



ผลความเป็นพิษร่วมต่อพืชของพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนต่อ

ข้าวโพดหวาน (*Zea mays* L. var *sacharata* Bailey)

ถั่วพุ่ม (*Vigna sinensis*) และฟักทอง (*Cucurbita moschata*)

Combine-Phytotoxic Effects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on

Sweet Corn (*Zea mays* L. var *sacharata* Bailey),

Cowpea (*Vigna sinensis*) and Squash (*Cucurbita moschata*)

ชนิษฐา สมตระกูล^{1*} จำปี ไชยเมืองคุณ¹ ดวงอนงค์ ผลาผล¹ และ วราภรณ์ ฉุยฉาย²

บทคัดย่อ

ศึกษาความเป็นพิษร่วมกันของฟลูออรีนและฟลูออแรนทีนร่วมกับแอนทราซีนหรือฟิแนนทรีนที่ปนเปื้อนในดิน (อัตราส่วน 1:1) ต่อการเจริญระยะต้นกล้าของพืช 3 ชนิดคือ ข้าวโพดหวาน (*Zea mays* L. var *sacharata* Bailey) ถั่วพุ่ม (*Vigna sinensis*) และฟักทอง (*Cucurbita moschata*) พบว่า ข้าวโพดหวานไวต่อความเป็นพิษร่วมกันของฟิเอเอซมากที่สุด รองลงมาคือถั่วพุ่ม ส่วนฟักทองเป็นพืชที่ทนทานต่อการปนเปื้อนร่วมกันของฟิเอเอซ 3 ชนิดมากที่สุด ความยาวรากเป็นดัชนีที่ไวต่อความเป็นพิษมากที่สุด รองลงมาคือน้ำหนักสด การปนเปื้อนร่วมกันของฟลูออรีน ฟลูออแรนทีน และแอนทราซีน เป็นพิษต่อการเจริญเติบโตระยะต้นกล้าของพืชมากกว่าการปนเปื้อนร่วมกันของฟลูออรีน ฟลูออแรนทีน และฟิแนนทรีน

Abstract

The combine toxicity of fluorene and fluoranthene with phenanthrene or anthracene (1:1 ratio) to seedling growth of sweet corn (*Zea mays* L. var *sacharata* Bailey), cowpea (*Vigna sinensis*), and squash (*Cucurbita moschata*) were studied. The result shown that the most sensitive plant to PAH-combine toxicity was sweet corn, the moderate was cow pea, and the most tolerant species was squash. Root length and fresh weight of seedling was sensitive to PAH-combine toxicity. The combination of fluorene, fluoranthene and anthracene was toxic to plants more than the combination of fluorene, fluoranthene and phenanthrene.

¹ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

²สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ อ.เมือง จ.นครสวรรค์ 60000

*Corresponding Author, E-mail: skhanitta@hotmail.com

คำสำคัญ: ความเป็นพิษต่อพืช ฟลูออรีน ฟลูออแรนทีน ฟีนแอนทริน แอนทราซีน

Keywords: Phytotoxicity, Fluorene, Fluoranthene, Phenanthrene, Anthracene

บทนำ

พอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (พีเอ-เอช) เป็นสารมลพิษอินทรีย์ที่เป็นพิษต่อมนุษย์ สัตว์พืช และจุลินทรีย์ การปนเปื้อนของพีเอเอชในประเทศไทยและต่างประเทศ โดยทั่วไปมีที่มาจากริมถนนหลวงและเมืองใหญ่ที่มีการจราจรคับคั่ง (Zehetner et al., 2009) ดินตะกอนแม่น้ำ (Echols et al., 2008) บริเวณสถานีรถไฟเก่า (Roy et al., 2005) แหล่งอุตสาหกรรม และการเผาเศษขยะทางการเกษตร (Hoshiko et al., 2011) โดยพีเอเอชเหล่านี้สามารถสะสมในดินและตะกอนในแหล่งน้ำแล้วเคลื่อนย้ายสู่แหล่งเกษตรกรรมและปากแม่น้ำได้จากการศึกษาระดับการปนเปื้อนในดินตามถนนที่มีการจราจรคับคั่งในจังหวัดเชียงใหม่พบการปนเปื้อนของพีเอเอชทั้ง 16 ชนิด ตามรายการของ EPA โดยชนิดของพีเอเอชที่พบมากที่สุด ได้แก่ ไพรีนและฟลูออแรนทีน (Amagai et al., 1999) และ การศึกษาระดับการปนเปื้อนของพีเอเอชบริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยาและอ่าวไทยของประเทศไทยพบระดับพีเอเอชที่สูงเช่นกันโดยมีค่าเฉลี่ยของพีเอเอชอยู่ที่ 6-8,399 นาโนกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งของตะกอน ปริมาณพีเอเอชเข้มข้นมากที่สุดคือตะกอนจากในคลองโดยอยู่ในระดับ 2,290-2,556 นาโนกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งของตะกอน ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวเป็นพื้นที่ที่มีการทำเกษตรกรรมทั้งสิ้น (Boonyatomanond et al., 2006) ดังนั้น ปัญหาการปนเปื้อนพีเอเอชในดินจึงเป็นปัญหาที่ไม่ควรมองข้าม

การปนเปื้อนพีเอเอชในดินส่งผลกระทบต่อ การเจริญของพืชเศรษฐกิจได้ทั้งในด้านการสะสม และความเป็นพิษที่ทำให้การเจริญเติบโตของพืชลดลง พืชเศรษฐกิจหลายชนิดสามารถสะสมพีเอเอชไว้ในชีวมวลได้ เช่น การสะสมฟีนแอนทรินและไพรีนในส่วนของรากและยอดของกะหล่ำดอกและถั่วเหลือง เป็นต้น (Gao and Zhu, 2004) นอกจากนั้น การที่พืชสัมผัสกับพีเอเอชในระดับความเข้มข้นที่สูงยังเป็นพิษต่อพืชอีกด้วย เช่น การได้รับฟลูออแรนทีน ฟลูออรีน ฟีนแอนทริน และไพรีนทำให้น้ำหนักสดของ *Sinapsis alba*, *Trifolium pretense* และหญ้าไร้ลดลง (Sverdrup et al., 2003) การปนเปื้อนไพรีนในดินเพียง 80 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำให้ความยาวรากของถั่วลิสงลดลง (Chouychai et al., 2008) เป็นต้น นอกจากนั้น ความเป็นพิษของพีเอเอชแต่ละชนิดต่อพืชมีความแตกต่างกันได้ เช่น การปนเปื้อนฟลูออแรนทีนในดินลดน้ำหนักสดของข้าวฟ่างและผักบุ้งลง แต่การปนเปื้อนฟีนแอนทรินทำให้ความสูงของต้นข้าวฟ่างและผักบุ้งลดลง (ชนิษฐา และคณะ, 2554a) และเมื่อเกิดการปนเปื้อนร่วมกันระหว่างพีเอเอชต่างชนิดกัน พบว่าความเป็นพิษต่อพืชจะต่างไปด้วย เช่น การปนเปื้อนร่วมกันระหว่างฟลูออรีน ฟลูออแรนทีนและฟีนแอนทรินในดิน จะเป็นพิษต่อการเจริญระยะต้นกล้าของข้าวฟ่าง ข้าวโพดข้าวเหนียว และข้าวเจ้ามากกว่าการปนเปื้อนร่วมกันของฟลูออรีน ฟลูออแรนทีนและแอนทราซีนในดิน (ชนิษฐา และคณะ, 2554b) อย่างไรก็ตาม การศึกษาความเป็นพิษร่วมกันของพีเอเอชต่างชนิดกันต่อการเจริญเติบโตของพืชยังมีน้อย ทั้งที่การปนเปื้อนใน

สิ่งแวดล้อมจริง โอกาสที่จะพบพีเอเอชปนเปื้อนในดินเพียงชนิดเดียวเป็นไปได้น้อยมาก การศึกษานี้จึงได้เปรียบเทียบความเป็นพิษร่วมกันของพีเอเอชสามกลุ่มคือ ฟลูออรีนและฟลูออแรนทริน ฟลูออรีน ฟลูออแรนทีน และพีแนนทริน หรือฟลูออรีน ฟลูออแรนทีน และแอนทราซีน ต่อการเจริญระยะต้นกล้าของพืชทดสอบ 3 วงศ์ ได้แก่ ข้าวโพดหวาน (*Zea mays* L. var *sacharata* Bailey) ซึ่งเป็นพืชวงหญ้า ถั่วพุ่ม (*Vigna sinensis*) ซึ่งเป็นพืชวงศ์ถั่ว และ ฟักทอง (*Cucurbita moschata*) ซึ่งเป็นพืชวงศ์แตง ผลการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่อเกษตรกรในการวางแผนการเพาะปลูกหรือดินที่ปนเปื้อนด้วยพีเอเอชในสภาพแวดล้อมจริงต่อไป

วิธีดำเนินงาน

1. การเตรียมดิน

เก็บดินที่ไม่มีประวัติการปนเปื้อนด้วยพีเอเอชจากวัดป่ากู่แก้ว ต. ขามเรียง อ. กันทรวิชัย จ. มหาสารคาม นำดินมาผึ่งให้แห้งแล้วร่อนด้วยตะแกรงที่มีขนาดรูพรุน 2 มิลลิเมตร วิเคราะห์ปริมาณฟลูออรีน ฟลูออแรนทีน พีแนนทรินและแอนทราซีนที่ตกค้างในดินด้วย GC-MS เพื่อยืนยันการไม่ปนเปื้อนด้วยสารทั้งสี่ชนิดมาก่อน วิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของดิน ณ บริษัทห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด สาขาขอนแก่น ดินที่ใช้มี %sand 10.23 %silt 15.33 %clay 74.44 พีเอช 8.11 ความนำไฟฟ้า 109.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ อินทรีย์วัตถุ 2.40% ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด 0.29% ปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชนำไปใช้ได้ 58.38 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน

นำฟลูออรีน (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 บริษัท Sigma-Aldrich ประเทศเยอรมัน) ฟลูออแรนทีน (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 บริษัท Fluka ประเทศ

สหรัฐอเมริกา) พีแนนทริน (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 บริษัท Sigma-Aldrich ประเทศเยอรมัน) หรือแอนทราซีน (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 บริษัท Fluka ประเทศสหรัฐอเมริกา) มาละลายในอะซิโตนแล้วเติมลงดินให้มีความเข้มข้นรวมสุดท้ายของสารผสม ได้แก่ ฟลูออรีนและฟลูออแรนทริน ฟลูออรีน ฟลูออแรนทีน และพีแนนทริน หรือฟลูออรีน ฟลูออแรนทีน และแอนทราซีนในดินเป็น 0 2 20 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ผึ่งดินที่ปนเปื้อนในตู้ควั่นเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวทำละลายระเหยไปให้หมด หลังจากนั้นแบ่งดิน 50 กรัมใส่ลงในภาชนะพลาสติกที่มีความจุ 120 มิลลิลิตร โดยใช้ดินที่ไม่เติมพีเอเอชชนิดใดเลยเป็นชุดควบคุม และปรับความชื้นของดินให้เป็นร้อยละ 65 ก่อนการทดลอง

2. การทดสอบความเป็นพิษต่อพืช

การทดสอบความเป็นพิษดัดแปลงจากวิธีของ Kirk et al. (2004) โดยแช่เมล็ดพันธุ์ข้าวโพดหวาน (*Zea mays* L. var *sacharata* Bailey) (บริษัท เจียไต๋ (ประเทศไทย) จำกัด) ถั่วพุ่ม (*Vigna sinensis*) (บริษัท เจียไต๋ (ประเทศไทย) จำกัด) และฟักทอง (*Cucurbita moschata*) (บริษัท ฉั่วยงเซ่งพันธุ์พืช กรุงเทพฯ) ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วเพาะในถาดพลาสติกที่มีดินที่ปนเปื้อนด้วยพีเอเอชผสมแต่ละความเข้มข้น ความเข้มข้นละ 10 เมล็ด (ทำการทดลองทั้งหมดสามซ้ำ) ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องให้ได้รับแสงธรรมชาติ รดน้ำทุกวันเพื่อรักษาความชื้นในดินให้คงที่เมื่อครบกำหนดเวลา 10 วัน วัดร้อยละการงอก ความยาวราก ความสูงของต้น น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของต้นกล้าทั้งต้น

3. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างทรีทเมนต์ด้วย one-way ANOVA และเปรียบเทียบความ

แตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยด้วย Turkey's test การประเมินความเข้มข้นที่ทำให้การเจริญของพืชลดลงร้อยละ 20 (EC_{20}) ใช้วิธี probit analysis และคำนวณค่า additive index เพื่อประเมินผลรวมของสารมลพิษตามวิธีของ Wang et al. (2008) และ Chen and Lu (2002) โดยคำนวณค่า EC_{20} ของสารแต่ละชนิดด้วยวิธี probit analysis แล้วนำค่า EC_{20} มาคำนวณเป็นค่า additive index ทั้งนี้ หากค่า additive index น้อยกว่า 1 แสดงการเสริมฤทธิ์ และถ้ามากกว่า 1 แสดงการหักล้างฤทธิ์กันของสารพิษแต่ละคู่ (Wang et al. 2008)

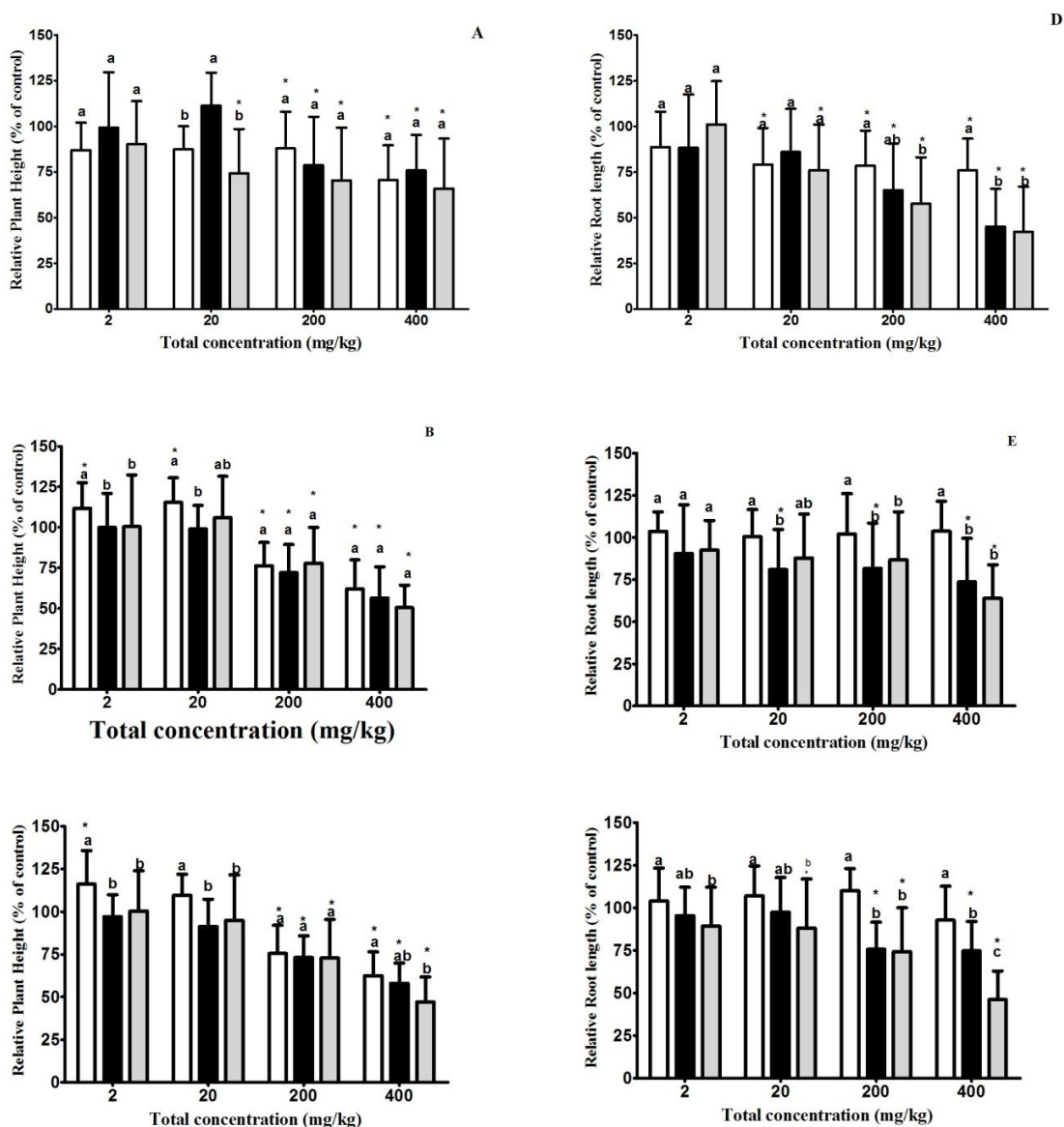
ผลการวิเคราะห์

1. ความเป็นพิษของฟิเอเอชที่ปนเปื้อนร่วมกันต่อการเจริญระยะต้นกล้าของข้าวโพดหวาน

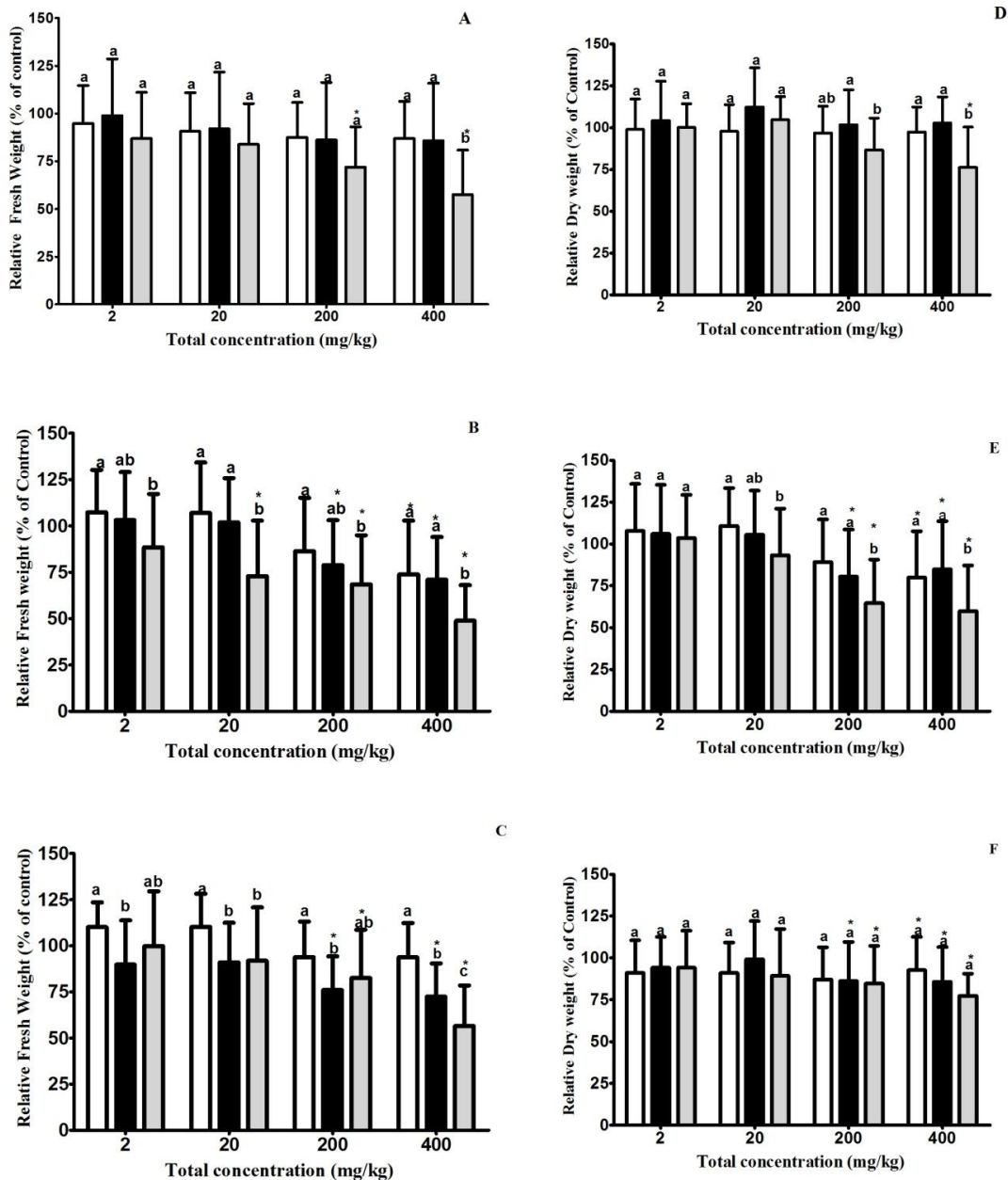
ความสูงของต้นข้าวโพดหวานวัดต่อความเป็นพิษจากการปนเปื้อนร่วมกันระหว่างฟลูออรีน ฟลูออแรนทีนและแอนทราซีนมากที่สุดเนื่องจากที่ความเข้มข้นรวมเป็น 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ทำให้ความสูงต้นของข้าวโพดหวานลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และความเข้มข้นรวมของสารผสมเพียง 17.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน จะทำให้ความสูงต้นของข้าวโพดหวานลดลงร้อยละ 20 (ตารางที่ 1) ขณะที่ฟลูออรีน ฟลูออแรนทีนและฟิแนนทรีนทำให้ความสูงต้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อความเข้มข้นรวมในดินเป็น 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน และความ

เข้มข้นรวมต้องสูงถึง 258.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน จึงจะทำให้ความสูงต้นลดลงร้อยละ 20 ส่วนการปนเปื้อนร่วมกันของฟิเอเอชเพียงสองชนิดคือฟลูออรีนและฟลูออแรนทีนเป็นพิษต่อความสูงต้นข้าวโพดหวานเช่นกัน โดยความเข้มข้นรวมของสารทั้งสองต้องสูงถึง 217.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน จึงจะทำให้ความสูงต้นข้าวโพดหวานลดลงร้อยละ 20 (ตารางที่ 1) การปนเปื้อนของฟลูออรีนและฟลูออแรนทีนในดิน แล้วมีแอนทราซีนหรือฟิแนนทรีนร่วมด้วยจะเกิดการเสริมฤทธิ์กันต่อความสูงต้นของข้าวโพดหวาน (ตารางที่ 2)

การปนเปื้อนร่วมกันของฟิเอเอชสามชนิด ได้แก่ ฟลูออรีน ฟลูออแรนทีน และฟิแนนทรีน หรือฟลูออรีน ฟลูออแรนทีน และแอนทราซีนมีความเป็นพิษต่อความยาวรากของข้าวโพดหวานมากที่สุด โดยความยาวรากของข้าวโพดหวานลดลงร้อยละ 20 เมื่อมีการปนเปื้อนของฟลูออรีนและฟลูออแรนทีนร่วมกับแอนทราซีนหรือฟิแนนทรีนที่ระดับความเข้มข้น 28.6 และ 19.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดินตามลำดับ (ตารางที่ 1) ส่วนการปนเปื้อนร่วมกันของฟิเอเอชเพียงสองชนิดระหว่างฟลูออรีนและฟลูออแรนทีนมีความเป็นพิษต่อความยาวรากต่ำกว่า โดยความเข้มข้นรวมเท่ากับ 55.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน จึงจะทำให้ความยาวรากลดลงร้อยละ 20 และการปนเปื้อนของฟลูออรีนและฟลูออแรนทีนในดินแล้วมีแอนทราซีนหรือฟิแนนทรีนร่วมด้วยทำให้เกิดการเสริมฤทธิ์กันขึ้น (ตารางที่ 2)



ภาพที่ 1 ความสูงต้น ของต้นกล้าข้าวโพดหวาน (A) ถั่วพุ่ม (B) และฟักทอง (C) และน้ำหนักแห้งของต้นกล้าข้าวโพดหวาน (D) ถั่วพุ่ม (E) และฟักทอง (F) ซึ่งเจริญในดินที่ปนเปื้อนพีเอเอชดังนี้ □ ฟลูออรีน และฟลูออแรนทีน, ■ ฟลูออรีน ฟลูออแรนทีน และพีแนนทีน, ▒ ฟลูออรีน ฟลูออแรนทีน และแอนทราซีน ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างพีเอเอชแต่ละคู่ที่ความเข้มข้นเดียวกัน ส่วน * หมายถึงมีความแตกต่างจากการทดลองชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)



ภาพที่ 2 น้ำหนักสดของต้นกล้าข้าวโพดหวาน (A) ถั่วพุ่ม (B) และฟักทอง (C) และน้ำหนักแห้งของต้นกล้าข้าวโพดหวาน (D) ถั่วพุ่ม (E) และฟักทอง (F) ซึ่งเจริญในดินที่ปนเปื้อนพีเอเอชดังนี้ □ ฟลูออรีนและฟลูออแรนทิน, ■ ฟลูออรีน ฟลูออแรนทินและพีแนนทริน, ▒ ฟลูออรีน ฟลูออแรนทรินและแอนทราซีน ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างพีเอเอชแต่ละคู่ที่ความเข้มข้นเดียวกัน ส่วน * หมายถึงมีความแตกต่างจากการทดลองชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ตารางที่ 1 ค่า EC20 ของต้นกล้าข้าวโพดหวาน ถั่วพุ่ม และฟักทองอายุ 10 วันในดินที่มีการปนเปื้อนพีเอเอชที่ระดับความเข้มข้นรวมต่าง ๆ

พีเอเอช	ข้าวโพดหวาน			ถั่วพุ่ม			ฟักทอง		
	ความยาวราก	ความยาวยอด	น้ำหนักสด	ความยาวราก	ความยาวยอด	น้ำหนักสด	ความยาวราก	ความยาวยอด	น้ำหนักสด
แอนทราซิน	>400	>400	>400	14.3	11.5	>400	>400	34.4	>400
ฟิแนนทรีน	253.9	>400	>400	11.5	142.6	38.1	>400	328.4	>400
ฟลูออรีน และฟลูออแรนทีน	55.5	217.8	>400	>400	270.3	293.9	>400	188.9	>400
ฟลูออรีน ฟลูออแรนทีน และแอนทราซิน	28.6	17.2	22.3	113.0	190.4	10.9	12.4	97.5	119.1
ฟลูออรีน ฟลูออแรนทีน และฟิแนนทรีน	19.2	258.5	>400	100.8	145.3	229.1	184.8	72.5	108.5

ตารางที่ 2 ค่า additive index ของต้นกล้าข้าวโพดหวาน ถั่วพุ่ม และฟักทองอายุ 10 วันในดินที่มีการปนเปื้อนพีเอเอชที่ระดับความเข้มข้นรวมต่าง ๆ

พีเอเอช	ข้าวโพดหวาน			ถั่วพุ่ม			ฟักทอง		
	ความยาวราก additive index	ความยาวยอด additive index	น้ำหนักสด additive index	ความยาวราก additive index	ความยาวยอด additive index	น้ำหนักสด additive index	ความยาวราก additive index	ความยาวยอด additive index	น้ำหนักสด additive index
ฟลูออรีน ฟลูออแรนทีน และแอนทราซิน	0.29	0.06	0.06	4.10	8.63	0.03	0.03	1.68	0.30
ฟลูออรีน ฟลูออแรนทีน และฟิแนนทรีน	0.21	0.92	1	4.51	0.78	3.39	0.46	0.30	0.27

ทั้งน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งไวต่อความเป็นพิษของพีเอเอชสมน้อยกว่าความยาวรากและความยาวยอด โดยการปนเปื้อนร่วมกันระหว่างฟลูออรีน ฟลูออแรนทีนและแอนทราซินเท่านั้นที่เป็นพิษต่อน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของข้าวโพดหวาน โดยน้ำหนักสดจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เมื่อมีความเข้มข้นรวมของพีเอเอชตั้งแต่ 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ขึ้นไป (ภาพที่ 2A) เมื่อความเข้มข้นรวมของฟลูออรีน ฟลูออแรนทีน และแอนทราซินเป็น 22.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน จะทำให้น้ำหนักสดของข้าวโพดหวานลดลงร้อยละ 20 น้ำหนักสดไวต่อความเป็นพิษจากการปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชมากกว่าน้ำหนักแห้ง การ

ปนเปื้อนของฟลูออรีนและฟลูออแรนทีนแล้วมีฟิแนนทรีนร่วมด้วยไม่พบการเสริมฤทธิ์กันเมื่อพิจารณาจาก additive index ส่วนการปนเปื้อนของฟลูออรีนและฟลูออแรนทีนแล้วมีแอนทราซินร่วมด้วยจะเกิดการเสริมฤทธิ์กัน (ตารางที่ 2)

2. ความเป็นพิษของพีเอเอชที่ปนเปื้อนร่วมกันต่อการเจริญระยะต้นกล้าของถั่วพุ่ม

สารผสมระหว่างฟลูออรีนและฟลูออแรนทีนที่ความเข้มข้นรวมเพียง 2 และ 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน จะส่งผลกระทบต่อน้ำหนักสดของถั่วพุ่มเพิ่มขึ้นได้ ($P<0.05$) แต่เมื่อความเข้มข้นรวมเพิ่มขึ้นเป็น 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้งของดิน ทำให้ความสูงต้นของถั่วพุ่มลดลง

โดยความเข้มข้นรวมของสารทั้งสองเป็น 270.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน จึงจะส่งผลให้ความยาวยอดของถั่วพุ่มลดลงร้อยละ 20 การปนเปื้อนร่วมกันของ ฟิเอเอช 3 ชนิดทำให้ความสูงต้นของถั่วพุ่มลดลงเช่นกัน โดยความเข้มข้นรวมของฟลูออรีน ฟลูออแรนทรินและแอนทราซีน หรือฟลูออรีน ฟลูออแรนทินและฟิแนนทรินเป็น 190.4 และ 145.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน จึงทำให้ความสูงต้นของถั่วพุ่มลดลงร้อยละ 20 (ภาพที่ 1B) การปนเปื้อนของแอนทราซีนร่วมกับฟลูออรีนและฟลูออแรนทินทำให้เกิดการหักล้างฤทธิ์กันต่อความสูงต้นของถั่วพุ่ม ส่วนการปนเปื้อนของฟิแนนทรินร่วมกับฟลูออรีนและฟลูออแรนทินทำให้เกิดการเสริมฤทธิ์กัน

ความยาวรากของถั่วพุ่มไวต่อความเป็นพิษจากการปนเปื้อนร่วมกันของฟลูออรีน ฟลูออแรนทินและฟิแนนทรินมากที่สุดโดยที่ความเข้มข้นรวมเป็น 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ทำให้ความยาวรากของถั่วพุ่มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ภาพที่ 1E) ความเข้มข้นที่ทำให้ความยาวรากลดลงร้อยละ 20 คือ 100.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ในขณะที่การปนเปื้อนร่วมกันระหว่างฟลูออรีน ฟลูออแรนทรินและแอนทราซีนทำให้ความยาวรากของถั่วพุ่มลดลงร้อยละ 20 เมื่อความเข้มข้นรวมของสารทั้งสามเป็น 113 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน การปนเปื้อนร่วมกันของฟลูออรีนและฟลูออแรนทินเพียงสองชนิดต้องอยู่ในระดับความเข้มข้นที่สูงมากกว่า 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน จึงจะส่งผลให้ความยาวรากของถั่วพุ่มลดลงร้อยละ 20 การมีแอนทราซีนหรือฟิแนนทรินปนเปื้อนร่วมกับฟลูออรีนและฟลูออแรนทินทำให้เกิดการหักล้างฤทธิ์กันต่อความยาวรากของถั่วพุ่ม (ตารางที่ 2)

สารผสมระหว่างฟลูออรีน ฟลูออแรนทินและแอนทราซีนเป็นพิษต่อน้ำหนักสดของถั่วพุ่มมากที่สุด ที่ระดับความเข้มข้นตั้งแต่ 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ส่งผลให้น้ำหนักสดของถั่วพุ่มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ความเข้มข้นรวมของฟลูออรีนและฟลูออแรนทินและแอนทราซีนเพียง 10.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ส่งผลให้น้ำหนักสดของถั่วพุ่มลดลงร้อยละ 20 ขณะที่การปนเปื้อนร่วมกันระหว่างฟลูออรีน ฟลูออแรนทรินและฟิแนนทรินเป็นพิษต่ำกว่าโดยที่ความเข้มข้น 229 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ทำให้น้ำหนักสดของถั่วพุ่มลดลงร้อยละ 20 ส่วนการปนเปื้อนร่วมกันของฟิเอเอชเพียงสองชนิดเป็นพิษต่อน้ำหนักสดของถั่วพุ่มต่ำที่สุดโดยต้องมีความเข้มข้นรวมถึง 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน จึงจะให้น้ำหนักสดของถั่วพุ่มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และความเข้มข้นที่ทำให้น้ำหนักสดลดลงร้อยละ 20 คือ 293.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน (ตารางที่ 1) ความเป็นพิษของฟิเอเอชผสมต่อน้ำหนักแห้งของถั่วพุ่มมีแนวโน้มเช่นเดียวกับความเป็นพิษต่อน้ำหนักสดแต่น้ำหนักแห้งมีความไวต่อการปนเปื้อนร่วมกันระหว่างฟลูออรีน ฟลูออแรนทรินและฟิแนนทรินต่ำกว่าน้ำหนักสดโดยความเข้มข้นรวมต้องสูงถึง 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน จึงจะให้น้ำหนักแห้งของถั่วพุ่มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ภาพที่ 1E) การปนเปื้อนของฟลูออรีนและฟลูออแรนทินร่วมกับแอนทราซีนทำให้เกิดการเสริมฤทธิ์ แต่จะเกิดการหักล้างฤทธิ์ถ้าปนเปื้อนร่วมกับฟิแนนทริน

3. ความเป็นพิษของพีเอเอชที่ปนเปื้อนร่วมกันต่อการเจริญระยะต้นกล้าของฟักทอง

ผลของการปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชต่อความสูงต้นของฟักทองมีแนวโน้มเช่นเดียวกับถั่วพุ่ม โดยความเข้มข้นรวมของฟลูออรีนและฟลูออแรนทรินเพียง 2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน กระตุ้นให้ความสูงต้นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) แต่เมื่อความเข้มข้นรวมของฟลูออรีนและฟลูออแรนทริน หรือการปนเปื้อนร่วมกันระหว่างพีเอเอชสามชนิดที่ความเข้มข้นรวมตั้งแต่ 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ขึ้นไปกลับเป็นพิษโดยทำให้ความสูงต้นของฟักทองลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ภาพที่ 1C) การปนเปื้อนของแอนทราซีนร่วมกับฟลูออรีนและฟลูออแรนทริน หรือการปนเปื้อนของพีแนนทรินร่วมกับฟลูออรีนและฟลูออแรนทรินที่ความเข้มข้น 97.5 และ 72.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ทำให้ความสูงต้นของฟักทองลดลงร้อยละ 20 ส่วนการปนเปื้อนของพีแนนทรินร่วมกับฟลูออรีนมีความเป็นพิษต่อความสูงต้นต่ำสุด โดยความเข้มข้น 188.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้งของดิน ทำให้ความสูงต้นของฟักทองลดลงร้อยละ 20

ความเป็นพิษร่วมกันของพีเอเอชต่อความยาวรากของฟักทองมีแนวโน้มคล้ายกับความสูงต้น เพียงแต่ที่ระดับความเข้มข้นรวมเพียง 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้งของดิน ขึ้นไปของฟลูออรีน ฟลูออแรนทริน และแอนทราซีนทำให้ความยาวรากของฟักทองลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ตารางที่ 1) และ ความเข้มข้นรวมของพีเอเอชสามชนิดเพียง 12.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้งของดิน ทำให้ความยาวรากลดลงร้อยละ 20 ส่วนการปนเปื้อนร่วมกันระหว่างฟลูออรีน ฟลูออแรนทรินและพีแนนทรินเป็น

พิษต่ำกว่าโดยจะทำให้ความยาวของฟักทองลดลงเมื่อมีความเข้มข้นตั้งแต่ 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้งของดิน ขึ้นไป และความเข้มข้นที่ทำให้ความยาวรากลดลงร้อยละ 20 คือ 184.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้งของดิน การปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชเพียงสองชนิดไม่ทำให้ความยาวรากลดลงแม้ที่ความเข้มข้นสูงถึง 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้งของดิน แต่ทำให้ความยาวยอดลดลงที่ความเข้มข้นสูงสุด การปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชสองชนิดไม่ทำให้ความยาวรากของฟักทองลดลงแม้ใช้ความเข้มข้นสูงถึง 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้งของดิน (ภาพที่ 1F)

การปนเปื้อนร่วมกันระหว่างพีเอเอชสองชนิดที่ทุกระดับความเข้มข้นไม่เป็นพิษต่อน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของฟักทอง น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของฟักทองลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเจริญในดินที่ปนเปื้อนด้วยฟลูออรีน ฟลูออแรนทรินและแอนทราซีน หรือฟลูออรีน ฟลูออแรนทรินและพีแนนทริน ($P < 0.05$) การปนเปื้อนร่วมกันของแอนทราซีนกับฟลูออรีนและฟลูออแรนทริน หรือพีแนนทรินกับฟลูออรีนและฟลูออแรนทรินที่ความเข้มข้น 119.1 และ 108.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้งของดิน ส่งผลให้น้ำหนักสดของฟักทองลดลงร้อยละ 20 (ตารางที่ 1)

เมื่อพิจารณาผลร่วมของการปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอช พบว่า การมีพีแนนทรินปนเปื้อนร่วมกับฟลูออรีนหรือฟลูออแรนทรินทำให้เกิดการเสริมฤทธิ์กันต่อความยาวราก ความสูงต้นและน้ำหนักสดของฟักทอง ในขณะที่การมีแอนทราซีนปนเปื้อนร่วมกับฟลูออรีนและฟลูออแรนทรินเกิดการหักล้างฤทธิ์ต่อความสูงต้นของฟักทองเพิ่มขึ้น แต่หักล้างฤทธิ์ต่อความยาวรากและน้ำหนักสด (ตารางที่ 2)

บทสรุปและวิจารณ์

การปนเปื้อนร่วมกันของฟิเอเอซสามชนิด ได้แก่ ฟลูออรีน ฟลูออแรนทีน และแอนทราซีน หรือ ฟลูออรีน ฟลูออแรนทีนและฟิแนนทรีนเป็นพิษต่อทั้ง ความสูงต้น ความยาวรากและน้ำหนักสดของข้าวโพดหวาน โดยการปนเปื้อนร่วมกันระหว่างฟลูออรีน ฟลูออแรนทีนและแอนทราซีนมีแนวโน้มเป็นพิษสูงกว่า เมื่อสังเกตจากการเจริญเติบโตที่ได้รับผลกระทบทั้ง ความยาวราก ความยาวยอดและน้ำหนักสด ฟิเอเอซที่ ปนเปื้อนร่วมกันลดทั้งความยาวราก ความสูงต้น และ น้ำหนักสด น้ำหนักสดของพืชที่ลดลงนั้น อาจเกิดจากระบบรากของพืชถูกทำลายไปเพราะความยาวรากของ ข้าวโพดหวานลดลงเช่นกัน จึงทำให้ประสิทธิภาพในการลำเลียงน้ำเข้าสู่เซลล์ลดลง น้ำหนักสดจึงลดลงตามไปด้วย ซึ่งพัฒนาการของรากส่งผลต่อการเจริญของพืช ถ้าหากมีพัฒนาการที่ไม่ดีจะทำให้การดูดซึมสารอาหาร ของพืชลดลงตามไปด้วย เช่น การสัมผัสกับฟลูออแรนทีนในพืชตระกูลถั่วทำให้การลำเลียงแร่ธาตุลดลงเช่นกัน (Kummerová et al., 2006)

ในขณะที่การตอบสนองของพืชวงศ์หญ้าต่อการได้รับครีโอโซตกลับแตกต่างกันไป เช่น Tall fescue, Kentucky blue grass และ Wild rye จะสะสมน้ำมากขึ้น ซึ่งการสะสมน้ำมากขึ้นเป็นดัชนีแสดง ถึงความทนทานต่อสารมลพิษของพืช โดยปริมาณน้ำที่มากขึ้นภายในเซลล์จะช่วยเจือจางสารมลพิษที่ถูก ลำเลียงเข้าสู่เซลล์พืชทำให้พืชได้รับผลกระทบที่น้อยลง (Huang et al., 2004) แต่ในการศึกษานี้ ข้าวโพดหวานเป็นพืชที่ไวต่อความเป็นพิษของฟิเอเอซเมื่อสังเกตจากความยาวราก ความสูงต้นและน้ำหนัก เป็นพิษของฟิเอเอซส่วนใหญ่เกิดจากฟิเอเอซทำลาย ระบบสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช เช่น ผลิตภัณฑ์จาก แอนทราซีนยับยั้งการสังเคราะห์ด้วยแสงและการขนส่ง

อิเล็กตรอนในแถบเปิด G-3 (Mallakin et al., 2002) โครงสร้างที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ด้วยแสงเป็นส่วนของพืชที่อยู่เหนือดิน ดังนั้นเมื่อยอดได้รับผลกระทบอาจเป็นเพราะระบบการสังเคราะห์ด้วยแสง ถูกทำลาย ทำให้พัฒนาการของพืชลดลง และเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ชีวมวลของพืชลดลง (Kummerová et al., 2008)

ถั่วพุ่มมีแนวโน้มทนทานต่อการปนเปื้อนร่วมกันของฟิเอเอซมากกว่าข้าวโพดหวาน นอกจากนี้ การปนเปื้อนร่วมกันของฟิเอเอซสองชนิดที่ระดับความเข้มข้นต่ำกระตุ้นให้ความสูงต้นเพิ่มขึ้น การที่พืชได้รับ สารพิษที่ความเข้มข้นต่ำแล้วมีการเจริญเติบโตที่ดีขึ้น เนื่องจากพืชมีการสร้างเนื้อเยื่อชดเชยเนื้อเยื่อส่วนที่ถูก ทำลายไป (Wieczorek and Wieczorek, 2008) ถั่วพุ่มเป็นพืชที่มีแนวโน้มทนทานต่อการปนเปื้อนของฟิเอเอซในการศึกษานี้มากกว่าข้าวโพด ในขณะที่ฟักทองเป็น พืชที่มีแนวโน้มทนทานต่อการปนเปื้อนร่วมกันของ ฟิเอเอซมากกว่าข้าวโพดหวานและถั่วพุ่มโดยที่ความเข้มข้นระดับต่ำของฟลูออรีนและฟลูออแรนทีนส่งเสริม การเจริญของยอดเช่นกัน นอกจากนี้พืชในวงศ์แตงมี รายงานว่าทนทานต่อสารพิษหลายชนิดรวมทั้งมีการ นำมาใช้ฟื้นฟูสภาพแวดล้อมที่ปนเปื้อนสารมลพิษ อินทรีย์ เช่น ฟักทองชนิด *Cucurbita pepo* spp. *pepo* สะสมดีดีที และพอลิไซคลิกอะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอนที่มีมวลโมเลกุลสูงได้ (Åuslund et al., 2010; Parrish et al., 2006)

การปนเปื้อนร่วมกันของฟลูออรีน และ ฟลูออแรนทีนแล้วมีแอนทราซีนหรือฟิแนนทรีนร่วม ด้วยมีแนวโน้มเป็นพิษต่อพืชในการทดลองนี้มากกว่า การปนเปื้อนร่วมกันของสารเพียงสองชนิดคือฟลูออรีน และฟลูออแรนทีน โดยการมีแอนทราซีนร่วมด้วยมี แนวโน้มเป็นพิษมากกว่า โดยเฉพาะน้ำหนักสด ความ

ยารากและความสูงต้นของข้าวโพดหวานไวต่อการปนเปื้อนร่วมกันของฟลูออรีน ฟลูออแรนทีนและแอนทราซีนมากที่สุด ซึ่งผลที่ได้นี้ต่างจากการตอบสนองของต้นกล้าข้าวโพดข้าวเหนียว ข้าวฟ่าง และข้าวเจ้า ที่ไวต่อการปนเปื้อนร่วมกันของฟลูออรีน ฟลูออแรนทีนและฟิแนนทรีนมากกว่า มีเพียงความยารากและน้ำหนักแห้งของข้าวเจ้าที่ไวต่อการปนเปื้อนร่วมกันของฟลูออรีน ฟลูออแรนทีนและแอนทราซีนมากกว่า (ชนิษฐา และคณะ, 2554b) ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเป็นพิษร่วมกันระหว่างฟลูออรีนและฟลูออแรนทีนกับแอนทราซีนหรือฟิแนนทรีนมีแนวโน้มทำให้ความเป็นพิษเพิ่มมากขึ้น แต่การเพิ่มแอนทราซีนหรือฟิแนนทรีนจะเป็นพิษมากกว่ากันนั้นขึ้นกับชนิดพืชที่ทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- ชนิษฐา สมตระกูล ดวงมล ผลาผล จำปี ไชยเมืองคุณ และ วราภรณ์ อูยฉาย. (2554a). ความเป็นพิษของฟลูออแรนทีนและฟิแนนทรีนที่ปนเปื้อนในดินต่อการเจริญของพืชเศรษฐกิจระยะต้นกล้า. วารสารวิชาการและวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน. 4(1): 19-26.
- ชนิษฐา สมตระกูล จำปี ไชยเมืองคุณ และวราภรณ์ อูยฉาย. (2554b). ความเป็นพิษร่วมของแอนทราซีนและฟิแนนทรีนในดินที่ปนเปื้อนฟลูออรีนและฟลูออแรนทีนต่อการเจริญในระยะต้นกล้าของพืชเศรษฐกิจวงศ์หญ้า. วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 1: 31-42.
- Amagai, T., Takahashi, Y. and Matsushita, H. (1999). A Survey on polycyclic aromatic hydrocarbons concentration in soils in Chiangmai, Thailand. Environmental International 25(5): 563-572.
- Åslund, M. L. W., Lunney, A. L., Rutter, A. and Zeeb, B. A. (2010). Effects of amendments on the uptake and distribution of DDT in *Cucurbita pepo* spp. *pepo* plants. Environmental Pollution 158: 508-513.
- Boonyatumanond, R., Wattayakorn, G., Togo, A. and Takada, H. (2006). Distribution and origins of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in riverine, estuarine, and marine sediments in Thailand. Marine Pollution Bulletin 52: 942-956.
- Calvelo Pereira, R. and Monterroso, C. and Macias, F. (2010). Phytotoxicity of hexachlorocyclohexane: Effect on germination and early growth of different plant species. Chemosphere 79: 326-333.
- Chen, C. and Lu, C. (2002). An analysis of the combine effect of organic toxicants. Science of the Total Environment 289: 123-132.
- Chouychai, W., Tongkukiatkul, A., Upatham, S., Lee, H., Pokethitiyook, P. and Kruatrachue, M. (2008). Phenanthrene and pyrene toxicity on shoot and root elongation of corn and groundnut growing in acidic soil. 9th National Graduate Research Conference. March 14 -15, 2008. Graduated School, Burapha University. 8 pages
- Echols, K.R., Brumbaugh, W.G., Orazio, C.E., May, T.W., Poulton, B.C. and Peterman, P.H. (2008). Distribution of pesticides, PAHs, PCBs, and bioavailable metals in depositional sediment of the lower Missouri river, U.S.A. Archive of Environmental Contamination and Toxicology 55: 161-172.
- Gao, Y. and Zhu, L. (2004). Plant uptake, accumulation and translocation of phenanthrene and pyrene in soils. Chemosphere 55: 1169-1178.

- Kirk, J. L., Klironomos, J. N., Lee, H. and Trevors, J. T. (2002). Phytotoxicity assay to assess plant species for phytoremediation of petroleum contaminated soil. *Bioremediation Journal* 6: 57-63.
- Kummerová, M., Váňová, L., Krulová, J. and Zezulka, Š. (2008). The use of physiological characteristics for comparison of organic compounds phytotoxicity. *Chemosphere* 71: 2050-2059.
- Kummerová, M., Krulová, J., Zezulka, Š. and Tříska, J. (2008). Evaluation of fluoranthene phytotoxicity in pea plants by Hill reaction and chlorophyll fluorescence. *Chemosphere* 65: 489-496.
- Hoshiko, T., Yamamoto, K., Nakajima, F. and Prueksasit, T. (2011). Time series analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons and vehicle exhaust in roadside air environment in Bangkok, Thailand. *Procedia Environmental Sciences* 4: 87-94.
- Huang, X.D., El-Alawi, Y., Penrose, D. M., Glick, B.R. and Greenberg, B.M. (2004). Responses of three grass species to creosote during phytoremediation. *Environmental Pollution* 130: 453-463.
- Malalkin, A., Sudhakar, T., Dixon, D.G. and Greenberg, B.M. (2002). Sites of toxicity of specific photooxidation products of anthracene to higher plants: Inhibition of photosynthetic activity and electron transport in *Lemna gibba* L. G-3 (Duckweed). *Environmental Toxicology* 17: 462-471.
- Parrish, Z. D., White, J. C., Isleyen, M., Gent, M. P. N., Iannucci-Berger, W., Eiter, B. D., Kelsey, J. W. and Mattina, M. I. (2006). Accumulation of weathered polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHS) by plant and earthworm species. *Chemosphere* 64: 609-618.
- Roy, S., Labelle, S., Mehta, P., Mihoc, A., Fortin, N., Masson, C., Leblanc, R., Chateaufneuf, G., Sura, C., Gallipeau, C., Olsen, C., Delisle, S., Labrecque, M. and Greer, C.W. (2005). Phytoremediation of heavy metal and PAH-contaminated brownfield sites. *Plant and Soil* 272: 277-290.
- Sverdrup, L.E., Krough, P.H., Nielsen, T., Kjaer, C. and Stenersen, J. (2003). Toxicity of eight polycyclic aromatic compounds to red clover (*Trifolium pratense*), ryegrass (*Lolium perenne*), and mustard (*Sinapsis alba*). *Chemosphere* 53: 993-1003.
- Wang, L., Zheng, B. and Meng, W. (2008). Photo-induced toxicity of four polycyclic aromatic hydrocarbons, singly and in combination, to the marine diatom *Phaeodactylum tricornutum*. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 71: 465-472.
- Wieczorek, J.K. and Wieczorek, Z. J. (2008). Phytotoxicity and accumulation of anthracene applied to the foliage and sandy substrate in lettuce and radish plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 66(3): 369-377.
- Zehetner, F., Rosenfellner, U., Mentler, A. and Gerzabek, M.H. (2009). Distribution of road salt residues, heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons across a highway-forest interface. *Water, Air, and Soil Pollution* 198: 125-132.

