รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชต่อการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซนด้วยพืช

โดย นางสาววราภรณ์ ฉุยฉาย และคณะ

14 กันยายน 2558

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชต่อการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซนด้วยพืช

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. ผศ.ดร.วราภรณ์ ฉุยฉาย	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์
2. ศ.ดร.มาลียา เครือตราชู	มหาวิทยาลัยมหิดล

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

ผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชต่อการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซนด้วยพืช

วราภรณ์ ฉุยฉาย และ มาลียา เครือตราชู

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ได้ศึกษาผลของการใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตสามชนิดคือ กรดอินโดลบิวไทริก (Indolebutyric acid; IBA) ไทเดียซูรอน (Thidiazuron; TDZ) และกรดจิบเบอเรลลิก (Gibberellic acid; GA_3) ต่อการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซน (Hexachlorocyclohexane; HCH) ทั้งในด้านความเป็นพิษและการกำจัด HCH ออกจากดิน ในการศึกษาผลของการแช่เมล็ดในสารควบคุมการเจริญเติบโตความเข้มข้นต่างๆกัน ต่อความเป็นพิษของ HCH ต่อข้าวโพดข้าวเหนียว ถั่วฝักยาว และผักบุ้ง พบว่า สารควบคุมการเจริญเติบโตที่ใช้ส่งผลต่อการเจริญของพืชเมื่อเพาะเมล็ดในดินที่ไม่ปนเปื้อน แต่เมื่อเพาะเมล็ดในดินที่ปนเปื้อน HCH 20 mg/kg พบว่า เฉพาะ IBA 1.0 mg/l ที่เพิ่มน้ำหนักสดของรากต้นกล้าถั่วฝักยาวได้ IBA 0.1 – 1.0 mg/l และ GA_3 0.1 – 1.0 mg/l สามารถเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบข้าวโพดข้าวเหนียวได้ GA_3 1.0 mg/l เพิ่มน้ำหนักแห้งของยอดผักบุ้งและปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบได้ และ IBA 1.0 mg/l เพิ่มได้เฉพาะปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบผักบุ้ง ส่วน TDZ ไม่สามารถเพิ่มการเจริญเติบโตใดๆได้เลย จากนั้น ศึกษาผลของการแช่เมล็ดในสารละลายที่มีสารควบคุมเจริญเติบโต 2 ชนิดร่วมกัน ต่อความเป็นพิษของ HCH ต่อข้าวโพดข้าวเหนียว และถั่วฝักยาว พบว่า การแช่เมล็ดใน IBA 1.0 mg/l ร่วมกับ GA_3 1.0 mg/l สามารถเพิ่มน้ำหนักสดของรากของข้าวโพดข้าวเหนียวที่เจริญในดินที่ปนเปื้อน HCH 30 mg/kg ได้ แต่การแช่เมล็ดในสารละลาย IBA ร่วมกับ TDZ ทำให้น้ำหนักแห้งของยอดลดลง การสัมผัสกับสารควบคุมเจริญเติบโตไม่มีผลต่อการจัดเรียงเนื้อเยื่อภายในยอดข้าวโพดข้าวเหนียว แต่มีผลทำให้เกิดโพรงอากาศภายในชั้นคอร์เท็กซ์ของรากข้าวโพดข้าวเหนียว และ IBA ทำให้ขนรากของรากข้าวโพดข้าวเหนียวเพิ่มขึ้น ส่วนการจัดเรียงเนื้อเยื่อภายในยอดและรากของถั่วฝักยาวไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ส่วนการศึกษาผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตต่อการกำจัด HCH ออกจากดินภายในระยะเวลาหลังจากปลูกพืช 30 วัน พบว่า ในกรณีของถั่วฝักยาว การแช่เมล็ดใน IBA 1.0 mg/l ร่วมกับ TDZ 0.01 mg/l เมื่อนำไปปลูกในดินแล้วสามารถลดปริมาณ HCH ในดินได้เร็วสุด โดยมีปริมาณ HCH เหลือในดินรอบนอกเป็น 65.3% และ 11.2% ของปริมาณเริ่มต้น ในวันที่ 10 และ 30 ตามลำดับ ในกรณีของข้าวโพดข้าวเหนียว เมื่อเปรียบเทียบชนิดของสารควบคุมการเจริญเติบโต พบว่า GA_3 ส่งเสริมการกำจัด HCH ออกจากดินได้ดีที่สุด โดยมีปริมาณ HCH เหลือในดินรอบนอกเป็น 37.9% และ 2.6% ของปริมาณเริ่มต้น ในวันที่ 10 และ 30 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลของวิธีการให้สารควบคุมการเจริญเติบโตโดยใช้ TDZ 0.01 mg/l พบว่า วิธีการให้ TDZ ไม่ส่งผลต่อการกำจัด HCH ออกจากดิน แต่การรดลงในดินทำให้ข้าวโพดข้าวเหนียวมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นมากกว่าการแช่เมล็ดและการฉีดพ่นที่ยอด เมื่อเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของ GA_3 ต่อการแช่เมล็ด พบว่า ความเข้มข้นของ GA_3 ระหว่าง 0.01 – 1.0 mg/l ไม่ทำให้การลดปริมาณ HCH ในดินต่างกัน ดังนั้น ข้าวโพดข้าวเหนียวเป็นพืชที่เหมาะสมต่อการกำจัด HCH ในดิน และการแช่เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวในสารละลาย GA_3 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัด HCH ออกจากดินได้ดีที่สุด ส่วนการให้สารควบคุมการเจริญเติบโตแก่ข้าวโพด

ข้าวเหนียวโดยการรดลงดินทำให้การเจริญเติบโตของข้าวโพดข้าวเหนียวดีขึ้น แต่ไม่เพิ่มการกำจัด HCH ออกจากดิน

คำสำคัญ: การฟื้นฟูสภาพแวดล้อมด้วยพืช ข้าวโพดข้าวเหนียว จิบเบอเรลลิน ไซโทไคนิน ถั่วฝักยาว สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช ออกซิน เฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซน

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีนเช่น ดีดีที ลินเดน เฮปตาคลอร์ เอนโดซัลแฟน ในการเกษตรกรรมอย่างแพร่หลายในอดีตกลายเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญอย่างหนึ่งในประเทศไทย (Poolpak et al., 2008; Thapina and Hudak, 2000) สารเคมีกลุ่มออร์กาโนคลอรีนนี้สามารถคงทนอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้เป็นเวลานาน การสัมผัสต่อสารเคมีกลุ่มนี้เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตหลายชนิดและส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศโดยรวม นอกจากปัญหาด้านความเป็นพิษแล้ว ดินที่ปนเปื้อนสารเคมีกำจัดศัตรูพืชยังไม่เหมาะต่อการทำเกษตรกรรมแบบเกษตรอินทรีย์ ดังนั้นการฟื้นฟูสภาพของดินที่ปนเปื้อนสารเคมีกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีนจึงเป็นสิ่งที่ควรดำเนินการทั่วทุกบริเวณของโลกรวมทั้งประเทศไทย

การฟื้นฟูสภาพแวดล้อมด้วยวิธีการทางชีวภาพ (bioremediation) จัดเป็นวิธีการที่มีความปลอดภัย ต้นทุนต่ำและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ความเป็นไปได้ของการฟื้นฟูสภาพดินที่ปนเปื้อนสารเคมีกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีนมีทั้งการใช้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารพิษหรือใช้พืช (phytoremediation) หรือใช้ทั้งพืชและจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารเคมีกลุ่มนี้ได้ร่วมกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการกำจัดสารพิษให้ดียิ่งขึ้น พืชจะมีศักยภาพในการเพิ่มอัตราการรอดชีวิตและการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ข้อจำกัดของการบำบัดสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีนที่ปนเปื้อนในดินคือ การย่อยสลายสารกลุ่มนี้ของจุลินทรีย์ในดินเกิดขึ้นได้ช้า (Phillips et al., 2005) และความเป็นพิษต่อพืชของสารกลุ่มนี้ที่ทำให้การเจริญของพืชลดลง (Schefczik et al., 1980) ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการฟื้นฟูสภาพด้วยพืชลดลง การใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชเพื่อกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชในสภาวะที่มีสารมลพิษเป็นหัวข้อที่กำลังมีการศึกษาวิจัยอย่างกว้างขวาง โดยพบว่าสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชบางชนิดสามารถเพิ่มความทนทานต่อโลหะหนักและในบางครั้งสามารถเพิ่มการสะสมโลหะหนักในพืชได้ด้วย เช่นการเพิ่มการสะสมตะกั่วในทานตะวันและ *Sesbania drummondii* โดยสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชกลุ่มไซโตไคนินและออกซินตามลำดับ (Israr and Sahi, 2008; Tassi et al., 2008) ทั้งนี้ การได้รับสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชกลุ่มออกซินและจิบเบอเรลลินสามารถช่วยให้ข้าวทนทานต่อลินเดนหรือ Hexachlorocyclohexane เพิ่มขึ้นได้ (วราภรณ์ ฉุยฉาย และปัทมาพร รูปปัทม์, 2553; Sharada et al. 1999) แต่ยังไม่ทราบแน่ชัดว่าการที่พืชได้รับสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชแล้วจะทำให้สามารถสะสมหรือกระตุ้นการย่อยสลายสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มนี้ได้มากขึ้นหรือไม่ จึงเป็นจุดที่ควรศึกษาวิจัยต่อไป

ดังนั้น ในการวิจัยครั้งนี้ จึงเป็นการศึกษาผลของการให้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชเพิ่มเพิ่มประสิทธิภาพของการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์การ์โนคลอรีน โดยสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มนี้ที่เลือกใช้คือ เฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซน ซึ่งเป็นสารกำจัดศัตรูพืชในกลุ่มนี้ที่ยังมีรายงานว่าพบการปนเปื้อนในดินในประเทศไทย เช่น พบลินเดนที่เป็นไอโซเมอร์ชนิดแกมมาของเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซนในบริเวณนาข้าวของลุ่มน้ำแม่กลองเมื่อ พ.ศ. 2546 – 2547 0.34 – 24.17 mg/kg soil (Poolpak et al., 2008) พืชที่เลือกใช้คือข้าวโพด ผักบุ้งและทานตะวัน ซึ่งเป็นพืชที่เคยทดสอบมาก่อนแล้วว่ามีความทนทานต่อลินเดนในระดับความเข้มข้นที่พบการปนเปื้อนในดินทางการเกษตรในประเทศไทย (Chouychai and Lee, 2012) เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวางแผนฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีนต่อไป

2. วัตถุประสงค์

1) เพื่อทราบผลของการใช้ออกซิน จิบเบอเรลลินและไซโตไคนินชนิดฟีนิลยูเรียต่อประสิทธิภาพของการกำจัดเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซนในดินด้วยพืช

2) เพื่อทราบผลของการใช้ออกซิน จิบเบอเรลลินและไซโตไคนินชนิดฟีนิลยูเรียร่วมกันสองชนิดต่อประสิทธิภาพของการกำจัดเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซนในดินด้วยพืช

เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Phytoremediation เป็นการใช้พืชเพื่อกำจัด เคลื่อนย้าย หรือลดความเป็นพิษของสารพิษที่ปนเปื้อนในดิน น้ำ หรืออากาศ การบำบัดสารปนเปื้อนในดินโดยใช้พืชนั้นมีได้หลายวิธีเช่น การสกัดสารพิษด้วยพืช (phytoextraction) การย่อยสลายด้วยพืช (phytodegradation) การกรองด้วยราก (rhizofiltration) การตรึงด้วยพืช (phytostabilization) การทำให้ระเหยด้วยพืช (phytovolatilization) (Macek et al., 2000) ซึ่งกลไกที่พืชใช้ขึ้นกับคุณสมบัติของสารพิษที่ปนเปื้อน ในกรณีของสารปนเปื้อนที่เป็นสารอินทรีย์ วิธีการที่พืชใช้ในการบำบัดได้แก่ (1) การดูดซึมสารพิษเข้าสู่เซลล์พืชเพื่อการตรึงหรือการย่อยสลาย มักพบในสารพิษที่ละลายน้ำได้ดี (2) ปล่อยเอนไซม์หรือสารอื่นๆจากรากเพื่อย่อยสลายสารพิษนั้นในดิน หรือ (3) สนับสนุนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ภายในบริเวณราก ซึ่งมักพบในกรณีที่สารพิษละลายน้ำได้น้อย (McCutcheon and Schnoor, 2003; Schnoor et al., 1995)

การใช้พืชฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีนเกิดขึ้นได้ 2 วิธีคือ

1. การสกัดสารพิษด้วยพืช เป็นการที่พืชสะสมสารเคมีกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีนไว้ในชีวมวลของพืช ทั้งนี้ มีรายงานว่าสารเคมีกลุ่มนี้สามารถสะสมในพืชได้ เช่นพบการสะสมของ hexachlorocyclohexane ใน *Cynara scolymus* และ *Erica* sp. (Calvelo Pereira et al., 2007) ค่าการสะสมในสิ่งมีชีวิต (bioaccumulation factor) ของ เฮปตาคลอร์ในน้ำเต้าอยู่ระหว่าง 1 – 5.2 (Campbell et al., 2009) สารเคมีกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีนนี้เมื่อสะสมในพืชอาจจะเปลี่ยนรูปไปได้บ้าง เช่น เอนโดซัลแฟน (Endosulfan) ที่สะสมในเปลือกไม้ในสหรัฐอเมริกา อยู่ในรูปเอนโดซัลแฟน ซัลเฟต ในขณะที่ในบรรยากาศจะอยู่ในรูป อัลฟาเอนโดซัลแฟน และ เบตาเอนโดซัลแฟน จึงเป็นไปได้ว่าเมื่อพืชสะสมเอนโดซัลแฟนจะเปลี่ยนให้อยู่ในรูปเอนโดซัลแฟน ซัลเฟต (Simonich and Hites, 1995) ในกรณีของลินเดนซึ่งเป็นไอโซเมอร์ชนิดแกมมาของ HCH นั้น พบว่าการสะสม HCH ในพืช 4 ชนิดคือ *Aveana sativa*, *Chenopodium* spp., *Solanum nigrum*, และ *Cytisus striatus* พืชจะสะสมในรูปไอโซเมอร์เบตาของ HCH มากกว่า (Calvelo Pereira et al., 2006)

2. การย่อยสลายด้วยพืช พืชบางชนิดเช่น *Elodea canadensis* สามารถย่อยสลาย DDT ได้ 40% โดยสะสมไว้ในเซลล์พืช 22% (Garrison et al., 2000)

3. การสนับสนุนการทำงานของจุลินทรีย์ มีรายงานว่ามีจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารเคมีกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีนได้ทั้งราและแบคทีเรีย (Phillips et al., 2005) แต่ข้อจำกัดของการใช้จุลินทรีย์คือย่อยสลายสารกลุ่มนี้ได้ช้า และมักย่อยสลายให้สมบูรณ์จนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำด้วยจุลินทรีย์ชนิดเดียวได้น้อย มักจะเกิดเมตาบอไลต์ที่เป็นพิษมากขึ้น และอาจต้องใช้จุลินทรีย์มากกว่าหนึ่งชนิดเข้ามาทำงานร่วมกัน การส่งเสริมการย่อยสลายสารเคมีกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีนด้วยพืชมีรายงานด้วยเช่นกัน การปลูก *Holcus lanatus* ซึ่งเป็นพืชตระกูลหญ้าในดินที่ปนเปื้อน HCH จะช่วยส่งเสริมการย่อยสลาย HCH ในดินได้ดี นอกจากนั้นยังพบการย่อยสลาย DDT ในไรโซสเฟียร์ของ แตงกวาญี่ปุ่น ฟักทอง และ ผักโขม (Kidd et al., 2008)

ความเป็นพิษของเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซนต่อพืช

เฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซน เป็นสารเคมีกลุ่มออร์กาโนคลอรีนที่ใช้เป็นสารฆ่าแมลง มีไอโซเมอร์หลายชนิด (ชนิด α, β, γ, δ, ε, η, และ θ) แต่รูปแบบที่พบได้ทั่วไปมีสองแบบคือ เฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซนแบบผสมที่มีทุกไอโซเมอร์ (Technical – HCH) และลินเดน (ไอโซเมอร์ชนิดแกมมา) ซึ่งนิยมใช้เป็น

สารฆ่าแมลงทั้งสองแบบ (Pereira et al., 2007) ลินเดนถูกห้ามใช้ในประเทศไทยตั้งแต่ พ.ศ. 2544 เพราะเป็นสารที่คงทนในสิ่งแวดล้อมและอาจเป็นสารก่อมะเร็ง (IPM Thailand, 2551) ครึ่งชีวิตในดินประมาณ 400 วัน (Ulman, 1972)

มีรายงานเกี่ยวกับความเป็นพิษของเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซนต่อพืชหลายสปีชีส์ ความเป็นพิษของลินเดนต่อเซลล์พืช เกี่ยวข้องกับการรบกวนเยื่อหุ้มเซลล์ใบของ *Elodea densa* ซึ่งทำให้ความสามารถควบคุมปริมาณของไอออนโซเดียม/โพแทสเซียมของเยื่อหุ้มเซลล์ลดลง (Schefczik and Simonis, 1980) ลินเดนที่ตกค้างในดินด่างแสดงความเป็นพิษต่อความยาวรากของถั่วฝักยาวและผักกวางตุ้ง แต่เป็นพิษกับน้ำหนักสดของผักกวางตุ้งเท่านั้น (วราภรณ์ ฉุยฉาย และคณะ, 2553) ลินเดน 20 mg/kg ลดความยาวรากของข้าวโพดอย่างชัดเจนและมีแนวโน้มที่จะลดดัชนีความแข็งแรงของต้นกล้าและเพิ่มอัตราส่วนของน้ำหนักแห้งต่อน้ำหนักสด ซึ่งเป็นไปได้ว่าเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซนรบกวนการสะสมน้ำของพืช (Chouychai et al., 2009)

บทบาทของสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชกับการตอบสนองต่อสารมลพิษ

การที่พืชได้รับสารมลพิษจากสิ่งแวดล้อมจะส่งผลต่อระบบฮอร์โมนภายในพืชด้วยเช่นกัน เมื่อพืชได้รับโลหะหนัก จะเกิดการสะสมออกซิเจนปฏิกิริยาภายในเซลล์พืช ออกซิเจนปฏิกิริยานี้จะเป็นตัวส่งสัญญาณเพื่อกระตุ้นการทำงานของระบบฮอร์โมนต่างๆหลายระบบที่จะตอบสนองต่อสภาวะกดดัน เช่น กรดแอบไซซิก กรดจัสโมนิก จิบเบอเรลลิน กรดซาลิไซลิก และเอทิลีน โพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่มีวงอะโรมาติกหลายวงส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชโดยแสดงฤทธิ์คล้ายจิบเบอเรลลิน ซึ่งอาจเป็นเพราะโครงสร้างใกล้เคียงกัน (Xing et al., 2006) ฟลูโอแรนทรีน (Fluoranthene) ซึ่งเป็นสารประกอบกลุ่มโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนชนิดหนึ่ง กระตุ้นให้ถั่วลันเตาสร้างกรดแอบไซซิกมากขึ้นเมื่อได้รับฟลูโอแรนทรีนร่วมกับออกซินอย่างเดียวหรือออกซินร่วมกับไซโตไคนินในสภาพปลอดเชื้อ ซึ่งโดยปกติการสะสมกรดแอบไซซิกในพืชจะเกิดขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะกดดัน และความเป็นพิษของฟลูโอแรนทรีนชักนำให้เกิดสภาวะกดดันนั้นขึ้นได้ (Vanova et al., 2009)

การใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชจากภายนอกเพื่อลดความเป็นพิษต่อพืชของสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีนเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการกระตุ้นให้พืชสามารถเจริญเติบโตในสภาวะที่มีสารมลพิษปนเปื้อนได้ มีรายงานการใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชเพื่อลดความเป็นพิษของโลหะหนักต่อพืชเป็นจำนวนมาก เช่น ทานตะวันที่ปลูกแบบไฮโดรนิกส์ได้รับ IAA 10^{-10} M พร้อมกับตะกั่วในสารละลายธาตุอาหาร จะมีการเจริญเติบโตของยอดและรากดีกว่าต้นที่ได้รับตะกั่วเพียงอย่างเดียว (Fässler et al., 2010) การใช้จิบเบอเรลลิน 50 µM เพื่อลดความเป็นพิษของแคดเมียมนั้น พบว่าแม้จิบเบอเรลลินจะไม่สามารถเพิ่มน้ำหนักสด น้ำหนักแห้งของ *Brassica napus* ที่เจริญแบบไฮโดรโพนิกส์และได้รับแคดเมียม 50 – 100 µM ได้ แต่สามารถเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์ได้ที่แคดเมียม 50 µM (Meng et al., 2009)

พืชบางชนิดเมื่อได้รับสารควบคุมการเจริญเติบโตพร้อมกับการสัมผัสกับโลหะหนักจะกระตุ้นให้พืชชนิดนั้นสะสมโลหะหนักได้ดีขึ้น ตัวอย่างเช่น ทานตะวันที่เจริญในดินที่มีตะกั่วหรือสังกะสี เมื่อฉีดพ่นสารควบคุมการเจริญเติบโตกลุ่มไซโตไคนินที่ยอดจะเพิ่มการสะสมตะกั่วหรือสังกะสีภายในชีวมวลของพืชได้ (Tassi et al., 2008) *Sesbania drummondii* ที่ปลูกแบบไฮโดรโพนิกส์ในสารละลายที่มีตะกั่ว และมี IAA หรือ NAA อยู่ในสารละลายธาตุอาหารด้วยจะสะสมตะกั่วภายในชีวมวลได้เพิ่มขึ้นเช่นกัน (Israr and Sahi, 2008) แครอทที่เจริญในดินเค็มและมีโบรอนปนเปื้อนในดิน เมื่อเติมกรดซาลิไซลิกลงในดิน

ด้วย จะทำให้น้ำหนักแห้งของรากเพิ่มขึ้นและเพิ่มการทำงานของระบบแอนติออกซิแดนต์ (Antioxidant) ด้วย (Eraslan et al., 2007)

การศึกษาผลของการใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชในการลดความเป็นพิษของสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีนยังมีไม่มากนัก และมีทั้งที่ได้ผลและไม่ได้ผล Sharada et al. (1999) พบว่าความเป็นพิษของ Hexachlorocyclohexane (HCH) ทุกไอโซเมอร์ แสดงความเป็นพิษต่อพืชโดยลดระดับของ IAA และการทำงานของ Ca^{2+}-ATPase ดัชนีความแข็งแรง (คำนวณจากความยาวยอด ความยาวรากและร้อยละการงอก) ของต้นกล้าข้าวลดลงเมื่อได้รับ gamma และ delta-HCH แต่ดัชนีความแข็งแรงจะกลับคืนเป็นปกติได้ถ้าได้รับ IAA 100 nM เมื่อต้นกล้าข้าวได้รับการกระตุ้นด้วย IBA หรือ GA_3 ตั้งแต่ยังเป็นเมล็ดแล้วจึงนำมาเพาะในดินที่มีลินเดน 20 mg/kg ความเป็นพิษของลินเดนที่ปรากฏในระยะต้นกล้าจะน้อยกว่าต้นข้าวที่ไม่ได้รับการกระตุ้น (วราภรณ์ ฉุยฉาย และ ปัทมาพร รูปปัทม์, 2553) การแช่เมล็ดข้าวโพดในสารละลาย IBA 10.0 mg/l สามารถเพิ่มความยาวยอด ความยาวรากและน้ำหนักสดของต้นกล้าข้าวโพดที่เจริญในดินที่ปนเปื้อนลินเดน 20 mg/kg ได้ (ปัทมาพร รูปปัทม์ และคณะ, 2554) การแช่เมล็ดผักกวางตุ้งในสารละลาย IBA 1.0 – 10.0 mg/l สามารถเพิ่มการเจริญเติบโตของต้นกล้าผักกวางตุ้งในดินที่ปนเปื้อนลินเดน 20 mg/kg ได้ แต่จะไม่ได้ผลถ้าเพิ่มความเข้มข้นของลินเดนเป็น 40 mg/kg (Chouychai, 2012) การแช่เมล็ดผักกวางตุ้งในสารละลาย NAA 10.0 mg/l แล้วนำไปเพาะในทรายที่ปนเปื้อนเอนโดซัลแฟน ซัลเฟต 4-100 mg/kg ทำให้ความยาวยอดของต้นกล้ามากขึ้น แต่การแช่เมล็ดในสารละลายไทเดียซูรอน 10.0 mg/l ทำให้การเจริญของรากของต้นกล้าหยุดชะงักไป (ขนิษฐา สมตระกูล และ มาลียา เครือตราชู, 2556)

มีการใช้สารควบคุมการเจริญของพืชในการปรับปรุงประสิทธิภาพของการฟื้นฟูสภาพแวดล้อมของพืช โดยเฉพาะการเคลื่อนย้ายโลหะหนักออกจากดิน ตัวอย่าง เช่น การปลูก *Picris divaricata* ในสารละลายฮอกแลนด์ (Hoagland solution) ที่เติมตะกั่ว 100 µM และ กรดอินโดลอะซีติก (indoleacetic acid; IAA) 10–100 µM เพิ่มการสะสมโลหะในชีวมวลเมื่อเทียบกับพืชที่ไม่ได้รับ IAA ความเข้มข้นของตะกั่วในใบของ *P. divaricata* ที่ได้รับ IAA 100 µM เป็น 1,840 µg/g ส่วนต้นที่ไม่ได้รับ IAA เป็น 1,340 µg/g (Du et al., 2011) ถั่วอัลฟัลฟา ที่ปลูกในดินที่มีตะกั่ว 80 mg/kg และรดด้วยสารละลาย EDTA ร่วมกับ IAA 100 µM และไคนีติน (kinetin) 100 µM เพิ่มการสะสมตะกั่วในยอดโดยไม่เพิ่มการเจริญเติบโตของพืช ความเข้มข้นของตะกั่วในใบถั่วอัลฟัลฟาเมื่อไม่ได้รับสารควบคุมการเจริญเติบโตเป็น 92 mg/kg และเมื่อได้รับ IAA+kinetin เป็น 127 mg/kg (Lopez et al., 2009) วิธีให้สารควบคุมการเจริญเติบโตแก่พืชส่งผลต่อประสิทธิภาพเช่นกัน เช่น การให้ IAA หรือ GA_3 1 µM แก่ต้นข้าวโพดที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วให้ผลต่างกันไปตามวิธีการ การแช่เมล็ดใน IAA หรือ GA_3 ทำให้สะสมตะกั่วได้ต่ำกว่าการฉีดพ่น โดยการแช่เมล็ดทำให้สะสมตะกั่วในลำต้นและใบเป็น 40 และ 50 µg/g ตามลำดับ ส่วนการฉีดพ่นทำให้สะสมตะกั่วในลำต้นและใบเป็น 60 และ 100 µg/g ตามลำดับ (Hadi et al., 2010)

ผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตที่เลือกใช้กับระบบสรีรวิทยาของพืช

สารควบคุมการเจริญเติบโตที่เลือกใช้ในที่นี้มี 3 ชนิดคือ กรดอินโดลบิวทาริก (ออกซิน) ไทเดียซูรอน (ไซโตไคนินชนิดฟีนิลยูเรีย) และ กรดจิบเบอเรลลิก (จิบเบอเรลลิน) โดยทั้งสามชนิดเป็นสารควบคุมการเจริญเติบโตที่เร่งการเจริญเติบโตของพืช โดยที่การได้รับออกซินช่วยกระตุ้นให้พืชสะสมสารมลพิษได้ดี ส่วนไทเดียซูรอนนั้นเคยมีรายงานว่าช่วยกระตุ้นให้พืชทนทานต่อโลหะหนักและกระตุ้นการงอกได้ ส่วนจิบ

เบอเรลลินเป็นสารควบคุมการเจริญเติบโตที่มีบทบาทในการเพิ่มความยาวของปล้อง และกระตุ้นการงอกของเมล็ด จึงเลือกสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช 3 ชนิดนี้มาทดสอบ โดยรายละเอียดการออกฤทธิ์ของสารแต่ละชนิดเป็นดังนี้

1. กรดอินโดลบิวทาริก (Indolebutyric acid; IBA) เป็นสารควบคุมการเจริญเติบโตที่พบตามธรรมชาติ เช่นพบในใบข้าวโพดและพืชใบเลี้ยงคู่อีกหลายชนิด IBA ที่เป็นสารสังเคราะห์ใช้ในการเร่งรากของกิ่งปักชำซึ่งออกซินมีบทบาทต่อการเจริญเติบโตหลายประการ เช่น มีบทบาทสำคัญต่อการเกิดขั้วของเนื้อเยื่อ ซึ่งเป็นการเกิดความไม่สมมาตรขึ้นระหว่างเซลล์หรือภายในเซลล์ การเกิดรูปร่างของเซลล์และการเกิดตำแหน่งภายในเซลล์ (Boutté et al., 2007) การชักนำการยืดขยายเซลล์ลำต้น และเนื้อเยื่อหุ้มยอดแรกเกิด กระตุ้นการแบ่งเซลล์และการยืดขยายตัวของเซลล์ เร่งการเติบโตของพืชทั้งในส่วนที่เป็นต้นและราก โดยปกติแล้ว ส่วนต่างๆของพืชตอบสนองต่อปริมาณออกซินไม่เท่ากัน ลำต้นต้องการออกซินสูงกว่าในราก การยืดขยายความยาวของราก ออกซิน ปริมาณต่ำจะกระตุ้นการขยายตัวของรากได้ดี ส่วนความเข้มข้นที่กระตุ้นการเจริญของลำต้นจะสูงเกินไปสำหรับราก จนกลายเป็นการยับยั้ง ใช้ในการชักนำรากในการชักนำให้เกิดพืชต้นใหม่ในหลอดทดลอง (Thomas and Michel, 2007)

2. ไทเดียซูรอน)Thidiazuron; TDZ) เป็นสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชชนิดไซโตไคนินกลุ่มฟีนิลยูเรีย มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของพืชมาก TDZ กระตุ้นให้พืชหลายชนิดเกิดการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาได้ดี แม้ว่าพืชนั้นจะตอบสนองต่อสารควบคุมการเจริญเติบโตอื่นๆได้น้อย เช่นในกลุ่มของไม้เนื้อแข็ง (Malabadi et al., 2004) ใช้ที่ความเข้มข้นต่ำ บางครั้งเพียงแค่ระดับพิโคโมลก็เกิดผล และใช้เวลาในการกระตุ้นสั้น ตัวอย่างเช่น กระตุ้นการงอกของเมล็ด *Striga asiatica* และผักกาดหอม กระตุ้นการเจริญของตาในแอปเปิล การเจริญของใบเลี้ยงฟักทอง ลดการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ เพิ่มการสร้างปากใบ และเพิ่มน้ำหนักสดของพืช เป็นต้น (Murthy et al., 1998)

3. กรดจิบเบอเรลลิก (Gibberelic acid; GA_3) เป็นสารที่มีบทบาทในการกระตุ้นการแบ่งเซลล์ทำให้พืชเจริญเติบโตได้รวดเร็ว ช่วยเพิ่มความสามารถของการคลายตัวของผนังเซลล์ ช่วยกระตุ้นการย่อยสลายแป้งและน้ำตาล ลดแรงดันน้ำของพืชทำให้น้ำเข้าเซลล์ได้มาก ทำให้เซลล์ขยายตัว จิบเบอเรลลินมีผลต่อการเพิ่มน้ำหนักสดของพืชโดยไม่มีผลต่อน้ำหนักแห้ง ช่วยทำลายระยะพักตัวของพืชทั้งการพักตัวของตาและเมล็ด โดยข่มฤทธิ์ของ กรดแอบไซซิก ซึ่งทำให้เกิดระยะพักตัว ช่วยเร่งการทำงานของเอนไซม์ที่ย่อยสลายเอนโดสเปิร์ม (Olszewski et al., 2002) เพิ่มการงอกของเมล็ด เพิ่มการยืดตัวของปล้องทั้งที่กิ่งและก้านช่อดอก (Ortega-Baes and Rojas-Arechiga, 2007; Ranwala and Miller, 2008; Zeevaart et al., 1993)

ระเบียบวิธีวิจัย

<u>ตอนที่ 1</u> ผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชชนิดเดียว ต่อการเจริญในระยะต้นกล้าของข้าวโพด ผักบุ้งและถั่วฝักยาวที่ปลูกในดินปนเปื้อนเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซน

ใช้เทคนิคอล HCH (Dr. Ehrenstorfer GmbH, ความบริสุทธิ์ 99.0%, เป็นส่วนผสมของไอโซเมอร์แอลฟา 76%, ไอโซเมอร์เบตา 6%, ไอโซเมอร์แกมมา 15%, ไอโซเมอร์เดลตา 2%, และไอโซเมอร์เอปซีลอน 1%) ชั่ง HCH แล้วละลายด้วยอะซีโตน จากนั้นจึงเติมลงในดินให้ได้ความเข้มข้นเป็น 20 mg/kg ดินที่เติมเฉพาะอะซิโตน ใช้เป็นชุดควบคุมที่ 0 mg/kg ผึ่งดินไว้ 24 ชั่วโมงเพื่อให้อะซิโตนระเหยไปให้หมดก่อนใช้เพาะเมล็ด ดินที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นดินชุดชัยบาดาลที่ได้รับความอนุเคราะห์จากกรมพัฒนาที่ดิน จังหวัดนครสวรรค์

การทดสอบการเป็นพิษดัดแปลงมาจากวิธีของ Chouychai *et al*. (2007) แช่เมล็ดถั่วฝักยาว *(Vigna uguiculata)* (บริษัทอีสต์เวสต์ซีดจำกัด นนทบุรี) ข้าวโพดข้าวเหนียว (บริษัทอีสต์เวสต์ซีดจำกัด นนทบุรี) และเมล็ดผักบุ้ง (บริษัทฉั่วย่งเซ้งจำกัด นนทบุรี) ในสารละลายต่างๆต่อไปนี้คือ IBA (Fluka, ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99) 0.1, 1.0 และ 10.0 mg/l; GA_3 (Fluka, ความบริสุทธิ์ร้อยละ 90) 0.1, 1.0 และ 10.0 mg/l; TDZ (Fluka, ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99) 0.01, 0.1 และ 1.0 mg/l เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยมีเมล็ดที่แช่ในน้ำกลั่นเป็นชุดควบคุม แล้วจึงนำไปเพาะบนจานแก้วที่มีดินที่ผสมไว้ ทั้งที่มีและไม่มี HCH จานละ 10 เมล็ด จำนวน 3 จานต่อทรีทเมนต์ วางจานแก้วไว้ที่อุณหภูมิห้อง (29 องศาเซลเซียส) และได้รับแสงธรรมชาติ รดน้ำวันละประมาณ 10 ml เมื่อครบ 10 วัน บันทึกร้อยละการงอก วัดความยาวของยอดและราก น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของยอดและราก หาปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี และคลอโรฟิลล์ทั้งหมดในใบตามวิธีของ Huang et al. (2004) ความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ในหน่วย mg/ml คำนวณตามสูตรต่อไปนี้

$$[\text{Chl a}] = [12.7 \times A663] - [2.69 \times A645]$$

$$[\text{Chl b}] = [22.9 \times A645] - [4.68 \times A663]$$

$$[\text{Total Chl}] = [8.02 \times A663] + [20.2 \times A645]$$

ทดสอบความแตกต่างทางสถิติด้วย Two - way ANOVA และ LSD test

<u>ตอนที่ 2</u> ผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตสองชนิดร่วมกันต่อการเจริญในระยะต้นกล้าของข้าวโพด ผักบุ้งและถั่วฝักยาวที่ปลูกในดินปนเปื้อนเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซน

ดินที่ใช้ในการศึกษานี้เก็บมาจากศูนย์การศึกษาเกษตรเขาแรด คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ วิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของดินที่บริษัทห้องปฏิบัติการกลาง กรุงเทพฯ ดินนี้เป็นดินด่าง (pH 8.9) มีปริมาณฟอสฟอรัสน้อยกว่า 0.29 กรัม/100 กรัมน้ำหนักแห้งของดินมีไนโตรเจนทั้งหมด 0.21 กรัม/100 กรัมน้ำหนักแห้งของดินโพแทสเซียมทั้งหมด 0.13 กรัม/100 กรัมน้ำหนักแห้งของดินและสารอินทรีย์ในดิน 1.78 กรัม/100 กรัมน้ำหนักแห้งของดิน และได้วิเคราะห์ปริมาณสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีนได้แก่ เบนซีนเฮกซะคลอไรด์(Benzene hexachloride) เฮปตาคลอร์และเฮปตาคลอร์อีพอกไซด์(Heptachlor & heptachlor epoxide) อัลดรินและดีลดริน (Aldrin&dieldrin) ไดคอฟอล (Dicofol) ดีดีที (DDT) คลอร์เดน(Chlordane) เอนโดซัลแฟน (Endosulfan) เอนดริน (Endrin) ดีดีอี (DDE) และ ดีดีดี (DDD) ด้วย GC-MS ซึ่งไม่พบการปนเปื้อน

เตรียมดินโดยชั่ง HCH แล้วละลายด้วยอะซีโตน จากนั้นจึงเติมลงในดินให้ได้ความเข้มข้นเป็น 30 mg/kg ดินที่เติมเฉพาะอะซิโตน ใช้เป็นชุดควบคุมที่ 0 mg/kg ผึ่งดินไว้ 24 ชั่วโมงเพื่อให้อะซิโตนระเหยไปให้หมดก่อนใช้เพาะเมล็ด

แช่เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวพันธุ์ Big white 854 F1 (เมล็ดพันธุ์ทางการค้าของบริษัทอีสต์เวสต์ซีด จำกัด นนทบุรี) ในสารละลายต่างๆ ต่อไปนี้คือ 1) IBA 2 mg/l 2) TDZ 2 mg/l 3) GA_3 2 mg/l 4) IBA 1 mg/l + TDZ 1 mg/l 5) TDZ 1 mg/l + GA_3 1 mg/l 6) IBA 1 mg/l + GA_3 1 mg/l เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปเพาะบนจานแก้วที่มีดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อน HCH จานละ 10 เมล็ด จำนวน 3 จานต่อทรีทเมนต์ โดยมีเมล็ดที่แช่ในน้ำกลั่นเป็นชุดควบคุม วางแผนการทดลองแบบ CRD สองปัจจัย มี 2x7 ระดับ เมื่อครบ 10 วัน นำต้นกล้าที่งอกทั้งหมดมาวัดความยาวของยอดและราก โดยวัดจากโคนต้นถึงปลายใบที่อ่อนที่สุด และวัดจากโคนรากที่ออกจากใบเลี้ยงจนถึงปลายราก ชั่งน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของยอดและราก ทดสอบความแตกต่างทางสถิติด้วย Two-way ANOVA และLSD's test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ศึกษาลักษณะของเนื้อเยื่อภายในลำต้นและรากโดยตัดเนื้อเยื่อสดตามขวาง ย้อมด้วยสีซาฟรานินแล้วดูภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

สำหรับถั่วฝักยาว เนื่องจากการตอบสนองต่อจิบเบอเรลลินในการทดสอบในตอนที่ 1 นั้น ให้ผลในด้านการยับยั้งพัฒนาการของใบ จึงได้ทดสอบเฉพาะผลของ IBA และ TDZ ร่วมกันเท่านั้น โดยใช้เมล็ดถั่วฝักยาว *(Vigna uguiculata)* (บริษัทอีสต์เวสต์ซีดจำกัด นนทบุรี) นำเมล็ดถั่วฝักยาวแช่ในสารละลายต่อไปนี้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง: 1) IBA 2 mg/l 2) TDZ 2 mg/l 3) IBA 1 mg/l + TDZ 1 mg/l เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปเพาะบนจานแก้วที่มีดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อน HCH จานละ 10 เมล็ด จำนวน 3 จานต่อทรีทเมนต์ โดยมีเมล็ดที่แช่ในน้ำกลั่นเป็นชุดควบคุม วางแผนการทดลองแบบ CRD สองปัจจัย มี 2x4 ระดับ เมื่อครบ 10 วัน นำต้นกล้าที่งอกทั้งหมดมาวัดความยาวของยอดและราก โดยวัดจากโคนต้นถึงปลายยอดอ่อน และวัดจากโคนรากตามแนวรากแก้ว ชั่งน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของยอดและราก ทดสอบความแตกต่างทางสถิติด้วย Two-way ANOVA และLSD's test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ศึกษาลักษณะของเนื้อเยื่อภายในลำต้นและรากโดยตัดเนื้อเยื่อสดตามขวาง ย้อมด้วยสีซาฟรานินแล้วดูภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

<u>ตอนที่ 3</u> ผลของการใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตต่อการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซนด้วยข้าวโพดข้าวเหนียวและถั่วฝักยาว

ชั่ง HCH แล้วละลายด้วยอะซีโตนจากนั้นจึงเติมลงในดินให้ได้ความเข้มข้นเป็น 50 mg/kg ดินชุดควบคุมเติมเฉพาะอะซีโตน แล้วผึ่งให้แห้งที่ 28-30 องศาเซลเซียส ใช้เวลามากกว่า 24 ชั่วโมง หรือจนกว่ากลิ่นของอะซีโตนจะหมดไป ตัวอย่างดินถูกสุ่มมา 3 ตำแหน่ง แล้วนำไปวิเคราะห์ ความเข้มข้นของ HCH ในดินเมื่อวิเคราะห์ด้วย GC-MS เป็น 46.8 ± 11.3 mg/kg ซึ่งใช้เป็นค่าเริ่มต้นของ HCH ในดิน

การทดลองในกระถางปลูกในเดือนกันยายน – ตุลาคม พ.ศ. 2555 ใช้เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวพันธุ์บิ๊กไวท์ 854 F1 (East west Seed Co, Ltd, นนทบุรี ประเทศไทย) นำเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวแช่ในสารละลายต่อไปนี้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง: (a) distilled water; (b) 0.01 mg/l l TDZ; (c) 1.0 mg/l IBA; (d) 0.1 mg/l GA_3 (e) 1.0 mg/l IBA + 0.01 mg/l l TDZ; (f) 1.0 mg/l IBA + 0.1 mg/l GA_3; (g) 0.01 mg/l l TDZ + 0.1 mg/l GA_3 แล้วจึงปลูกในดินที่ปนเปื้อน HCH โดยใส่ลงไปกระถางละ 2-3 เมล็ด

กระถางที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 นิ้ว และใส่ดินลงไป 1 Kg หลังจากเมล็ดงอก จะถอนให้เหลือกระถางละต้น เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวที่แช่ในน้ำกลั่นและเพาะในดินที่ไม่ปนเปื้อน HCH ใช้เป็นชุดควบคุม การทดลองทำสามซ้ำ

ในการศึกษาผลของวิธีการให้สารควบคุมการเจริญเติบโต ได้เปรียบเทียบผลของวิธีการให้สารละลาย TDZ 0.01 mg/l ต่อข้าวโพด โดยมี 5 ทรีทเมนต์ คือ (a) แช่เมล็ดใน TDZ 0.01 mg/l เป็นเวลา 3 ชั่วโมงก่อนปลูกในดินปนเปื้อน HCH; (b) แช่เมล็ดในน้ำกลั่นเป็นเวลา 3 ชั่วโมงก่อนปลูกในดินปนเปื้อน HCH และรดด้วย TDZ 0.01 mg/l ต่อต้นในวันที่ 5 หลังการปลูก; (c) แช่เมล็ดในน้ำกลั่นเป็นเวลา 3 ชั่วโมงก่อนปลูกในดินปนเปื้อน HCH และฉีดพ่นด้วยสารละลาย TDZ 0.01 mg/l ที่เติม Tween 20 1 หยด ในปริมาณ 10 ml ต่อต้น (d) แช่เมล็ดในน้ำกลั่นเป็นเวลา 3 ชั่วโมงก่อนปลูกในดินปนเปื้อน HCH; และ (e) แช่เมล็ดในน้ำกลั่นเป็นเวลา 3 ชั่วโมงก่อนปลูกในดินที่ไม่ปนเปื้อน HCH ปลูกกระถางละ 2-3 เมล็ด หลังจากเมล็ดงอก จะถอนให้เหลือกระถางละต้น การทดลองทำสามซ้ำ

ในการศึกษาผลของความเข้มข้นที่ต่างกันของสารควบคุมการเจริญเติบโต ได้เปรียบเทียบความเข้มข้นของ GA_3 4 ระดับความเข้มข้น คือ (a) น้ำกลั่น (0 mg/kg); (b) GA_3 0.01 mg/l; (c) GA_3 0.1 mg/l และ (d) GA_3 1.0 mg/l นำเมล็ดข้าวโพดมาแช่ในสารละลายในแต่ละทรีทเมนต์เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วปลูกในดินปนเปื้อน HCH กระถางละ 2-3 เมล็ด หลังจากเมล็ดงอก จะถอนให้เหลือกระถางละต้น เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวที่แช่ในน้ำกลั่นและเพาะในดินที่ไม่ปนเปื้อน HCH ใช้เป็นชุดควบคุม การทดลองทำสามซ้ำ

สำหรับถั่วฝักยาว เนื่องจากการตอบสนองต่อจิบเบอเรลลินในการทดสอบในตอนที่ 1 นั้น ให้ผลในด้านการยับยั้งพัฒนาการของใบ จึงได้ทดสอบเฉพาะผลของ IBA และ TDZ ต่อการกระตุ้นการกำจัด HCH ออกจากดินที่ปลูกถั่วฝักยาวเท่านั้น การทดลองในกระถางปลูกในเดือนกันยายน – ตุลาคม พ.ศ. 2555 ใช้เมล็ดถั่วฝักยาว *(Vigna uguiculata)* (บริษัทอีสต์เวสต์ซีดจำกัด นนทบุรี) นำเมล็ดถั่วฝักยาวแช่ในสารละลายต่อไปนี้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง: (a) distilled water; (b) 0.01 mg/l l TDZ; (c) 1.0 mg/l IBA; (d) 1.0 mg/l IBA + 0.01 mg/l l TDZ แล้วจึงปลูกในดินที่ปนเปื้อน HCH โดยใส่ลงไปกระถางละ 2-3 เมล็ด กระถางที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 นิ้ว และใส่ดินลงไป 1 Kg หลังจากเมล็ดงอก จะถอนให้เหลือกระถางละต้น เมล็ดถั่วฝักยาวที่แช่ในน้ำกลั่นและเพาะในดินที่ไม่ปนเปื้อน HCH ใช้เป็นชุดควบคุม การทดลองทำสามซ้ำ

เก็บดินทั้งดินรอบนอกและดินในบริเวณไรโซสเฟียร์ในวันที่ 10 และ 30 หลังเมล็ดงอก เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณ HCH ที่เหลืออยู่ในดินด้วย GC-MS โดยเก็บตัวอย่างดินที่ปนเปื้อนแต่ไม่ได้ปลูกพืชมาวิเคราะห์ด้วย เก็บตัวอย่างข้าวโพดในแต่ละทรีทเมนต์เพื่อวัดความยาวยอด ความยาวราก น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งของยอดและราก ตัวอย่างแห้งของยอดและรากข้าวโพดในวันที่ 30 จะนำไปวิเคราะห์ปริมาณ HCH ที่ตกค้างในพืชเช่นกัน

สกัดตัวอย่างดินด้วยซอกห์เลต โดยใช้ดินแห้ง 1 กรัมผสมกับโซเดียมซัลเฟตแอนไฮดรัสในอัตราส่วน 1:1 เติมเอนโดซัลแฟน ซัลเฟต (Dr. Ehrenstorfer GmbH, Germany, Lot no. 81205, ความบริสุทธิ์ 98.5%) 300 mg/l ละลายในเฮกเซน ปริมาณ 100 μl เพื่อเป็นอินเทอร์นอล แสตนดาร์ด นำตัวอย่างดินไปสกัดในชุดซอกห์เลตด้วยเฮกเซน: อะซีโตน (1:1 โดยปริมาตร) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง รอบของการสกัดประมาณ 3-4 รอบต่อชั่วโมง แล้วนำไประเหยจนเกือบแห้งในสภาวะที่มีความดันในอ่างน้ำ

อุณหภูมิ 60ºC โดยใช้โรตารี อีวาพอเรเตอร์ (Rotary evaporator) (Buchi, Germany) เติมเฮกเซน 10 ml และระเหยจนเหลือปริมาตรประมาณ 1.5 ml การสกัด HCH ในยอดและรากทำเช่นเดียวกับในดิน

วิเคราะห์ความเข้มข้นของ HCH ในสารสกัดด้วยเฮกเซนด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี (Shimadzu GC AOC-5000) และแมสสเปกโทรสโกปี (Mass spectroscopic detector) (Shimadzu MS-QP2010) กราฟมาตรฐานเป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้นของ HCH ระหว่าง 0.4 - 100 mg/l ใช้คอลัมน์แบบคะพิลลารี Rtx®-5MS (30 m x 25 mm, I.D. = 25 μm) อัตราการไหลของแก๊สฮีเลียมเป็น 0.6 ml/min ที่ความดัน 49.5 kPa โดยอัตราส่วนสปลิท (Split) เป็น 30:1 กำหนดอุณหภูมิเป็น180°C เป็นเวลา 2 นาที, แล้วเพิ่มอุณหภูมิในอัตรา 20°C/min จนถึง 250°C และคงที่ไว้ 2 นาที จากนั้นเพิ่มจาก 250ºC ถึง 280ºC ด้วยอัตรา 20°C/min และคงที่ไว้ 4 นาที อุณหภูมิที่อินเจกเตอร์ (Injector) และดีเทกเตอร์ (Detector) เป็น 250°C

การวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างทรีทเมนต์ใช้การวิเคราะห์แบบ Two-way ANOVA และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยรายคู่ด้วยการทดสอบ LSD

ผลการทดลองและวิจารณ์

<u>ตอนที่ 1</u> ผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชชนิดเดียว ต่อการเจริญในระยะต้นกล้าของข้าวโพด ผักบุ้งและถั่วฝักยาวที่ปลูกในดินปนเปื้อนเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซน

1.1 ผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตต่อการเจริญของถั่วฝักยาว

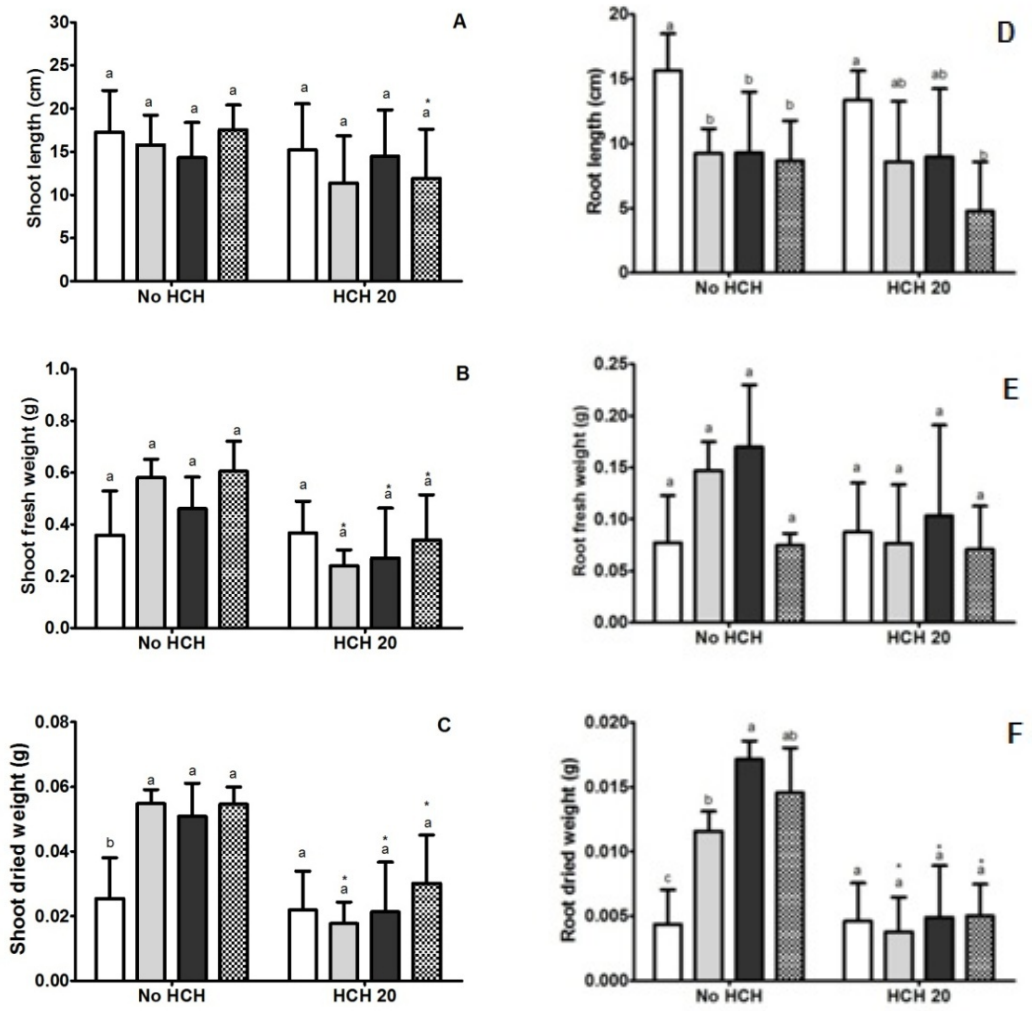
ในดินที่ไม่ปนเปื้อน HCH การแช่เมล็ดในสารละลาย GA_3 0.1 – 10.0 mg/l ก่อนนำไปเพาะจะไม่มีผลต่อความยาวยอดและน้ำหนักสดของยอดต้นกล้าถั่วฝักยาว (รูปที่ 1A – 1B) แต่จะทำให้น้ำหนักแห้งของยอดถั่วฝักยาวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (รูปที่ 1C) ส่วนการแช่เมล็ดถั่วฝักยาวใน GA_3 แล้วนำไปเพาะในดินที่มี HCH นั้น พบว่า GA_3 ไม่สามารถกระตุ้นให้การเจริญของยอดถั่วฝักยาวดีขึ้นได้เลย เมื่อเทียบกับต้นกล้าที่มาจากเมล็ดที่แช่ในน้ำกลั่น และถ้าเปรียบเทียบระหว่างเมล็ดถั่วฝักยาวที่แช่ใน GA_3 ความเข้มข้นเท่ากัน แต่นำไปเพาะในดินที่มี HCH ต่างกันแล้ว จะเห็นว่า ต้นกล้าที่เจริญในดินที่มี HCH จะมีน้ำหนักของยอดทั้งน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งน้อยกว่าต้นที่เจริญในดินที่ไม่มี HCH อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

การแช่เมล็ดถั่วฝักยาวในสารละลาย GA_3 0.1 – 10.0 mg/l ก่อนนำไปเพาะในดินที่ไม่ปนเปื้อน HCH จะเห็นผลต่อรากของต้นกล้าได้ชัดเจน เมล็ดที่ได้รับ GA_3 ทุกความเข้มข้น เมื่อนำไปเพาะในดินที่ไม่มี HCH ต้นกล้าจะมีความยาวรากสั้นกว่าเมล็ดที่แช่ในน้ำกลั่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่จะมีน้ำหนักแห้งสูงขึ้น โดยที่ไม่มีผลต่อน้ำหนักสด (รูปที่ 1D-1F) ส่วนเมล็ดที่ได้รับ GA_3 ทุกความเข้มข้น เมื่อนำไปเพาะในดินที่มี HCH พบว่าเฉพาะต้นกล้าที่มาจากเมล็ดที่แช่ใน GA_3 10.0 mg/l เท่านั้นที่มีความยาวรากสั้นกว่าต้นที่มาจากเมล็ดที่แช่น้ำกลั่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ GA_3 จะไม่มีผลต่อน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของรากต้นกล้าถั่วฝักยาวเลย (รูปที่ 1D-1F) นอกจากนั้น ต้นกล้าที่ได้รับ GA_3 ทุกความเข้มข้นทั้งที่เพาะในดินที่มีและไม่มี HCH นั้น การพัฒนาของใบไม่ดี และมีระดับของคลอโรฟิลล์ทุกชนิดที่วัดต่ำมาก (ไม่ได้แสดงข้อมูล) ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงไม่ได้ทดสอบผลของ GA_3 ต่อถั่วฝักยาว

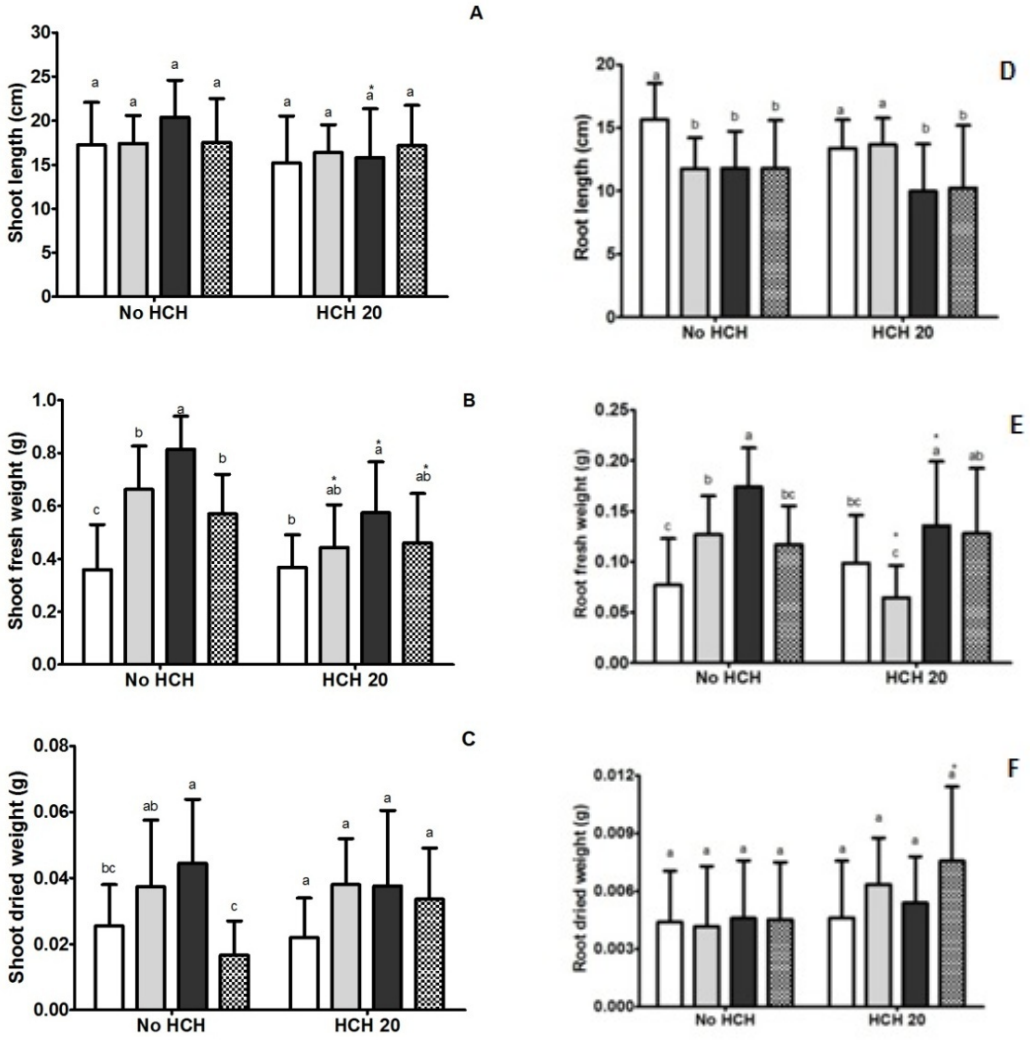
จิบเบอเรลลินเป็นสารควบคุมการเจริญเติบโตที่มีบทบาทในการส่งเสริมการยืดตัวของราก (Tanimoto, 2005) และมีการนำจิบเบอเรลลินมาใช้เพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชในสภาวะที่มีโลหะหนัก ซึ่งพบว่า จิบเบอเรลลินจะออกฤทธิ์ได้น้อยกกว่าออกซิน เช่น การใช้ GA_3 หรือ IAA อย่างละ 100 µM ในการลดความเป็นพิษของทองแดง 80 µM ต่อการเจริญของทานตะวัน พบว่า การใช้ IAA เพิ่มความยาวของรากและกระตุ้นการพัฒนาของขนรากได้ดีกว่า GA_3 แต่ GA_3 จะให้ผลดีทางด้านการรักษาระดับของรงควัตถุ (Ouizoudou and Ilias, 2005) และยังช่วยเพิ่มระดับของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระและการสะสมไนโตรเจนในถั่วลันเตาที่ได้รับโครเมียมได้ เมื่อใช้ GA_3 10 µM แต่จะไม่ได้ผลถ้าเพิ่มปริมาณเป็น 100 µM (Gangwar et al., 2011)

ในการทดลองนี้ ความเข้มข้นของ GA_3 ที่ใช้คือ 0.1 – 10.0 mg/l หรือ 0.3 – 30 µM ซึ่งแม้จะไม่สามารถกระตุ้นการเจริญของยอดและรากสำหรับต้นกล้าที่เจริญในดินที่มี HCH ได้ แต่สามารถเพิ่มน้ำหนักแห้งในต้นกล้าที่เจริญในดินที่ไม่มี HCH ดังนั้น จึงเป็นไปได้ว่าการใช้ GA_3 นี้ไม่สามารถลดความเป็นพิษของ HCH ต่อการเจริญระยะต้นกล้าของถั่วฝักยาวได้ การเพิ่มความเข้มข้นของ GA_3 อาจจะส่งผลเสียต่อการเจริญของถั่วฝักยาวมากยิ่งขึ้น เนื่องจากโดยทั่วไป การเจริญของยอดต้องการจิบเบอเรลลินใน

ระดับ 1 μM และรากต้องการในระดับ 1 nM และจะเห็นได้จากการยับยั้งการยืดยาวของรากถั่วฝักยาวทั้งในดินที่มีและไม่มี HCH



รูปที่ 1 ผลของ GA_3 ต่อความยาวยอด (A) น้ำหนักสดยอด (B) น้ำหนักแห้งยอด (C) ความยาวราก (D) น้ำหนักสดราก (E) และน้ำหนักแห้งราก (F) ของต้นกล้าถั่วฝักยาวที่เจริญในดินที่ไม่มีหรือมีเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซน (HCH) 20 mg/kg เป็นเวลา 10 วัน สัญลักษณ์ : □ น้ำกลั่น ▩ GA_3 0.1 mg/l ■ GA_3 1.0 mg/l ▩ GA_3 10.0 mg/l; ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกันหมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างต้นกล้าที่ได้รับ GA_3 ต่างกันในดินที่มี HCH ความเข้มข้นเดียวกัน * แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากต้นกล้าที่เจริญในดินที่ไม่ปนเปื้อนที่ได้รับ GA_3 ระดับเดียวกัน



รูปที่ 2 ผลของ IBA ต่อความยาวยอด (A) น้ำหนักสดยอด (B) น้ำหนักแห้งยอด (C) ความยาวราก (D) น้ำหนักสดราก (E) และน้ำหนักแห้งราก (F) ของต้นกล้าถั่วฝักยาวที่เจริญในดินที่ไม่มีหรือมีเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซน (HCH) 20 mg/kg เป็นเวลา 10 วัน สัญลักษณ์ : □ น้ำกลั่น ▩ IBA 0.1 mg/l ■ IBA 1.0 mg/l▩ IBA 10.0 mg/l; ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกันหมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างต้นกล้าที่ได้รับ IBA ต่างกันในดินที่มี HCH ความเข้มข้นเดียวกัน * แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากต้นกล้าที่เจริญในดินที่ไม่ปนเปื้อนที่ได้รับ IBA ระดับเดียวกัน

การแช่เมล็ดถั่วฝักยาวในสารละลาย IBA 0.1 – 10.0 mg/l แล้วนำไปเพาะในดินที่ไม่มี HCH พบว่า IBA 1.0 mg/l ทำให้น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของยอดต้นกล้าถั่วฝักยาวสูงกว่าต้นกล้าที่มาจากเมล็ดที่แช่น้ำกลั่นหรือ IBA 10.0 mg/l อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ไม่มีผลต่อความยาวยอด ส่วนเมล็ดที่แช่ในสารละลาย IBA 0.1 – 10.0 mg/l แล้วนำไปเพาะในดินที่มี HCH พบว่า IBA ไม่มีผลต่อความยาวยอดและน้ำหนักแห้งของต้นกล้าถั่วฝักยาว เฉพาะต้นกล้าที่มาจากเมล็ดที่แช่ใน IBA 1.0 mg/l เท่านั้น ที่มีน้ำหนักสดของยอดสูงกว่าต้นกล้าที่มาจากเมล็ดที่แช่ในน้ำกลั่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเมล็ดที่แช่ใน IBA ความเข้มข้นเท่ากัน แต่เพาะลงในดินที่มีหรือไม่มี HCH จะเห็นได้ว่า ต้นกล้าที่เจริญใน

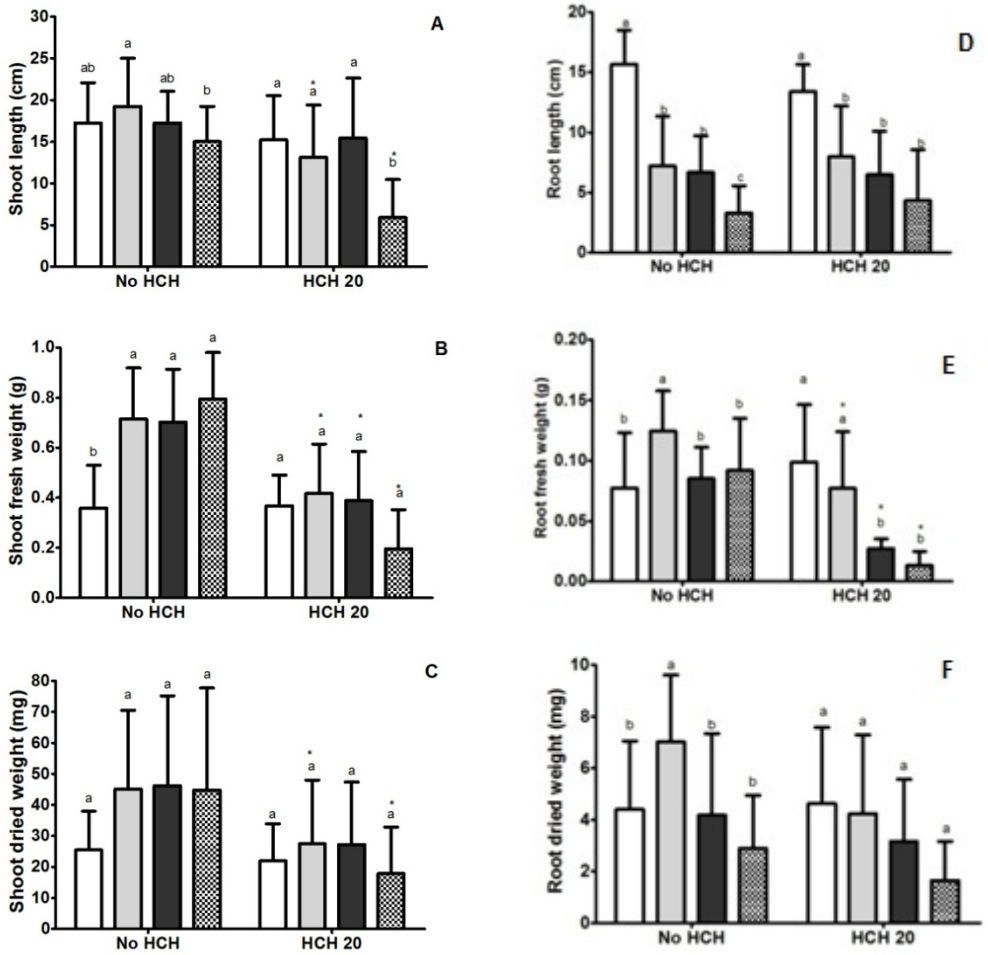
ดินที่มี HCH จะมีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของยอดต่ำกว่าต้นที่เจริญในดินที่ไม่ปนเปื้อน (รูปที่ 2) การแช่เมล็ดถั่วฝักยาวในสารละลาย IBA 0.1 – 10.0 mg/l แล้วนำไปเพาะในดินที่ไม่มี HCH พบว่า IBA ส่งผลต่อความยาวและน้ำหนักสดของรากมากกว่าน้ำหนักแห้ง เมล็ดที่แช่ใน IBA ทุกความเข้มข้นเมื่อนำไปเพาะในดินที่ไม่มี HCH จะทำให้ความยาวรากสั้นกว่าต้นกล้าที่มาจากเมล็ดที่แช่น้ำกลั่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และต้นกล้าที่มาจากเมล็ดที่แช่ใน IBA 1.0 mg/l จะมีน้ำหนักสดของรากมากกว่าต้นกล้าที่มาจากเมล็ดที่แช่ในน้ำกลั่นหรือ IBA ความเข้มข้นอื่นไม่ว่าจะเพาะในดินที่มีหรือไม่มี HCH ก็ตาม การแช่เมล็ดถั่วฝักยาวในสารละลาย IBA ทุกความเข้มข้นจะไม่มีผลต่อน้ำหนักแห้งของต้นกล้า ไม่ว่าจะเพาะในดินที่มีหรือไม่มี HCH เช่นกัน (รูปที่ 2D-2F)

IBA เป็นสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชที่สามารถกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชในสภาวะที่ได้รับสารพิษได้ดี โดยสามารถส่งเสริมการเจริญของต้นกล้าข้าวโพดและผักกวางตุ้งในดินที่ปนเปื้อนลินเดน 20 mg/kg ได้ (ปัทมาพร รูปปัทม์ และคณะ; Chouychai, 2012) แต่ไม่สามารถส่งเสริมการเจริญของต้นกล้าผักกวางตุ้งที่เจริญในดินที่ปนเปื้อนเอนโดซัลแฟน-ซัลเฟต 4-100 mg/kg ได้ (ขนิษฐา สมตระกูล และมาลียา เครือตราชู, 2555) ซึ่งในการศึกษานี้ IBA 1.0 mg/l สามารถเพิ่มน้ำหนักสดของต้นกล้าถั่วฝักยาวในดินที่ปนเปื้อน HCH 20 mg/kg ได้เช่นกัน ทั้งนี้ มีรายงานว่า HCH ลดระดับของฮอร์โมน IAA ในต้นกล้าข้าวได้ และการได้รับ IAA จากภายนอกจะช่วยให้ต้นกล้าข้าวเจริญได้เป็นปกติ (Sharada et al., 1999) จึงเป็นไปได้ว่า การสัมผัสกับ HCH ที่ปนเปื้อนในดินทำให้ระดับของฮอร์โมน IAA ในต้นกล้าถั่วฝักยาวเปลี่ยนไป และการแช่เมล็ดถั่วฝักยาวในสารละลาย IBA จะช่วยให้ระดับของ IAA เป็นปกติได้ ซึ่งต้องมีการศึกษาในรายละเอียดต่อไป

การแช่เมล็ดถั่วฝักยาวในสารละลาย TDZ 0.01 – 0.1 mg/l แล้วเพาะลงในดินที่ไม่ปนเปื้อน HCH ทำให้ความยาวยอดของต้นกล้าอยู่ในระดับเดียวกับต้นที่มาจากเมล็ดที่แช่ในน้ำกลั่น แต่ถ้าเพิ่มความเข้มข้นของ TDZ เป็น 1.0 mg/l จะทำให้ความยาวยอดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนั้น การแช่เมล็ดในสารละลาย TDZ ทุกความเข้มข้นแล้วเพาะในดินที่ไม่มี HCH ทำให้น้ำหนักสดของต้นกล้ามากกว่าต้นที่มาจากเมล็ดที่แช่ในน้ำกลั่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ไม่มีผลต่อน้ำหนักแห้งของต้นกล้า อย่างไรก็ตาม เมื่อนำเมล็ดที่แช่ในสารละลาย TDZ ทุกความเข้มข้นไปเพาะในดินที่ HCH 20 mg/kg พบว่าไม่มีผลต่อทั้งน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของต้นกล้า แต่การแช่เมล็ดในสารละลาย TDZ 1.0 mg/l จะยังทำให้ความยาวยอดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติและยังสั้นกว่าต้นกล้าที่เพาะในดินที่ไม่ปนเปื้อน HCH อีกด้วย (รูปที่ 3A-3C) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเมล็ดที่แช่ใน TDZ ความเข้มข้นเท่ากัน แต่เพาะลงในดินที่มีหรือไม่มี HCH จะเห็นได้ว่า ต้นกล้าที่เจริญในดินที่มี HCH จะมีน้ำหนักสดทั้งของยอดและรากต่ำกว่าต้นที่เจริญในดินที่ไม่มี HCH (รูปที่ 3)

TDZ มีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของรากอย่างชัดเจน โดยต้นกล้าถั่วฝักยาวที่มาจากเมล็ดที่แช่ในสารละลาย TDZ ทุกความเข้มข้นเมื่อนำมาเพาะในดินทั้งที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อน HCH จะมีความยาวรากลดลงจากต้นที่มาจากเมล็ดที่แช่ในน้ำกลั่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และจะลดลงมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ TDZ สูงขึ้น (รูปที่ 3D-3F) การแช่เมล็ดใน TDZ 0.01 mg/l แล้วนำมาเพาะในดินที่ไม่ปนเปื้อน HCH ทำให้น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของรากถั่วฝักยาวเพิ่มขึ้นได้ แต่ถ้าใช้ที่ความเข้มข้นสูงมากกว่านี้จะไม่มีผล อย่างไรก็ตาม การแช่เมล็ดถั่วฝักยาวในสารละลาย TDZ แล้วนำมาเพาะในดินที่ปนเปื้อน HCH จะไม่มีผลต่อน้ำหนักแห้งของราก และที่ความเข้มข้น 0.1 – 1.0 mg/l จะทำให้น้ำหนักสด

ของรากลดลงเมื่อเทียบกับต้นที่มาจากเมล็ดที่แช่ในน้ำกลั่นหรือ TDZ 0.01 mg/l อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติด้วย



รูปที่ 3 ผลของ TDZ ต่อความยาวยอด (A) น้ำหนักสดยอด (B) น้ำหนักแห้งยอด (C) ความยาวราก (D) น้ำหนักสดราก (E) และน้ำหนักแห้งราก (F) ของต้นกล้าถั่วฝักยาวที่เจริญในดินที่ไม่มีหรือมีเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซน (HCH) 20 mg/kg เป็นเวลา 10 วัน สัญลักษณ์ : □ น้ำกลั่น ▒ TDZ 0.01 mg/l ■ TDZ 0.1 mg/l ▩ TDZ 1.0 mg/l; ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกันหมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างต้นกล้าที่ได้รับ IBA ต่างกันในดินที่มี HCH ความเข้มข้นเดียวกัน * แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากต้นกล้าที่เจริญในดินที่ไม่ปนเปื้อนที่ได้รับ IBA ระดับเดียวกัน

TDZ เป็นสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชกลุ่มไซโทไคนินชนิดฟีนิลยูเรียซึ่งมีฤทธิ์ในการส่งเสริมการแตกยอดของพืชได้ดี โดยนำมาใช้กระตุ้นการแตกยอดในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อของพืชหลายชนิดเช่น ว่านนางคำ (กู่คำ วิไลเฮือง และ วิไลลักษณ์ ชินะจิตร 2551) และกระเจียวขาว (อนุพันธ์ กงบังเกิด และพันธิตรา กมล, 2549) การใช้ TDZ เพื่อลดความเป็นพิษของสารมลพิษในพืชมีรายงานเป็นจำนวนมากเช่นกัน การแช่เมล็ดข้าวโพดในสารละลาย TDZ 0.01μM ช่วยลดความเป็นพิษของนิกเกิลต่อข้าวโพดได้

(Lukatkin et al., 2007) TDZ 1.0 mg/l สามารถส่งเสริมการเจริญของข้าวโพดที่เจริญในดินที่ปนเปื้อนฟลูออรีน 10 mg/kg ได้ แต่จะไม่ได้ผลถ้าปริมาณฟลูออรีนในดินเพิ่มขึ้นเป็น 100 mg/kg (วราภรณ์ ฉุยฉาย และคณะ, 2554) การแช่เมล็ดผักกวางตุ้งใน TDZ 10.0 mg/l แล้วนำไปเพาะในทรายที่ปนเปื้อนเอนโดซัลแฟน ซัลเฟต ทำให้รากของต้นกล้าผักกวางตุ้งไม่พัฒนา แม้จะมีการเจริญของยอดที่ดี (ขนิษฐา สมตระกูล และ มาลียา เครือตราชู, 2556)

ในการศึกษานี้ TDZ ส่งผลในด้านการยับยั้งความยาวของทั้งยอดและรากของต้นกล้าถั่วฝักยาวอย่างชัดเจน แต่จะให้ผลดีในด้านการเพิ่มน้ำหนักสดของต้นกล้า ซึ่งการออกฤทธิ์ในด้านการเพิ่มน้ำหนักสดของ TDZ มีรายงานในด้านการนำไปใช้ฉีดพ่นเพื่อเพิ่มน้ำหนักสดของผลกีวี (Famiani et al., 2007) ดังนั้น การใช้งาน TDZ เพื่อลดความเป็นพิษของสารมลพิษต่อถั่วฝักยาว อาจต้องใช้ TDZ ร่วมกับสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชชนิดอื่น โดยเฉพาะชนิดที่ส่งเสริมการเจริญของรากได้ดี หรือส่งเสริมการยืดยาวของยอดและรากได้ดี

1.2 ผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตต่อการเจริญของข้าวโพดข้าวเหนียว

การแช่เมล็ดข้าวโพดในสารละลายของสารควบคุมการเจริญเติบโตแสดงผลที่ต่างกันเมื่อเพาะเมล็ดข้าวโพดในดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อน HCH เมล็ดที่แช่ใน IBA หรือ TDZ แล้วเพาะในดินที่ไม่ปนเปื้อนมีร้อยละการงอกสูงถึง 75 – 90% ในขณะที่เมล็ดที่แช่ในน้ำกลั่นก่อนเพาะงอกได้เพียง 55% ส่วนการเพาะในดินที่ปนเปื้อน HCH นั้น การแช่เมล็ดในน้ำกลั่น ทำให้เมล็ดงอกได้ 66% เมล็ดที่แช่ใน IBA หรือ TDZ แล้วเพาะในดินที่ปนเปื้อน HCH นั้นมีการงอกเพียง 40 – 60% ในขณะที่ GA_3 ไม่มีผลต่อการงอก

การตอบสนองต่อสารควบคุมการเจริญเติบโตของข้าวโพดต่างกันเมื่อเพาะในดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อน HCH โดยในดินที่ไม่ปนเปื้อนนั้น IBA 0.1 mg/l และ GA_3 1.0 mg/l สามารถเพิ่มความยาวยอดของต้นกล้าข้าวโพดได้ เมื่อเทียบกับต้นที่ไม่ได้กระตุ้นด้วยสารควบคุมการเจริญเติบโต และถ้าเพิ่มความเข้มข้นขึ้นอีก ความยาวยอดจะลดลง ในขณะที่เมื่อเพาะในดินที่ปนเปื้อน HCH 20 mg/kg ไม่มีสารควบคุมการเจริญเติบโตชนิดใดเพิ่มความยาวของยอดต้นกล้าข้าวโพดได้เลย (ตารางที่ 1) แนวโน้มการตอบสนองที่ต่างกันนี้พบในรากเช่นกัน ในดินที่ไม่ปนเปื้อน IBA 1-10 mg/l TDZ 0.01-0.1 mg/l และ GA_3 1.0 mg/l ลดความยาวรากของต้นกล้าข้าวโพดเมื่อเทียบกับต้นที่ไม่ได้กระตุ้นด้วยสารควบคุมการเจริญเติบโต แต่ถ้าเพาะในดินที่ปนเปื้อน HCH 20 mg/kg ความยาวรากของต้นกล้าข้าวโพดไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 2) สารควบคุมการเจริญเติบโตทั้งหมดที่ใช้ไม่มีผลต่อน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของข้าวโพดไม่ว่าจะเพาะในดินที่ปนเปื้อนหรือไม่ปนเปื้อน (ตารางที่ 1 และ 2)

สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชสามารถเพิ่มระดับของคลอโรฟิลล์ในใบข้าวโพดได้ทั้งในสภาวะที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อน HCH แต่การออกฤทธิ์ของสารควบคุมการเจริญเติบโตแต่ละกลุ่มนั้นต่างกัน TDZ ซึ่งเป็นสารควบคุมการเจริญเติบโตกลุ่มไซโทไคนินชนิดฟีนิลยูเรีย สามารถเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์เอ และคลอโรฟิลล์ทั้งหมดได้ในทุกความเข้มข้นที่ใช้ แต่เฉพาะ TDZ 0.1 mg/l เท่านั้นที่เพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์บีได้ แต่ถ้าเจริญในดินที่ปนเปื้อน HCH 20 mg/kg TDZ จะไม่มีผลต่อปริมาณคลอโรฟิลล์เลย IBA ซึ่งเป็นสารควบคุมการเจริญเติบโตกลุ่มออกซินสามารถเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์เอและคลอโรฟิลล์ทั้งหมดได้ทั้งในดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อน ส่วน GA_3 ซึ่งเป็นสารควบคุมการเจริญเติบโตกลุ่มจิบเบอเรลลินสามารถเพิ่มระดับคลอโรฟิลล์เอได้เมื่อข้าวโพดเจริญในดินที่ปนเปื้อน HCH 20 mg/kg และไม่ปนเปื้อน แต่ไม่มีผลต่อระดับคลอโรฟิลล์บี (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 1 ความยาวยอด น้ำหนักสดของยอด และน้ำหนักแห้งของยอดของข้าวโพดข้าวเหนียวที่เจริญในดินปนเปื้อน HCH 20 mg/kg หรือดินไม่ปนเปื้อนเป็นเวลา 10 วัน

สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (mg/l)	ไม่ปนเปื้อน			20 mg/kg HCH		
	ความยาว (cm)	น้ำหนักสด (mg)	น้ำหนักแห้ง (mg)	ความยาว (cm)	น้ำหนักสด (mg)	น้ำหนักแห้ง (mg)
น้ำกลั่น	12.6 ± 5.3b	409.8 ± 197.3ab	30.5 ± 12.7a	14.8 ± 3.3ab	400.9 ± 118.2a	32.9 ± 7.0a
IBA 0.1	21.3 ± 6.0a	554.9 ± 193.3a	35.0 ± 8.5a	15.4 ± 6.0ab	284.2 ± 192.4a*	21.6 ± 14.2a*
IBA 1.0	12.9 ± 2.8b	343.7 ± 76.6b	27.0 ± 10.6a	14.1 ± 3.6ab	256.2 ± 118.3a	21.0 ± 10.5a*
IBA 10.0	9.8 ± 2.4b	214.1 ± 77.5b	30.8 ± 14.1a	11.1 ± 5.4b	246.2 ± 105.2a	20.1 ± 9.6a*
TDZ 0.01	14.7 ± 3.6b	237.8 ± 38.7b	30.5 ± 6.9a	10.6 ± 4.5b	213.8 ± 179.8a	17.7 ± 13.4a
TDZ 0.1	10.6 ± 2.4b	278.7 ± 103.8b	32.5 ± 7.5a	12.3 ± 4.6b	285.1 ± 133.7a	21.8 ± 10.8a
TDZ 1.0	10.5 ± 2.6b	209.9 ± 55.8b	25.0 ± 10.8a	12.2 ± 5.1b	264.1 ± 184.7a	21.8 ± 10.3a*
GA_3 0.1	17.7 ± 5.8ab	447.2 ± 194.1ab	28.0 ± 18.0a	14.7 ± 4.7ab	378.7 ± 167.2a	28.7 ± 13.6a
GA_3 1.0	20.7 ± 4.7a	437.0 ± 149.2ab	34.0 ± 9.8a	15.9 ± 4.0a	426.7 ± 237.4a	32.7 ± 18.4a*
GA_3 10.0	17.6 ± 1.3b	500.1 ± 62.7ab	39.4 ± 5.3a	14.3 ± 5.7ab	313.8 ± 115.3a	22.1 ± 8.5a*

อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ภายในคอลัมน์เดียวกันและ * แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ระหว่างดินที่ไม่ปนเปื้อนและปนเปื้อน 20 mg/kg HCH เมื่อใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตเหมือนกัน

ตารางที่ 2 ความยาวราก น้ำหนักสดของราก และน้ำหนักแห้งของรากของข้าวโพดข้าวเหนียวที่เจริญในดินปนเปื้อน HCH 20 mg/kg หรือดินไม่ปนเปื้อนเป็นเวลา 10 วัน

สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (mg/l)	ไม่ปนเปื้อน			20 mg/kg HCH		
	ความยาว (cm)	น้ำหนักสด (mg)	น้ำหนักแห้ง (mg)	ความยาว (cm)	น้ำหนักสด (mg)	น้ำหนักแห้ง (mg)
น้ำกลั่น	13.1 ± 4.8a	155.3 ± 59.9a	13.5 ± 4.8a	5.9 ± 2.1a*	134.7 ± 64.8a	13.4 ± 5.7a
IBA 0.1	13.5 ± 4.3a	251.2 ± 41.7a	36.8 ± 12.7a	5.2 ± 0.3a*	101.6 ± 20.7a*	10.4 ± 2.4a
IBA 1.0	7.1 ± 3.4b	218.8 ± 67.8a	26.4 ± 14.5a	5.1 ± 1.9a*	122.0 ± 71.0a*	12.6 ± 7.2a
IBA 10.0	8.2 ± 2.9b	216.4 ± 59.8a	30.0 ± 5.0a	4.9 ± 2.0a*	139.8 ± 78.5a	11.6 ± 6.4a
TDZ 0.01	8.9 ± 2.4b	210.9 ± 72.3a	20.9 ± 8.9a	4.4 ± 2.6a*	96.4 ± 78.7a*	9.2 ± 6.6a
TDZ 0.1	8.9 ± 2.7b	182.1 ± 100.2a	17.7 ± 10.1a	4.5 ± 2.2a*	106.5 ± 69.6a*	9.2 ± 5.9a
TDZ 1.0	10.3 ± 1.1ab	221.1 ± 84.1a	21.6 ± 9.5a	4.6 ± 2.2a*	87.1 ± 57.9a*	7.8 ± 5.5a
GA_3 0.1	11.6 ± 2.8ab	205.3 ± 48.1a	35.4 ± 24.0a	4.9 ± 1.0a*	135.5 ± 58.0a*	10.8 ± 4.2a
GA_3 1.0	9.3 ± 2.8b	251.9 ± 57.3a	29.5 ± 13.8a	6.9 ± 2.7a*	134.7 ± 61.9a*	13.6 ± 5.3a
GA_3 10.0	12.3 ± 4.3ab	247.9 ± 42.4a	33.3 ± 23.2a	4.6 ± 1.6a*	116.0 ± 41.3a*	11.8 ± 3.1a

อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ภายในคอลัมน์เดียวกันและ * แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ระหว่างดินที่ไม่ปนเปื้อนและปนเปื้อน 20 mg/kg HCH เมื่อใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตเหมือนกัน

ตารางที่ 3 ปริมาณคลอโรฟิลล์ของข้าวโพดข้าวเหนียวที่เจริญในดินปนเปื้อน HCH 20 mg/kg หรือดินไม่ปนเปื้อนเป็นเวลา 10 วัน

สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (mg/l)	ไม่ปนเปื้อน			20 mg/kg HCH		
	คลอโรฟิลล์เอ (mg/ml)	คลอโรฟิลล์บี (mg/ml)	คลอโรฟิลล์ทั้งหมด (mg/ml)	คลอโรฟิลล์เอ (mg/ml)	คลอโรฟิลล์บี (mg/ml)	คลอโรฟิลล์ทั้งหมด (mg/ml)
น้ำกลั่น	5.7 ± 0.0d	3.3 ± 0.2b	9.3 ± 0.2cd	4.6 ± 0.1c*	3.0 ± 3.4b	7.9 ± 0.3bc
IBA 0.1	11.1 ± 2.1b	6.6 ± 1.2ab	18.2 ± 3.4ab	7.8 ± 0.0a	5.6 ± 0.0a	13.9 ± 0.0a*
IBA 1.0	13.6 ± 1.2a	6.9 ± 0.9ab	21.2 ± 1.1a	6.5 ± 0.2b	3.8 ± 0.7ab*	10.7 ± 0.7b*
IBA 10.0	7.8 ± 0.0c	4.3 ± 0.0b	12.6 ± 0.0c	3.8 ± 0.1c	2.9 ± 0.6b	6.8 ± 0.6c*
TDZ 0.01	9.5 ± 0.8bc	7.1 ± 0.6ab	17.1 ± 1.5b	6.0 ± 0.1bc	3.3 ± 0.4b*	9.7 ± 0.3bc*
TDZ 0.1	10.8 ± 0.8b	7.8 ± 0.8a	19.1 ± 1.6ab	5.6 ± 0.2bc	2.8 ± 0.0b*	8.7 ± 0.3bc*
TDZ 1.0	8.4 ± 1.4c	5.7 ± 1.2ab	14.5 ± 2.6b	6.1 ± 0.9bc	3.8 ± 1.4ab	10.2 ± 0.8b*
GA_3 0.1	7.3 ± 0.0c	4.3 ± 0.0b	12.0 ± 0.0c	6.5 ± 0.4b*	4.8 ± 1.2ab	11.6 ± 1.3ab
GA_3 1.0	5.0 ± 2.1d	4.9 ± 4.6b	10.1 ± 6.8cd	6.7 ± 0.1ab	3.7 ± 0.5ab	10.8 ± 0.3ab
GA_3 10.0	5.2 ± 0.0d	3.0 ± 0.0b	8.5 ± 0.0d	5.0 ± 0.1c*	3.0 ± 0.4b	8.3 ± 0.4bc

อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ภายในคอลัมน์เดียวกันและ * แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ระหว่างดินที่ไม่ปนเปื้อนและปนเปื้อน 20 mg/kg HCH เมื่อใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตเหมือนกัน

1.3 ผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตต่อการเจริญของผักบุ้ง

การแช่เมล็ดผักบุ้งในสารละลายสารควบคุมการเจริญเติบโตทุกชนิดไม่มีผลต่อการงอก ทั้งเมื่อเพาะในดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อน โดยร้อยละการงอกอยู่ระหว่าง 70 – 80%

การตอบสนองต่อสารควบคุมการเจริญเติบโตของผักบุ้งเมื่อเพาะในดินที่ไม่ปนเปื้อนและปนเปื้อน HCH 20 mg/kg ต่างกันเช่นเดียวกับข้าวโพดข้าวเหนียว สารควบคุมการเจริญเติบโตที่ใช้ทุกชนิดโดยเฉพาะ TDZ ทำให้ความยาวยอดของผักบุ้งลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเพาะในดินที่ไม่ปนเปื้อน HCH มีเฉพาะ GA_3 0.1 – 1.0 mg/l ที่สามารถเพิ่มน้ำหนักแห้งของยอดได้ ส่วนต้นที่เจริญในดินที่ปนเปื้อน HCH นั้น สารควบคุมการเจริญเติบโตทุกชนิดไม่มีผลต่อความยาวยอดของผักบุ้งเลย และมีเฉพาะ GA_3 1.0 mg/l เท่านั้นที่ยังคงเพิ่มน้ำหนักแห้งของยอดได้ (ตารางที่ 4) สารควบคุมการเจริญเติบโตทุกชนิดที่ใช้ลดความยาวรากของต้นกล้าผักบุ้งลง แต่เพิ่มน้ำหนักแห้งของรากผักบุ้ง มีเฉพาะ TDZ 0.1 mg/l เท่านั้นที่เพิ่มน้ำหนักสดของรากได้ ส่วนสารควบคุมการเจริญเติบโตอื่นๆไม่มีผล ในขณะที่ถ้าเพาะในดินที่ปนเปื้อน HCH การออกฤทธิ์ของสารควบคุมการเจริญเติบโตจะต่างไปคือ ไม่มีผลต่อความยาวและน้ำหนักสดของราก แต่กลับมีผลในด้านลดน้ำหนักแห้งของรากแทน โดยเฉพาะ IBA 0.1 mg/l TDZ 1.0 mg/l และ GA_3 10 mg/l (ตารางที่ 5)

สารควบคุมการเจริญเติบโตทุกชนิดที่ใช้ทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบผักบุ้งลดลงทั้งคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี และคลอโรฟิลล์ทั้งหมด ยกเว้น $GA_3$10.0 mg/l เพียงชนิดเดียวที่ไม่ทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์เอลดลงแต่ลดเฉพาะคลอโรฟิลล์บีและคลอโรฟิลล์ทั้งหมด ส่วนผักบุ้งที่เจริญในดินที่ปนเปื้อน HCH นั้น มีเฉพาะ IBA 1.0 mg/l ที่สามารถเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์เอและบีได้ ส่วน TDZ ยังคงลดปริมาณคลอโรฟิลล์ทุกชนิดในใบ ขณะที่ GA_3 ไม่มีผลต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ (ตารางที่ 6)

ตารางที่ 4 ความยาวยอด น้ำหนักสดของยอด และน้ำหนักแห้งของยอดของผักบุ้งที่เจริญในดินปนเปื้อน HCH 20 mg/kg หรือดินไม่ปนเปื้อนเป็นเวลา 10 วัน

สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (mg/l)	ไม่ปนเปื้อน			20 mg/kg HCH		
	ความยาว (cm)	น้ำหนักสด (mg)	น้ำหนักแห้ง (mg)	ความยาว (cm)	น้ำหนักสด (mg)	น้ำหนักแห้ง (mg)
น้ำกลั่น	11.5 ± 1.2a	290.7 ± 35a	15.0 ± 3.9b	11.1 ± 1.6ab	258.4 ± 56.0a	13.9 ± 4.0b
IBA 0.1	10.0 ± 2.2ab	263.9 ± 50a	15.0 ± 2.1b	10.5 ± 3.0ab	251.2 ± 60.2a	14.2 ± 3.8b
IBA 1.0	9.4 ± 1.7b	243.4 ± 54.5a	16.0 ± 3.0ab	11.3 ± 2.3a*	281.6 ± 73.7a	15.0 ± 3.4b
IBA 10.0	8.1 ± 1.6bc	223.6 ± 31.2a	15.1 ± 2.5ab	11.3 ± 1.5a*	289.6 ± 44.9a*	15.9 ± 2.5ab
TDZ 0.01	8.9 ± 2.0bc	234.4 ± 39.0a	14.6 ± 2.0b	11.5 ± 2.1ab	293.2 ± 51.4a	17.8 ± 3.9ab
TDZ 0.1	6.2 ± 1.7c	165.2 ± 26.7a	9.8 ± 1.5b	11.0 ± 2.5ab*	283.2 ± 74.0a*	14.8 ± 5.2b
TDZ 1.0	7.3 ± 1.3bc	212.5 ± 36.0a	13.9 ± 2.5b	9.5 ± 2.4b*	245.7 ± 74.8a	13.8 ± 4.6b
GA_3 0.1	9.6 ± 2.2ab	248.6 ± 35.2a	16.9 ± 2.3a	12.5 ± 1.7a	276.4 ± 60.7a	15.7 ± 2.4ab
GA_3 1.0	9.2 ± 1.2b	263.2 ± 35.6a	16.2 ± 1.6ab	10.8 ± 2.2ab	317.8 ± 59.2a	18.0 ± 3.3a
GA_3 10.0	9.8 ± 1.2ab	211.1 ± 33.3a	18.8 ± 3.5a	10.4 ± 2.5b	262.1 ± 65.8a*	16.5 ± 3.0ab

อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ภายในคอลัมน์เดียวกันและ * แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ระหว่างดินที่ไม่ปนเปื้อนและปนเปื้อน 20 mg/kg HCH เมื่อใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตเหมือนกัน

ตารางที่ 5 ความยาวราก น้ำหนักสดของราก และน้ำหนักแห้งของรากของผักบุ้งที่เจริญในดินปนเปื้อน HCH 20 mg/kg หรือดินไม่ปนเปื้อนเป็นเวลา 10 วัน

สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (mg/l)	ไม่ปนเปื้อน			20 mg/kg HCH		
	ความยาว (cm)	น้ำหนักสด (mg)	น้ำหนักแห้ง (mg)	ความยาว (cm)	น้ำหนักสด (mg)	น้ำหนักแห้ง (mg)
น้ำกลั่น	6.5 ± 1.7a	70.1 ± 14.3b	4.0 ± 1.0c	3.2 ± 0.6a*	67.8 ± 21.1ab	3.9 ± 1.4a
IBA 0.1	4.3 ± 1.2bc	89.7 ± 28.4ab	8.2 ± 3.1ab	3.5 ± 0.6a	63.2 ± 21.0b*	2.8 ± 1.3b
IBA 1.0	4.4 ± 1.1bc	86.6 ± 37.8ab	8.9 ± 3.2a	4.0 ± 0.7a	74.0 ± 24.3ab	3.2 ± 1.0ab
IBA 10.0	4.6 ± 2.3bc	73.7 ± 21.2b	8.4 ± 1.9ab	4.0 ± 0.4a	79.1 ± 14.8a	3.7 ± 1.0ab
TDZ 0.01	5.7 ± 1.4b	84.2 ± 15.5ab	6.4 ± 1.4b	3.9 ± 0.5a*	72.0 ± 15.3ab	3.6 ± 0.8ab
TDZ 0.1	2.8 ± 1.0c	99.4 ± 22.8ab	8.9 ± 3.2a	4.2 ± 0.9a*	78.8 ± 16.2ab	3.8 ± 9.3ab
TDZ 1.0	3.2 ± 1.3c	101.0 ± 25.6a	8.4 ± 1.5ab	4.0 ± 0.6a	76.8 ± 22.3ab*	2.8 ± 0.9b
GA_3 0.1	3.4 ± 1.0c	70.7 ± 17.8bc	8.6 ± 2.9ab	3.8 ± 0.6a	69.3 ± 18.4ab	2.7 ± 1.2b
GA_3 1.0	4.3 ± 1.2bc	76.9 ± 25.4b	7.8 ± 1.1a	3.6 ± 0.8a	72.0 ± 14.5ab	3.4 ± 0.9ab
GA_3 10.0	3.8 ± 0.8c	51.6 ± 8.3c	7.3 ± 2.9ab	3.6 ± 0.8a	74.7 ± 17.2ab*	2.9 ± 1.4b

อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ภายในคอลัมน์เดียวกันและ * แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ระหว่างดินที่ไม่ปนเปื้อนและปนเปื้อน 20 mg/kg HCH เมื่อใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตเหมือนกัน

การเจริญเติบโตของพืชและปริมาณคลอโรฟิลล์นิยมใช้สำหรับการทดสอบความเป็นพิษของพืชต่อสารมลพิษหลายชนิด HCH นั้นมีรายงานว่าลดความยาวยอด ความยาวราก และชีวมวลของพืชหลายชนิด โดยเฉพาะข้าวสาลี และ *Phaseolus vulgaris* (Calvelo Pereira et al., 2010) ต้นกล้าข้าวโพดและผักบุ้งนั้นมีรายงานว่าสามารถทนทานต่อลินเดนหรือแอลฟา-เอนโดซัลแฟนที่ระดับความเข้มข้น 0.2 – 20 mg/kg ได้ ในการศึกษานี้ เฉพาะความยาวรากและปริมาณคลอโรฟิลล์เอของทั้งข้าวโพดข้าวเหนียวและผักบุ้งที่เจริญในดินที่ปนเปื้อน HCH 20 mg/kg เท่านั้นที่ถูกยับยั้งอย่างมีนัยสำคัญ ไม่มีสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชชนิดใดที่เพิ่มการเจริญเติบโตของข้าวโพดในดินที่ปนเปื้อน HCH แม้ว่า GA_3 สามารถ

เพิ่มความยาวยอดของข้าวโพดในดินที่ไม่ปนเปื้อนได้ สารควบคุมการเจริญเติบโตทุกชนิดที่ใช้ลดทั้งความยาวยอดและความยาวรากของผักบุ้งที่เจริญในดินที่ไม่ปนเปื้อน แต่ผลในทางลบเหล่านี้ไม่พบในผักบุ้งที่เจริญในดินที่ปนเปื้อน HCH ปรากฏการณ์ลักษณะนี้พบในการกระตุ้นเมล็ดข้าวโพดหวาน ถั่วพุ่ม และแตงกวาด้วย NAA หรือ TDZ 10 mg/l แล้วนำไปเพาะในทรายที่ปนเปื้อนเอนโดซัลแฟน ซัลเฟต 1 – 100 mg/kg ซึ่งสารควบคุมการเจริญเติบโตที่ใช้ไม่ช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตของพืชทั้ง 3 ชนิด (Somtrakoon and Kruatrachue, 2014)

ตารางที่ 6 ปริมาณคลอโรฟิลล์ของผักบุ้งที่เจริญในดินปนเปื้อน HCH 20 mg/kg หรือดินไม่ปนเปื้อนเป็นเวลา 10 วัน

สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (mg/l)	ไม่ปนเปื้อน			20 mg/kg HCH		
	คลอโรฟิลล์เอ (mg/ml)	คลอโรฟิลล์บี (mg/ml)	คลอโรฟิลล์ทั้งหมด (mg/ml)	คลอโรฟิลล์เอ (mg/ml)	คลอโรฟิลล์บี (mg/ml)	คลอโรฟิลล์ทั้งหมด (mg/ml)
น้ำกลั่น	12.6 ± 1.8a	9.2 ± 1.9a	20.4 ± 2.0a	7.2 ± 0.4c*	3.9 ± 0.4c*	11.5 ± 0.9c*
IBA 0.1	3.9 ± 2.0c	2.3 ± 0.9c	6.4 ± 3.0d	8.2 ± 4.1bc*	5.9 ± 1.5bc	14.6 ± 2.8bc*
IBA 1.0	6.1 ± 0.9bc	2.9 ± 0.8c	9.4 ± 1.8c	13.7 ± 1.4a*	8.3 ± 1.1a	22.7 ± 0.5a*
IBA 10.0	3.4 ± 0.0c	3.0 ± 0.2c	6.6 ± 0.3cd	6.4 ± 4.1c	7.0 ± 2.4ab	13.8 ± 4.5bc*
TDZ 0.01	1.1 ± 0.2c	2.5 ± 0.4c	3.7 ± 0.7d	1.1 ± 0.0d	1.7 ± 0.2d	3.0 ± 0.2d
TDZ 0.1	1.2 ± 0.5c	2.7 ± 0.9c	4.0 ± 1.4d	1.2 ± 0.3d	1.9 ± 0.2d	3.2 ± 0.3d
TDZ 1.0	1.5 ± 0.4c	4.2 ± 0.8bc	5.8 ± 1.2d	1.2 ± 0.2d	2.1 ± 0.3d	3.3 ± 0.2d
GA_3 0.1	7.2 ± 0.0b	4.7 ± 0.0bc	12.3 ± 0.0b	7.6 ± 0.2bc	4.1 ± 0.1c	12.1 ± 0.2c
GA_3 1.0	4.7 ± 0.1bc	5.0 ± 1.0b	10.0 ± 2.1bc	10.2 ± 0.3b	4.8 ± 0.1c	15.5 ± 0.2b*
GA_3 10.0	8.3 ± 0.0ab	3.9 ± 0.0bc	12.6 ± 0.0b	9.8 ± 0.5bc	5.1 ± 0.2bc	15.4 ± 0.7b

อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ภายในคอลัมน์เดียวกันและ * แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ระหว่างดินที่ไม่ปนเปื้อนและปนเปื้อน 20 mg/kg HCH เมื่อใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตเหมือนกัน

ปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบของพืชทั้งสองชนิดลดลงเมื่อเจริญในดินที่ปนเปื้อน HCH และเฉพาะ IBA และ GA_3 ที่สามารถเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์ในพืชที่เจริญในดินที่ปนเปื้อน HCH ได้ GA_3 มีรายงานว่าสามารถรักษาระดับของรงควัตถุในทานตะวันที่สัมผัสกับความเป็นพิษของทองแดง (Ouzounidou and Ilias, 2005) TDZ ลดปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบผักบุ้งทั้งที่เจริญในดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อน และสามารถเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์ได้เฉพาะต้นที่เจริญในดินที่ไม่ปนเปื้อนเท่านั้น ผลกระทบเช่นนี้เคยมีรายงานในต้นกล้าข้าวโพดหวานและถั่วพุ่มที่เจริญมาจากเมล็ดที่แช่ TDZ 10 mg/l แล้วเพาะในทรายที่ปนเปื้อนเอนโดซัลแฟน ซัลเฟต (Somtrakoon and Kruatrachue, 2014) TDZ ที่ความเข้มข้นสูงสามารถชักนำการสร้างเอทิลีนในเนื้อเยื่อพืชได้ (Murthy et al., 1998) และระดับเอทิลีนที่สูงขึ้นจะชักนำการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ (Bleecker and Kende, 2000) การผลิตเอทิลีนถูกชักนำได้ในพืชที่สัมผัสกับสารมลพิษอินทรีย์ได้ เช่น ถั่วลันเตาที่สัมผัสกับฟลูออแรนทีน (Vanova et al., 2011) เป็นไปได้ว่า ความเข้มข้นของ TDZ ที่ใช้ในการทดลองอาจจะสูงจนถึงระดับที่ชักนำให้สร้างเอทิลีนและเป็นพิษต่อการเจริญของต้นกล้าข้าวโพดข้าวเหนียวและผักบุ้ง

จากการศึกษาความเป็นพิษข้างต้น จะเห็นได้ว่าข้าวโพดข้าวเหนียวและถั่วฝักยาวสามารถเจริญในดินที่ปนเปื้อน HCH ได้ โดย IBA สามารถส่งเสริมการเจริญของถั่วฝักยาวในดินที่ปนเปื้อน HCH ได้ และ IBA และ GA_3 สามารถเพิ่มระดับคลอโรฟิลล์ในใบข้าวโพดข้าวเหนียวเมื่อเพาะในดินปนเปื้อน HCH ได้

ส่วนผักบุ้งนั้น การใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตมีแนวโน้มเพิ่มความเป็นพิษต่อผักบุ้งมากขึ้นหรือไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตเลย ดังนั้น ในการศึกษาตอนต่อไปจึงเลือกใช้พืชเพียง 2 ชนิดคือข้าวโพดข้าวเหนียว ซึ่งจะทดสอบกับสารควบคุมการเจริญเติบโต 3 ชนิด คือ IBA TDZ และ GA_3 และถั่วฝักยาว ซึ่งจะทดสอบกับสารควบคุมการเจริญเติบโต 2 ชนิด คือ IBA และ TDZ

<u>ตอนที่ 2</u> ผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตสองชนิดร่วมกันต่อการเจริญในระยะต้นกล้าของข้าวโพดและถั่วฝักยาวที่ปลูกในดินปนเปื้อนเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซน

การปนเปื้อน HCH –30 mg/kg ในดินส่งผลต่อการเจริญของต้นกล้าข้าวโพด โดยเมื่อแช่เมล็ดในน้ำกลั่นแล้วเพาะในดินที่ปนเปื้อน HCH จะทำให้น้ำหนักสดของยอดข้าวโพดลดลง แต่ไม่มีผลต่อความยาวยอดและน้ำหนักแห้งของยอด (ตารางที่ 7) ในขณะที่ HCH ส่งผลต่อการเจริญของรากอย่างชัดเจน โดยทำให้ความยาวและน้ำหนักสดของรากลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ทำให้น้ำหนักแห้งของรากสูงขึ้น (ตารางที่ 8)

2.1 ผลของการใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตร่วมกันและ HCH ต่อการเจริญของยอดข้าวโพดข้าวเหนียว

ในดินที่ไม่ปนเปื้อน HCH การแช่เมล็ดในสารควบคุมการเจริญเติบโตทั้งชนิดเดียวและร่วมกันสองชนิดแล้วนำไปเพาะไม่มีผลต่อความยาวยอดและน้ำหนักสดของยอดต้นกล้าข้าวโพดข้าวเหนียว แต่สามารถเพิ่มน้ำหนักแห้งของยอดได้ (ตารางที่ 7) ส่วนในดินที่ปนเปื้อน HCH นั้น การแช่เมล็ดในสารควบคุมการเจริญเติบโตทั้งชนิดเดียวและสองชนิดนั้น ไม่มีผลต่อความยาวยอดและน้ำหนักสดของยอดเช่นกัน แต่มีเพียง TDZ 2 mg/l เท่านั้นที่สามารถเพิ่มน้ำหนักแห้งของยอดได้เมื่อเทียบกับต้นที่มาจากเมล็ดที่แช่น้ำกลั่น โดยต้นที่มาจากเมล็ดที่แช่ TDZ 2 mg/l มีน้ำหนักแห้งของยอดเป็น 65.0 mg ส่วนต้นที่มาจากเมล็ดที่แช่น้ำกลั่นมีน้ำหนักแห้งของยอดเป็น 50.6 mg (ตารางที่ 7) ส่วนสารควบคุมการเจริญเติบโตชนิดอื่นๆ ไม่มีผลต่อน้ำหนักแห้งของยอดเนื้อเยื่อของยอดข้าวโพดข้าวเหนียวที่มาจากเมล็ดที่แช่ในน้ำกลั่นหรือสารควบคุมการเจริญเติบโตชนิดต่างๆ ทั้งที่เพาะในดินที่ปนเปื้อนหรือไม่ปนเปื้อน HCH นั้นไม่มีความแตกต่างกัน

TDZ นั้นเป็นสารควบคุมการเจริญเติบโตกลุ่มฟีนิลยูเรียซึ่งมีรายงานว่าความเข้มข้นในช่วง 0.01 – 1.0 mg/l ไม่สามารถเพิ่มการเจริญของยอดต้นกล้าถั่วฝักยาวที่เจริญในดินที่ปนเปื้อน HCH 20 mg/kg ได้ ในทำนองเดียวกัน TDZ 1.0 – 10.0 mg/l ไม่สามารถเพิ่มการเจริญของยอดถั่วฝักยาวในดินที่ปนเปื้อนไกลโฟเซต 50 mg/kg (วราภรณ์ ฉุยฉายและคณะ, 2557) นอกจากนั้น TDZ 10 mg/l ยังทำให้ความยาวยอดของต้นกล้าผักกวางตุ้ง ข้าวโพดหวาน ถั่วพุ่ม และแตงกวาที่เจริญในทรายที่ปนเปื้อนเอนโดซัลแฟนซัลเฟตลดลงด้วย (ขนิษฐา สมตระกูลและมาลียาเครือตราชู, 2556; Somtrakoon and Kruatrachue, 2014) แต่ในการศึกษานี้ TDZ เป็นสารควบคุมการเจริญเติบโตเพียงชนิดเดียวที่เพิ่มน้ำหนักแห้งของยอดข้าวโพดที่เจริญในดินที่ปนเปื้อน HCH 30 mg/kg ได้

ตารางที่ 7 ความยาวยอด น้ำหนักสดของยอด และน้ำหนักแห้งของยอดของต้นกล้าข้าวโพดข้าวเหนียวที่เจริญในดินที่ไม่ปนเปื้อนหรือปนเปื้อน HCH 30 mg/kg เป็นเวลา 10 วัน โดยแช่ในสารควบคุมการเจริญเติบโตต่างชนิดกันก่อนเพาะ

สารควบคุมการเจริญเติบโต (mg/l)	ไม่ปนเปื้อน HCH			ปนเปื้อน 30 mg/kg HCH		
	ความยาว (cm)	น้ำหนักสด (mg)	น้ำหนักแห้ง (mg)	ความยาว (cm)	น้ำหนักสด (mg)	น้ำหนักแห้ง (mg)
น้ำกลั่น	25.5 ± 6.6a	655.0 ± 271.4a	32.7 ± 11.4c	20.1 ± 2.7a	468.6 ± 68.4a*	50.6 ± 5.6b
I 2.0	31.1 ± 5.8a	710.0 ± 128.4a	49.6 ± 10.3b	21.7 ± 2.7a*	584.3 ± 136.0a	55.2 ± 17.8ab
T 2.0	30.3 ± 8.4a	638.3 ± 82.1a	65.4 ± 6.2a	17.6 ± 2.5a*	457.1 ± 77.4a*	65.0 ± 11.3a
G 2.0	28.9 ± 7.3a	718.3 ± 111.1a	58.0 ± 11.5ab	22.7 ± 2.8a*	520.0 ± 140.6a*	40.8 ± 12.5b
I1.0 + T 1.0	34.3 ± 7.5a	578.3 ± 156.2a	55.8 ± 15.9ab	17.4 ± 5.3a*	452.8 ± 178.3a	43.4 ± 20.0b
T 1.0 + G 1.0	31.1 ± 8.4a	633.3 ± 105.2a	60.4 ± 11.2ab	18.0 ± 1.5a*	481.4 ± 49.4a*	53.4 ± 10.3ab
I 1.0 + G 1.0	31.2 ± 2.6a	585.0 ± 125.5a	54.1 ± 13.6ab	20.7 ± 3.7a*	595.7 ± 91.6a	59.6 ± 8.2ab

อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ระหว่างสารควบคุมการเจริญเติบโตต่างชนิดกันและ * แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ระหว่างต้นที่เจริญในดินที่ไม่ปนเปื้อน HCH และปนเปื้อน HCH 30 mg/kg ที่ได้รับสารควบคุมการเจริญเติบโตชนิดเดียวกัน ตัวย่อ I = IBA; T = TDZ; G = GA_3

3.2 ผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตและ HCH ต่อการเจริญของรากข้าวโพดข้าวเหนียว

ในดินที่ไม่ปนเปื้อน HCH การแช่เมล็ดใน GA_3 2 mg/l เท่านั้นที่สามารถเพิ่มความยาวรากของข้าวโพดข้าวเหนียวได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับต้นที่มาจากต้นที่แช่ในน้ำกลั่น โดย ต้นที่มาจากเมล็ดที่แช่ใน GA_3 2 mg/l มีความรากเป็น 24.7 cm ส่วนต้นที่มาจากเมล็ดที่แช่ในน้ำกลั่นมีความยาวรากเป็น 17.5 cm ส่วนต้นที่มาจากเมล็ดที่แช่ในสารควบคุมการเจริญเติบโตสองชนิดจะมีความยาวรากที่สั้นกว่าต้นที่มาจากเมล็ดที่แช่ในสารควบคุมการเจริญเติบโตชนิดเดียว (ตารางที่ 8) ในขณะที่การแช่เมล็ดในสารควบคุมการเจริญเติบโตทั้งชนิดเดียวและใช้ร่วมกันนั้น สามารถเพิ่มน้ำหนักแห้งของรากได้ แต่ไม่มีผลต่อน้ำหนักสดของราก ในดินที่ปนเปื้อน HCH การออกฤทธิ์ของสารควบคุมการเจริญเติบโตจะต่างไปโดยไม่มีสารควบคุมการเจริญเติบโตชนิดใดเลยที่มีผลต่อความยาวรากและน้ำหนักแห้งของราก ในขณะที่การแช่เมล็ดใน IBA 2 mg/l หรือ IBA 1 mg/l ร่วมกับ GA_3 1 mg/l สามารถเพิ่มน้ำหนักสดของรากข้าวโพดได้เมื่อเทียบกับต้นที่มาจากเมล็ดที่แช่น้ำกลั่น (ตารางที่ 8)

การแช่เมล็ดใน IBA 1 mg/l ร่วมกับ GA_3 1mg/l สามารถเพิ่มน้ำหนักสดของรากของข้าวโพดข้าวเหนียวที่เจริญในดินที่ปนเปื้อน HCH 30 mg/kg ได้เช่นเดียวกับที่สามารถเพิ่มน้ำหนักสดของรากข้าวโพดข้าวเหนียวในดินที่ปนเปื้อนฟีแนนทรีน 400 mg/kg ได้ แต่ไม่สามารถเพิ่มน้ำหนักสดของรากในต้นที่เจริญในดินที่ไม่ปนเปื้อนได้ (วราภรณ์ ฉุยฉาย และคณะ, 2558) ซึ่งเป็นไปได้ว่าการที่รากพืชสัมผัสกับสารมลพิษในดินนั้น ได้ส่งผลต่อปริมาณออกซินและจิบเบอเรลลินภายในราก ฮอร์โมนภายในพืชทั้งสองชนิดนี้มีรายงานว่าไวต่อการสัมผัสสารมลพิษของพืช ต้นกล้าข้าวที่สัมผัสกับลินเดนทำให้ระดับของออกซินในเนื้อเยื่อลดลง (Sharada et al., 1999) ส่วนระดับของจิบเบอเรลลินในพืชนั้นมีรายงานว่าลดลงเมื่อพืชสัมผัสกับพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Xing et al., 2006) ดังนั้นเมื่อพืชได้รับออกซินหรือจิบเบอเรลลินจากภายนอกจึงสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชให้เป็นปกติได้ ซึ่งมีรายงานว่า เมล็ดผักกวางตุ้งที่ได้รับ IBA หรือ GA_3 แล้วนำไปเพาะในดินที่ปนเปื้อนลินเดน 40 mg/kg มีการเจริญของรากที่ดีกว่าต้นที่มาจากเมล็ดที่แช่ในน้ำกลั่นได้ โดย IBA สามารถชักนำการเจริญของรากได้ดีกว่าการแช่ใน GA_3

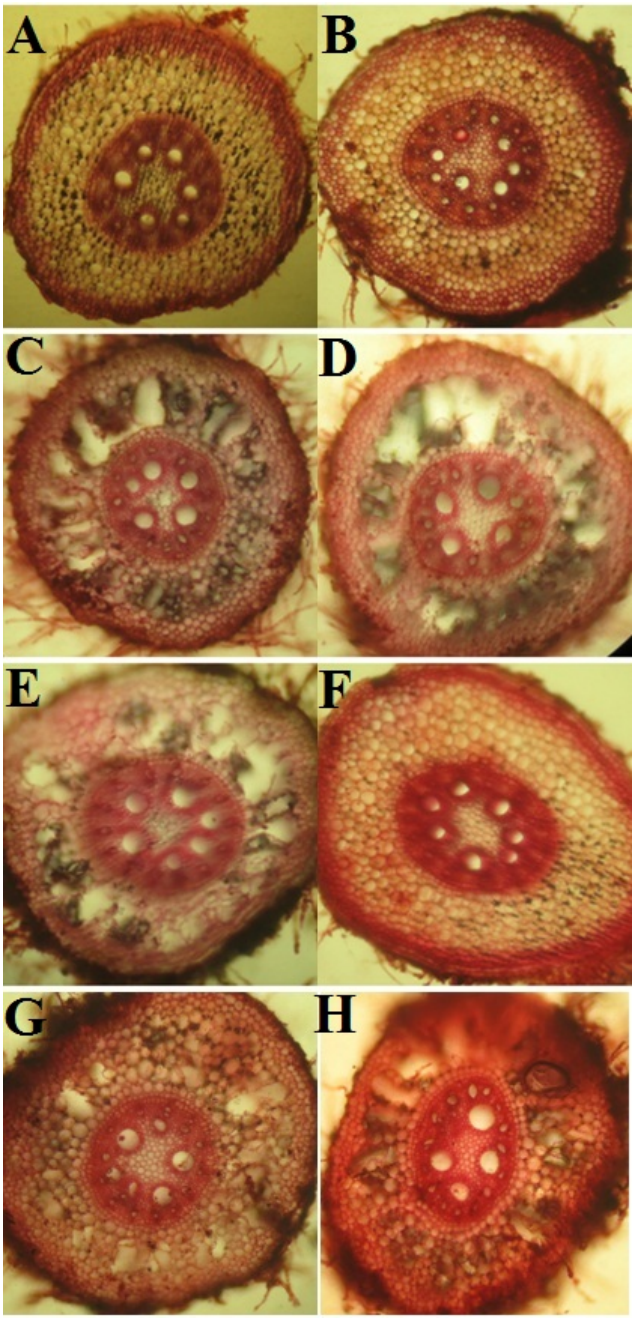
(Chouychai, 2012) เนื้อเยื่อของรากข้าวโพดข้าวเหนียวที่มาจากต้นที่แช่ในน้ำกลั่นทั้งที่เพาะในดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อน HCH ไม่มีความแตกต่างกัน แต่ต้นที่มาจากเมล็ดที่แช่ใน IBA TDZ และ GA_3 แล้วเพาะในดินที่ปนเปื้อน HCH จะเห็นว่าเกิดโพรงอากาศในชั้นคอร์เท็กซ์ของราก (รูปที่ 4) ต้นที่มาจากเมล็ดที่แช่ใน IBA รวมกับ GA_3 หรือ TDZ ร่วมกับ GA_3 จะเกิดโพรงอากาศในชั้นคอร์เท็กซ์เช่นกัน แต่มีปริมาณโพรงอากาศน้อยกว่า ส่วนต้นที่มาจากเมล็ดที่แช่ IBA ร่วมกับ TDZ ไม่เกิดโพรงอากาศ นอกจากนั้น รากที่มาจากเมล็ดที่แช่ IBA จะมีขนรากมากกว่าทรีทเมนต์อื่น (รูปที่ 4) ส่วนการเกิดโพรงอากาศในชั้นพิธนั้นพบเฉพาะรากของต้นที่มาจากเมล็ดที่แช่ใน IBA และ GA_3 เท่านั้น (รูปที่ 5)

ตารางที่ 8 ความยาวราก น้ำหนักสดของราก และน้ำหนักแห้งของรากของต้นกล้าข้าวโพดข้าวเหนียวที่เจริญในดินที่ไม่ปนเปื้อนหรือปนเปื้อน HCH 30 mg/kg เป็นเวลา 10 วัน โดยแช่ในสารควบคุมการเจริญเติบโตต่างชนิดกันก่อนเพาะ

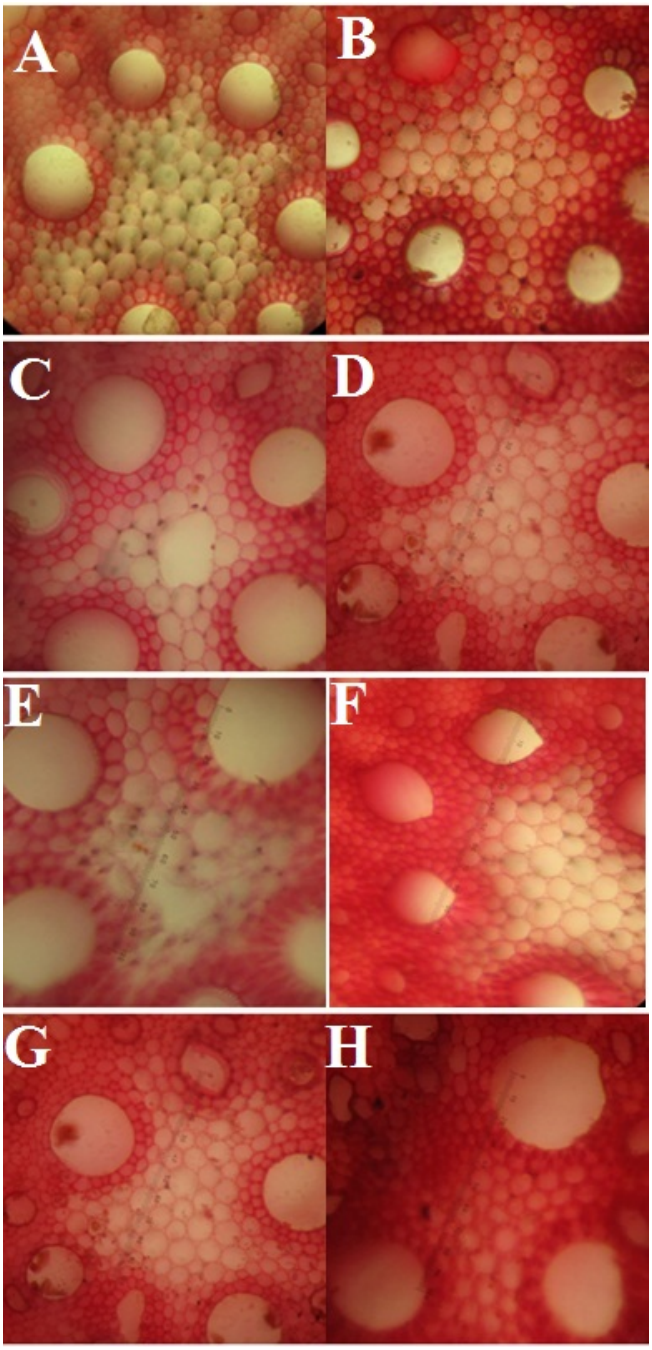
สารควบคุมการเจริญเติบโต (mg/l)	ไม่ปนเปื้อน HCH			ปนเปื้อน 30 mg/kg HCH		
	ความยาว (cm)	น้ำหนักสด (mg)	น้ำหนักแห้ง (mg)	ความยาว (cm)	น้ำหนักสด (mg)	น้ำหนักแห้ง (mg)
น้ำกลั่น	17.5 ± 5.1bc	571.7 ± 268.0ab	29.9 ± 13.4c	4.4 ± 1.0ab*	270.0 ± 72.8b*	46.7 ± 4.9ab*
I 2.0	23.8 ± 5.4ab	693.3 ± 147.3a	66.6 ± 6.8ab	5.8 ± 1.7ab*	420.0 ± 116.5a*	57.7 ± 16.8a
T 2.0	20.7 ± 4.1b	426.7 ± 120.9b	62.2 ± 16.9ab	3.2 ± 0.8b*	245.7 ± 37.8b*	35.8 ± 8.0b*
G 2.0	24.7 ± 3.0a	668.3 ± 119.2ab	73.8 ± 13.8a	6.8 ± 2.6a*	394.3 ± 129.7ab*	53.8 ± 17.7ab*
I1.0 + T 1.0	14.9 ± 4.5c	490.0 ± 144.6b	66.1 ± 21.1ab	4.3 ± 0.7ab*	247.1 ± 62.6b*	42.0 ± 10.2b*
T 1.0 + G 1.0	17.5 ± 4.6c	411.7 ± 120.9b	58.0 ± 14.6b	3.5 ± 0.7b*	241.4 ± 26.1b*	45.6 ± 7.7ab*
I 1.0 + G 1.0	17.1 ± 2.8c	536.7 ± 217.3b	53.8 ± 9.8b	5.5 ± 1.2ab*	442.8 ± 67.2a	57.2 ± 9.6a

อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ระหว่างสารควบคุมการเจริญเติบโตต่างชนิดกันและ
* แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ระหว่างต้นที่เจริญในดินที่ไม่ปนเปื้อน HCH และปนเปื้อนHCH 30 mg/kg ที่ได้รับสารควบคุมการเจริญเติบโตชนิดเดียวกันตัวย่อ I = IBA; T = TDZ; G = GA_3

การเกิดโพรงอากาศภายในเนื้อเยื่อเป็นการตอบสนองต่อสารมลพิษแบบหนึ่งของพืช มีรายงานว่าถั่วลันเตาที่เลี้ยงในอาหารกึ่งแข็งสูตร MS ที่เติม IAA 0.1mg/l ร่วมกับฟลูออแรนทีน 1.0 mg/l จะมีการสร้างเอทิลีนมากกว่าต้นที่เจริญในอาหารที่ไม่มีฟลูออแรนทีน และเกิดโพรงอากาศในเนื้อเยื่อชั้นคอร์เท็กซ์เพิ่มขึ้นด้วยหลังจากเลี้ยงในอาหารสูตรดังกล่าวเป็นเวลา 21 วัน (Vanova et al., 2011) อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้ไม่ได้วัดปริมาณเอทิลีนที่เกิดขึ้น และการเกิดโพรงอากาศจะเกิดเฉพาะในต้นที่ได้รับสารควบคุมการเจริญเติบโตและเพาะในดินที่มี HCH ดังนั้น ผลของการได้รับสารควบคุมการเจริญเติบโตจากภายนอกต่อการตอบสนองต่อสารมลพิษของพืชโดยเฉพาะระดับของฮอร์โมนภายในเนื้อเยื่อพืชจึงเป็นประเด็นที่ควรศึกษาในรายละเอียดต่อไป



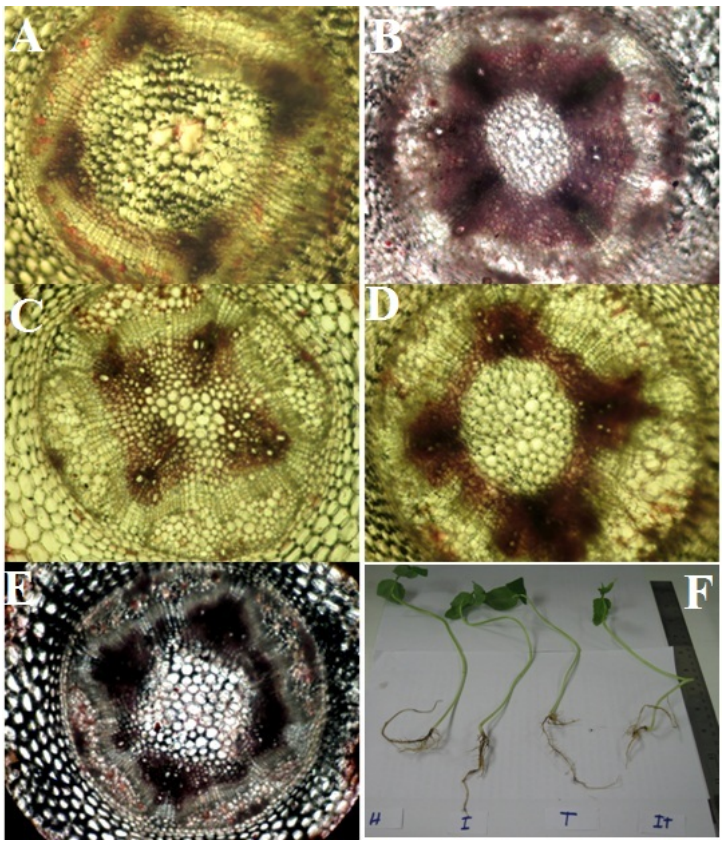
รูปที่ 4 ลักษณะเนื้อเยื่อรากของต้นกล้าข้าวโพดข้าวเหนียวอายุ 10 วันตัดตามขวางและย้อมด้วยสีซาฟรานิน กำลังขยาย 100 เท่าโดยเรียงตามลำดับดังนี้ ต้นที่แช่ในน้ำกลั่นแล้วเพาะในดินไม่ปนเปื้อน (A) และดินที่ปนเปื้อน HCH 30 mg/l (B) ต้นที่แช่ในสารควบคุมการเจริญเติบโตแล้วเพาะในดินที่ปนเปื้อน HCH 30 mg/l ได้แก่ IBA (C) TDZ (D) GA_3 (E) IBA ร่วมกับ TDZ (F) TDZ ร่วมกับ GA_3 (G) และ IBA ร่วมกับ GA_3 (H)



รูปที่ 5 ลักษณะเนื้อเยื่อรากเน้นบริเวณพิธ (pith) และไซเลมของต้นกล้าข้าวโพดข้าวเหนียวอายุ 10 วัน ตัดตามขวางและย้อมด้วยสีซาฟรานิน กำลังขยาย 400 เท่าโดยเรียงตามลำดับดังนี้ ต้นที่แช่ในน้ำกลั่นแล้วเพาะในดินไม่ปนเปื้อน (A) และดินที่ปนเปื้อน HCH 30 mg/l (B) ต้นที่แช่ในสารควบคุมการเจริญเติบโตแล้วเพาะในดินที่ปนเปื้อน HCH 30 mg/l ได้แก่ IBA (C) TDZ (D) GA_3 (E) IBA ร่วมกับ TDZ (F) TDZ ร่วมกับ GA_3 (G) และ IBA ร่วมกับ GA_3 (H)

2.1 ผลของการใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตร่วมกันและ HCH ต่อการเจริญของยอดถั่วฝักยาว

การกระตุ้นเมล็ดถั่วฝักยาวด้วยสารละลาย IBA และ TDZ ร่วมกันนั้น ไม่ได้ส่งเสริมการเจริญของยอดต้นกล้าถั่วฝักยาวต่างไปจากการกระตุ้นเมล็ดด้วยสารละลาย IBA หรือ TDZ เพียงชนิดเดียวทั้งในดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อน HCH (ตารางที่ 9) อย่างไรก็ตาม การใช้ IBA และ TDZ ร่วมกันส่งผลให้น้ำหนักแห้งรากถั่วฝักยาวลดลงเช่นเดียวกับการกระตุ้นเมล็ดด้วย TDZ อย่างเดียว แต่การกระตุ้นเมล็ดด้วย IBA ทำให้น้ำหนักแห้งของรากถั่วฝักยาวเพิ่มขึ้นเมื่อเจริญในดินที่ไม่ปนเปื้อน แต่สำหรับถั่วฝักยาวที่เจริญในดินที่ปนเปื้อน HCH การใช้ IBA และ TDZ ร่วมกันและการกระตุ้นเมล็ดด้วย TDZ อย่างเดียวไม่ได้ลดน้ำหนักแห้งของรากลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับต้นที่มาจากเมล็ดที่แช่ในน้ำกลั่น (ตารางที่ 10) และเมื่อเปรียบเทียบลักษณะการจัดเรียงเนื้อเยื่อภายในรากของต้นกล้าถั่วฝักยาวแล้ว การที่รากถั่วฝักยาวสัมผัสกับดินที่ปนเปื้อน HCH หรือการกระตุ้นเมล็ดด้วยสารควบคุมการเจริญเติบโต ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อภายในรากอย่างชัดเจน (รูปที่ 6)



รูปที่ 6 ลักษณะเนื้อเยื่อรากของต้นกล้าถั่วฝักยาวอายุ 10 วันตัดตามขวางและย้อมด้วยสีซาฟรานิน กำลังขยาย 100 เท่าโดยเรียงตามลำดับดังนี้ ต้นที่แช่ในน้ำกลั่นแล้วเพาะในดินไม่ปนเปื้อน (A)และดินที่ปนเปื้อน HCH 30 mg/l (B) ต้นที่แช่ในสารควบคุมการเจริญเติบโตแล้วเพาะในดินที่ปนเปื้อน HCH 30 mg/l ได้แก่ IBA (C) TDZ (D) IBA ร่วมกับ TDZ (E) และลักษณะของต้นกล้าที่เจริญจากเมล็ดที่แช่ในสารควบคุมการเจริญเติบโตต่างๆกันแล้วเพาะในดินที่ปนเปื้อน HCH (F)

ตารางที่ 9 ความยาวยอด น้ำหนักสดของยอดและน้ำหนักแห้งของยอดของถั่วฝักยาวที่เจริญในดินที่ไม่ปนเปื้อนหรือปนเปื้อน HCH 30 mg/kg เป็นเวลา 10 วัน

สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (mg/l)	ไม่ปนเปื้อน			30 mg/kg HCH		
	ความยาว (cm)	น้ำหนักสด (mg)	น้ำหนักแห้ง (mg)	ความยาว (cm)	น้ำหนักสด (mg)	น้ำหนักแห้ง (mg)
น้ำกลั่น	26.3 ± 1.4a	960.0 ± 169.3a	68.4 ± 10.4a	24.2 ± 3.5a	913.3 ± 271.8a	46.8 ± 18.7a*
I 1.0	25.3 ± 1.5a	905.3 ± 157.8a	70.0 ± 8.0a	24.5 ± 1.6a	910.0 ± 186.6a	58.5 ± 12.8a
T 0.01	25.9 ± 2.0a	906.7 ± 108.8a	64.8 ± 10.2a	24.3 ± 1.4a	818.3 ± 167.5a	59.4 ± 11.9a
I1.0 + T 0.01	25.8 ± 1.6a	875.6 ± 75.6a	65.2 ± 8.9a	24.8 ± 2.7a	968.3 ± 115.0a	65.8 ± 8.5a

อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) ระหว่างสารควบคุมการเจริญเติบโตต่างชนิดกันและ * แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) ระหว่างต้นที่เจริญในดินที่ไม่ปนเปื้อน HCH และปนเปื้อนHCH 30 mg/kg ที่ได้รับสารควบคุมการเจริญเติบโตชนิดเดียวกัน ตัวย่อ I = IBA; T = TDZ

ตารางที่ 10 ความยาวราก น้ำหนักสดของรากและน้ำหนักแห้งของรากของถั่วฝักยาวที่เจริญในดินที่ไม่ปนเปื้อนหรือปนเปื้อน HCH 30 mg/kg เป็นเวลา 10 วัน

สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (mg/l)	ไม่ปนเปื้อน			30 mg/kg HCH		
	ความยาว (cm)	น้ำหนักสด (mg)	น้ำหนักแห้ง (mg)	ความยาว (cm)	น้ำหนักสด (mg)	น้ำหนักแห้ง (mg)
น้ำกลั่น	10.9 ± 3.4a	126.7 ± 39.8a	21.6 ± 8.8b	10.8 ± 2.6a	171.7 ± 52.3a	11.8 ± 2.5b
I 1.0	10.3 ± 1.3a	145.0 ± 35.1a	28.6 ± 5.1a	10.6 ± 2.2a	245.0 ± 75.6a*	22.3 ± 5.6a
T 0.01	12.1 ± 3.2a	125.0 ± 10.5a	13.5 ± 3.4c	13.0 ± 0.8a	186.7 ± 56.1a*	17.8 ± 5.8ab
I1.0 + T 0.01	9.9 ± 3.0a	131.7 ± 42.2a	15.5 ± 5.4bc	13.2 ± 1.8a	223.3 ± 25.0a*	17.4 ± 1.7ab

อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) ระหว่างสารควบคุมการเจริญเติบโตต่างชนิดกันและ * แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) ระหว่างต้นที่เจริญในดินที่ไม่ปนเปื้อน HCH และปนเปื้อนHCH 30 mg/kg ที่ได้รับสารควบคุมการเจริญเติบโตชนิดเดียวกัน ตัวย่อ I = IBA; T = TDZ

<u>ตอนที่ 3</u> ผลของการใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตต่อการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซนด้วยข้าวโพดข้าวเหนียวและถั่วฝักยาว

3.1 ผลของการใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตต่อการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซนด้วยข้าวโพดข้าวเหนียว

โดยทั่วไป ปริมาณของ HCH ที่เติมลงในดินไม่มีความเป็นพิษที่ชัดเจนต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพดจนถึงวันที่ 30 หลังจากเมล็ดงอก ความยาวยอดและความยาวรากของข้าวโพดที่เจริญในดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อน HCH ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05) เมล็ดที่สัมผัสกับสารควบคุมการเจริญเติบโตทั้งชนิดเดียวและสองชนิดร่วมกันไม่มีผลกระทบที่ชัดเจนต่อการเจริญของยอดและรากของข้าวโพดในระยะเวลา 30 วันที่ทำการทดลอง (ตารางที่ 1 และ 2)

ความแตกต่างของวิธีการให้สารควบคุมการเจริญเติบโตแก่พืชต่อการเจริญของข้าวโพดข้าวเหนียวนั้นทดสอบโดยใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตชนิดเดียวและความเข้มข้นเดียวคือ TDZ 0.01 mg/l ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าความยาวยอดของต้นกล้าข้าวโพดไม่ได้รับผลกระทบจากวิธีการให้สารควบคุมการเจริญเติบโต อย่างไรก็ตาม ในวันที่ 30 น้ำหนักสดของยอดของต้นกล้าข้าวโพดทั้งที่รดหรือฉีดพ่นด้วย TDZ 0.01 mg/l มีค่ามากกว่าต้นที่มาจากเมล็ดที่แช่ใน TDZ 0.01 mg/l อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

น้ำหนักแห้งของข้าวโพดที่รดหรือฉีดพ่นด้วย TDZ 0.01 mg/l มีค่าเป็น 0.6 และ 0.4 g ตามลำดับนั้นมากกว่าต้นที่แช่ใน TDZ 0.01 mg/l หรือไม่ได้สัมผัสกับ TDZ ซึ่งมีค่าเป็น 0.2 และ 0.1 g ตามลำดับ (ตารางที่ 1) รากของต้นกล้าข้าวโพดที่รดด้วย TDZ 0.01 mg/l เจริญเติบโตได้ดีกว่ารากของข้าวโพดที่สัมผัสกับสารควบคุมการเจริญเติบโตด้วยวิธีอื่นๆ โดยเห็นได้จากรากยาวกว่า และมีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของรากมากกว่าในวันที่ 30 (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 11 ความยาวยอด น้ำหนักสดของยอด และน้ำหนักแห้งของยอดข้าวโพดข้าวเหนียวที่เจริญในดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อน HCH

Plant	ความยาวยอด (cm)		น้ำหนักสดของยอด (g)		น้ำหนักแห้งของยอด (g)	
	วันที่ 10	วันที่ 30	วันที่ 10	วันที่ 30	วันที่ 10	วันที่ 30
ชนิดของสารควบคุมฯ						
ไม่ปนเปื้อน	19.0 ± 1.3a*	39.5 ± 9.7a	0.49 ± 0.1a	2.54 ± 1.6a	0.03 ± 0.0a	0.15 ± 0.1a
HCH	21.8 ± 4.6a	34.5 ± 7.4a	0.53 ± 0.2a	3.08 ± 3.0a	0.04 ± 0.0a	0.09 ± 0.0a
HCH + I	23.5 ± 10.0a	32.9 ± 8.4a	0.61 ± 0.4a	2.45 ± 2.4a	0.04 ± 0.0a	0.17 ± 0.2a
HCH + T	15.7 ± 3.9a	41.9 ± 5.3a	0.28 ± 0.4a	2.58 ± 1.0a	0.02 ± 0.0a	0.21 ± 0.1a
HCH + G	21.5 ± 0.4a	41.2 ± 1.6a	0.30 ± 0.4a	2.54 ± 0.4a	0.03 ± 0.0a	0.16 ± 0.1a
HCH + IT	30.4 ± 1.8a	36.3 ± 4.7a	0.64 ± 0.6a	1.26 ± 0.8b	0.04 ± 0.0a	0.08 ± 0.0a
HCH + TG	22.9 ± 1.2a	33.9 ± 2.0a	0.48 ± 0.5a	4.47 ± 2.0a	0.02 ± 0.0a	0.32 ± 0.2a
HCH +IG	25.2 ± 2.5a	37.4 ± 6.5a	0.39 ± 0.4a	1.96 ± 1.2a	0.03 ± 0.0a	0.12 ± 0.1a
วิธีการให้						
ไม่ปนเปื้อน	19.0 ± 1.3a	39.5 ± 9.7a	0.49 ± 0.1a	2.54 ± 1.6ab	0.03 ± 0.0a	0.15 ± 0.1b
HCH	21.8 ± 4.6a	34.5 ± 7.4a	0.53 ± 0.2a	3.08 ± 3.0ab	0.04 ± 0.0a	0.09 ± 0.0b
HCH + แช่ใน T	15.7 ± 3.9a	41.9 ± 5.3a	0.28 ± 0.4a	2.58 ± 1.0b	0.02 ± 0.0a	0.21 ± 0.1b
HCH + รดด้วย T	27.5 ± 1.7a	51.3 ± 3.6a	0.44 ± 0.6a	5.91 ± 1.5a	0.03 ± 0.0a	0.57 ± 0.1a
HCH + ฉีดพ่น T	23.8 ± 3.7a	46.0 ± 5.1a	0.64 ± 0.5a	5.81 ± 1.4a	0.05 ± 0.0a	0.43 ± 0.1a
ความเข้มข้นของสาร						
ควบคุมฯ	30.3 ± 5.6a	36.4 ± 1.9a	0.80 ± 0.3a	0.83 ± 0.1b	0.06 ± 0.0a	0.07 ± 0.0a
ไม่ปนเปื้อน	25.4 ± 2.4a	40.8 ± 6.7a	0.75 ± 0.1a	1.10 ± 0.1ab	0.06 ± 0.0a	0.08 ± 0.0a
HCH	23.4 ± 5.2a	34.2 ± 5.6a	0.59 ± 0.2a	0.76 ± 0.1b	0.04 ± 0.0a	0.07 ± 0.0a
HCH +G (0.01 mg/l)	27.6 ± 1.0a	40.1 ± 6.9a	0.70 ± 0.1a	1.30 ± 0.2a	0.05 ± 0.0a	0.08 ± 0.0a
HCH + G (0.1 mg/l)	25.4 ± 4.1a	41.0 ± 6.6a	0.78 ± 0.3a	1.27 ± 0.3a	0.06 ± 0.0a	0.08 ± 0.0a
HCH +G (1.0 mg/l)						

*อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ระหว่างการทดลองเดียวกันในคอลัมน์เดียวกัน ตัวย่อ: PGR = สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช; I = IBA; T = TDZ; G = GA_3.

การแช่เมล็ดในสารละลาย GA_3 ความเข้มข้นต่างกันไม่มีผลต่อความยาวยอดและน้ำหนักแห้งของยอดข้าวโพด อย่างไรก็ตาม น้ำหนักสดของยอดข้าวโพดที่มาจากเมล็ดที่แช่ใน GA_3 0.1–1.0 mg/l มีค่าระหว่าง 1.27 – 1.30 g ซึ่งสูงกว่าต้นที่มาจากเมล็ดที่แช่ใน GA_3 0.01 mg/l ซึ่งมีค่าเพียง 0.76 -1.10 g ในวันที่ 30 (ตารางที่ 1) ความเข้มข้นทั้งหมดของ GA_3 ไม่ได้ส่งผลต่อน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของรากข้าวโพดในวันที่ 10 ยกเว้น GA_3 0.01 mg/l ที่ลดความยาวรากของข้าวโพดในวันที่ 30 (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 12 ความยาวราก น้ำหนักสดของราก และน้ำหนักแห้งของรากข้าวโพดข้าวเหนียวที่เจริญในดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อน HCH

พืช	ความยาวราก (cm)		น้ำหนักสดของราก (g)		น้ำหนักแห้งของราก (g)	
	วันที่ 10	วันที่ 30	วันที่ 10	วันที่ 30	วันที่ 10	วันที่ 30
ชนิดของสารควบคุมฯ						
ไม่ปนเปื้อน	18.5 ± 3.8a*	25.8 ± 8.4a	0.49 ± 0.1a	0.31 ± 0.2a	0.02 ± 0.0a	0.03 ± 0.0a
HCH	12.8 ± 2.8a	17.0 ± 6.6a	0.64 ± 0.1a	0.21 ± 0.0a	0.03 ± 0.0a	0.02 ± 0.0a
HCH + I	12.0 ± 5.2a	23.1 ± 8.6a	0.57 ± 0.1a	0.34 ± 0.4a	0.05 ± 0.0a	0.05 ± 0.0a
HCH + T	7.8 ± 1.1a	23.7 ± 10.7a	0.42± 0.2a	0.54 ± 0.4a	0.02 ± 0.0a	0.11 ± 0.1a
HCH + G	8.5 ± 4.9a	10.3 ± 0.4a	0.28 ± 0.1a	0.30 ± 0.2a	0.03 ± 0.0a	0.16 ± 0.1a
HCH + IT	20.5 ± 4.5a	14.0 ± 7.6c	0.49 ± 0.1a	0.14 ± 0.1a	0.06 ± 0.0a	0.02 ± 0.0a
HCH + TG	13.3 ± 1.5a	35.3 ± 8.1a	0.47 ± 0.2a	0.97 ± 0.4a	0.05 ± 0.0a	0.32 ± 0.1a
HCH +IG	14.7 ± 4.5a	12.9 ± 3.4a	0.68 ± 0.5a	0.21 ± 0.2a	0.05 ± 0.0a	0.12 ± 0.2a
วิธีการให้						
ไม่ปนเปื้อน	18.5 ± 3.8a	25.8 ± 8.4bc	0.49 ± 0.1a	0.31 ± 0.2b	0.02 ± 0.0a	0.03 ± 0.0c
HCH	12.8 ± 2.8a	17.0 ± 6.6c	0.64 ± 0.1a	0.21 ± 0.0b	0.03 ± 0.0a	0.02 ± 0.0c
HCH + แช่ใน T	7.8 ± 1.1a	23.7 ± 10.7bc	0.42± 0.2a	0.54 ± 0.4b	0.02 ± 0.0a	0.11 ± 0.1c
HCH + รดด้วย T	11.5 ± 3.5a	41.8 ± 9.7a	0.33 ± 0.0a	2.23 ± 1.0a	0.03 ± 0.0a	0.57 ± 0.1a
HCH + ฉีดพ่น T	11.6 ± 3.0a	29.0 ± 4.0b	0.42 ± 0.1a	1.73 ± 0.4a	0.05 ± 0.0a	0.43 ± 0.1b
ความเข้มข้นของสารควบคุมฯ						
ไม่ปนเปื้อน	19.5 ± 5.4a	12.2 ± 1.5a	0.35 ± 0.0a	0.65 ± 0.3a	0.05 ± 0.0a	0.07 ± 0.0a
HCH	8.9 ± 0.4b	5.8 ± 1.5b	0.22 ± 0.0a	0.62 ± 0.1a	0.02 ± 0.0a	0.08 ± 0.0a
HCH +G (0.01 mg/l)	8.9 ± 5.4b	6.5 ± 2.6b	0.27 ± 0.0a	0.48 ± 0.2a	0.03 ± 0.0a	0.05 ± 0.0a
HCH +G (0.1 mg/l)	10.9 ± 2.8b	11.1 ± 1.2ab	0.31 ± 0.1a	0.61 ± 0.2a	0.04 ± 0.0a	0.07 ± 0.0a
HCH +G (1.0 mg/l)	10.9 ± 2.8b	9.5 ± 3.8ab	0.32 ± 0.0a	0.59 ± 0.3a	0.03 ± 0.0a	0.07 ± 0.0a

*อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ระหว่างการทดลองเดียวกันในคอลัมน์เดียวกัน ตัวย่อ: PGR = สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช; I = IBA; T = TDZ; G = GA_3.

การกำจัด HCH ในดินที่ไม่ปลูกพืชเกิดขึ้นได้ช้า ในวันที่ 10 หลังจากเมล็ดงอก HCH ร้อยละ 97.7 ของปริมาณที่เติมลงในดินยังคงอยู่ในดินที่ไม่ปลูกพืช ส่วนในดินที่ปลูกพืชนั้นมี HCH เหลืออยู่ร้อยละ 83.6 ในดินรอบนอก (Bulk soil) และร้อยละ 67.9 ในไรโซสเฟียร์ ปริมาณ HCH ลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากวันที่ 10 ดังที่เห็นได้จากในวันที่ 30 HCH ที่คงเหลืออยู่ในดินที่ไม่ปลูกพืชคิดเป็นร้อยละ 54.4 ส่วนในดินที่ปลูกพืชเหลืออยู่ร้อยละ 10.0 ในดินรอบนอก และร้อยละ 1.5 ในไรโซสเฟียร์ เมื่อนำเมล็ดข้าวโพดไปแช่ในสารควบคุมการเจริญเติบโตก่อนเพาะลงในดิน อัตราการกำจัด HCH ในช่วงแรกเพิ่มขึ้น ซึ่งเห็นได้จากในวันที่ 10 ปริมาณของ HCH ที่คงเหลืออยู่ในดินรอบนอกที่ปลูกข้าวโพดซึ่งสัมผัสกับสารละลาย IBA, TDZ, และ GA_3 เหลืออยู่ร้อยละ 52.2, 60.7 และ 37.9 ตามลำดับ ในวันที่ 30 ปริมาณ HCH ส่วนใหญ่ถูกกำจัดออกจากดิน และปริมาณที่เหลืออยู่ในดินของทรีทเมนต์ที่ปลูกพืชทั้งหมดอยู่ระหว่างร้อยละ 0.7 - 10.0 โดยการลดลงของ HCH ที่เร็วที่สุดคือพบในไรโซสเฟียร์ของข้าวโพดที่มาจากเมล็ดที่แช่ในสารละลาย GA_3 ในวันที่ 10 เหลือปริมาณ HCH อยู่เพียงร้อยละ 4.6 ของปริมาณเริ่มต้น และปริมาณ HCH ต่ำกว่าระดับที่ตรวจวัดได้ในวันที่ 30 (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 13 ร้อยละของ HCH ที่เหลืออยู่ในดินที่ไม่ปลูกพืชและปลูกข้าวโพดข้าวเหนียวซึ่งสัมผัสกับสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชต่างชนิดกัน วิธีการให้ต่างกันและความเข้มข้นต่างกัน ความเข้มข้นเริ่มต้นของ HCH เป็น 46.8 ± 11.3 mg/kg

พืช	วันที่ 10	วันที่ 30
<u>สารควบคุมการเจริญเติบโตต่างชนิด</u>		
ไม่ปลูกพืช	97.8 ± 21.6a	62.5 ± 14.0a*
ดินรอบนอก	83.6 ± 9.8ab	10.0 ± 6.8b*
ดินไรโซสเฟียร์	67.9 ± 29.8b*	1.5 ± 0.6b*
ดินรอบนอก + แช่ใน I	52.2 ± 8.2bc*	5.4 ± 0.4b*
ดินไรโซสเฟียร์+ แช่ใน I	40.9 ± 0.0bc*	4.0 ± 0.4b*
ดินรอบนอก+ แช่ใน T	60.7 ± 12.6bc*	6.3 ± 6.4b*
ดินไรโซสเฟียร์ +แช่ใน T	40.8 ± 3.1bc*	0.7 ± 0.7b*
ดินรอบนอก+ แช่ใน G	37.9 ± 1.4c*	2.6 ± 0.1b*
ดินไรโซสเฟียร์ + แช่ใน G	4.6 ± 1.6d*	BD
ดินรอบนอก+ แช่ใน IT	60.6 ± 20.2bc*	14.0 ± 11.9b*
ดินไรโซสเฟียร์ +แช่ใน IT	43.7 ± 1.5bc*	3.6 ± 1.5b*
ดินรอบนอก+ แช่ใน TG	22.3 ± 3.8cd*	6.1 ± 8.2b*
ดินไรโซสเฟียร์+ แช่ใน TG	21.2 ± 6.9cd*	1.6 ± 1.4b*
ดินรอบนอก+ แช่ใน IG	54.8 ± 8.3bc*	13.8 ± 1.2b*
ดินไรโซสเฟียร์ + แช่ใน IG	38.3 ± 16.7c*	4.2 ± 2.7b*
<u>วิธีการให้ต่างกัน</u>		
ไม่ปลูกพืช	97.8 ± 21.6a	62.5 ± 14.0a*
ดินรอบนอก	83.6 ± 9.8ab	10.0 ± 6.8b*
ดินไรโซสเฟียร์	67.9 ± 29.8bc*	1.5 ± 0.6b*
ดินรอบนอก + แช่ใน T	60.7 ± 12.6bc*	6.3 ± 6.4b*
ดินไรโซสเฟียร์+ แช่ใน T	40.8 ± 3.1c*	0.7 ± 0.7b*
ดินรอบนอก + รดด้วย T	53.6± 11.6bc*	6.6 ± 5.8b*
ดินไรโซสเฟียร์+ รดด้วย T	57.6 ± 7.4bc*	4.7 ± 3.5b*
ดินรอบนอก + ฉีดพ่น T	49.8 ± 12.3bc*	1.8 ± 1.0b*
ดินไรโซสเฟียร์+ ฉีดพ่น T	51.7 ± 2.9bc*	BD
<u>ความเข้มข้นต่างกัน</u>		
ไม่ปลูกพืช	97.8 ± 21.6a	62.5 ± 14.0a
ดินรอบนอก	34.9 ± 12.9bc*	12.7 ± 2.9b*
ดินไรโซสเฟียร์	13.6 ± 4.6c*	13.7 ± 6.8b*
ดินรอบนอก + G 0.01 mg/l	49.8 ± 25.0b*	15.6 ± 3.0b*
ดินไรโซสเฟียร์+ G 0.01 mg/l	15.9 ± 2.8bc*	12.6 ± 0.8b*
ดินรอบนอก+ G 0.1 mg/l	43.4 ± 8.4b*	15.9 ± 13.2b*
ดินไรโซสเฟียร์ + G 0.1 mg/l	11.1 ± 1.8c*	17.3 ± 6.1b*
ดินรอบนอก+ G 1.0 mg/l	67.0 ± 3.9ab	35.1 ± 11.0ab*
ดินไรโซสเฟียร์+ G 1.0 mg/l	18.9 ± 2.0bc*	16.6 ± 4.0b*

อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ระหว่างการทดลองเดียวกันในคอลัมน์เดียวกัน * แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากวันที่ 0 ตัวย่อ: I = IBA; T = TDZ; G = GA_3; BD = ต่ำกว่าขีดจำกัดของการวัดที่ 0.4 mg/kg

เมล็ดข้าวโพดที่แช่ในสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช 2 ชนิดผสมกันแสดงผลที่ต่างกันต่อการกำจัด HCH ออกจากดิน การกำจัด HCH ลดลงอย่างช้าๆเมื่อปลูกข้าวโพดที่มาจากเมล็ดที่แช่ในสารละลาย IBA+GA_3 หรือ IBA+TDZ เมื่อเปรียบเทียบกับดินที่ปลูกข้าวโพดที่มาจากเมล็ดที่แช่สารควบคุมการเจริญเติบโตชนิดเดียว ปริมาณ HCH ที่เหลืออยู่ในดินรอบนอกของดินที่ปลูกข้าวโพดซึ่งมาจากการแช่เมล็ดใน IBA+GA_3 หรือ IBA+TDZ คิดเป็นร้อยละ 60.6 และ 54.8 ของปริมาณเริ่มต้นในวันที่ 10 มีทรีทเมนต์ที่ใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตผสมกันเพียงคู่เดียว คือ TDZ+GA_3 ที่ทำให้การกำจัด HCH จากดินมากกว่าการปลูกด้วยข้าวโพดที่มาจากเมล็ดที่แช่ในสารละลาย TDZ ชนิดเดียวในวันที่ 10 ซึ่งปริมาณที่เหลืออยู่ของดินที่ปลูกข้าวโพดที่มาจากที่แช่ในสารละลาย TDZ+GA_3 ในวันที่ 10คิดเป็นร้อยละ 22.3 ของปริมาณเริ่มต้น (ตารางที่ 3)

แม้ว่าวิธีการให้ TDZ 0.01 mg/l ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพดดังที่กล่าวไว้ข้างต้น แต่ไม่พบผลกระทบต่อการกำจัด HCH ออกจากดินภายในระยะเวลา 30 วัน ปริมาณ HCH ที่คงอยู่ในดินรอบนอกของดินที่ปลูกข้าวโพดซึ่งแช่เมล็ดใน TDZ 0.01 mg/l หรือรด หรือฉีดพ่นด้วย TDZ 0.01 mg/l คิดเป็นร้อยละ 60.7, 53.6, และ 49.8 ของปริมาณเริ่มต้นตามลำดับ ส่วนในวันที่ 30 ปริมาณที่เหลืออยู่คิดเป็น 6.3, 6.6 และ 1.8 ของปริมาณเริ่มต้นตามลำดับ (ตารางที่ 3)

การปลูกข้าวโพดที่มาจากเมล็ดที่สัมผัสกับ GA_3 ความเข้มข้นต่างๆไม่มีผลต่อการกำจัด HCH ในวันที่ 30 ปริมาณ HCH ที่เหลืออยู่ในดินรอบนอกของดินที่ปลูกข้าวโพดซึ่งไม่ได้สัมผัสกับ GA_3 เป็นร้อยละ 12.7 ซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับปริมาณ HCH ที่เหลืออยู่ในดินที่ปลูกข้าวโพดซึ่งมาจากเมล็ดที่สัมผัส GA_3 0.01, 0.1, และ 1.0 mg/l

ไม่พบการสะสมปริมาณ HCH ในเนื้อเยื่อยอดและรากของข้าวโพดที่ปลูกจนครบ 30 วัน มี HCH ปริมาณเล็กน้อย คือ 9.8 µg/g ที่พบในเนื้อเยื่อรากของข้าวโพดที่รดด้วย TDZ 0.01 mg/l เพียงทรีทเมนต์เดียว

สารควบคุมการเจริญเติบโตที่ใช้ทั้งสามชนิดเคยมีรายงานว่าสามารถใช้เพิ่มความทนทานของพืชต่อสารมลพิษได้ ตัวอย่างเช่น IBA 1-10 mg/l สามารถเพิ่มการเจริญเติบโตของผักกวางตุ้งในดินที่ปนเปื้อนลินเดน (Chouychai, 2012) ในขณะที่ TDZ 0.01 µM สามารถเพิ่มการเจริญเติบโตของข้าวโพดในระบบไฮโดรโพนิกส์ในสารละลาย Knop ที่มีนิกเกิลได้ (Lukatkin et al., 2007) ช่วงความเข้มข้นที่ใช้ในการศึกษานี้ได้เคยมีการศึกษามาก่อนหน้านี้แล้วว่าสามารถเพิ่มการเจริญของพืชในดินที่ปนเปื้อนได้ IBA 1 mg/l สามารถเพิ่มความยาวยอดและความยาวรากของต้นกล้าผักกวางตุ้งในดินที่ปนเปื้อนลินเดน 20 mg/kg (Chouychai, 2012) TDZ 0.01 mg/l สามารถเพิ่มน้ำหนักสดของยอดข้าวโพดข้าวเหนียวในดินที่ปนเปื้อนฟีแนนทรีน 400 mg/kg (วราภรณ์ ฉุยฉายและคณะ, 2557) ข้าวโพดที่เจริญในตะกั่วไนเตรต ($Pb(NO_3)$) 800 mg/kg จะมีชีวมวลสูงขึ้นเมื่อแช่เมล็ดใน GA_3 0.35 mg/l (1 µM) เมื่อเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ได้สัมผัสกับ GA_3 (Hadi et al., 2010) อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีรายงานเกี่ยวกับผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตเหล่านี้กับการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีนด้วยพืช

ในการศึกษาครั้งนี้ การกระตุ้นข้าวโพดด้วยสารควบคุมการเจริญเติบโตไม่ได้ทำให้การเจริญเติบโตของข้าวโพดเปลี่ยนแปลง แต่เพิ่มการกำจัด HCH ออกจากดิน การกำจัดนี้ไม่ได้เกิดจากการสะสม HCH ในเนื้อเยื่อพืช ซึ่งต่างจากการเพิ่มการสะสมของโลหะบางชนิดในพืชที่สัมผัสกับสารควบคุมการเจริญเติบโต (Wang et al., 2007) ในกลุ่มของสารควบคุมการเจริญเติบโตทั้งสามชนิดที่ใช้นี้ GA_3 มีประสิทธิภาพสูงสุดในการเพิ่มการกำจัด HCH ออกจากดินโดยไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของ GA_3 ที่พืชได้รับ ในกลุ่มของทรีท

เมนต์ที่ใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตร่วมกัน ข้าวโพดที่กระตุ้นด้วย TDZ+GA_3 จะส่งเสริมการกำจัด HCH ออกจากดินได้ดีที่สุด ความสามารถของ GA_3 ในการเพิ่มการกำจัดสารมลพิษออกจากดินมีรายงานในดินที่มีการปนเปื้อนร่วมกันของแคดเมียมและเบนโซเอไพรีน การฉีดพ่น *Tagates patula* ด้วย GA_3 1-5 mmol/kg เพิ่มการย่อยสลายทางชีวภาพของเบนโซเอไพรีนขึ้นเล็กน้อยคือร้อยละ 4 (Sun et al., 2013)

กลไกซึ่งสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชเร่งการกำจัด HCH ออกจากดินที่ปลูกข้าวโพดยังไม่เป็นที่เข้าใจดีนัก แต่น่าจะเป็นผลมาจากการเพิ่มการย่อยสลายทางชีวภาพของ HCH โดยเฉพาะในไรโซสเฟียร์ของข้าวโพด ซึ่งเห็นได้จากการที่ความเข้มข้นของ HCH ลดลงอย่างรวดเร็วในไรโซสเฟียร์ และไม่มีการสะสม HCH อย่างมีนัยสำคัญในเนื้อเยื่อพืช การทำความเข้าใจเกี่ยวกับผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตต่อการย่อยสลายทางชีวภาพของสารมลพิษในไรโซสเฟียร์ รูปแบบของสารหลั่งจากรากพืช และกิจกรรมของแบคทีเรียในดินในการตอบสนองต่อสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชต้องมีการศึกษาต่อไป

3.1 ผลของการใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตต่อการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซนด้วยถั่วฝักยาว

การแช่เมล็ดในสารละลาย IBA และ TDZ มีผลเฉพาะทำให้ความยาวยอดและน้ำหนักแห้งของรากถั่วฝักยาวลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติแต่ไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตรูปแบบอื่นๆ ในขณะที่การแช่เมล็ดในสารละลาย IBA หรือ TDZ เพียงอย่างเดียวไม่มีผลต่อความยาวยอดและน้ำหนักแห้งของรากของถั่วฝักยาว (ตารางที่ 14)

ตารางที่ 14 ความยาว น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งของข้าวโพดข้าวเหนียวที่เจริญในดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อน HCH เป็นเวลา 30 วัน

พืช	ความยาว (cm)		น้ำหนักสด (mg)		น้ำหนักแห้ง (mg)	
	ยอด	ราก	ยอด	ราก	ยอด	ราก
ไม่ปนเปื้อน	58.6 ± 12.1a*	12.3 ± 5.6a	2,050.0 ± 544a	130.0 ± 26.4a	226.7 ± 81.4a	33.3 ± 11.5a
HCH	61.6 ± 7.7a	11.4 ± 0.2a	2,033.3 ± 275a	126.7 ± 37.8a	233.3 ± 57.7a	26.7 ± 5.8a
HCH + I	67.1 ± 5.4a	15.5 ± 6.4a	2,366.7 ± 385a	120.0 ± 62.4a	161.2 ± 158.2a	22.8 ± 11.2a
HCH + T	65.8 ± 8.3a	19.7 ± 3.2a	2,046.7 ± 362a	136.7 ± 66.6a	186.7 ± 48.9a	23.3 ± 1.8a
HCH + IT	39.8 ± 2.6b	12.4 ± 8.1a	1,225.0 ± 106a	55.0 ± 7.1a	74.7 ± 18a	4.2 ± 3.7b

*อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ระหว่างการทดลองเดียวกันในคอลัมน์เดียวกัน ตัวย่อ: I = IBA; T = TDZ;

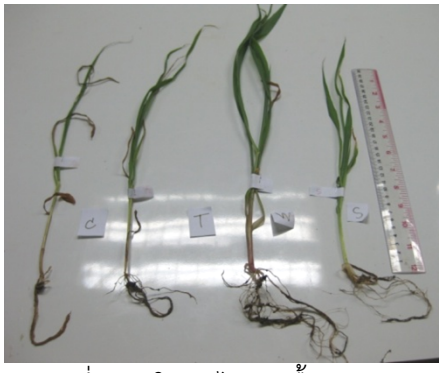
การย่อยสลาย HCH ในดินที่ไม่ปลูกพืชเกิดขึ้นได้ช้า โดยมี HCH คงเหลืออยู่ในดินร้อยละ 97.7 ในวันที่ 10 หลังปลูกพืช และยังเหลือถึงร้อยละ 54.0 ในวันที่ 30 หลังปลูกพืช การปลูกถั่วฝักยาวที่มาจากเมล็ดที่กระตุ้นด้วย IBA + TDZ ทำให้ HCH ในดินรอบนอกลดลงเร็วที่สุด โดยในวันที่ 10 เหลืออยู่เพียงร้อยละ 65.3 ส่วนการปลูกถั่วฝักยาวที่มาจากเมล็ดที่กระตุ้นด้วย IBA ทำให้ HCH ในดินรอบนอกลดลงช้าที่สุดโดยเหลือถึง ร้อยละ 94.4 ซึ่งไม่ต่างจากดินที่ไม่ปลูกพืชอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนปริมาณ HCH ในไรโซสเฟียร์ของถั่วฝักยาวลดลงในระดับที่เร็วกว่าดินรอบนอก อย่างไรก็ตาม ปริมาณ HCH ในดินที่ปลูกถั่วฝักยาวทั้งที่กระตุ้นและไม่ได้กระตุ้นด้วยสารควบคุมการเจริญเติบโตลดลงอยู่ในระดับเดียวกันในวันที่

30 คืออยู่ระหว่างร้อยละ 21.2 – 11.2 สำหรับดินรอบนอก และร้อยละ 6.9 - 2.3 สำหรับไรโซสเฟียร์ ไม่พบการสะสม HCH ในเนื้อเยื่อยอดและรากของถั่วฝักยาวทุกต้นในวันสุดท้ายของการทดลอง (30 วัน)

ตารางที่ 15 ร้อยละของ HCH ที่เหลืออยู่ในดินที่ไม่ปลูกพืชและปลูกถั่วฝักยาวซึ่งสัมผัสกับสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชต่างชนิดกัน ความเข้มข้นเริ่มต้นของ HCH เป็น 46.8 ± 11.3 mg/kg

พืช	วันที่ 10^{th}	วันที่ 20^{th}	วันที่ 30^{th}
ไม่ปลูกพืช	97.7 ± 0.0a	93.6 ± 0.0a	54.0 ± 0.0a*
ดินรอบนอก	86.7 ± 4.4ab	64.3 ± 0.7b*	16.1 ± 4.9b*
ดินรอบนอก + I	94.4 ± 3.5a	65.4 ± 4.9b*	21.2 ± 11.3b*
ดินรอบนอก + T	79.5 ± 4.5ab	22.2 ± 15.4c*	18.8 ± 4.0b*
ดินรอบนอก + IT	65.3 ± 14.0bc*	44.1 ± 10.0bc*	11.2 ± 0.5b*
ดินไรโซสเฟียร์	69.4 ± 9.4bc*	7.8 ± 6.8c*	5.4 ± 1.0b*
ดินไรโซสเฟียร์ + I	89.2 ± 11.0a	40.5 ± 19.6bc*	4.5 ± 3.6b*
ดินไรโซสเฟียร์ + T	71.4 ± 10.3bc*	20.9 ± 3.1c*	6.9 ± 4.1b*
ดินไรโซสเฟียร์ + IT	49.4 ± 8.3bc*	6.7 ± 3.6c*	2.3 ± 0.0b*

อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ระหว่างการทดลองเดียวกันในคอลัมน์เดียวกัน ตัวย่อ: I = IBA; T = TDZ; BD = ต่ำกว่าขีดจำกัดของการวัดที่ 0.4 mg/kg.



รูปที่ 7 ลักษณะของต้นข้าวโพดอายุ 30 วัน ซึ่งปลูกในดินไม่ปนเปื้อน HCH (C) ปนเปื้อน HCH และได้รับ TDZ 0.01 mg/l โดยการแช่เมล็ด (T) การรดลงดิน (W) และการฉีดพ่นที่ใบ (S)

รูปที่ 8 ลักษณะของต้นถั่วฝักยาวอายุ 30 วัน ซึ่งปลูกในดินไม่ปนเปื้อน HCH (C) ปนเปื้อน HCH (H) ปนเปื้อน HCH มาจากเมล็ดที่แช่ IBA (I) TDZ (T) และ IBA ร่วมกับ TDZ (IT)

เอกสารอ้างอิง

กู่คำ วิไลเฮือง และ วิไลลักษณ์ ชินะจิตร. 2551. การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อว่านนางคำ. *แก่นเกษตร*. 36 (พิเศษ): 229 – 233.

ขนิษฐา สมตระกูล และ มาลียา เครือตราชู. 2555. ผลของกรดอินโดลบิวไทริกต่อการเจริญในระยะต้นกล้าของผักกวางตุ้งที่ปลูกในทรายที่ปนเปื้อนเอนโดซัลแฟน-ซัลเฟต. *วารสารวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร*. 30 (1): 14 – 24.

ขนิษฐา สมตระกูล และ มาลียา เครือตราชู. 2556. ผลของกรดแอลฟาแนฟทาลีนอะซีติกและไทเดียซูรอนต่อการเจริญของต้นกล้าผักกวางตุ้งในทรายที่ปนเปื้อนเอนโดซัลแฟน-ซัลเฟต. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*. 15 (1): 1-11.

ปัทมาพร รูปปัทม์ เจริญพงษ์ ชมภูนุช สุชาติ สระทองหน และ วราภรณ์ ฉุยฉาย. 2554. ผลของออกซินและจิบเบอเรลลินต่อความเป็นพิษของลินเดนในต้นกล้าข้าวโพดที่ปลูกในดินด่าง. วารสารเกษตรนเรศวร. 13 (1): 43 – 49.

วราภรณ์ ฉุยฉาย จตุรพร ดอนรอดไพร สายสวาท เม่นสุวรรณ์ วณิชชา คงตุ้ม และ นันธพร ศิลป์สมบูรณ์. 2554. ผลของไทเดียซูรอนต่อการเจริญของต้นอ่อนข้าวโพดในดินด่างที่ปนเปื้อนฟลูออรีน. *แก่นเกษตร*. 39 (พิเศษ): 316 – 320.

วราภรณ์ ฉุยฉาย เจริญพงษ์ ชมภูนุช สุชาติ สระทองหน และปัทมาพร รูปปัทม์. 2553. ความเป็นพิษของลินเดนและเอนโดซัลแฟนที่ตกค้างในดินด่างต่อการเจริญระยะต้นกล้าของถั่วฝักยาวและผักกวางตุ้ง. *การประชุมวิชาการเกษตรครั้งที่ 11.* 25 – 26 มกราคม 2553. คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. หน้า 425 – 428.

วราภรณ์ ฉุยฉาย เบญจวรรณ พิลึก และ ขนิษฐา สมตระกูล. 2558. ผลของการใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตร่วมกันต่อความเป็นพิษของฟีแนนทรีนในข้าวโพดข้าวเหนียว. *แก่นเกษตร.* 43 (พิเศษ 1), 823-829

วราภรณ์ ฉุยฉาย และปัทมาพร รูปปัทม์. 2553. ผลของ IBA และ GA_3 ต่อความเป็นพิษของลินเดนในต้นกล้าข้าวที่เจริญในดินด่าง. *การประชุมสัมมนาทางวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออกครั้งที่ 3.* 20 – 21 พฤษภาคม 2553. โรงแรมพัทยา ปาร์ค บีช รีสอร์ท หน้า 836 – 842.

วราภรณ์ ฉุยฉาย วณิชชา คงตุ้ม และขนิษฐา สมตระกูล. 2557. ผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชต่อความเป็นพิษของฟีแนนทรีนในข้าวโพดข้าวเหนียวและถั่วฝักยาว.*วารสารวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร.* 31 (3): 11-23.

วราภรณ์ ฉุยฉาย วราพร น้อยจันทร์ และขนิษฐา สมตระกูล. 2557. ผลของไซโตไคนินต่อความเป็นพิษของไกลโฟเสทในถั่วฝักยาวระยะต้นกล้า. *วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก*. 7 (2): 51-55.

อนุพันธ์ กงบังเกิด และ พันธิตรา กมล. 2549. ผลของไซโตไคนินและออกซินต่อการพัฒนาของเนื้อเยื่อเพาะเลี้ยงกระเจียวขาว. *วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร*. 2 (2): 183 – 201.

Bleecker, AB, and Kende, H. 2000. Ethylene: A gaseous signal molecule in plants. *Annual Reviews of Cell Developmental Biol*ogy.16: 1-18

Boutté, Y, Ikada, Y, and Grebe, M. 2007. Mechanism of auxin-dependent cell and tissue polarity. *Current Opinion in Plant Biology*. 10: 606-613.

Calvelo Pereira, RC, Monterroso, C, Macias, F, Camps-Arbestain, M. 2007. Distribution pathways of hexachlorocyclohexane isomers in a soil-plant-air system. A case study with *Cynara scolymus* L. and *Erica* sp. plants grown in a contaminated site. *Environmental Pollution*. in press.

Calvelo Pereira, R, Camps-Arbestain, M, Garrido, BR, Macias, F, and Monterroso, C. 2006. Behaviour of α-, β-, γ-. and δ-hexachlorocyclohexane in the soil-plant system of a contaminated site. *Environmental Pollution*.144: 210 -217.

Calvelo Pereira, R, Monterros, C, and Macias, F. 2010. Phytotoxicity of hexachlorocyclohexane: Effect on germination and early growth of different plant species. *Chemosphere*., 79: 326–333.

Campbell, S, Arakaki, AS, Li, QX. 2009. Phytoremediation of heptachlor and heptachlor epoxide in soil by Cucurbitaceae. *International Journal of Phytoremediation*. 11: 28-38.

Chouychai, W, Thongkukiatkul, A, Upatham, S, Lee, H, Pokethitiyook, P, and Kruatrachue, M.2007. Phytotoxicity assay of crop plants to phenanthrene and pyrene contaminants in acidic soil. *Environmental Toxicol*ogy, 22: 597-604.

Chouychai, W, Chompunut, J, Sathonghon, S, Ruppat, P. 2009. Respond of Corn Seedling to Lindane and Endosulfan Contaminants in Soil. *35th Congress on Science and Technology of Thailand*. October 15 – 17, Burapha University. 5 pages.

Chouychai, W. 2012. Effect of some plant growth regulators on lindane and alpha-endosulfan toxicity to *Brassica chinensis*. *Journal of Environmental Biology*. 33 (4): 811 – 816.

Chouychai, W, and Lee, H. 2012. Phytotoxicity assay of crop plants to lindane and alpha-endosulfan contaminants in alkaline Thai soil. *International Journal of Agriculture and Biol*ogy. 14: 734-738.

Du R, He E, Tang Y, Hu P, Ying R, Morel J, and Qiu R. 2011. How phytohormone IAA and chelator EDTA affect lead uptake by Zn/Cd hyperaccumulator *Picris divaricata*. *International Journal of Phytoremediation*. 13, 1024 – 1036.

Eraslan, F, Inal, A, Gunes, A, Alpaslan, M. 2007. Impact of exogenous salicylic acid on the growth, antioxidant activity and physiology of carrot plants subjected to combined salinity and boron toxicity. *Scientia Horticulturae*.113: 120 – 128.

Famiani, F, Proietti, P, Pilli, M, Battistelli, A, Moscatello, S. 2007. Effects of application of thidiazuron (TDZ), gibberellic acid (GA3), and 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) on fruit size and quality of *Actinidia deliciosa* 'Hayward'. *New Zealand Journal of Crop and Horticural Science*. 35 (3): 341 – 347.

Fässler, E, Evangelou, MW, Robinson, BH and Schulin, R. 2010. Effects of indole-3-acetic acid (IAA) on sunflower growth and heavy metal uptake in combination with ethylene diamine disuccinic acid (EDDS). *Chemosphere*. 80: 901-907.

Gangwar, S., Singh, V.P., Srivastava, P.K. and Maurya, J.N. 2011. Modification of chromium (VI) phytotoxicity by exogenous gibberellic acid and application in *Pisum sativum* (L.) seedlings. *Acta Physiologiae Plantarum*. 33(4): 1385-1397.

Garrison, AW, Nzengung, VA, Avants, JK, Ellington, JJ, Jones, WJ, Rennels, D, Wolfe, NL. 2000. Phytodegradation of *p,p'*-DDT and the enantiomer of *o,p'*-DDT. *Environmental Science and Technology*.34: 1663 – 1670.

Hadi, F, Bano, A, and Fuller, MP. 2010. The improved phytoextraction of lead (Pb) and the growth of maized (*Zea mays* L.): the role of plant growth regulators (GA_3 and IAA) and EDTA alone and in combination. Chemosphere. 80: 457 – 462.

Huang, X, El-Alawi, Y, Penrose, DM, Glick, BR, and Greenberg, BM. 2004. Responses of three grass species to creosote during phytoremediation. *Environmental Pollution*, 130: 453-463.

IPM Thailand. http://210.246.186.28/fieldcrops/ipm/th/Pesticides/pesticides_banned_abc.htm สืบค้นวันที่ 19 สิงหาคม 2551

Israr, M, and Sahi, SV. 2008. Promising role of plant hormones in translocation of lead in *Sesbina drummondii* shoots. *Environmental Pollution*. 153: 29 – 36.

Kidd, PS, Prieto-Fernández, A, Monterroso, C. 2008. Rhizosphere microbial community and hexachlorocyclohexane degradative potential in contrasing plant species. *Plant Soil*. 302: 233 – 247.

Lopez, ML, Peralta-Videa, JR, Parsons, JG, Gardea-Torresdey, JL, and Duarte-Gardea. M. 2009. Effect of indole-3-acetic acid, kinetin, and ethylenediaminetraacetic acid on plant growth and uptake and translocation of lead, micronutrients, and macronutrients in alfalfa plants. *International Journal of Phytoremediation*. 11: 131 – 149.

Lukatkin, AS, Gracheva, NV, Grishenkova, NN, Dukhovskis, PV, and Brazaitite, AA. 2007. Cytokinin-like growth regulators mitigate toxic action of zinc and nickel ions on maize seedling. *Russian Journal of Plant Physiology*. 54: 381 – 387.

Macek, T, Mackova, M, Kas, J. 2000. Exploitation of plants for the removal of organics in the environmental remediation. *Biotechnology Advances*. 18: 23-34.

Malabadi, RB, Mulgund, GS, Nataraja, K. 2004. Efficient regeneration of *Vanda coerulea*, an endangered orchid using thidiazuron. *Plant Cell, Tissue, and Organ Culture*.76: 289 – 293.

McCutcheon, SC, Schnoor, JL. 2003. Overview of phytotransformation and control of waste *In Phytoremediation: Transformation and Control of Contaminant*, McCutcheon, S.C, Schnoor, JL. (eds.). New Jercy, Wiley-Interscience, Inc. pp. 3-58

Meng, H, Hua, S, Shamsi, IH, Jilani, G, Li, Y, Jiang, L. 2009. Cadmium-induced stress on the seed germination and seedling growth of *Brassica napus* L., and its alleviation through exogenous plant growth regulators**.** *Plant Growth Regulation*. 58: 47-59.

Murthy, BNS, Murch, SJ, Saxena, P.K. 1998. Thidiazuron: A potent regulator of *in vitro* plant morphogenesis. *In Vitro Cell Developmental Biology-Plant*. 34: 267 – 275.

Olszewski, N, Sun, T, Gubler, F. 2002. Gibberellin signaling: Biosynthesis, catabolism, and response pathway. *The Plant Cell*. S61 – S80.

Ortega-Baes, P, and Rojas-Arechiga, M. 2007. Seed germination of *Trichocereus tercheckii* (Cactaceae): Light, temoerature and gibberellic acid effects. *Journal of Arid Environment*. 69: 169 – 176.

Ouizoudou, G., I. Ilias. 2005. Hormone-induced protection of sunflower photosynthetic apparatus against copper toxicity. *Biologia Plantarum*. 49: 223 – 228.

Phillips, TM, Seech, AG, Lee, H, and Trevors, JT. 2005. Biodegradation of hexachlorocyclohexane (HCH) by microorganisms. *Biodegradation*.16: 363 – 392.

Poolpak, T, Pokethitiyook, P, Kruatrachue, M, Arjarasirikoon, U, and Thanwaniwat, N. 2008. Residue analysis of organochlorine pesticides in the Mae Klong river of Central Thailand. *Journal of Hazardous Materials*.156: 230 – 239.

Ranwala, AP, and Miller, WB. 2008. Gibberellin-mediated changes in carbohydrate metabolism during flower stalk elongation in tulips. *Plant Growth Regulation*. 55: 241-248.

Schefczik, K, Simonis, W. 1980. Side effects of chlorinated hydrocarbon insecticides on membranes of plant cells : I. The influence of lindane on the membrane potential of *Elodea densa* leaf cells*. Pesticide Biochemistry and Physiology*. 13: 13 – 19.

Schnoor, J L, Licht, L A, McCutcheon, SC, Wolfe, NL, Carreira, LH. 1995. Phytoremediation of organic and nutrient contamination. *Environmental Science and Technology*. 29: 318A-232A.

Sharada, K, Salimath, BP, Shetty, S, Gopalakrishna, N, Karanth, K. 1999. Indol-3-ylacetic acid and calmodulin-regulated Ca^{2+}-ATPase: A target for the phytotoxic action of hexachlorocyclohexane, *Pesticide Science*. 35: 315 – 319.

Simonich, SL, and Hites, RA. 1995. Organic pollutant accumulation in vegetation. *Environmental Science and Technology*. 29: 2905 – 2914.

Somtrakoon, K, and Kruatrachue, M. 2014. Effect of alpha-naphthalene acetic acid and thidiazuron on seedling of economic crops grown in endosulfan sulfate-spiked sand. *Journal of Environmental Biology*. 35: 1021 – 1030.

Sun Y, Xu Y, Zhou Q, Wang L, Lin D, and Liang X. 2013. The potential of gibberellic acid 3 (GA_3) and Tween-80 induced phytoremediation of co-contaminationof Cd and benzo[a]pyrene (B[a]P) using *Tagates patula*. *Journal of Environmental Management*. 114: 202 – 208.

Thapina, A, and Hudak, PF. 2000. Pesticide use and residual occurrence in Thailand. *Environmental Monitoring Assessment*. 60: 103 – 114.

Thomas TD, and Michael A. 2007. High-frequency planted regeneration and multiple shoot induction from cultured immature seeds of *Rhynchostylis retusa* Blume., an exquisite orchid. *Plant Biotechnology Report*. 1: 243 – 249

Tanimoto, E. 2005. Regulation of root growth by plant hormone-Role of auxins and gibberellins. *Critical Review in Plant Science*. 24: 249 – 265.

Tassi, E, Pouget, J, Petruzzelli, G, and Barbafieri, M. 2008.The effects of exogenous plant growth regulatorin the phytoextraction of heavy metal. *Chemosphere*. 71: 66 – 73.

Ulman, E. 1972. *Lindane*, Monograph of an Insecticide, Verlag K. Schillinger, Federal Republic of Germany

Vanova, L, Kummerova, M, Klems, M, Zezulka, S. 2009. Fluoranthene influences endogenous abscisic acid level and primary photosynthetic processes in pea (*Pisum sativum* L.) plants in vitro. *Plant Growth Regulation*. 57: 39 – 47.

Vanova, L, Kummerova, M, and Votrubva. 2011. Fluoranthene-induced production of ethylene and formation of lysigenous intercellular spaces in pea plants cultivated *in vitro*. *Acta Physiologia Plantarum*.33: 1037- 1042.

Wang H, Shan X, Wen B, Owens G, Fang J, and Zhang S. 2007. Effect of indole-3-acetic acid on lead accumulation in maize (*Zea mays* L.) seedlings and the relevant antioxidant response. *Environmental and Experimental Botany*. 61: 246 – 253.

Xing, W, Luo, Y, Wu, L, Song, J, and Christie, P. 2006. Accumulation and phytoavailibility of benzo[a]pyrene in an acid sandy soil. *Environmental Geochemistry and Health*. 28: 153 – 158.

Zeevaart, JAD, Gage, DA, and Talon, M. 1993. Gibberellin A1 is required for stem elongation in spinach. *Proceeding of National Academic Science USA*. 90: 7401-7405.

ภาคผนวก

ผลงานตีพิมพ์จากโครงการวิจัยนี้มีจำนวน 2 เรื่อง คือ

1. Waraporn Chouychai, Maleeya Kruatrachue and Hung Lee. (2015). Effect of plant growth regulators on phytoremediation of hexachlorocyclohexane-contaminated soil. *International Journal of Phytoremediation*. 17 (11): 1053 - 1059. (IF 2014/2015 =1.739)
2. วราภรณ์ ฉุยฉาย และ มาลียา เครือตราชู. 2556. ผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตบางชนิดต่อความเป็นพิษของเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซนในถั่วฝักยาว. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*. 15 (2): 32 – 40.

International Journal of Phytoremediation, 17: 1053–1059, 2015
Copyright © Taylor & Francis Group, LLC
ISSN: 1522-6514 print / 1549-7879 online
DOI: 10.1080/15226514.2014.989309

Taylor & Francis
Taylor & Francis Group

Effect of Plant Growth Regulators on Phytoremediation of Hexachlorocyclohexane-Contaminated Soil

WARAPORN CHOUYCHAI[1], MALEEYA KRUATRACHUE[2], and HUNG LEE[3]

[1]*Biology Program, Department of Science, Faculty of Science and Technology Nakhonsawan Rajabhat University, Nakhonsawan, Thailand*
[2]*Department of Biology, Faculty of Science, Mahidol University, Bangkok, Thailand*
[3]*School of Environmental Sciences, University of Guelph, Guelph, Ontario, CANADA*

The influence of three plant growth regulators, indolebutyric acid (IBA), thidiazuron (TDZ) and gibberellic acid (GA_3), either individually or in pair-wise combinations, on the ability of waxy corn plant to remove hexachlorocyclohexane (HCH) from contaminated soil was studied. Waxy corn seeds were immersed for 3 h in solutions of 1.0 mg/l IBA, 0.01 mg/l TDZ, 0.1 mg/l GA_3, or a mixture of two of the growth regulators, and then inoculated in soil contaminated with 46.8 mg/kg HCH for 30 days. Pretreatment of corn seeds with the plant growth regulators did not enhance corn growth when compared with those immersed in distilled water (control), but the pretreatment enhanced HCH removal significantly. On day 30, HCH concentration in the bulk soil planted with corn seeds pretreated with GA_3 or TDZ+GA_3 decreased by 97.4% and 98.4%, respectively. In comparison, HCH removal in soil planted with non-pretreated control waxy corn seeds was only 35.7%. The effect of several growth regulator application methods was tested with 0.01 mg/l TDZ. The results showed that none of the methods, which ranged from seed immersion, watering in soil, or spraying on shoots, affected HCH removal from soil. However, the method of applying the growth regulators may affect corn growth. Watering the corn plant with TDZ in soil led to higher root fresh weight (2.2 g) and higher root dried weight (0.57 g) than the other treatments (0.2 1.7 g root fresh weight and 0.02 0.43 g root dried weight) on day 30. Varying the concentrations of GA_3 did not affect the enhancement of corn growth and HCH removal on day 30. The results showed that plant growth regulators may have potential for use to enhance HCH phytoremediation.

Keywords: auxins, cytokinin, gibberellin, organochlorine, phytoremediation

Introduction

Hexachlorocyclohexane (HCH), a widely used organochlorine pesticide, is recalcitrant, highly toxic, and listed as a priority pollutant by the USEPA (Phillips *et al.* 2005) . Because of its persistence, HCH contamination remains a serious environmental problem worldwide. Kim and Smith (2001) reported HCH concentration to be about 2.97 μg/kg dried soil in Chulla province, South Korea. In another study, HCH concentrations ranging from 0.19 to 42.3 μg/kg dried soil have been reported for vegetable soils in Guangzhou, China (Chen *et al.* 2005). In the Mae Klong river area in central Thailand, HCH concentrations ranging from 6.9 to 24.2 mg/kg dry soil have been reported (Poolpak *et al.* 2008). Thus, removal of HCH from contaminated environment is considered an urgent issue.

Address correspondence to Waraporn Chouychai, Biology Program, Department of Science, Faculty of Science and Technology, Nakhonsawan Rajabhat University, Nakhonsawan, Thailand 60000. E-mail: waraporn.c@nsru.ac.th

Phytoremediation has been suggested to be a useful technology to remove HCH contaminants from soil. Several mechanisms by which plants may help to eliminate HCH from soil have been described. Calvelo Pereira *et al.* (2006) reported that HCH could be accumulated in both the shoot and root of *Avena sativa, Chenopodium* spp., *Solanum nigrum, Cytisus striatus*, and *Vicia sativa*, with the highest accumulation being found in leaves of *Cytisus striatus* (60 mg/kg) after growing the plant in soil contaminated with up to 19,905 mg/kg HCH for 4 months. *Sesamum indicum* was reported to accumulate 16, 10, 6 and 2 mg/kg of the gamma isomer of HCH or lindane in the root, shoot, leaves, and seed biomass, respectively, when grown in lindane-contaminated soil for 124 days (Abhilash and Singh 2010). In another study, loss of HCH and increased Cl^- ion concentration were found in HCH-contaminated soil planted with *C. striatus* for 180 days (Kidd *et al.* 2008). Total HCH concentration in bulk soil planted with *C. striatus* and unplanted soil decreased from 100 mg/kg to 30 and 40 mg/kg, respectively. Cl^- ion concentration in the rhizosphere of *C. striatus* was 200 mg/kg in HCH-contaminated soil while the Cl^- ion concentration was lower than 50 mg/kg in non-contaminated rhizospheric soil (Kidd *et al.* 2008). The

results suggest that phytoremediation was effective in cleaning up HCH-contaminated soil.

Plant growth regulators have been used to improve the efficiency of phytoremediation. Several reports showed that plant growth regulators may increase the capacity of plants to remove heavy metals. For example, *Picris divaricata* grown hydroponically in Hoagland solution supplemented with 100 μM $Pb(NO_3)_2$ and 10–100 μM indolcacetic acid (IAA) could accumulate more lead (Pb) in biomass than control plant without IAA. Lead concentrations in leaves of *P. divaricata* without and with 100 μM IAA treatment were 1,340 and 1,840 μg/g, respectively (Du *et al.* 2011). In another study, alfalfa grown in 80 mg Pb/kg soil and watered with EDTA solution supplemented with 100 μM IAA and 100 μM kinetin showed increased Pb accumulation in shoot without enhanced plant growth. Lead concentrations in leaves of alfalfa without and with IAA + kinetin treatment were 92 and 127 mg/kg dry weight, respectively (Lopez *et al.* 2009).

The method of applying growth regulators to plants can also affect their effectiveness. For example, application of 1 μM IAA or GA_3 to corn planted in Pb-contaminated soil resulted in variable Pb accumulation depending on the application method. Seed immersion in IAA or GA_3 solution led to lower Pb accumulation (40 and 50 μg/g in stem and leaves, respectively) than Pb accumulated by corn plant which was sprayed with IAA or GA_3 solutions (60 and 100 μg/g in stem and leaves, respectively) (Hadi, Bano, and Fuller 2010).

The beneficial effect of plant growth regulators on growth of plants exposed to organochlorines or PAHs has also been reported. For example, seed immersion in 10 mg/l GA_3 or IBA increased root length of *Brassica chinensis* seedlings grown in 20 mg/kg lindane-contaminated soil (Chouychai 2012). Hydroponic growth of tomato exposed to 10–300 μM phenanthrene or pyrene with 50 nM brassinosteroid was better than those exposed to phenanthrene or pyrene alone (Ahammed *et al.* 2012). It is not known if application of plant growth regulators to plants can enhance phytoremediation of organochlorine compounds. In this study, the effect of 3 plant growth regulators, IBA, TDZ, and GA_3, used alone or in combination, on waxy corn growth and HCH removal was examined. The plant growth regulators used are well known representatives of auxins, cytokinins and gibberellins. In addition, the effect of several methods of applying the plant growth regulators to waxy corn plant and the effect of various concentrations of plant growth regulator were studied. Corn plant has been used in phytoremediation of soil contaminated with phenanthrene (Chouychai *et al.* 2012) and endosulfan sulfate (Somtrakoon *et al.* 2014). In particular, waxy corn was reported to be more tolerant to phenanthrene, anthracene, fluorene and fluoranthene than sweet corn (Somtrakoon and Chouychai 2013), making it potentially more suited to phytoremediation of soils contaminated with organic compounds.

Materials and Methods

Soil Preparation and Analysis

Alkaline soil with no previous history of organochlorine contamination was collected from Khaorad Agricultural Station, Faculty of Agricultural Technology and Industrial Technology, Nakhonsawan Rajabhat University, Nakhonsawan, Thailand. The soil was kept at room temperature (28–31°C) in black plastic bags. Before use, the soil was air-dried at 28–31°C for at least 24 h to constant weight. A sample of the soil was sent to the Central Laboratory (Thailand) Co. Ltd., Bangkok, Thailand for chemical and physical characterization and measurement of background organochlorine contamination.

The soil used in this experiment, as described previously (Chouychai and Lee 2012), was alkaline (pH 8.9) with low total phosphorus content (below 0.29 g/100 g soil). The soil contained (per 100 g dry soil): 0.21 g total nitrogen (N), 0.13 g total potassium (K), and 1.78 g organic matter. The soil was tested for a number of organochlorine compounds (benzene hexachloride, heptachlor & heptachlor epoxide, aldrin & dieldrin, dicofol, DDT, chlordane, endosulfan, endrin, DDE, and DDD) by GC-MS. None was detected.

Technical HCH (Dr. Ehrenstorfer GmbH, purity 99.0%, mixture of 76% alpha isomer, 6% beta isomer, 15% gamma isomer, 2% delta isomer, and 1% epsilon isomer) was weighed and dissolved in acetone. The HCH solution was transferred to a glass sprayer and spiked to soil to a final concentration of about 50 mg/kg dried soil. As a control, acetone without any pesticides was sprayed into soil. After thorough mixing with a metal digger, the spiked soil was air-dried at 28–30°C for more than 24 h or until the smell of acetone had disappeared before use. Triplicate soil samples were randomly collected and HCH content in the soil samples analyzed. The concentration of HCH in the soil samples determined with GC-MS was 46.8 ± 11.3 mg/kg dried soil. This was considered the initial concentration of HCH in soils.

Experimental Design

Pot experiments were performed in September and October, 2012. Seeds of waxy corn cultivar Big white 854 F1 (commercial seeds of East west Seed Co, Ltd, Nonthaburi, Thailand) were used. Plant growth regulators, used either alone or in pairs, were indolebutyric acid (IBA, Fluka, purity 99%), gibberellic acid (GA_3, Fluka, purity 90%) and thidiazuron (TDZ, Fluka, purity 99%). Corn seeds were immersed for 3 h in one of the following solutions: (a) distilled water; (b) 0.01 mg/l l TDZ; (c) 1.0 mg/l IBA; (d) 0.1 mg/l GA_3 (e) 1.0 mg/l IBA + 0.01 mg/l l TDZ; (f) 1.0 mg/l IBA + 0.1 mg/l GA_3; (g) 0.01 mg/l l TDZ + 0.1 mg/l GA_3, and then inoculated in HCH-contaminated soil. HCH-contaminated soil was inoculated at 2–3 seeds per pot. The pots used in this experiment were 7 inches in diameter and each contained 1 kg dried soil. After germination, each pot was thinned to one seedling. Corn seeds immersed in distilled water were inoculated in non-contaminated soil as another control for plant growth. These were done in triplicate.

To assess the effect of application method, three different methods of applying 0.01 mg/l TDZ to corn were compared. There were 5 treatments, as followed: (a) seeds immersed in 0.01 mg/l TDZ for 3 h and then inoculated in HCH-contaminated soil; (b) seeds immersed in water for 3 h,

inoculated in HCH-contaminated soil, and watered with 10 ml of 0.01 mg/l TDZ per plant at 5 days after planting; (c) seeds immersed in water for 3 h, inoculated in HCH-contaminated soil, and on day 5, the leaves of each plant seedling were sprayed with 10 ml of a solution containing 0.01 mg/l TDZ + 1 drop of Tween 20; (d) seeds immersed in water for 3 h and inoculated in HCH contaminated soil; and (e) seeds immersed in water for 3 h and inoculated in non-contaminated soil. The experiments were done in triplicate.

To assess the effect of varying levels of plant growth regulators, three concentrations of GA_3 were compared. Corn seeds were immersed for 3 h in the following solutions: (a) distilled water; (b) 0.01 mg/l GA_3; (c) 0.1 mg/l GA_3 and (d) 1.0 mg/l GA_3. The immersed seeds were inoculated in HCH-contaminated soil at 2–3 seeds per pot and then, after germination, thinned to one seedling per pot. Corn seeds immersed in distilled water were inoculated in non-contaminated soil as a control for plant growth. These were done in triplicate.

One gram dry soil each of rhizospheric soil and bulk soil was removed on days 10 and 30 after seed germination for analysis of residual HCH concentration by GC-MS. Soils from unplanted control treatment were also collected and analyzed. The plants from each treatment (in triplicate) were sampled on days 10 and 30 to determine the shoot length, root length, fresh weight and dried weight of shoot and root. The dried shoot and root collected on day 30 were analyzed for HCH concentration also.

HCH Extraction and Analysis

Soil samples were subjected to Soxhlet extraction. One gram dry weight of soil was mixed with anhydrous sodium sulfate in 1:1 ratio. Endosulfan sulfate (Dr. Ehrenstorfer GmbH, Germany, Lot no. 81205, purity 98.5%) was then added as an internal standard (100 μl of a 300 mg/l endosulfan sulfate stock solution prepared in hexane). The soil sample was extracted with 180 ml of acetone and hexane (1:1, v/v) for 12 h. The extraction cycle around the thimble was approximately 3–4 cycles per hour. The extracts were transferred to 250-ml pear-shaped flasks and evaporated to near dryness under reduced pressure in a 60°C water bath using a rotary evaporator (Buchi, Germany). An additional 10 ml *n*-hexane was added to each concentrated extract and evaporated to a small volume (about 1.5 ml). HCH in shoot and root of each plant was extracted in the same way as that for soils.

HCH concentrations in the hexane extracts and standards were measured using a gas chromatograph (Shimadzu GC AOC-5000) equipped with a mass spectroscopic detector (Shimadzu MS-QP2010). The standard curves were linear at concentrations ranging from 0.4 to 100 mg/l of HCH. Separation was achieved using a Rtx®-5MS capillary column (30 m x 25 mm, I.D. = 25 μm). The helium carrier flow rate was 0.6 ml/min with a pressure of 49.5 kPa under split 30:1 ratio conditions. The oven temperature was programmed at 180°C for 2 min, followed by a linear increase of 20°C/min to 250°C and held for 2 min. The temperature then increased from 250°C to 280°C at 20°C/min and held for 4 min. The injector and detector temperatures were maintained at 250°C.

Statistical Analysis of Data

Two-way ANOVA was used to test for statistically significant differences between treatments followed by LSD test.

Result

Effect of Plant Growth Regulators on Corn Growth

In general, the amount of HCH added to the soil had no apparent toxic effect on corn growth up to 30 days after seed germination, as the shoot and root lengths of corn grown in non-contaminated and HCH-contaminated soils were not significantly different ($P > 0.05$). Seed treatment with either individual or combined plant growth regulators also had no apparent effect on shoot and root growth of corn during the 30-day experiment (Tables 1 & 2).

The effect of different methods of applying the plant growth regulators on corn growth was tested by using 0.01 mg/l TDZ. The results showed that the shoot length of corn seedlings was not affected by different application methods. However, on day 30, the shoot fresh weight of corn seedlings either watered or sprayed with 0.01 mg/l TDZ was significantly higher than that of corn whose seeds were subjected to immersion treatment. Correspondingly, the shoot dried weights of corn seedlings watered or sprayed with 0.01 mg/l TDZ (0.6 and 0.4 g, respectively) were higher than those of corn seedlings from seeds immersed in 0.01 mg/l TDZ and without TDZ treatment (0.2 and 0.1 g, respectively) (Table 1). The root of corn seedlings watered with 0.01 mg/l TDZ also grew better than that of seedlings receiving other application methods, as seen by longer root length, and higher root fresh weight and root dried weight on day 30 (Table 2).

Immersion of seeds in various concentrations of GA_3 had no effect on shoot length and shoot dried weight of corn. However, the shoot fresh weight of corn seedlings (1.27–1.30 g) from seeds immersed in 0.1–1.0 mg/l GA_3 was higher than that (0.76 −1.10 g) of the 0.01 mg/l GA_3 treatment on day 30 (Table 1). All concentrations of GA_3 applied did not affect the root fresh weight and root dried weight and decreased corn root length on day 10, except for the 0.01 mg/l GA_3 treatment which resulted in decreased corn root length on day 30 (Table 2).

Effect of Plant Growth Regulator on HCH Removal

HCH removal in unplanted soil occurred at a slow rate. On day 10, 97.7% of the spiked 46.8 mg HCH/kg dried soil remained in the unplanted soil, while 83.6 and 67.9% of the spiked HCH remained in the planted bulk soil and rhizospheric soil, respectively. The amount of HCH decreased more rapidly after 10 days, such that on day 30, about 54.4, 10.0 and 1.5% HCH remained in the unplanted soil, planted bulk soil and rhizospheric soil, respectively. When corn seeds were immersed in plant growth regulators before inoculation into soil, the initial rate of removal of HCH increased. This is seen on day 10 when the amounts of HCH remaining in the bulk soil planted with corn seeds previously immersed in IBA, TDZ, and GA_3

Table 1. Shoot length, fresh weight and dried weight of waxy corn grown in HCH-contaminated and non-contaminated soil

	Shoot length (cm)		Shoot fresh weight (g)		Shoot dry weight (g)	
Plant	Day 10	Day 30	Day 10	Day 30	Day 10	Day 30
Type of PGR						
Non-contaminated	19.0 ⊥ 1.3a*	39.5 ⊥ 9.7a	0.49 ⊥ 0.1a	2.54 ⊥ 1.6a	0.03 ⊥ 0.0a	0.15 ⊥ 0.1a
HCH	21.8 + 4.6a	34.5 + 7.4a	0.53 + 0.2a	3.08 + 3.0a	0.04 + 0.0a	0.09 + 0.0a
HCH + I	23.5 ± 10.0a	32.9 ± 8.4a	0.61 ± 0.4a	2.45 ± 2.4a	0.04 ± 0.0a	0.17 ± 0.2a
HCH + T	15.7 ⊥ 3.9a	41.9 ⊥ 5.3a	0.28 ⊥ 0.4a	2.58 ⊥ 1.0a	0.02 ⊥ 0.0a	0.21 ⊥ 0.1a
HCH + G	21.5 ± 0.4a	41.2 ± 1.6a	0.30 ± 0.4a	2.54 ± 0.4a	0.03 ± 0.0a	0.16 ± 0.1a
HCH + IT	30.4 ± 1.8a	36.3 ± 4.7a	0.64 ± 0.6a	1.26 ± 0.8b	0.04 ± 0.0a	0.08 ± 0.0a
HCH + TG	22.9 + 1.2a	33.9 + 2.0a	0.48 + 0.5a	4.47 + 2.0a	0.02 + 0.0a	0.32 + 0.2a
HCH +IG	25.2 ± 2.5a	37.4 ± 6.5a	0.39 ± 0.4a	1.96 ± 1.2a	0.03 ± 0.0a	0.12 ± 0.1a
Application method						
Non-contaminated	19.0 + 1.3a	39.5 + 9.7a	0.49 + 0.1a	2.54 + 1.6ab	0.03 + 0.0a	0.15 + 0.1b
HCH	21.8 ± 4.6a	34.5 ± 7.4a	0.53 ± 0.2a	3.08 ± 3.0ab	0.04 ± 0.0a	0.09 ± 0.0b
HCH + immersed T	15.7 ⊥ 3.9a	41.9 ⊥ 5.3a	0.28 ⊥ 0.4a	2.58 ⊥ 1.0b	0.02 ⊥ 0.0a	0.21 ⊥ 0.1b
HCH + watered T	27.5 ± 1.7a	51.3 ± 3.6a	0.44 ± 0.6a	5.91 ± 1.5a	0.03 ± 0.0a	0.57 ± 0.1a
HCH + sprayed T	23.8 ± 3.7a	46.0 ± 5.1a	0.64 ± 0.5a	5.81 ± 1.4a	0.05 ± 0.0a	0.43 ± 0.1a
Concentration of PGR						
Non-contaminated	30.3 ± 5.6a	36.4 ± 1.9a	0.80 ± 0.3a	0.83 ± 0.1b	0.06 ± 0.0a	0.07 ± 0.0a
HCH	25.4 ± 2.4a	40.8 ± 6.7a	0.75 ± 0.1a	1.10 ± 0.1ab	0.06 ± 0.0a	0.08 ± 0.0a
HCH + G (0.01 mg/l)	23.4 + 5.2a	34.2 + 5.6a	0.59 + 0.2a	0.76 + 0.1b	0.04 + 0.0a	0.07 + 0.0a
HCH + G (0.1 mg/l)	27.6 ± 1.0a	40.1 ± 6.9a	0.70 ± 0.1a	1.30 ± 0.2a	0.05 ± 0.0a	0.08 ± 0.0a
HCH +G (1.0 mg/l)	25.4 ± 4.1a	41.0 ± 6.6a	0.78 ± 0.3a	1.27 ± 0.3a	0.06 ± 0.0a	0.08 ± 0.0a

*Different lower case letters denote significant difference ($P < 0.05$) between the same experiment in the same column. Abbreviations: PGR = Plant growth regulator; I = IBA; T = TDZ; G = GA_3.

Table 2. Root length, fresh weight and dried weight of waxy corn grown in HCH-contaminated and non-contaminated soil

	Root length (cm)		Root fresh weight (g)		Root dry weight (g)	
Plant	Day 10	Day 30	Day 10	Day 30	Day 10	Day 30
Type of PGR						
Non-contaminated	18.5 ± 3.8a*	25.8 ± 8.4a	0.49 ± 0.1a	0.31 ± 0.2a	0.02 ± 0.0a	0.03 ± 0.0a
HCH	12.8 ± 2.8a	17.0 ± 6.6a	0.64 ± 0.1a	0.21 ± 0.0a	0.03 ± 0.0a	0.02± 0.0a
HCH +I	12.0 ± 5.2a	23.1 ± 8.6a	0.57 ± 0.1a	0.34 ± 0.4a	0.05 ± 0.0a	0.05 ± 0.0a
HCH + T	7.8 ± 1.1a	23.7 ± 10.7a	0.42± 0.2a	0.54 ± 0.4a	0.02 ± 0.0a	0.11 ± 0.1a
HCH + G	8.5 ⊥ 4.9a	10.3 ⊥ 0.4a	0.28 ⊥ 0.1a	0.30 ⊥ 0.2a	0.03 ⊥ 0.0a	0.16 ⊥ 0.1a
HCH + IT	20.5 + 4.5a	14.0 + 7.6c	0.49 + 0.1a	0.14 + 0.1a	0.06 + 0.0a	0.02 + 0.0a
HCH + TG	13.3 ± 1.5a	35.3 ± 8.1a	0.47 ± 0.2a	0.97 ± 0.4a	0.05 ± 0.0a	0.32 ± 0.1a
HCH +IG	14.7 ⊥ 4.5a	12.9 ⊥ 3.4a	0.68 ⊥ 0.5a	0.21 ⊥ 0.2a	0.05 ⊥ 0.0a	0.12⊥ 0.2a
Application method						
Non-contaminated	18.5 ± 3.8a	25.8 ± 8.4bc	0.49 ± 0.1a	0.31 ± 0.2b	0.02 ± 0.0a	0.03 ± 0.0c
HCH	12.8 + 2.8a	17.0 + 6.6c	0.64 + 0.1a	0.21 + 0.0b	0.03 + 0.0a	0.02+ 0.0c
HCH + immersed T	7.8 ± 1.1a	23.7 ± 10.7bc	0.42± 0.2a	0.54 ± 0.4b	0.02 ± 0.0a	0.11 ± 0.1c
HCH + watered T	11.5 ⊥ 3.5a	41.8 ⊥ 9.7a	0.33 ⊥ 0.0a	2.23 ⊥ 1.0a	0.03 ⊥ 0.0a	0.57 ⊥ 0.1a
HCH + sprayed T	11.6 + 3.0a	29.0 + 4.0b	0.42+ 0.1a	1.73 + 0.4a	0.05 + 0.0a	0.43 + 0.1b
Concentration of PGR						
Non-contaminated	19.5 ⊥ 5.4a	12.2 ⊥ 1.5a	0.35⊥ 0.0a	0.65⊥ 0.3a	0.05 ⊥ 0.0a	0.07 ⊥ 0.0a
HCH	8.9 ± 0.4b	5.8 ± 1.5b	0.22 ± 0.0a	0.62 ± 0.1a	0.02 ± 0.0a	0.08 ± 0.0a
HCH +G (0.01 mg/l)	8.9 ± 5.4b	6.5 ± 2.6b	0.27 ± 0.0a	0.48 ± 0.2a	0.03 ± 0.0a	0.05 ± 0.0a
HCH + G (0.1 mg/l)	10.9 + 2.8b	11.1 + 1.2ab	0.31 + 0.1a	0.61 + 0.2a	0.04 + 0.0a	0.07 + 0.0a
HCH +G (1.0 mg/l)	10.9 ± 2.8b	9.5 ± 3.8ab	0.32 ± 0.0a	0.59 ± 0.3a	0.03 ± 0.0a	0.07 ± 0.0a

*Different lower case letters denote significant difference ($P < 0.05$) between the same experiment in the same column. Abbreviations: PGR = Plant growth regulator; I = IBA; T = TDZ; G = GA_3.

Table 3. Percentage of HCH remaining in soil planted with waxy corn treated with varying type, method, and concentration of plant growth regulators and unplanted soil. The initial HCH concentration was 46.8 ⊥ 11.3 mg/kg

Plant	Day 10	Day 30
Varying type of PGR		
Unplanted	97.8 ± 21.6*a*	62.5 ± 14.0*a**
Bulk soil	83.6 ± 9.8*ab*	10.0 ± 6.8*b**
Rhizospheric soil	67.9 ⊥ 29.8*b**	1.5 ⊥ 0.6*b**
Bulk soil + immersed I	52.2 + 8.2*bc**	5.4 + 0.4*b**
Rhizospheric soil + I	40.9 + 0.0*bc**	4.0 + 0.4b*
Bulk soil + immersed T	60.7 ± 12.6*bc**	6.3 ± 6.4*b**
Rhizospheric soil + T	40.8 ± 3.1*bc**	0.7 ± 0.7*b**
Bulk soil + immersed G	37.9 + 1.4*c**	2.6 + 0.1*b**
Rhizospheric soil + G	4.6 + 1.6*d**	BD
Bulk soil + immersed IT	60.6 ± 20.2*bc**	14.0 ± 11.9*b**
Rhizospheric soil + IT	43.7 ± 1.5*bc**	3.6 ± 1.5*b**
Bulk soil + immersed TG	22.3 + 3.8*cd**	6.1 + 8.2*b**
Rhizospheric soil + TG	21.2 + 6.9*cd**	1.6 + 1.4*b**
Bulk soil + immersed IG	54.8 ± 8.3*bc**	13.8 ± 1.2*b**
Rhizospheric soil + IG	38.3 ± 16.7*c**	4.2 ± 2.7*b**
Varying application method		
Unplanted	97.8 + 21.6*a*	62.5 + 14.0*a**
Bulk soil	83.6 ± 9.8*ab*	10.0 ± 6.8*b**
Rhizospheric soil	67.9 ± 29.8*bc**	1.5 ± 0.6*b**
Bulk soil + immersed T	60.7 ± 12.6*bc**	6.3 ± 6.4*b**
Rhizospheric soil + immersed T	40.8 + 3.1*c**	0.7 + 0.7*b**
Bulk soil + watered T	53.6 ± 11.6*bc**	6.6 ± 5.8*b**
Rhizospheric soil + watered T	57.6 ± 7.4*bc**	4.7 ± 3.5*b**
Bulk soil + sprayed T	49.8 ± 12.3*bc**	1.8 ± 1.0*b**
Rhizospheric soil + sprayed T	51.7 + 2.9*bc**	BD
Varying concentration of PGR		
Unplanted	97.8 ± 21.6*a*	62.5 ± 14.0*a*
Bulk soil	34.9 ± 12.9*bc**	12.7 ± 2.9*b**
Rhizospheric soil	13.6 ⊥ 4.6*c**	13.7 ⊥ 6.8*b**
Bulk soil + G 0.01 mg/l	49.8 ± 25.0*b**	15.6 ± 3.0*b**
Rhizospheric soil + G 0.01 mg/l	15.9 ± 2.8*bc**	12.6 ± 0.8*b**
Bulk soil + G 0.1 mg/l	43.4 ± 8.4*b**	15.9 ± 13.2*b**
Rhizospheric soil + G 0.1 mg/l	11.1 ⊥ 1.8*c**	17.3 ⊥ 6.1*b**
Bulk soil + G 1.0 mg/l	67.0 ± 3.9*ab*	35.1 ± 11.0*ab**
Rhizospheric soil + G 1.0 mg/l	18.9 ± 2.0*bc**	16.6 ± 4.0*b**

Different lower case letters denote significant difference ($P < 0.05$) between the same experiment in the same column.* denotes statistically significantly different from the day 0 value. Abbreviations: I = IBA; T = TDZ; G = GA_3; BD = below detection limit of 0.4 mg/kg.

solutions were 52.2, 60.7 and 37.9%, respectively. By day 30, most of the HCH has been removed, and the amounts remaining in soil of all planted treatment ranged from 0.7 to 10.0%. Of particular note was the very rapid decrease of HCH concentrations in the rhizospheric soil of corn whose seeds were immersed in GA_3 solution. On day 10, only 4.6% of the initial HCH remained and HCH was undetectable on day 30 (Table 3).

Corn seeds immersed in a mixture of plant growth regulators showed variable effect on HCH removal. HCH removal was slightly reduced when the soil was planted with seeds immersed in IBA + GA_3 or IBA + TDZ solutions as compared to that of soil planted with seeds immersed in solutions of individual plant growth regulators. The amount of HCH remaining in the bulk soil planted with corn seeds immersed in solutions of IBA+GA_3 or IBA+TDZ were 60.6 and 54.8%, respectively, on day 10. There was only one combination treatment (soil planted with corn seeds immersed in solution of TDZ+GA_3) which led to greater removal of HCH from soil than that when seeds were treated by TDZ alone on day 10. In this instance, the HCH remaining in bulk soil of TDZ+GA_3-treated corn were 22.3% on day 10 (Table 3).

Although the method of applying 0.01 mg/l TDZ affected corn growth (see above), their effect on HCH removal was not pronounced, as the HCH in soil decreased at about the same rate for all these treatments over 30 days. The amount of HCH remaining in bulk soil planted with corn immersed, watered, or sprayed with 0.01 mg/l TDZ were 60.7, 53.6, and 49.8%, respectively, on day 10, and 6.3, 6.6 and 1.8%, respectively, on day 30 (Table 3).

Corn seeds treated with various concentrations of GA_3 had no apparent effect on HCH removal. On day 30, the extent of HCH removal from bulk soil planted with untreated corn seeds (12.7%) was not significantly different from those treatments in which seeds were treated with 0.01, 0.1, and 1.0 mg/l GA_3.

Residual HCH in Corn Biomass

At the end of the experiment, the shoot and root tissues were sampled and tested for HCH content. No HCH was accumulated in any of the shoot tissues, as the levels were below the detection limit of 0.4 μg/g biomass in all treatments. A small amount of HCH (9.8 μg/g biomass) was found only in the root tissue of corn watered with 0.01 mg/l TDZ.

Discussion

Auxins, gibberellins and cytokinins are plant growth regulators generally used for enhancing plant growth in agriculture. The synthetic phenylurea cytokinin, TDZ, has been reported to protect chlorophyll from degradation, enhance seed germination, accelerate bud break, increase stomata formation on leaves, and increase fruit weight (Murthy, Murch, and Saxena 1998). The synthetic auxin IBA is often used for root induction in plant regeneration *in vitro* (Thomas and Michel 2007). Gibberellins have been reported to induce seed germination and increase internode elongation of flower stalk or stem (Ortega-Baes and Rojas-Arechiga 2007; Ranwala and Miller 2008; Zeevaart, Gage, and Talon 1993). These three plant growth regulators have also been reported to increase plant tolerance to pollutants. For example, 1–10 mg/l IBA could induce growth of *Brassica chinensis* in lindane-contaminated soil (Chouychai 2012), while 0.01 μM TDZ increased corn growth hydroponically in Ni-containing Knop solution (Lukatkin *et al.* 2007). The concentration ranges of the plant growth regulators tested in the current study are similar to those reported previously to enhance plant growth in polluted soil. For example, 1 mg/l IBA was reported to

enhance shoot and root length of *Brassica chinensis* seedling grown in 20 mg/kg lindane contaminated soil (Chouychai 2012), and 0.01 mg/l TDZ was shown to enhance shoot fresh weight of waxy corn grown in 400 mg/kg phenanthrene-contaminated soil (Chouychai *et al.* 2014). Corn plant grown in 800 mg/kg $Pb(NO_3)$ produced higher biomass when its seeds were pre-soaked in 0.35 mg/l (1 μM) GA_3 than control plants whose seeds did not receive GA_3 treatment (Hadi *et al.* 2010). However, it is not known if these plant growth regulators can assist in the phytoremediation of organochlorine pesticides in soil.

In this study, treatment of corn with plant growth regulators did not appreciably change corn growth, but it led to enhanced HCH removal from soil. This was not due to accumulation of HCH in plant tissues, and thus differed from the enhanced accumulation of some metals by plants treated with plant growth regulators (Wang *et al.* 2007). Among the 3 plant growth regulators tested, GA_3 was found to be the best in increasing HCH removal, independent of the varying GA_3 concentrations tested. Among the combination treatments, TDZ+GA_3-treated corn was found to be the best in enhancing HCH removal. The ability of GA_3 to increase pollutant removal was previously tested in cadmium + benzo[a]pyrene co-contaminated soil. Spraying of *Tagates patula* with 1–5 mmol/kg GA_3 increased benzo[a]pyrene biodegradation slightly, by up to 4% (Sun *et al.* 2013).

The mechanism by which treatment with plant growth regulators may accelerate HCH removal from corn-planted soil is not understood, but it is very likely a result of enhanced HCH biodegradation, especially in the corn rhizosphere. This is inferred from the more rapid decrease in HCH concentrations in rhizospheric soil, coupled with the absence of significant HCH accumulation by plant tissues. To better understand the effect of plant growth regulators on pollutant biodegradation in the rhizosphere, the pattern of plant root exudates and activity of competent soil bacteria in response to plant growth regulator treatment should be studied further.

Funding

We acknowledge financial support from the Thailand Research Fund (Grant No. MRG5480043) and the Commission on Higher Education, Ministry of Education, Thailand and Nakhonsawan Rajabhat University.

References

Abhilash PC, Singh N. 2010. Effect of growing *Sesamum indicum* L. on enhanced dissipation of lindane (1,2, 3, 4, 5, 6- hexachlorocyclohexane) from soil. Int J Phytorem 12:440–453.

Ahammed GJ, Yuan H, Ogweno JO, Zhou Y, Xia X, Mao W, Shi K, Yu J. 2012. Brassinosteroid alleviates phenanthrene and pyrene phytotoxicity by increasing detoxification activity and photosynthesis in tomato. Chemosphere 86:546–555.

Calvelo Pereira R, Camps-Arbestain M, Garrido BR, Macias F, Monterroso C. 2006. Behaviour of α-, β-, γ-, and δ-hexachlorocyclohexane in the soil-plant system of contaminated site. Environ Pollut 144:210–217.

Chen L, Ran Y, Xing B, Mai B, He J, We X, Fu J, Sheng G. 2005. Content and source of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in vegetable soils of Guangzhou, China. Chemosphere 60:879–890.

Chouychai W. 2012. Effect of some plant growth regulators on lindane and alpha-endosulfan toxicity to *Brassica chinensis*. Journal of Environmental Biology 33(4):811–816.

Chouychai W, Lee H. 2012. Phytotoxicity assay of crop plants to lindane and alpha-endosulfan contaminants in alkaline Thai soil. Int J Agri Biol 14(5):734–738.

Chouychai W, Tongkukiatkul A, Upatham S, Pokethitiyook P, Kruatrachue M, Lee H. 2012. Effect of corn plant on survival and phenanthrene degradation capacity of *Pseudomonas* sp. UG14Lr in two soils. Int J Phytorem 14:585–595.

Chouychai W, Kongtoom W, Somtrakoon K. 2014. Effect of plant growth regulators on phenanthrene toxicity in waxy corn and long bean. Journal of Agricultural Research and Extension 31: in press. (in Thai with English abstract).

Du R, He E, Tang Y, Hu P, Ying R, Morel J, Qiu R. 2011. How phytohormone IAA and chelator EDTA affect lead uptake by Zn/Cd hyperaccumulator *Picris divaricata*. Int J Phytorem 13:1024–1036.

Hadi F, Bano A, Fuller MP. 2010. The improved phytoextraction of lead (Pb) and the growth of maized (*Zea mays* L.): the role of plant growth regulators (GA_3 and IAA) and EDTA alone and in combination. Chemosphere 457–462.

Kidd PS, Prieto-Fernandez A, Monterroso C, Acea MJ. 2008. Rhizosphere microbial community and hexachlorocyclohexane degradative potential in contrasting plant species. Plant Soil 302:233–247.

Kim JH, Smith A. 2001. Distribution of organochlorine pesticides in soil from South Korea. Chemosphere 43:137–140.

Lopez ML, Peralta-Videa JR, Parsons JG, Gardea-Torresdey JL, Duarte-Gardea M. 2009. Effect of indole-3-acetic acid, kinetin, and ethylenediaminetraacetic acid on plant growth and uptake and translocation of lead, micronutrients, and macronutrients in alfalfa plants. Int J Phytorem 11:131–149.

Lukatkin AS, Gracheva NV, Grisenkova NN, Dukhovskis PV, Brazaitite AA. 2007. Cytokinin-like growth regulators mitigate toxic action of zinc and nickel ions on maize seedling. Russian J Plant Physiol 54:381–387.

Ortega-Baes P, Rojas-Arechiga M. 2007. Seed germination of *Trichocereus tercheckii* (Cactaceae): Light, temoerature and gibberellic acid effects. J Arid Environ 69:169–176.

Murthy BNS, Murch SJ, Saxena PK. 1998. Thidiazuron: A potent regulation of in vitro plant morphogenesis. In Vitro Cell Develop Biol-Plant 34:267–275.

Philips TM, Seech AG, Lee H, Trevors JT. 2005. Biodegradation of hexachlorocyclohexane (HCH) by microorganisms. Biodegradation. 16:363–392.

Poolpak T, Pokethitiyook P, Kruatrachue M, Arjarasirikoon U, Thanwaniwat N. 2008. Residue analysis of organochlorine pesticides in the Mae Klong river of Central Thailand. J Hazard Mat 156:230–239.

Ranwala AP, Miller WB. 2008. Gibberellin-mediated changes in carbohydrate metabolism during flower stalk elongation in tulips. Plant Growth Regulat 55:241–248.

Somtrakoon K, Chouychai W. 2013. Phytotoxicity of single and combine polycyclic aromatic hydrocarbons to economic crops. Russian J Plant Physiol 60:139–148.

Somtrakoon K, Kruatrachue M, Lee H. 2014. Phytoremediation of endosulfan sulfate-contaminated soil by single and mixed plant cultivations. Water, Air, Soil Pollut (in press) (http://dx.doi.org/10.1007/s11270-014-1886-0)

Sun Y, Xu Y, Zhou Q, Wang L, Lin D, Liang X. 2013. The potential of gibberellic acid 3 (GA_3) and Tween-80 induced phytoremediation of co-contamination of Cd and benzo[a]pyrene (B[a]P) using *Tagates patula*. J Environ Manage 114:202–208.

Thomas TD, Michael A. 2007. High-frequency planted regeneration and multiple shoot induction from cultured immature seeds of *Rhyn-*

chortylis retusa Blume., an exquisite orchid. Plant Biotechnol Report 1:243–249.

Wang H, Shan X, Wen B, Owens G, Fang J, Zhang S. 2007. Effect of indole-3-acetic acid on lead accumulation in maize (*Zea mays* L.) seedlings and the relevant antioxidant response. Environ Experiment Bot 61:246–253.

Zeevaart JAD, Gage DA, Talon M. 1993. Gibberellin A1 is required for stem elongation in spinach. Proc Natl Acad Sci USA 90:7401–7405.

32 วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม - สิงหาคม 2556

ผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชต่อความเป็นพิษของเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซนในถั่วฝักยาว

Effect of Plant Growth Regulators on Hexachlorocyclohexanephytotoxicity to Longbean

วราภรณ์ ฉุยฉาย[1*] และ มาลียา เครือตราชู[2]
[1]สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ อ.เมือง จ.นครสวรรค์ 60000
[2]ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
*E-mail : chouychai@yahoo.com

บทคัดย่อ

ศึกษาผลของการใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชสามชนิดคือ กรดอินโดลบิวไทริก (IBA) กรดจิบเบอเรลลิก (GA_3) และไทเดียซูรอน (TDZ) ต่อการลดความเป็นพิษของเฮกซะไซโคลคลอโรเฮกเซน(HCH) ในถั่วฝักยาว โดยแช่เมล็ดถั่วฝักยาวลงในสารละลายของ IBA หรือ GA_3 0.1 – 10.0 mg/l และ TDZ 0.01 – 1.0 mg/l เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยใช้เมล็ดที่แช่ในน้ำกลั่นเป็นชุดควบคุม แล้วนำมาเพาะในดินที่ไม่มีหรือมี HCH 20 mg/kgเป็นเวลา 10 วัน ผลปรากฏว่าเฉพาะ IBA 1.0 mg/l ให้ผลดีที่สุดในการส่งเสริมการเจริญของต้นกล้าถั่วฝักยาวในดินที่ปนเปื้อน HCH โดยสามารถเพิ่มน้ำหนักสดของยอดและรากของต้นกล้าได้ การแช่เมล็ดถั่วฝักยาวไนสารละลาย GA_3และ TDZ ทุกความเข้มข้นจะส่งเสริมการเจริญของต้นกล้าถั่วฝักยาวได้เฉพาะเมื่อนำไปเพาะในดินที่ไม่มี HCH เท่านั้น หากนำมาเพาะในดินที่มี HCH อยู่จะไม่สามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตได้ นอกจากนั้น การแช่เมล็ดใน TDZ 1.0 mg/l จะยับยั้งการเพิ่มความยาวของทั้งยอดและรากของถั่วฝักยาว ดังนั้น IBA จึงเป็นสารควบคุมการเจริญเติบโตที่เหมาะสมสำหรับการส่งเสริมการเจริญเติบโตของถั่วฝักยาวในดินที่ปนเปื้อน HCH และควรศึกษาผลต่อการเจริญระยะยาวต่อไป

คำสำคัญ :ความเป็นพิษต่อพืช ออกซิน จิบเบอเรลลิน ออร์กาโนคลอรีน ไทเดียซูรอน

Abstract

This study investigated the effects of three plant growth regulators, indolebutyric acid (IBA), gibberelicacic (GA_3), and thidiazuron (TDZ) to decrease hexachlorocyclohexane (HCH) toxicity on longbeans. Longbean seeds were immersed in 0.1 – 10.0 mg/l IBA or GA3, or 0.01 – 1.0 mg/lTDZ for 3 h and then sown on 20 mg/kgHCH-contaminated soil or non-contaminated soil. After 10 days, the results showed that 1.0 mg/lIBA was the best for increasing longbean seedling growth in HCH-contaminated soil. Seeds immersed in 1.0 mg/lIBA provided seedlings with higher fresh weight than other treatments. All concentrations of GA_3 and TDZ only induced plant growth in non-contaminated soil. Seeds immersed in 1.0 mg/lTDZ inhibited shoot and root elongation of longbean seedlings. These results suggest that IBA is appropriate to induce longbean growth in HCH-contaminated soil and that further study is requiredabout growth after the seedling period.

Keywords: Phytotoxicity, Auxin, Gibberellin, Organochlorine, Thidiazuron

1. บทนำ

เฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซน (Hexachlorocyclohexane; HCH) จัดเป็นสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีนชนิดหนึ่งที่ยังคงเป็นปัญหาสำคัญในสิ่งแวดล้อม และมีรายงานการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมอยู่เสมอ เช่น พบ HCH ทุกไอโซเมอร์ 0.01 – 0.06 µg/l ในบริเวณปากแม่น้ำของอ่าวไทยตอนบน [1] 0.7 – 4.8 µg/l ในแม่น้ำตีบา แม่น้ำปัตตานี และแม่น้ำสายบุรี ทางภาคใต้ [2] และพบ HCH ทุกไอโซเมอร์ในดินบริเวณลุ่มน้ำแม่กลอง ประมาณ 24.2 µg/g [3]

ปัญหาการปนเปื้อน HCH ดังกล่าว นอกจากจะเป็นพิษต่อสัตว์น้ำและสัตว์หน้าดินในระบบนิเวศแล้ว ยังมีความเป็นพิษและสามารถสะสมได้ในพืชหลายชนิด การที่พืชสัมผัสกับ HCH ทำให้พืชเกิดสภาวะเครียด และสร้างเอนไซม์เพื่อตอบสนองต่อภาวะเครียดเหล่านี้มากขึ้น รบกวนการทำงานของเยื่อหุ้มเซลล์ในสาหร่าย ทำให้การควบคุมการขนส่งโซเดียมและโพแทสเซียมเสียไป และลดระดับของกรดอินโดลอะซีติก (IAA) ซึ่งเป็นฮอร์โมนพืชกลุ่มออกซินในต้นกล้าข้าว [4] HCH ไม่แสดงผลเป็นพิษต่อร้อยละการงอกของเมล็ดพืชแต่จะทำให้งอกช้าลงเท่านั้น [5] ลินเดนหรือไอโซเมอร์ชนิดแกมมาของ HCH ที่ปนเปื้อนในดินลดความยาวของยอดและรากของต้นกล้าข้าวโพด [6] ถั่วฝักยาว ผักกวางตุ้ง [7] ข้าว [8] ทานตะวัน ผักบุ้ง และฟักทอง [9] ความเป็นพิษต่อพืชของสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีนนี้ นอกจากจะส่งผลทำให้ผลผลิตของพืชลดลงแล้ว ยังลดความสามารถของพืชในการนำไปใช้เพื่อฟื้นฟูสภาพแวดล้อม (Phytoremediation) ที่ปนเปื้อนสารกลุ่มนี้ด้วย

การใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชจากภายนอกเพื่อลดความเป็นพิษต่อพืชของสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีนเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการกระตุ้นให้พืชสามารถเจริญเติบโตในสภาวะที่มีสารมลพิษปนเปื้อนได้ มีรายงานการใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชเพื่อลดความเป็นพิษของโลหะหนักต่อพืชเป็นจำนวนมาก เช่น ทานตะวันที่ปลูกแบบไฮโดรนิกส์ได้รับ IAA 10^{-10} M พร้อมกับตะกั่วในสารละลายธาตุอาหาร จะมีการเจริญเติบโตของยอดและรากดีกว่าต้นที่ได้รับตะกั่วเพียงอย่างเดียว [10] การใช้จิบเบอเรลลิน50 µM เพื่อลดความเป็นพิษของแคดเมียมนั้น พบว่าแม้จิบเบอเรลลินจะไม่สามารถเพิ่มน้ำหนักสด น้ำหนักแห้งของ *Brassica napus* ที่เจริญแบบไฮโดรโพนิกส์และได้รับแคดเมียม 50 – 100 µM ได้ แต่สามารถเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์ได้ที่แคดเมียม 50 µM [11] อย่างไรก็ตาม การศึกษาผลของการใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชในการลดความเป็นพิษของสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีนยังมีไม่มากนัก และมีทั้งที่ได้ผลและไม่ได้ผล การแช่เมล็ดข้าวโพดในสารละลาย IBA 10.0 mg/l สามารถเพิ่มความยาวยอด ความยาวรากและน้ำหนักสดของต้นกล้าข้าวโพดที่เจริญในดินที่ปนเปื้อนลินเดน 20 mg/kg ได้ [12] การแช่เมล็ดผักกวางตุ้งในสารละลาย IBA 1.0 – 10.0 mg/l สามารถเพิ่มการเจริญเติบโตของต้นกล้าผักกวางตุ้งในดินที่ปนเปื้อนลินเดน 20 mg/kg ได้ แต่จะไม่ได้ผลถ้าเพิ่มความเข้มข้นของลินเดนเป็น 40 mg/kg [13] การแช่เมล็ดผักกวางตุ้งในสารละลาย NAA 10.0 mg/l แล้วนำไปเพาะในทรายที่ปนเปื้อนเอนโดซัลแฟน ซัลเฟต4-100 mg/kg ทำให้ความยาวยอดของต้นกล้ามากขึ้น แต่การแช่เมล็ดในสารละลายไทเดียซูรอน 10.0 mg/l ทำให้การเจริญของรากของต้นกล้าหยุดชะงักไป [14] ดังนั้น การเลือกใช้ชนิดและความเข้มข้นของสารควบคุมการเจริญเติบโตให้เหมาะสม จึงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจ

ในการศึกษาครั้งนี้ จึงได้ศึกษาผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตสองชนิดคือกรดอินโดบิวไทริก (IBA) ไทเดียซูรอน (TDZ) และกรดจิบเบอเรลลิก (GA_3) ซึ่งเป็นสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชกลุ่มออกซิน ไซโทไคนิน และจิบเบอเรลลินตามลำดับ ต่อการกระตุ้นการเจริญเติบโตของถั่วฝักยาว *(Vignauguiculata)* ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญและยังเป็นตัวแทนของพืชตระกูลถั่วที่นิยมใช้ในการฟื้นฟูสภาพแวดล้อมที่ปนเปื้อนสารมลพิษอินทรีย์ด้วย โดยสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีนที่ใช้ในการศึกษานี้คือ HCH ซึ่งยังคงพบปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมจนถึงปัจจุบัน ทั้งนี้ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไปใช้ประโยชน์เพื่อเพิ่มผลผลิตหรือเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้พืชในการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมต่อไป

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

ชั่ง HCH (Sigma Aldrich, purity 99.8%) แล้วละลายด้วยอะซีโตน จากนั้นจึงเติมลงในดินให้ได้ความเข้มข้นเป็น 20 mg/kg ดินที่เติมเฉพาะอะซิโตน ใช้เป็นชุดควบคุมที่ 0 mg/kg ผึ่งดินไว้ 24 ชั่วโมงเพื่อให้อะซิโตนระเหยไปให้หมดก่อนใช้เพาะเมล็ด ดินที่ใช้ในการทดลองนี้

เป็นดินชุดชัยบาดาลที่ได้รับความอนุเคราะห์จากกรมพัฒนาที่ดิน จังหวัดนครสวรรค์

แช่เมล็ดถั่วฝักยาว(*Vignauguiculata*) (บริษัทอีสต์เวสต์ซีดจำกัด นนทบุรี) ในสารละลายต่าง ๆ ต่อไปนี้คือ IBA 0.1, 1.0 และ 10.0 mg/l;GA_3 0.1, 1.0 และ 10.0 mg/l; TDZ 0.01, 0.1 และ 1.0 mg/l เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยมีเมล็ดที่แช่ในน้ำกลั่นเป็นชุดควบคุม แล้วจึงนำไปเพาะบนจานแก้วที่มีดินที่ผสมไว้ ทั้งที่มีและไม่มี HCH จานละ 10 เมล็ด จำนวน 3 จานต่อทรีทเมนต์ เมื่อครบ 10 วัน บันทึกร้อยละการงอก วัดความยาวของยอดและราก น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของยอดและราก ทดสอบความแตกต่างทางสถิติด้วย Two - way ANOVA และ LSD test

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 ผลของ GA_3ต่อการเจริญของต้นกล้าถั่วฝักยาว

ในดินที่ไม่ปนเปื้อน HCH การแช่เมล็ดในสารละลาย $GA_3$0.1 – 10.0 mg/l ก่อนนำไปเพาะจะไม่มีผลต่อความยาวยอดและน้ำหนักสดของยอดต้นกล้าถั่วฝักยาว (รูปที่ 1A – 1B) แต่จะทำให้น้ำหนักแห้งของยอดถั่วฝักยาวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (รูปที่ 1C) ส่วนการแช่เมล็ดถั่วฝักยาวใน GA_3แล้วนำไปเพาะในดินที่มี HCH นั้น พบว่า GA_3 ไม่สามารถกระตุ้นให้การเจริญของยอดถั่วฝักยาวได้ เมื่อเทียบกับต้นกล้าที่มาจากเมล็ดที่แช่ในน้ำกลั่น และถ้าเปรียบเทียบระหว่างเมล็ดถั่วฝักยาวที่แช่ใน GA_3 ความเข้มข้นเท่ากัน แต่นำไปเพาะในดินที่มี HCH ต่างกันแล้ว จะเห็นว่า ต้นกล้าที่เจริญในดินที่มี HCH จะมีน้ำหนักของยอดทั้งน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งน้อยกว่าต้นที่เจริญในดินที่ไม่มี HCH อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

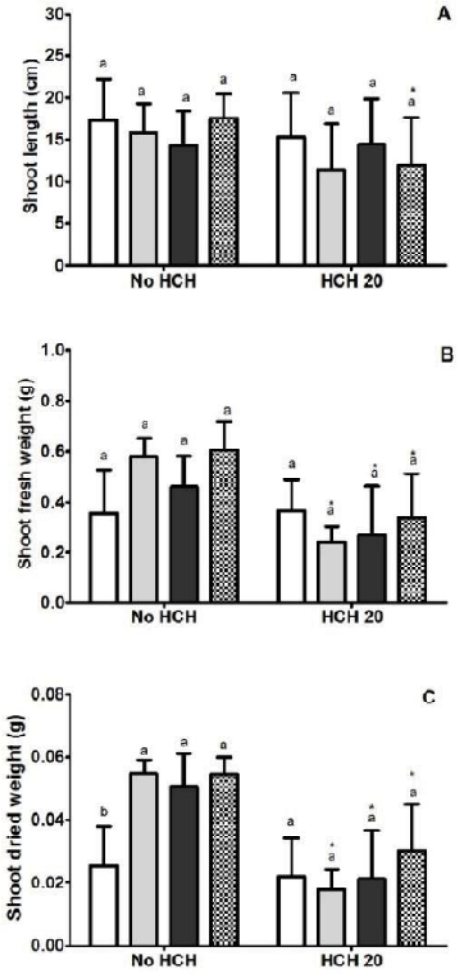
การแช่เมล็ดถั่วฝักยาวในสารละลาย $GA_3$0.1 – 10.0 mg/l ก่อนนำไปเพาะในดินที่ไม่ปนเปื้อน HCH จะเห็นผลต่อรากของต้นกล้าได้ชัดเจน เมล็ดที่ได้รับ GA_3 ทุกความเข้มข้น เมื่อนำไปเพาะในดินที่ไม่มี HCH ต้นกล้าจะมีความยาวรากสั้นกว่าเมล็ดที่แช่ในน้ำกลั่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่จะมีน้ำหนักแห้งสูงขึ้น โดยที่ไม่มีผลต่อน้ำหนักสด (รูปที่ 2) ส่วนเมล็ดที่ได้รับ GA_3 ทุกความเข้มข้น เมื่อนำไปเพาะในดินที่มี HCH พบว่าเฉพาะต้นกล้าที่มาจากเมล็ดที่แช่ใน $GA_3$10.0 mg/l เท่านั้นที่มีความยาวรากสั้นกว่าต้นที่มาจากเมล็ดที่แช่น้ำกลั่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ GA_3 จะไม่มีผลต่อน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของรากต้นกล้าถั่วฝักยาว (รูปที่ 2)

จิบเบอเรลลินเป็นสารควบคุมการเจริญเติบโตที่มีบทบาทในการส่งเสริมการยืดตัวของราก [15] และมีการนำจิบเบอเรลลินมาใช้เพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชในสภาวะที่มีโลหะหนัก ซึ่งพบว่า จิบเบอเรลลินจะออกฤทธิ์ได้น้อยกว่าออกซิน เช่น การใช้ GA_3หรือ IAA อย่างละ 100 µM ในการลดความเป็นพิษของทองแดง 80 µM ต่อการเจริญของทานตะวัน พบว่า การใช้ IAA เพิ่มความยาวของรากและกระตุ้นการพัฒนาของขนรากได้ดีกว่า GA_3แต่ GA_3 จะให้ผลดีทางด้านการรักษาระดับของรงควัตถุ [16] และยังช่วยเพิ่มระดับของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระและการสะสมไนโตรเจนในถั่วลันเตาที่ได้รับโครเมียมได้ เมื่อใช้ GA_3 10 µM แต่จะไม่ได้ผลถ้าเพิ่มปริมาณเป็น 100 µM[17]

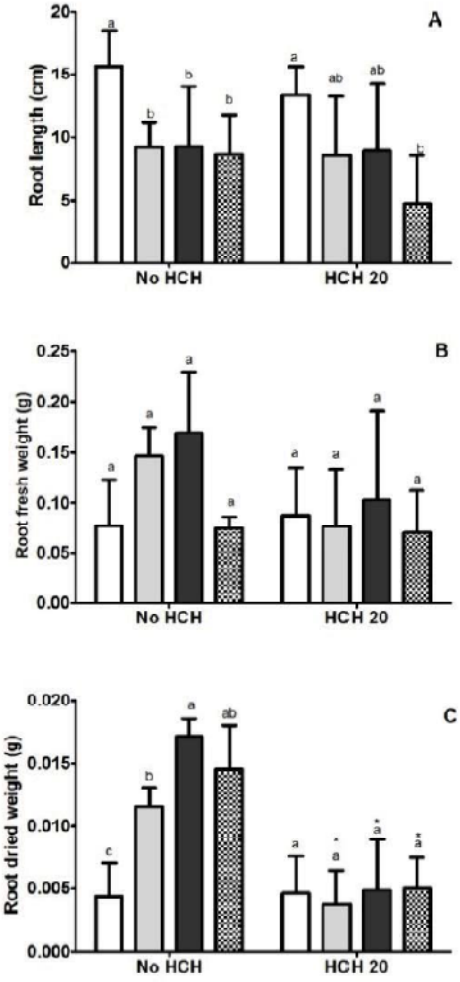
ในการทดลองนี้ ความเข้มข้นของ GA_3 ที่ใช้คือ 0.1 – 10.0 mg/l หรือ 0.3 – 30 µM ซึ่งแม้จะไม่สามารถกระตุ้นการเจริญของยอดและรากสำหรับต้นกล้าที่เจริญในดินที่มี HCH ได้ แต่สามารถเพิ่มน้ำหนักแห้งในต้นกล้าที่เจริญในดินที่ไม่มี HCH ดังนั้น จึงเป็นไปได้ว่าการใช้ GA_3 นี้ไม่สามารถลดความเป็นพิษของ HCH ต่อการเจริญระยะต้นกล้าของถั่วฝักยาวได้ การเพิ่มความเข้มข้นของ GA_3 อาจจะส่งผลเสียต่อการเจริญของถั่วฝักยาวมากยิ่งขึ้น เนื่องจากโดยทั่วไป การเจริญของยอดต้องการจิบเบอเรลลินในระดับ 1 µM และรากต้องการในระดับ 1 nM และจะเห็นได้จากการยับยั้งการยืดยาวของรากถั่วฝักยาวทั้งในดินที่มีและไม่มี HCH

3.2 ผลของ IBA ต่อการเจริญของต้นกล้าถั่วฝักยาว

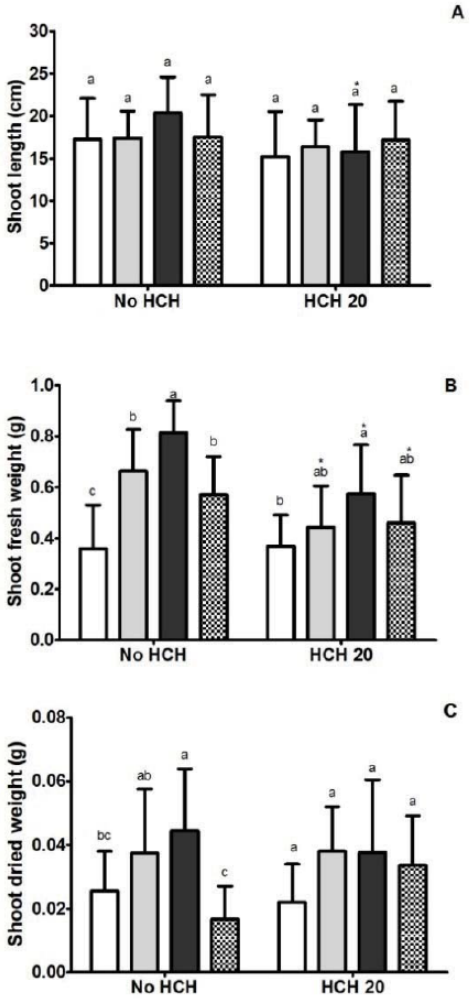
การแช่เมล็ดถั่วฝักยาวในสารละลาย IBA 0.1 – 10.0 mg/l แล้วนำไปเพาะในดินที่ไม่มี HCH พบว่า IBA 1.0 mg/l ทำให้น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของยอดต้นกล้าถั่วฝักยาวสูงกว่าต้นกล้าที่มาจากเมล็ดที่แช่น้ำกลั่นหรือ IBA 10.0 mg/l อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ไม่มีผลต่อความยาวยอด ส่วนเมล็ดที่แช่ในสารละลาย IBA 0.1 – 10.0 mg/l แล้วนำไปเพาะในดินที่มี HCH พบว่า IBA ไม่มีผลต่อความยาวยอดและน้ำหนักแห้งของต้นกล้าถั่วฝักยาว เฉพาะต้นกล้าที่มาจากเมล็ดที่แช่ใน IBA 1.0 mg/l เท่านั้นที่มีน้ำหนักสดของยอดสูงกว่าต้นกล้าที่มาจากเมล็ดที่แช่ในน้ำกลั่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเมล็ดที่แช่ใน IBA ความเข้มข้นเท่ากัน แต่เพาะลงในดินที่มีหรือไม่มี HCH จะเห็นได้ว่า ต้นกล้าที่เจริญในดินที่มี HCH



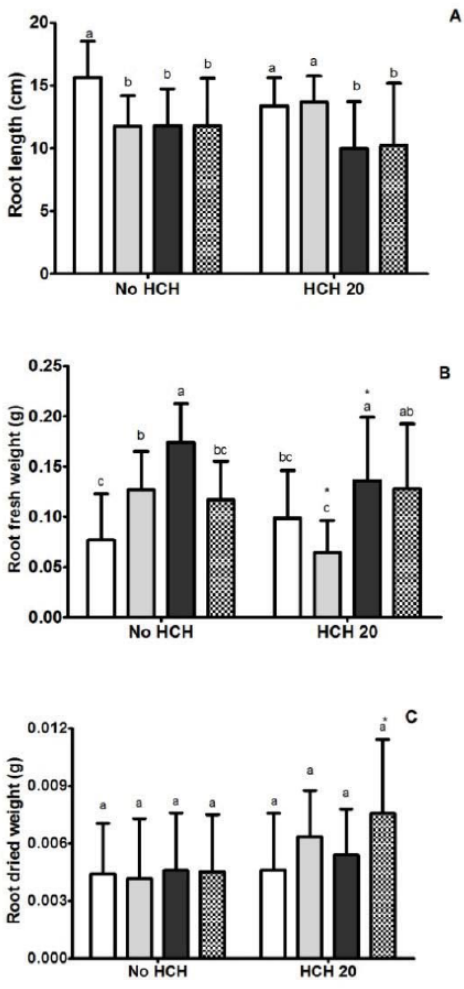
รูปที่ **1** ผลของ GA_3ต่อความยาวยอด (A) น้ำหนักสดยอด (B) และน้ำหนักแห้งยอด (C) ของต้นกล้าถั่วฝักยาวที่เจริญในดินที่ไม่มีหรือมีเฮกซะคลอโรไซโคลเฮก - เซน (HCH) 20 mg/kg เป็นเวลา 10 วัน สัญลักษณ์: น้ำกลั่น GA_3 0.1mg/l GA_3 1.0 mg/l GA_3 10.0 mg/l; ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่าง ต้นกล้าที่ได้รับ GA_3 ต่างกันในดินที่มี HCH ความเข้มข้นเดียวกัน * แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากต้นกล้าที่เจริญในดินที่ไม่ปนเปื้อนที่ได้รับ GA_3 ระดับเดียวกัน



รูปที่ **2** ผลของ GA_3 ต่อความยาวราก (A) น้ำหนักสดราก (B) และน้ำหนักแห้งราก(C) ของต้นกล้าถั่วฝักยาวที่เจริญในดินที่ไม่มีหรือมีเฮกซะคลอโรไซโคลเฮก - เซน (HCH) 20 mg/kg เป็นเวลา 10 วันสัญลักษณ์: น้ำกลั่น GA_3 0.1 mg/l GA_3 1.0 mg/l GA_3 10.0 mg/l; ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกันหมายถึงมีความ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่าง ต้นกล้าที่ได้รับ GA_3 ต่างกันในดินที่มี HCH ความเข้มข้นเดียวกัน * แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากต้นกล้าที่เจริญในดินที่ไม่ปนเปื้อนที่ได้รับ GA_3 ระดับเดียวกัน



รูปที่ 3 ผลของ IBA ต่อความยาวยอด (A) น้ำหนักสดยอด (B) และน้ำหนักแห้งยอด (C) ของต้นกล้าถั่วฝักยาวที่เจริญในดินที่ไม่มีหรือมีเฮกซะคลอโรไซโคลเฮก - เซน (HCH) 20 mg/kg เป็นเวลา 10วัน สัญลักษณ์: ☐ น้ำกลั่น ▨ I BA 0.1mg/l ■ IBA 1.0 mg/l ▩ IBA10.0 mg/l; ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกันหมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างต้นกล้าที่ได้รับ IBA ต่างกันในดินที่มี HCH ความเข้มข้นเดียวกัน * แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากต้นกล้าที่เจริญในดินที่ไม่ปนเปื้อนที่ได้รับ IBA ระดับเดียวกัน



รูปที่ 4 ผลของ IBA ต่อความยาวราก (A) น้ำหนักสดราก (B) และน้ำหนักแห้งราก (C) ของต้นกล้าถั่วฝักยาวที่เจริญในดินที่ไม่มีหรือมีเฮกซะคลอโรไซโคลเฮก - เซน(HCH) 20 mg/kg เป็นเวลา 10 วัน สัญลักษณ์ : ☐ น้ำกลั่น ▨ I BA 0.1mg/l ■ IBA 1.0 mg/l ▩ IBA10.0 mg/l; ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกันหมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างต้นกล้าที่ได้รับ IBA ต่างกันในดินที่มี HCH ความเข้มข้นเดียวกัน *แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากต้นกล้าที่เจริญในดินที่ไม่ปนเปื้อนที่ได้รับ IBA ระดับเดียวกัน

จะมีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของยอดต่ำกว่าต้นที่เจริญในดินที่ไม่ปนเปื้อน (รูปที่ 3)

การแช่เมล็ดถั่วฝักยาวในสารละลาย IBA 0.1 – 10.0 mg/l แล้วนำไปเพาะในดินที่ไม่มี HCH พบว่า IBA ส่งผลต่อความยาวและน้ำหนักสดของรากมากกว่าน้ำหนักแห้ง เมล็ดที่แช่ใน IBA ทุกความเข้มข้นเมื่อนำไปเพาะในดินที่ไม่มี HCH จะทำให้ความยาวรากสั้นกว่าต้นกล้าที่มาจากเมล็ดที่แช่น้ำกลั่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และต้นกล้าที่มาจากเมล็ดที่แช่ใน IBA 1.0 mg/l จะมีน้ำหนักสดของรากมากกว่าต้นกล้าที่มาจากเมล็ดที่แช่ในน้ำกลั่นหรือ IBA ความเข้มข้นอื่นไม่ว่าจะเพาะในดินที่มีหรือไม่มี HCH ก็ตาม การแช่เมล็ดถั่วฝักยาวในสารละลาย IBA ทุกความเข้มข้นจะไม่มีผลต่อน้ำหนักแห้งของต้นกล้า ไม่ว่าจะเพาะในดินที่มีหรือไม่มี HCH เช่นกัน (รูปที่ 4)

IBA เป็นสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชที่สามารถกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชในสภาวะที่ได้รับสารพิษได้ดี โดยสามารถส่งเสริมการเจริญของต้นกล้าข้าวโพดและผักกวางตุ้งในดินที่ปนเปื้อนลินเดน 20 mg/kg ได้ [12], [13] แต่ไม่สามารถส่งเสริมการเจริญของต้นกล้าผักกวางตุ้งที่เจริญในดินที่ปนเปื้อนเอนโดซัลแฟน-ซัลเฟต 4-100 mg/kg ได้ [18] ซึ่งในการศึกษานี้ IBA 1.0 mg/l สามารถเพิ่มน้ำหนักสดของต้นกล้าถั่วฝักยาวในดินที่ปนเปื้อน HCH 20 mg/kg ได้เช่นกัน ทั้งนี้ มีรายงานว่า HCH ลดระดับของฮอร์โมน IAA ในต้นกล้าข้าวได้ และการได้รับ IAA จากภายนอกจะช่วยให้ต้นกล้าข้าวเจริญได้เป็นปกติ [19] จึงเป็นไปได้ว่า การสัมผัสกับ HCH ที่ปนเปื้อนในดินทำให้ระดับของฮอร์โมน IAA ในต้นกล้าถั่วฝักยาวเปลี่ยนไป และการแช่เมล็ดถั่วฝักยาวในสารละลาย IBA จะช่วยให้ระดับของ IAA เป็นปกติได้ ซึ่งต้องมีการศึกษาในรายละเอียดต่อไป

3.3 ผลของ TDZ ต่อการเจริญของต้นกล้าถั่วฝักยาว

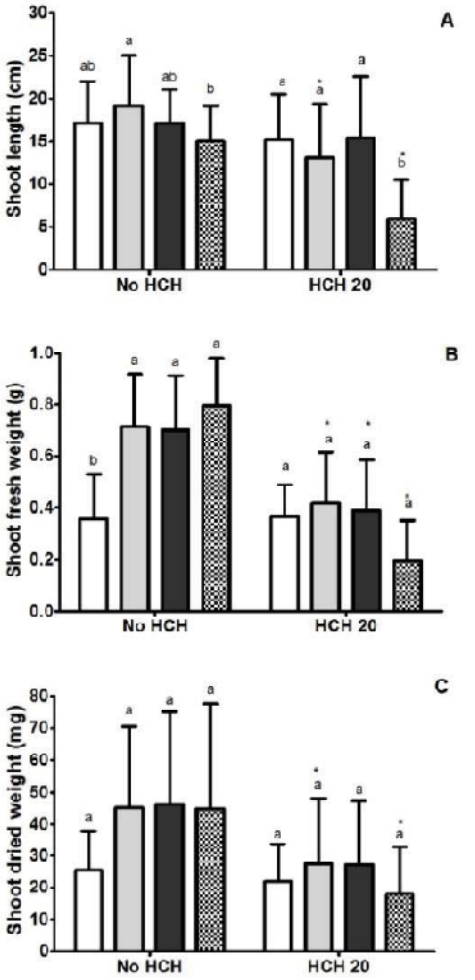
การแช่เมล็ดถั่วฝักยาวในสารละลาย TDZ 0.01 – 0.1 mg/l แล้วเพาะลงในดินที่ไม่ปนเปื้อน HCH ทำให้ความยาวยอดของต้นกล้าอยู่ในระดับเดียวกับต้นที่มาจากเมล็ดที่แช่ในน้ำกลั่น แต่ถ้าเพิ่มความเข้มข้นของ TDZ เป็น 1.0 mg/l จะทำให้ความยาวยอดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนั้น การแช่เมล็ดในสารละลาย TDZ ทุกความเข้มข้นแล้วเพาะในดินที่ไม่มี HCH ทำให้น้ำหนักสดของต้นกล้ามากกว่าต้นที่มาจากเมล็ดที่แช่ในน้ำกลั่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติแต่ไม่มีผลต่อน้ำหนักแห้งของต้นกล้า อย่างไรก็ตาม เมื่อนำเมล็ดที่แช่ในสารละลาย TDZ ทุกความเข้มข้นไปเพาะในดินที่ HCH 20 mg/kg พบว่าไม่มีผลต่อทั้งน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของต้นกล้า แต่การแช่เมล็ดในสารละลายTDZ 1.0 mg/l จะยังทำให้ความยาวยอดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติและยังสั้นกว่าต้นกล้าที่เพาะในดินที่ไม่ปนเปื้อน HCH อีกด้วย (รูปที่ 5) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเมล็ดที่แช่ใน TDZ ความเข้มข้นเท่ากัน แต่เพาะลงในดินที่มีหรือไม่มี HCH จะเห็นได้ว่า ต้นกล้าที่เจริญในดินที่มี HCH จะมีน้ำหนักสดทั้งของยอดและรากต่ำกว่าต้นที่เจริญในดินที่ไม่มี HCH (รูปที่ 5-6)

TDZ มีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของรากอย่างชัดเจน โดยต้นกล้าถั่วฝักยาวที่มาจากเมล็ดที่แช่ในสารละลาย TDZ ทุกความเข้มข้นเมื่อนำมาเพาะในดินทั้งที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อน HCH จะมีความยาวรากลดลงจากต้นที่มาจากเมล็ดที่แช่ในน้ำกลั่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และจะลดลงมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ TDZ สูงขึ้น (รูปที่ 6) การแช่เมล็ดใน TDZ 0.01 mg/l แล้วนำมาเพาะในดินที่ไม่ปนเปื้อน HCH ทำให้น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของรากถั่วฝักยาวเพิ่มขึ้นได้ แต่ถ้าใช้ที่ความเข้มข้นสูงมากกว่านี้จะไม่มีผล อย่างไรก็ตาม การแช่เมล็ดถั่วฝักยาวในสารละลาย TDZ แล้วนำมาเพาะในดินที่ปนเปื้อน HCH จะไม่มีผลต่อน้ำหนักแห้งของราก และที่ความเข้มข้น 0.1 – 1.0 mg/l จะทำให้น้ำหนักสดของรากลดลงเมื่อเทียบกับต้นที่มาจากเมล็ดที่แช่ในน้ำกลั่นหรือ TDZ 0.01 mg/l อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติด้วย

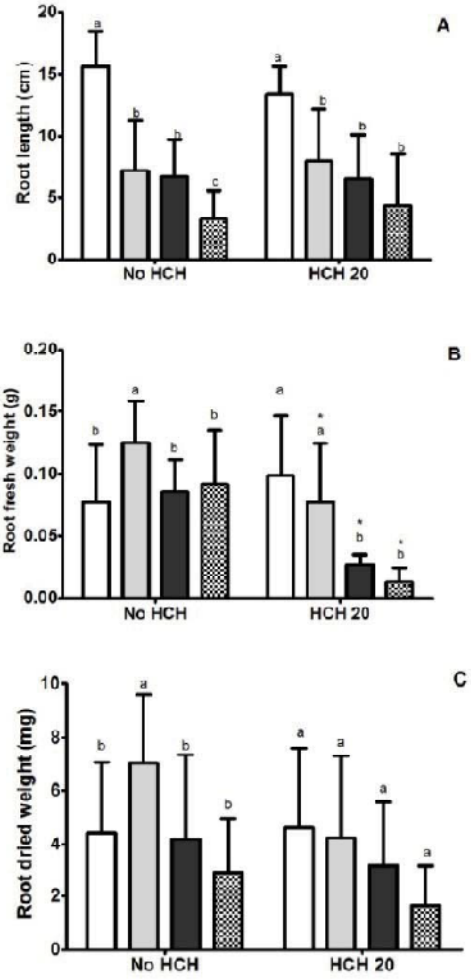
TDZ เป็นสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชกลุ่มไซโทไคนินชนิดฟีนิลยูเรียซึ่งมีฤทธิ์ในการส่งเสริมการแตกยอดของพืชได้ดี โดยนำมาใช้กระตุ้นการแตกยอดในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อของพืชหลายชนิดเช่น ว่านนางคำ [20] และกระเจียวขาว [21] การใช้ TDZ เพื่อลดความเป็นพิษของสารมลพิษในพืชมีรายงานเป็นจำนวนมากเช่นกัน การแช่เมล็ดข้าวโพดในสารละลาย TDZ 0.01μM ช่วยลดความเป็นพิษของนิกเกิลต่อข้าวโพดได้ [22] TDZ 1.0 mg/l สามารถส่งเสริมการเจริญของข้าวโพดที่เจริญในดินที่ปนเปื้อนฟลูออรีน 10 mg/kg ได้ แต่ละไม่ได้ผลถ้าปริมาณฟลูออรีนในดินเพิ่มขึ้นเป็น 100 mg/kg [23] การแช่เมล็ดผักกวางตุ้งใน TDZ 10.0 mg/l แล้วนำไปเพาะในทรายที่ปนเปื้อนเอนโดซัลแฟน ซัลเฟต ทำให้รากของต้นกล้าผักกวางตุ้งไม่พัฒนา แม้จะมีการเจริญของยอดที่ดี [14]

ในการศึกษานี้ TDZ ส่งผลในด้านการยับยั้งความยาวของทั้งยอดและรากของต้นกล้าถั่วฝักยาวอย่างชัดเจน แต่

จะให้ผลดีในด้านการเพิ่มน้ำหนักสดของต้นกล้า ซึ่งการออกฤทธิ์ในด้านการเพิ่มน้ำหนักสดของ TDZ มีรายงานในด้านการนำไปใช้ฉีดพ่นเพื่อเพิ่มน้ำหนักสดของผลกีวี [24] ดังนั้น การใช้งาน TDZ เพื่อลดความเป็นพิษของสารมลพิษต่อถั่วฝักยาว อาจต้องใช้ TDZ ร่วมกับสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชชนิดอื่น โดยเฉพาะชนิดที่ส่งเสริมการเจริญของรากได้ดี หรือส่งเสริมการยืดยาวของยอดและรากได้ดี



รูปที่ 5 ผลของ TDZ ต่อความยาวยอด (A) น้ำหนักสดยอด (B) และน้ำหนักแห้งยอด (C) ของต้นกล้าถั่วฝักยาวที่เจริญในดินที่ไม่มีหรือมีเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซน(HCH) 20 mg/kg เป็นเวลา 10วัน สัญลักษณ์ : □ น้ำกลั่น ▨ TDZ0.01 mg/l ■ TDZ0.1 mg/l ▩ TDZ1.0 mg/l; ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกันหมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างต้นกล้าที่ได้รับ IBA ต่างกันในดินที่มี HCH ความเข้มข้นเดียวกัน * แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากต้นกล้าที่เจริญในดินที่ไม่ปนเปื้อนที่ได้รับ IBA ระดับเดียวกัน



รูปที่ 6 ผลของ TDZ ต่อความยาวยอด (A) น้ำหนักสดยอด (B) และน้ำหนักแห้งยอด (C) ของต้นกล้าถั่วฝักยาวที่เจริญในดินที่ไม่มีหรือมีเฮกซะคลอโรไซโคลเฮกเซน(HCH) 20 mg/kg เป็นเวลา 10วัน สัญลักษณ์ : □ น้ำกลั่น ▨ TDZ0.01 mg/l ■ TDZ0.1 mg/l ▩ TDZ1.0 mg/l; ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกันหมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างต้นกล้าที่ได้รับ IBA ต่างกันในดินที่มี HCH ความเข้มข้นเดียวกัน * แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากต้นกล้าที่เจริญในดินที่ไม่ปนเปื้อนที่ได้รับ IBA ระดับเดียวกัน

4. สรุปและเสนอแนะ

การแช่เมล็ดถั่วฝักยาวในสารละลาย IBA 1.0 mg/l ให้ผลดีที่สุดในการส่งเสริมการเจริญของต้นกล้าถั่วฝักยาวในดินที่ปนเปื้อน HCH โดยสามารถเพิ่มน้ำหนักสดของยอดและรากของต้นกล้าได้ การแช่เมล็ดถั่วฝักยาวในสารละลาย GA_3ทุกความเข้มข้นจะส่งเสริมการเจริญของต้นกล้าถั่วฝักยาวได้เฉพาะเมื่อนำไปเพาะในดินที่ไม่มีสารมลพิษเท่านั้น หากนำมาเพาะในดินที่มี HCH อยู่จะไม่สามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตได้ TDZ ให้ผลเช่นเดียวกับ GA_3 คือส่งเสริมการเจริญเติบโตได้เฉพาะในดินที่ไม่ปนเปื้อน HCH เท่านั้น และถ้าใช้ในความเข้มข้นสูงจะเป็นพิษต่อการเพิ่มความยาวของทั้งยอดและราก ดังนั้น IBA จึงเป็นสารควบคุมการเจริญเติบโตที่เหมาะสมสำหรับถั่วฝักยาว และควรศึกษาถึงผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพแวดล้อมต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาแห่งประเทศไทย และมหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ที่สนับสนุนทุนพัฒนาศักยภาพการทำวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่

6. บรรณานุกรม

[1] Cheevaporn, V., and Menasveta, P. 2003. "Water pollution and habitat degradation in the Gulf of Thailand". **Marine Pollution Bulletin**. 47: 43 – 51.

[2] Samoh, A.N.H., and Ibrahim, M.D. 2009. "Organochlorine pesticide residues in the major rivers of southern Thailand". **EnvironmentAsia** 1, 30-34.

[3] Poolpak, T., Pokethitiyook, P., Kruatrachue, M., Arjarasirikoon, U., and Thanwaniwat, N. 2008. "Residue analysis of organochlorine pesticides in the Mae Klong river of Central Thailand". **Journal of Hazardous Materials**. 156, 230 – 239.

[4] ขนิษฐา สมตระกูล และ วราภรณ์ ฉุยฉาย. 2555. "การปนเปื้อน ความเป็นพิษและการสะสมในพืชของสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์แกนโนคลอรีน". **วารสารวิทยาศาสตร์แลเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี**. 14 (2), 35 – 44.

[5] Calvelo Pereira, R., Monterroso, C., and Macias, F. 2010. "Phytotoxicity of hexachlorocyclohexane: Effect on germination and early growth of different plant species". **Chemosphere**. 79 : 326–333.

[6] Chouychai, W., Chompunut, J., Sathonghon, S., and Ruppat, P. 2009. "Respond of Corn Seedling to Lindane and Endosulfan Contaminants in Soil". **35th Congress on Science and Technology of Thailand**. October 15 –17, 2009. Burapha University. 5 pages.

[7] วราภรณ์ ฉุยฉาย เจริญพงษ์ชมภูนุช สุชาติ สระทอง หนและปัทมาพร รูปปัทม์. 2553. "ความเป็นพิษของลินเดนและเอนโดซัลแฟนที่ตกค้างในดินต่างต่อการเจริญระยะต้นกล้าของถั่วฝักยาวและผักกวางตุ้ง". **รายงานการประชุมวิชาการเกษตร ครั้งที่ 11**. 25 – 26 มกราคม 2553. คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. หน้า 425 – 428

[8] Chompunut, J Sathonghon, S., and Chouychai, W. 2010. "Co-toxicity of lindane and alpha-endosulfan contaminants in alkaline soil to rice seedling". **Proceeding of 6thNaresuan Research Conference**, July 29 – 31, 2010. Naresuan University. pp. 390 – 399.

[9] Chouychai, W. and Lee, H. 2012. "Phytotoxicity Assay of Crop Plants to Lindane and Alpha-endosulfan Contaminants in Alkaline Thai Soil". **International Journal of Agriculture and Biology**, 14 (5), 734 – 738.

[10] Fässler, E., Evangelou, M.W., Robinson, B.H. and Schulin, R. 2010. "Effects of indole-3-acetic acid (IAA) on sunflower growth and heavy metal uptake in combination with ethylene diaminedisuccinic acid (EDDS)". **Chemosphere**. 80: 901-907.

[11] Meng, H., Hua, S., Shamsi, I.H., Jilani, G., Y. Li, Y., Jiang, L. 2009. "Cadmium-induced stress on the seed germination and seedling growth of Brassica napusL., and its alleviation through exogenous plant growth regulators". **Plant Growth Regulation** 58, 47-59.

[12] ปัทมาพร รูปปัทม์ เจริญพงษ์ ชมพูนุช สุชาติ สระทองหน และ วราภรณ์ ฉุยฉาย. 2554. "ผลของออกซินและจิบเบอเรลลินต่อความเป็นพิษของลินเดนในต้นกล้าข้าวโพดที่ปลูกในดินต่าง". **วารสารเกษตรนเรศวร**, 13 (1), 43 49.

[13] Chouychai, W.2012."Effect of some plant growth regulators on lindane and alpha-ondosulfan toxicity to *Brassica chinensis*". **Journal of Environmental Biology** 33 (4), 811 – 816.

[14] ขนิษฐา สมตระกูล และ มาลียา เครือตราชู. 2556. "ผลของกรดแอสฟาแนฟทาลีนอะซีติกและไทเดียซูรอนต่อการเจริญของต้นกล้าผักกวางตุ้งในทรายที่ปนเปื้อนเอนโดซัลแฟน-ซัลเฟต". **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี**. 15 (1): 1-11.

[15] Tanimoto, E. 2005. "Regulation of root growth by plant hormone-Role of auxins and gibberellins". **Critical Review in Plant Science**. 24: 249 – 265.

[16] Ouizoudou, G., I. Ilias. 2005. "Hormone-induced protection of sunflower photosynthetic apparatus against copper toxicity". **BiologiaPlantarum**. 49, 223 – 228.

[17] Gangwar, S., Singh, V.P., Srivastava, P.K. and Maurya, J.N. 2011. "Modification of chromium (VI) phytotoxicity by exogenous gibberellic acid and application in *Pisumsativum* (L.)seedlings". **ActaPhysiologiaePlantarum**. 33(4): 1385- 1397.

[18] ขนิษฐา สมตระกูล และ มาลียา เครือตราชู. 2555. "ผลของกรดอินโดลบิวไทริกต่อการเจริญในระยะต้นกล้าของผักกวางตุ้งที่ปลูกในทรายที่ปนเปื้อนเอนโดซัลแฟน ซัลเฟต". **วารสารวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร**. 30 (1) :14 24.

[19] Sharada, K., Salimath, B.P., Shetty, S., Gopalakrishna, N., and Karanth, K. (1999). "Indol-3-ylacetic acid and calmodulin regulated Ca^{2+} ΛTPase: Λ target for the phytotoxic action of hexachlorocyclohexane". **Pesticide Science**, *35*, 315 – 319.

[20] กู่คำ วิไลเฮือง และ วิไลลักษณ์ ชินะจิตร. 2551. "การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อว่านนางคำ". **แก่นเกษตร**. 36 (พิเศษ): 229 – 233.

[21] อนุพันธ์ กงบังเกิด และ พันธิตรา กมล. 2549. "ผลของไซโตไคนินและออกซินต่อการพัฒนาของเนื้อเยื่อเพาะเลี้ยงกระเจี๊ยวขาว". **วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร**. 2 (2): 183 201.

[22] Lukatkin, A.S., Gracheva, N.V., Grishenkova, N.N., Dukhovskis, I.V., and Brazaitite, A.A. 2007. "Cytokinin-liko growth regulators mitigate toxic action of zinc and nickel ions on maize seedling". **Russian Journal of Plant Physiology**. 54: 381– 387

[23] วราภรณ์ ฉุยฉาย, จตุรพร ตอนรอดไพร,สายสวาท เม่นสุวรรณ์, วณิชชา คงตุ้ม, และ นันธพร ศิลป์สมบูรณ์. 2554. "ผลของไทเดียซูรอนต่อการเจริญของต้นอ่อนข้าวโพดในดินต่างที่ปนเปื้อนฟลูออรีน". **แก่นเกษตร** 39 (พิเศษ): 316 – 320.

[24] Tamiani, T., Proietti, P., Pilli, M., Battistelli, A., Moscatollo, S. 2007. "Effects of application of thidiazuron (TDZ), gibberellic acid (GA3), and 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) on fruit size and quality of *Actinidiadeliciosa* 'Hayward'". **New Zealand Journal of Crop and Horticural Science**. 35 (3): 341 – 347.