue) ใบที่ยังไม่แก่เต็มที่ และเนื้อเยื่อเจริญ (meristems) ดังนั้น อวัยวะของพืชที่ทำหน้าที่สะสมอาหาร เช่น หัว เหง้า และไหล จึงมีสารไกลโฟเสทไปสะสมอยู่ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง (ทศพล พรพรหม, 2545 : 17)

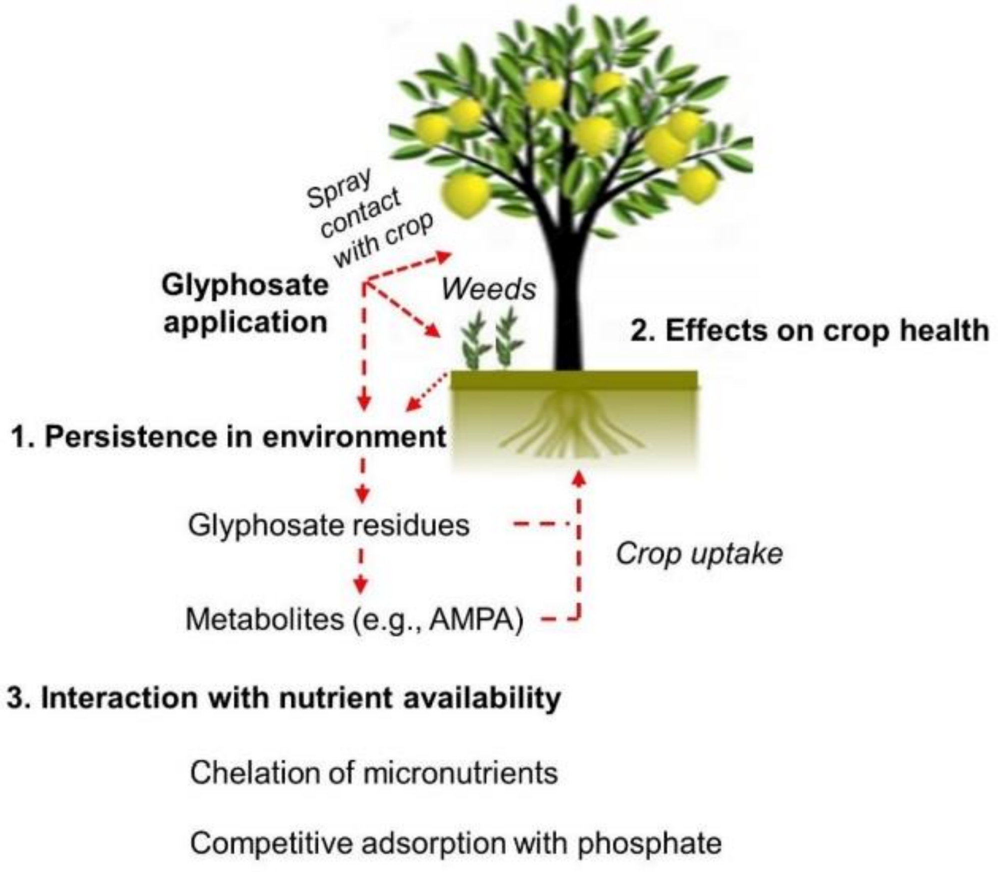
ภาพที่ 2.3 ลักษณะของพืชที่ได้รับสารไกลโฟเสท
ที่มา : (Strachan & Johnson, 2013)

คุณสมบัติของไกลโฟเสทเมื่อลงสู่ดิน

เมื่อมีการย่อยสลายจะทำให้มีการปลดปล่อยฟอสเฟตในโครงสร้างของสารดังกล่าวออกมาสู่ดิน เมื่อสารอยู่ในดินจะมีการดูดซับกรดฟอสฟอริก (phosphoric acids) โดยอนุภาคดินเหนียว จึงทำให้มีการเคลื่อนย้ายในดินได้น้อยและไม่มีการระเหย เนื่องจากไกลโฟเสทมีการยึดเกาะกับอนุภาคของดินเหนียวได้ค่อนข้างสูง (พันทวี แข็งขัน, 2563 : 518) ไกลโฟเสทจะสามารถแตกตัวเป็นประจุลบในดิน เนื่องจากในดินมีคอลลอยด์ ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ของเหล็ก และอลูมิเนียม (Al) ซึ่งมีประจุบวกอยู่ในดิน เมื่อไกลโฟเสทแตกตัวเป็นประจุลบจึงไปจับตัวผิวอนุภาคคอลลอยด์จึงทำให้ดินมีประจุลบเพิ่มมากขึ้น แล้วสามารถดึงธาตุอาหารที่เป็นไอออนบวกได้มากขึ้น สารไกลโฟเสทมีครึ่งชีวิตในดินนาน 30-47 วัน (Borggaard and Gimsing, 2008 : 445)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

จากการใช้ไกลโฟเสทในปริมาณมากเกินความจำเป็นในรูปการฉีดพ่น ทำให้มีการแพร่กระจายของไกลโฟเสททั้งในแหล่งน้ำและดิน จากรายงานต่าง ๆ พบว่ามีการตรวจพบไกลโฟเสทสะสมในดินและในพืชผลทางการเกษตร ในสัตว์ที่เลี้ยงด้วยพืชผลซึ่งมีไกลโฟเสทตกค้างอยู่ รวมถึงในมนุษย์ จากปริมาณการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นทำให้พบการตกค้างของสารไกลโฟเสทในสิ่งแวดล้อม เกิดผลเสียหายต่อพืชปลูก และในพืชผลทางการเกษตร (ภาพที่ 2.4)



ภาพที่ 2.4 ผลของไกลโฟเสทต่อการผลิตพืชผลทางการเกษตร
ที่มา : (Kanissery, R. et al. : 2019 : 3)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

ข้อมูลความเป็นพิษ

ในปี 2558 หน่วยงาน International Agency for Research on Cancer (IARC) ระบุว่า ไกลโฟเสทเป็นสารใน กลุ่ม 2A ที่อาจจะก่อให้เกิดมะเร็ง มีผลต่อ สารพันธุกรรม พิษแบบเฉียบพลันของไกลโฟเสทได้แก่ ระคายเคืองทางผิวหนัง ผื่นคัน ผิวหนังไหม้ ปวดท้อง ท้องเสีย คลื่นไส้ อาเจียน และทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของไตลดลง (พันทวี แข็งขัน, 2563 : 517) ความเป็น

พิษของไกลโฟเสท ได้ถูกนำมาทดลองในสัตว์ทดลอง พบว่าสารชนิดนี้มีอันตรายน้อยกว่าสารกำจัดโรคและแมลง เมื่อพิจารณาค่า median lethal dose (LD_{50}) ดังตารางที่ 2.3 แล้วพบว่าสารไกลโฟเสทมีความเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์ในระดับต่ำ

ตารางที่ 2.3 ผลการทดสอบความเป็นพิษของไกลโฟเสท

รูปแบบการออกฤทธิ์ของไกลโฟเสท	ค่า LD_{50} (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)	
	ในหนู ทางปาก	ในกระต่าย ทางผิวหนัง
กรด	5,600	> 5,000
เกลือ	> 5,000	> 5,000

ที่มา : (ทศพล พรพรหม, 2545 : 10)

ค่า median lethal dose (LD_{50}) คือ ค่าความเข้มข้นหรือปริมาณที่ต่ำสุดของวัตถุมีพิษที่ทำให้ประชากรของสัตว์ทดลองตายร้อยละ 50 ภายในระยะเวลาหนึ่ง (ธวัชชัย รัตน์ชเลศ, 2540 : 9) ค่าความเป็นอันตรายของสารกำจัดวัชพืชต่อมนุษย์และสัตว์อาจพิจารณาได้จากค่า LD_{50} สารที่มีค่า LD_{50} สูงจะมีความเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์น้อย ดังนั้น สารกำจัดวัชพืชโดยทั่วไปจะมีค่า LD_{50} สูงเมื่อเปรียบเทียบกับสารกำจัดโรคและแมลง ค่า LD_{50} ที่ถือว่าปลอดภัย มีค่าตั้งแต่ 5,000 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ขึ้นไป (คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2556)

กลุ่มประชากรที่เสี่ยงต่อการใช้ไกลโฟเสท คือ คนรับจ้างทำสวน คนงานในสนามหญ้า หากมนุษย์ได้รับสารทางปากหรือผิวหนังจำนวนมาก จะทำให้เกิดอาการพิษเฉียบพลัน ทำให้เกิดอาการคลื่นไส้อาเจียน ไอแห้ง แน่นหน้าอก ในรายที่รุนแรงจะมีอาการอาเจียนปนเลือด ปัสสาวะออกน้อย ไตวาย และปอดบวมน้ำ การสัมผัสถูกผิวหนังจะทำให้เกิดผื่นคัน แสบตา เคืองตา และเจ็บแสบในลำคอ และอาจมีอาการพิษเรื้อรังจากการสัมผัสทางผิวหนัง โดยเป็นผื่นคัน ผิวหนังไหม้ น้ำตาไหลมาก บางรายมีเลือดกำเดาไหล (สุธาสินี อั้งสูงเนิน, 2558 : 55)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

การปนเปื้อนของสารไกลโฟเสทในสิ่งแวดล้อม

ไกลโฟเสทที่ปนเปื้อนสู่ธรรมชาติเกิดจากการที่เกษตรกรใช้สารมากเกินความจำเป็น โดยคงทนอยู่ได้นานจากการจับกับอนุภาคของดิน ไกลโฟเสทจับกับอนุภาคของดินเหนียวได้ดี แต่มีความสามารถในการจับกับอนุภาคของดินทรายได้ต่ำ ทำให้เสี่ยงต่อการปนเปื้อนไปสู่น้ำใต้ดินและแหล่งน้ำผิวดิน (Borggaard and Gimsing, 2008 : 442) นอกจากนี้ไกลโฟเสทสามารถจับกับไอออน

ของโลหะได้หลายชนิด ทำให้ธาตุอาหารของพืชในดินลดลง ส่วนการปนเปื้อนในอากาศนั้นพบได้น้อยมาก เนื่องจากไกลโฟเสทนั้นระเหยได้ต่ำ (ภัทรารัตน์ เทียมเก่า, 2557 : 75)

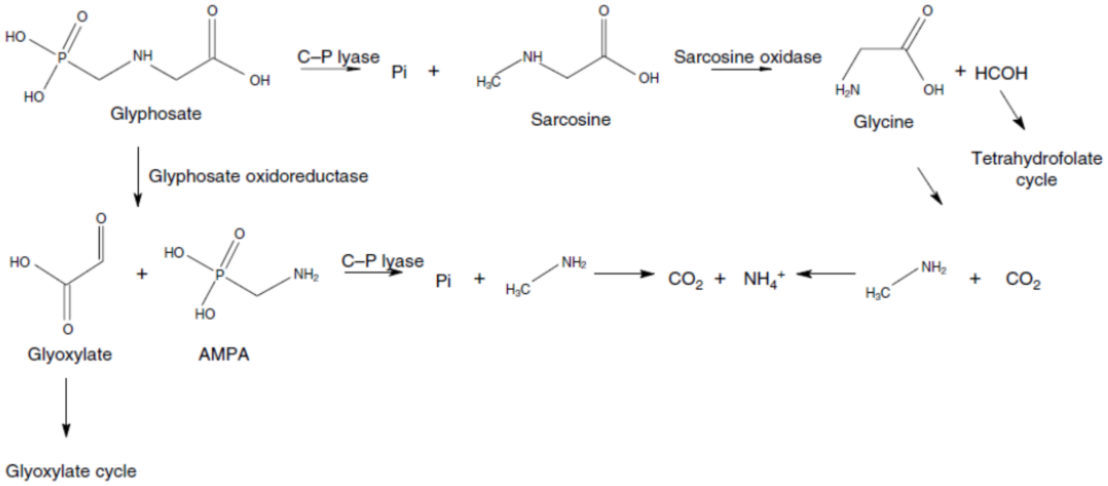
การย่อยสลายของสารไกลโฟเสท

ไกลโฟเสทเกิดการสลายตัวโดยวิธีเคมีและการสลายตัวโดยแสงได้น้อย สองวิธีนี้ไม่ใช่วิธีหลักในการย่อยสลายไกลโฟเสทในดิน การสลายตัวโดยวิธีเคมี จะเกิดขึ้นได้ช้าเนื่องจากไกลโฟเสทมีพันธะระหว่างคาร์บอนและฟอสฟอรัส (C-P bond) ที่มีความต้านทานต่อการทำลายพันธะได้สูง เนื่องจากมีความเสถียร ดังนั้นการย่อยสลายไกลโฟเสทโดยจุลินทรีย์จึงสามารถพบได้มากกว่า และการย่อยสลายโดยกระบวนการของจุลินทรีย์ในดิน สามารถเกิดได้ทั้งสภาพที่มีออกซิเจน (aerobic) และไม่มีออกซิเจน (anaerobic) โดยสภาพที่มีออกซิเจนจะสามารถทำให้เกิดการย่อยสลายได้ในอัตราที่สูงกว่า (Ballou, 2011) การย่อยสลายไกลโฟเสทโดยจุลินทรีย์ เกิดขึ้นได้ 2 กระบวน (ภาพที่ 2.5) ได้แก่

กระบวนการแรกจุลินทรีย์จะผลิตเอนไซม์ไกลโฟเสทออซิโดรีดักเตส (glyphosate oxidoreductase) ออกมาเพื่อแยกพันธะคาร์บอน-ไนโตรเจน (C-N bond) ในสูตรโครงสร้างของไกลโฟเสท ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นไกลออกซีเลท (glyoxolate) และกรดอะมิโนเมทิลฟอสโฟนิก (aminomethylphosphonic acid หรือ AMPA) ต่อมาจุลินทรีย์จะผลิตเอนไซม์คาร์บอน-ฟอสฟอรัสไลเอส (C-P lyase) ออกมาเพื่อแยกพันธะ C-P ในโครงสร้างของ AMPA ได้เป็นอนินทรีย์ฟอสเฟต (inorganic phosphate) และเมทิลเอมีน (methylamine) ในที่สุดจะอยู่ในรูปของ CO_2 และ NH_4^+

และอีกกระบวนการหนึ่ง จุลินทรีย์จะผลิตเอนไซม์คาร์บอน-ฟอสฟอรัส ไลเอส ออกมาเพื่อแยกพันธะระหว่าง C-P ในโครงสร้างของไกลโฟเสท ได้ผลิตภัณฑ์เป็นอนินทรีย์ฟอสเฟต ซาโคไซน์ (sacosine) และ ไกลซีน (glycine) ภายหลังจะถูกเมแทบอไลท์ (metabolized) ได้เป็น CO_2 และ NH_4^+ (Ballou, 2011) การย่อยสลายที่สมบูรณ์ของทั้ง 2 กระบวนการจะได้ CO_2 และ NH_4^+ แบคทีเรียที่มีสามารถย่อยสลายสารไกลโฟเสทมีหลายสกุล (genus) แสดงดังตารางที่ 2.4

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี



ภาพที่ 2.5 กระบวนการย่อยสลายไกลโฟเสทโดยจุลินทรีย์

ที่มา : (Borggaard and Gimsing, 2008 : 444)

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างแบคทีเรียที่มีคุณสมบัติในการย่อยสลายสารไกลโฟเสท

ชนิดแบคทีเรียที่พบ	อ้างอิง
Ensifer sp. CNII15, *Acidovorax* sp. CNI26, *Agrobacterium tumefaciens* CNI28, *Novosphingobium* sp. CNI35, *Ochrobactrum pituitosum* CNI52.	Rossi et al., 2021
Bacillus aryabhattai FACU	Elarabi, et al., 2020
Bacillus subtilis, Citrobacter koseri, Escherichia coli, Pseudomonas fluorescens	Abubacker et al., 2016
Salinicoccus spp.	Sharifi et al., 2015
Pseudomonas spp.	Zhao et al., 2015
Rhizobium meliloti, Bacillus megaterium, Bacillus subtilis, Bacillus cereus	จุไรรัตน์ อิมินา, 2557
Pseudomonas putida, Enterobacter cloacae	Benslama and Boulahrouf, 2013

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างแบคทีเรียที่มีคุณสมบัติในการย่อยสลายสารไกลโฟเสท (ต่อ)

ชนิดแบคทีเรียที่พบ	อ้างอิง
Enterobacter sp. AY 0822447	Ogot et al., 2013
Bacillus cereus CB4	Fan et al., 2012
Pseudomonas putida, *Pseudomonas aeruginosa,* *Alcaligenes faecalis*	Olawale et al., 2011
Escherichia sp., *Azotobactor* sp., *Alcaligenes* sp., *Acetobacter* sp., *Pseudomonas fluorescens*	Moneke et al., 2010

การย่อยสลายทางชีวภาพ

การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) เป็นการทำลายสารปนเปื้อนโดยอาศัยกิจกรรมของจุลินทรีย์ สารปนเปื้อนเหล่านี้อาจจะถูกพิจารณาว่าเป็นแหล่งอาหารหรือสารตั้งต้น (substate) ของจุลินทรีย์ กระบวนการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ (mineralization) เกี่ยวข้องกับการออกซิไดซ์ (oxidized) สารเหล่านั้นให้เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ให้ทั้งคาร์บอนและพลังงานเพื่อการเจริญและการสืบพันธุ์ของเซลล์ โดยจะเกิดได้ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจน การย่อยแต่ละขั้นตอนเกิดจากการเร่งปฏิกิริยาโดยเอนไซม์ที่สร้างขึ้นภายในเซลล์ เอนไซม์ทั้งหมดมักจะพบภายในเซลล์ แต่ก็พบว่าบางชนิดถูกสร้างและปล่อยออกมานอกเซลล์เพื่อช่วยในกระบวนการย่อยเริ่มต้น เอนไซม์จำพวกนี้เรียกว่าเอนไซม์นอกเซลล์ (extracellular enzymes) ซึ่งมีความสำคัญต่อการย่อยโมเลกุลขนาดใหญ่ โมเลกุลเหล่านี้ต้องถูกทำให้มีขนาดเล็กลงเพื่อนำผ่านเข้าสู่เซลล์ การย่อยทั้งหมดจะสิ้นสุดลง เมื่อไม่มีเอนไซม์ที่สามารถย่อยต่อไปได้ การขาดเอนไซม์ที่เหมาะสมในการย่อยนี้เป็นเหตุผลหนึ่งของการตกค้างของสารมลพิษปนเปื้อน เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีที่ซับซ้อนทำให้เอนไซม์ปกติไม่สามารถย่อยได้ ดังนั้นสารปนเปื้อนที่มีโครงสร้างใกล้เคียงกับสารที่มาจากธรรมชาติจึงมักจะถูกย่อยได้ง่ายกว่า การย่อยอย่างไม่สมบูรณ์ยังเกิดได้จากกระบวนการเมแทบอลิซึมร่วม (co-metabolism) ซึ่งมีการออกซิไดซ์สารบางส่วนที่เกิดขึ้น แต่พลังงานที่ได้ไม่ได้ถูกนำไปใช้เพื่อการเจริญของเซลล์ กระบวนการนี้เกิดขึ้นขณะที่เซลล์หลั่งเอนไซม์ที่สามารถย่อยสารปกติได้ แต่เอนไซม์เหล่านี้ไม่ค่อยมีความจำเพาะจึงเกิดการย่อยสลายสารอื่นร่วมด้วย (วีรานุช หลาง, 2551 : 35)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

การย่อยสลายทางชีวภาพ มักถูกใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ในระบบนิเวศ การจัดการมลพิษและการบำบัดมลพิษ (bioremediation) โดยกระบวนการบำบัดมลพิษโดยจุลินทรีย์นี้ สามารถแบ่งได้ 3 ระดับตามรายงานของ Jouter, et al (2013) ดังนี้

การลดการปนเปื้อนในธรรมชาติ

การลดการปนเปื้อนในธรรมชาติ (natural attenuation) ไกลโฟเสทจะถูกรีดิวซ์ (reduced) โดยจุลินทรีย์สายพันธุ์ท้องถิ่นโดยไม่ต้องมีการเพิ่มจุลินทรีย์โดยมนุษย์

การกระตุ้นทางชีวภาพ

การกระตุ้นทางชีวภาพ (biostimulation) เป็นการใช้ธาตุอาหาร และออกซิเจนมาประยุกต์ในระบบ เพื่อเพิ่มและเร่งการย่อยสลายทางชีวภาพ

การเติมจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลาย

การเติมจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารพิษนั้น ๆ ลงไปในระบบ (bioaugmentation) ในระหว่างการกระตุ้นทางชีวภาพ จุลินทรีย์เหล่านี้จะมีความสามารถมากกว่าจุลินทรีย์สายพันธุ์ท้องถิ่นในการย่อยสลายสารปนเปื้อนที่เป็นเป้าหมาย

แบคทีเรียส่งเสริมการเจริญของพืช

แบคทีเรียส่งเสริมการเจริญของพืชหรือพีจีพีอาร์ (plant growth promoting rhizobacteria: PGPR) เป็นกลุ่มของแบคทีเรียที่มีประโยชน์ช่วยในการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งอาศัยอยู่บริเวณรอบรากพืช สามารถดำรงชีวิตอยู่ เพิ่มจำนวน และแข่งขันกับกลุ่มจุลินทรีย์อื่นได้ โดย Somers Vanderleyden & Srinivasan (2004 : 230) ได้จำแนกแบคทีเรียส่งเสริมการเจริญของพืชออกตามหน้าที่ ได้แก่ (ก) กลุ่ม biofertilizers ที่มีความสามารถให้การเพิ่มปริมาณธาตุอาหารให้แก่พืช (ข) กลุ่ม phytostimulators สามารถส่งเสริมการเจริญของพืช โดยการผลิตฮอร์โมนพืช (phytohormones) (ค) กลุ่ม rhizoremediators มีความสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีพิษ (ง) กลุ่ม biopesticide สามารถควบคุมการเกิดโรคในพืช สามารถนำมาผลิตเป็นสารปฏิชีวนะ (antibiotic) และสารต้านทานเชื้อรา (antifungal) ได้ ซึ่งสามารถแบ่งกลุ่มแบคทีเรียส่งเสริมการเจริญของพืชตามกลไกการทำงานได้ 2 แบบ ได้แก่

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

กลไกทางตรง

กลไกทางตรง (direct mechanisms) แบ่งออกตามคุณสมบัติการสร้างแหล่งอาหารที่สำคัญให้แก่พืช ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และธาตุอาหารที่พืชต้องการ

1) การตรึงไนโตรเจน

ไนโตรเจน (nitrogen; N) เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพืช ไนโตรเจนที่อยู่ในบรรยากาศส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ได้ จำเป็นต้องผ่าน

กระบวนการปฏิกิริยาการตรึงไนโตรเจนด้วยสิ่งมีชีวิต (biological nitrogen fixation) ด้วยการเปลี่ยนไนโตรเจนเป็นแอมโมเนียด้วยการตรึงโดยเอนไซม์ไนโตรจิเนส (nitrogenase) ในจุลินทรีย์ (Ahemad & Kibret, 2013 : 21)

2) การละลายฟอสเฟต

ฟอสฟอรัส (phosphorus; P) เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพืชรองจากไนโตรเจน (Ahemad and Kibret, 2013 : 22) ในสภาพธรรมชาติฟอสฟอรัสมักอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ พืชไม่สามารถดูดซึมได้ จุลินทรีย์จะการผลิตเอนไซม์ออกมาละลายฟอสเฟตให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำ และสามารถทำให้พืชดูดซึมไปใช้ในการเจริญเติบโตได้

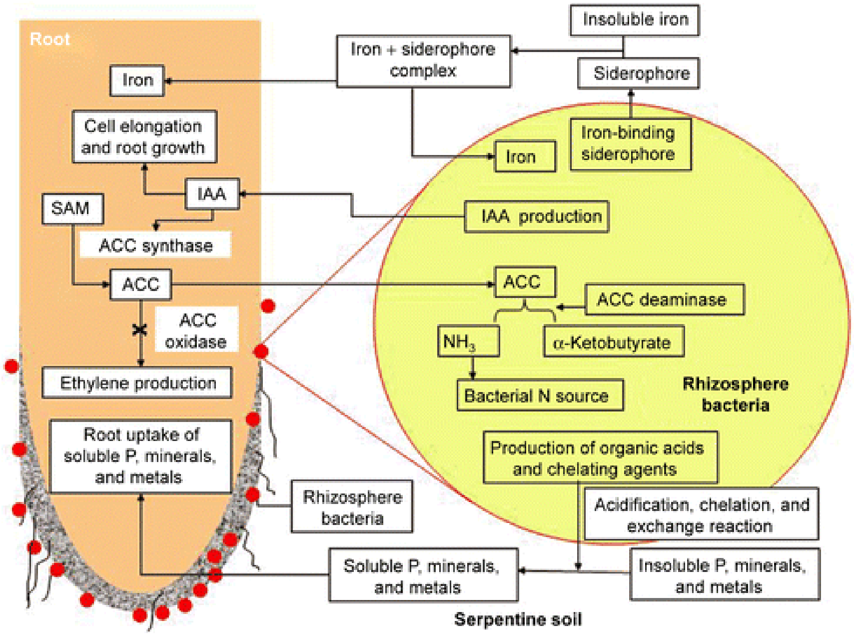
3) การผลิตสารซิเดอร์โรฟอร์

แบคทีเรียส่งเสริมการเจริญของพืช สามารถสร้างสารซิเดอร์โรฟอร์ออกมาจับกับธาตุเหล็กที่อยู่บริเวณรอบ ๆ รากพืช ทำให้เชื้อราก่อโรคพืชขาดธาตุเหล็ก ทำให้ได้รับผลกระทบโดยตรงเนื่องจากเชื้อราก่อโรคจะไม่สามารถแพร่พันธุ์ต่อไปได้

4) การผลิตฮอร์โมนพืช

แบคทีเรียส่งเสริมการเจริญของพืชบางชนิดมีสามารถในการผลิตฮอร์โมนพืชได้ (phytohormone) โดยจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเจริญเติบโตของพืช โดยกลุ่มของฮอร์โมนพืชที่สำคัญคือ กลุ่มออกซิน (auxins) โดยทั่วไปจะเป็นสารควบคุมการเจริญเติบโตที่พืชสร้างตามธรรมชาติและมนุษย์สังเคราะห์ขึ้นมา โดยสังเคราะห์จากกรดอะมิโนที่เรียกว่า ทริปโตแฟน (tryptophan) (มานี เตื้อสกุล, 2550 : 54) สารในกลุ่มออกซินที่ผลิตโดยแบคทีเรีย ยกตัวอย่างเช่น indole-3-acetic acid (IAA) ซึ่งจะช่วยกระตุ้นการยืดตัวของเซลล์ การแบ่งเซลล์ และการเปลี่ยนแปลงของ โดยกลไกของแบคทีเรียส่งเสริมการเจริญของพืชแสดงดังภาพที่ 2.6

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี



ภาพที่ 2.6 กลไกของแบคทีเรียส่งเสริมการเจริญของพืช
ที่มา : (Rajkumar et al., 2010 : 143)

กลไกทางอ้อม

กลไกทางอ้อม (indirect mechanisms) ของแบคทีเรียส่งเสริมการเจริญของพืช ได้แก่ การผลิตสารปฏิชีวนะที่ใช้ในการควบคุมโรคพืช ลดปริมาณของธาตุเหล็กบริเวณรอบรากพืชที่เป็นประโยชน์ต่อเชื้อโรคพืช การสร้างสารต่อต้านเชื้อรา การผลิตเอนไซม์ทำลายผนังเซลล์ของเชื้อราโรคพืช สามารถแย่งเกาะบริเวณรากทำให้ลดโอกาสที่เชื้อก่อโรคจะเข้ามายังเซลล์พืช และการเหนี่ยวนำการสร้างความต้านทานโรค (ธนากร แสงสง่า, 2557 : 556)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายสารกำจัดวัชพืชโดยจุลินทรีย์

จิราพร ทำเนียบ, ปิยมาศ คงศรี และศุภรัตน์ สมตระกูล (2558 : 15) รายงานผลการคัดแยกแบคทีเรียย่อยสลายสารกำจัดวัชพืชจากดินสวนผลไม้ในจังหวัดจันทบุรี โดยนำดิน 20 ตัวอย่างมาคัดแยกแบคทีเรียโดยใช้เทคนิคเจือจางลำดับส่วนและเพาะเลี้ยงบนอาหาร Mineral Salt Medium (MSM) ที่เติมไกลโฟเสทความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่าสามารถคัดแยกแบคทีเรียได้ทั้งหมด 110 ไอโซเลท จากนั้นศึกษาความสามารถในการเจริญบนอาหารแข็ง MSM ที่เติมสารไกลโฟเสทความเข้มข้น 1,3 และ 5 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งคาร์บอนเพียงแหล่งเดียว ผลการทดลอง

พบว่า มี 16 ไอโซเลท ที่สามารถเจริญได้ดีบนอาหารทดสอบ จึงคัดเลือกมาทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำของเยื่อหุ้มเซลล์ ผลการทดลองพบว่า ทุกไอโซเลทมีค่าความไม่ชอบน้ำของเยื่อหุ้มเซลล์อยู่ในช่วง 80-90% จากผลการทดลองมีแบคทีเรีย 3 ไอโซเลท คือ MaH01-1, NaH01-1 และ ThH02-1 ที่เจริญบนอาหารแข็ง MSM ที่เติมไกลโฟเสทความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร และมีสมบัติความไม่ชอบน้ำของเยื่อหุ้มเซลล์มากกว่า 80% จึงคัดเลือกเฉพาะแบคทีเรียทั้ง 3 ไอโซเลทนี้มาศึกษาลักษณะการเจริญในอาหารเหลว MSM ที่เติมไกลโฟเสทความเข้มข้น 0.02, 0.5 และ 1 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 168 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างทุก 24 ชั่วโมง วัดความขุ่นของเซลล์แบคทีเรียในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีความยาวคลื่น 625 nm ผลการทดลองพบว่า ไอโซเลท ThH02-1 มีการเจริญดีที่สุดในทุกชุดทดลองที่เติมไกลโฟเสทความเข้มข้นต่าง ๆ

Abubacker Visvanathan & Srinivasan (2016 : 243) รายงานผลการคัดแยกดินจากบริเวณสวนกล้วย พบว่าสามารถคัดแยกแบคทีเรียสายพันธุ์ *Bacillus subtilis* (NCBT-008), *Citrobacter koseri* (NCBT-042), *Escherichia coli* (NCBT-001) และ *Pseudomonas fluorescens* (NCBT-046) ที่สามารถเจริญในอาหารเหลวที่เติมไกลโฟเสทได้ ยืนยันผลการย่อยสลายไกลโฟเสทของแบคทีเรียโดยการวิเคราะห์โครมาโทแกรม Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) GC-MS และ SEM-EDX ผลการทดลองพบว่าสามารถยืนยันผลการย่อยสลายทางชีวภาพของไกลโฟเสทของแบคทีเรียสายพันธุ์ดังกล่าวได้

Sharifi et al. (2015 : 31) รายงานการย่อยสลายทางชีวภาพของไกลโฟเสทโดยแบคทีเรียชอบเกลือ ที่คัดแยกได้จากทะเลสาบ Qom Hoze-soltan หลังจากการเก็บตัวอย่างและคัดแยกแบคทีเรีย มีการคัดเลือกแบคทีเรียชอบเกลือสายพันธุ์ท้องถิ่นที่มีประสิทธิภาพสูงในการย่อยสลายสารทดสอบ โดยพิจารณาจากสายพันธุ์ที่สามารถเจริญได้ดีในสภาวะที่เติมไกลโฟเสท (ค่า OD_{660} ที่มีค่าสูง) และทำให้เกิดการลดลงของไกลโฟเสทได้มากที่สุด (ค่า OD_{220} ที่มีค่าลดลง) ผลการจัดจำแนกชนิดของแบคทีเรียโดยใช้ผลทดสอบลักษณะทางชีวเคมี ชีวโมเลกุล (วิเคราะห์ลำดับเบสของชิ้นยีน 16s rRNA) การดื้อต่อยาปฏิชีวนะ ร่วมกับการหาค่า Minimum Inhibitory Concentration (MIC) พบว่า แบคทีเรียที่คัดเลือกได้อยู่ในกลุ่ม gram positive cocci ที่มีความคล้ายคลึงอย่างมากกับแบคทีเรียในจีนัส *Salinicoccus* ผลวิเคราะห์ปริมาณไกลโฟเสทที่ลดลงซึ่งเป็นผลมาจากการย่อยสลายของแบคทีเรีย โดย HPLC พบว่า *Salinicoccus* spp. สามารถย่อยสลายไกลโฟเสทได้

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

จุไรรัตน์ อิมินา ฐปน ชื่นบาล และศิราภรณ์ ชื่นบาล (2557) รายงานผลการคัดแยกแบคทีเรียจากดินในพื้นที่การเกษตรที่มีประวัติการใช้สารไกลโฟเสท โดยใช้เทคนิค Enrichment culture สามารถคัดแยกแบคทีเรียได้ 27 ไอโซเลท เมื่อนำเชื้อทั้งหมดไปทดสอบประสิทธิภาพการ

ย่อยสลายสารไกลโฟเสทโดยเลี้ยงในอาหาร Tryptone Soya Broth (TSB) ที่เติมสารไกลโฟเสทความเข้มข้น 20 ppm เก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 5 และ 10 วัน ได้เชื้อที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายดีที่สุด จำนวน 5 ไอโซเลท ได้แก่ GJA2, GJA7, GJA8, GJA14 และ GJA26 โดยไอโซเลท GJA2 มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสูงที่สุดเท่ากับ 73.3 % จากการเพาะเลี้ยงเป็นระยะเวลา 5 วัน ไอโซเลท GJA14 มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายเพิ่มสูงขึ้นเป็น 95.9 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลา 10 วัน

Kryuchkova et al. (2013 : 100) รายงานผลการศึกษาแบคทีเรียจำนวน 10 ไอโซเลทที่ทนต่อความเข้มข้นของไกลโฟเสท 10 nM ซึ่งคัดแยกได้จากดินบริเวณรอบรากพืช พบว่า *Enterobacter chloacae* K7 สามารถย่อยสลายไกลโฟเสท โดยใช้สารดังกล่าวเป็นแหล่งฟอสฟอรัส ผลการวิเคราะห์เทคนิค gas-liquid chromatography พบว่าการลดลงของสารกำจัดวัชพืชสัมพันธ์กับการเจริญของ *E. chloacae* ผลการวิเคราะห์ Thin-Layer Chromatography พบว่า *E. chloacae* K7 ย่อยสลายสารดังกล่าวได้เป็นซาโคไซน์และถูกออกซิไดซ์ได้เป็นไกลซีน

Benslama & Boulahrouf (2013 : 5587) รายงานผลการคัดแยกแบคทีเรียย่อยสลายสารไกลโฟเสทจำนวน 5 สายพันธุ์ ด้วยเทคนิค Enrichment cultures จากตัวอย่างดินที่ไม่เคยมีประวัติการใช้ไกลโฟเสทมาก่อนในประเทศแอลจีเรีย พบว่าเชื้อที่คัดแยกสามารถเจริญได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่เติมไกลโฟเสทเป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งฟอสฟอรัส เมื่อนำไปวิเคราะห์ลำดับเบสของของยีน 16s RNA ทดสอบ Matrix Assisted Laser Desorption Ionization (MALDI), Time Of Flight (TOF), Mass Spectrometry (MS) และทดสอบคุณสมบัติชีวเคมี ระบุชนิดได้เป็น *P. putida* พบว่าสายพันธุ์ที่ดีที่สุด คือ ไอโซเลท Arph1 ซึ่งสามารถเจริญได้ดีที่สุดในสภาวะที่มีไกลโฟเสทความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งฟอสฟอรัส และทนต่อความเข้มข้นของไกลโฟเสทได้สูงถึง 9 กรัมต่อลิตร โดยมีสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรียไอโซเลทดังกล่าวคือที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่า pH 9 ในสภาวะที่เติมกลูตาเมท (glutamate) เป็นแหล่งคาร์บอนร่วมกับไกลโฟเสท

Ogot et al. (2013 : 31) รายงานผลการศึกษาแบคทีเรียที่สามารถสลายราวด์อัพ (Roundup) ซึ่งคัดแยกจากดินและลำไส้ของปลวกสายพันธุ์ *Macrotermes michaelseni* โดยใช้อาหาร MM7 ที่เติมสารกำจัดศัตรูพืชเป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงาน ไอโซเลทที่คัดแยกได้มีรูปร่างของเซลล์แบบท่อน แกรมลบ กำหนดชื่อเป็น GS_1 และไอโซเลทที่คัดแยกได้จากลำไส้ปลวกตั้งชื่อเป็น GT_2 การวิเคราะห์ลำดับเบสของของยีน 16s RNA แสดงให้เห็นว่าทั้งสองไอโซเลทมีความใกล้เคียงกับ *Enterobacter* sp. AY 0822447 ถึง 99% ผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้เน้นถึงศักยภาพของแบคทีเรียในการบำบัดสารมลพิษในธรรมชาติ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี