

การประเมินความเป็นพิษของพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อน ร่วมกันในดินต่อการเจริญในระยะต้นกล้าของพืชเศรษฐกิจวงศ์ถั่ว Phytotoxicity Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Co-Contamination in Soil during Economic Legume Seedling Growth

ชนิษฐา สมตระกูล^{1*} ดวงอนงค์ ผลาผล² และวราภรณ์ ฉุยฉาย³

¹อาจารย์ ²นักศึกษา ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44150

³อาจารย์ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ จังหวัดนครสวรรค์ 60000

บทคัดย่อ

การศึกษาความเป็นพิษร่วมกันของพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) ที่พบบ่อย 4 ชนิด คือ แอนทราซีน ฟลูออรีน ฟลูออแรนทีน และฟิแนนทรีนที่ปนเปื้อนในดินต่อการเจริญระยะต้นกล้าของพืชเศรษฐกิจวงศ์ถั่ว 3 ชนิด คือ ถั่วพุ่ม ถั่วเขียว และถั่วฝักยาว ผลพบว่า การเจริญเติบโตของถั่วเขียวมีความไวต่อการปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชมากกว่าถั่วพุ่มและถั่วฝักยาว การปนเปื้อนร่วมกันระหว่างฟลูออรีน ฟิแนนทรีน ฟลูออแรนทีน และแอนทราซีนทั้งสี่ชนิด ยังแสดงความเป็นพิษต่อพืชวงศ์ถั่วมากกว่าการปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชแต่ละคู่ ส่วนความยาวยอดและน้ำหนักสดของต้นกล้ามีความไวต่อการปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชสี่ชนิดมากกว่าความยาวราก ในส่วนน้ำหนักแห้งของต้นกล้ายังมีความไวต่อการปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชทุกแบบในลักษณะที่เกิดขึ้นน้อยที่สุด

Abstract

This research studied combined toxicities of 4 generally found Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) - anthracene, fluorene, fluoranthene, and phenanthrene – during growth of 3 legume seedlings - cow pea, mungbean, and longbean - planted in varied combination of PAH contaminant in soil. Results showed that mungbean growth was more sensitive to PAH co-contaminated soil than cow pea and longbean. Co-contamination of all 4 PAHs was more toxic to legume than each pair of PAHs. Shoot length and fresh weight of legume seedling were more sensitive to co-contamination of all 4 PAHs than root length. Dry weight of legume seedling was the least sensitive to co-contamination of all PAHs.

คำสำคัญ : แอนทราซีน ฟลูออรีน ฟลูออแรนทีน ฟิแนนทรีน

Keywords : Anthracene; Fluorene; Fluoranthene; Phenanthrene

* ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ skhanitta@hotmail.com โทร. 08 0755 7771

1. บทนำ

พอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (พีเอเอช; PAHs) เป็นสารมลพิษอินทรีย์ที่แพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของสารอินทรีย์ และกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การใช้เชื้อเพลิงจากถ่านหิน อุตสาหกรรมปิโตรเคมี รั่วไหลจากการขุดเจาะน้ำมัน และอุบัติเหตุจากเรืออับปาง การปนเปื้อนของพีเอเอชพบกันทั่วโลก รวมทั้งประเทศไทยด้วย โดยเฉพาะมักพบในแหล่งอุตสาหกรรมรวมทั้งบริเวณที่มีการทำเกษตรกรรม (Hao et al., 2007)

การปนเปื้อนของพีเอเอชในดินย่อมส่งผลกระทบต่อพืชหลายลักษณะ เช่น ควบคุมการเลือกผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์และทำให้สมดุลของไอออนในเซลล์เสียไป ทำลายคลอโรฟิลล์ ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการขนส่งอิเล็กตรอน และทำให้พืชเกิดสีเหลือง (วรภรณ์, 2554) เช่น การปนเปื้อนของฟลูออแรนทีนในดินสามารถลดน้ำหนักสดของข้าวฟ่างและผักบุ้ง นอกจากนี้การปนเปื้อนของพีแนนทรินยังลดความยาวยอดของข้าวฟ่างและผักบุ้ง (ขนิษฐา และคณะ, 2554a) การได้รับแอนทราซีนผ่านทางใบและการปนเปื้อนในดินยังมีผลทำให้ชีวมวลของรากผักกาดหอมและผักกาดหัวลดลงตามลำดับ (Wieczorek and Wieczorek, 2007)

รายงานเกี่ยวกับความเป็นพิษของพีเอเอชแต่ละชนิดต่อพืชมีเป็นจำนวนมาก แต่การศึกษาความเป็นพิษของพีเอเอชที่ปนเปื้อนร่วมกันในดินต่อพืชยังมีน้อย ทั้งที่ความเป็นพิษของพีเอเอชที่ปนเปื้อนร่วมกันอาจจะมีความเป็นพิษต่างไปจากพีเอเอชชนิดเดียวได้ เช่น สาหร่ายทะเลชนิด *Phaeodactylum tricornutum* จะไวต่อการ

ปนเปื้อนร่วมกันระหว่างฟลูออแรนทีนกับไพรีนในน้ำมากกว่าการปนเปื้อนเพียงชนิดเดียว (Wang et al., 2008) การศึกษาครั้งนี้จึงศึกษาเปรียบเทียบความเป็นพิษของพีเอเอชที่ปนเปื้อนร่วมกันจำนวนสองชนิด ได้แก่ ฟลูออรีนและพีแนนทริน แอนทราซีน และฟลูออแรนทีน ฟลูออรีนและแอนทราซีน พีแนนทรินและฟลูออแรนทีน เป็นต้น และครอบคลุมรวมถึงลักษณะการปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชทั้งสี่ชนิดต่อการเจริญในระยะต้นกล้าของพืชวงศ์ถั่ว ได้แก่ ถั่วพุ่ม (*Vigna. sinensis*) ถั่วเขียว (*V. radiata*) และถั่วฝักยาว (*V. sesquipedalis*) โดยพีเอเอชที่ต้องการทดสอบเป็นสารที่ต้องกำจัดออกไปจากสิ่งแวดล้อมอย่างเร่งด่วนตามรายการของ US. EPA. (Hao et al., 2007) นอกจากนี้ผลลัพธ์และข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนการฟื้นฟูดินในบริเวณที่มีการปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชต่อไป

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมดิน

เก็บดินที่ไม่มีประวัติการปนเปื้อนด้วยพีเอเอชมาจากพื้นที่ในวัดป่ากู่แก้ว ต.ขามเรียง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม และนำดินมาผึ่งให้แห้ง แล้วร่อนด้วยตะแกรงที่มีขนาดรูพรุน 2 มิลลิเมตร ทำการวิเคราะห์ปริมาณพีเอเอชที่ตกค้างอยู่ในดินด้วย GC-MS เพื่อยืนยันถึงการไม่ปนเปื้อนด้วยพีเอเอชมาก่อน นอกจากนี้ ยังทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของดิน ณ บริษัทห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด สาขาขอนแก่น โดยดินที่ใช้มีร้อยละขนาดอนุภาคทราย (% sand) ขนาดอนุภาคทรายแป้ง (% silt) และขนาดอนุภาคดินเหนียว (% clay) เท่ากับ 10.23,

15.33 และ 74.44 ตามลำดับ ส่วนคุณสมบัติอื่น ๆ ของดิน ได้แก่ pH 8.11 ความนำไฟฟ้า 109.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ปริมาณอินทรียวัตถุร้อยละ 2.40 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดร้อยละ 0.29 ปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชนำไปใช้ได้ 58.38 mg/kg

จากนั้นทำการละลายแอนทราซีน (ความบริสุทธิ์ 98% บริษัท Fluka ประเทศสหรัฐอเมริกา) ฟิแนนทริน (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 บริษัท Sigma-Aldrich ประเทศเยอรมนี) ฟลูออรีน (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 บริษัท Sigma-Aldrich ประเทศเยอรมนี) หรือฟลูออแรนทีน (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 บริษัท Fluka ประเทศสหรัฐอเมริกา) ในอะซิโตนแล้วเติมลงดินให้มีความเข้มข้นสุดท้ายของสารผสมระหว่างฟลูออรีนและฟิแนนทริน แอนทราซีนและฟลูออแรนทีน ฟลูออรีนและแอนทราซีน ฟิแนนทรินและฟลูออแรนทีนในอัตราส่วน 1:1 เป็น 0, 2, 20, 200 และ 400 mg/kg ส่วนดินที่ปนเปื้อนด้วยพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนทั้งสี่ชนิดก็ปฏิบัติเช่นเดียวกัน โดยมีอัตราส่วนของพีเอเอชทั้งสี่ชนิดเป็น 1:1:1:1 และความเข้มข้นรวมสุดท้ายในดินเป็น 0, 2, 20, 200 และ 400 mg/kg ตามลำดับ ทำการฝังดินที่ผสมแล้วในตู้ควั่นเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวทำลายระเหยไป หลังจากนั้นแบ่งดินในจำนวน 50 กรัมใส่ลงไปในภาชนะพลาสติกที่มีความจุ 120 มิลลิลิตร โดยใช้ดินที่ไม่เติมพีเอเอชชนิดใดเลยเป็นชุดควบคุม และปรับความชื้นของดินให้เป็นร้อยละ 65 ก่อนเริ่มต้นการทดลอง

2.2 การทดสอบความเป็นพิษต่อพืช

วิธีการทดสอบความเป็นพิษได้ทำการดัดแปลงมาจากวิธีของ Kirk et al. (2002) โดยแช่เมล็ดพันธุ์ถั่วพุ่ม ถั่วเขียว และถั่วฝักยาว (บริษัทเจียไต๋

ประเทศไทย จำกัด) ในน้ำกลั่นเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง แล้วเพาะในถาดพลาสติกที่มีดินที่ปนเปื้อนที่เตรียมไว้ในแต่ละระดับความเข้มข้น ในจำนวน 10 เมล็ด ต่อระดับความเข้มข้น (ทำสามซ้ำ) และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้ได้รับแสงธรรมชาติ ทำการรดน้ำทุกวันเพื่อรักษาความชื้นในดินให้คงที่เมื่อครบกำหนดระยะเวลา 10 วัน แล้ววัดค่าร้อยละการงอก ความยาวราก ความยาวยอด น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งของต้นกล้าทั้งต้น ชุดควบคุมก็ปฏิบัติเช่นเดียวกัน

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างทรีทเมนต์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยด้วย Turkey's Test ส่วนการประเมินความเข้มข้นที่ทำให้การเจริญของพืชลดลงร้อยละ 20 (EC_{20}) ได้เลือกใช้วิธี Probit Analysis และคำนวณหาค่า Additive index เพื่อประเมินผลรวมของสารมลพิษตามวิธีการที่ระบุไว้อย่างชัดเจนของ Wang et al. (2008) และ Chen and Lu (2002)

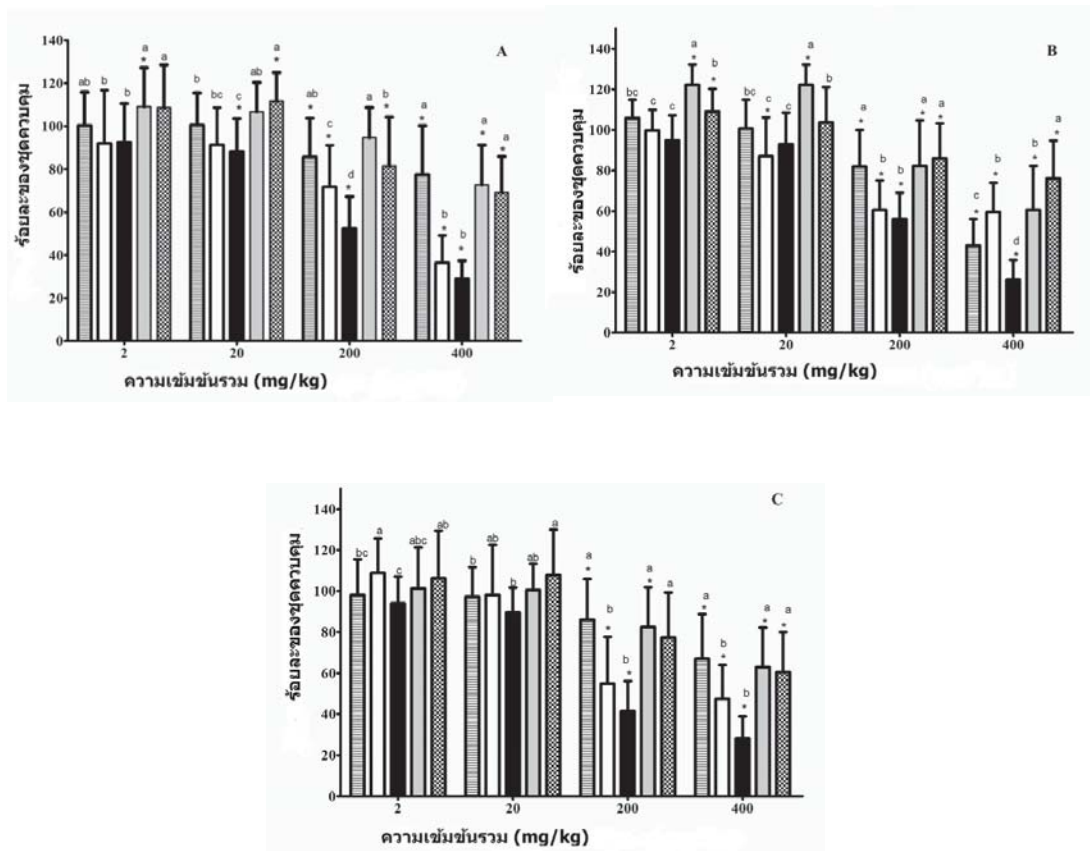
3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 ผลของพีเอเอชต่อการเจริญของถั่วพุ่ม

ความยาวยอดของถั่วพุ่มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีฟลูออรีนและแอนทราซีน หรือฟิแนนทริน และฟลูออแรนทีนปนเปื้อนร่วมกันในดินที่ระดับความเข้มข้น 2 และ 20 mg/kg (รูปที่ 1) ลักษณะการปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชสี่ชนิดในดินแสดงความเป็นพิษต่อถั่วพุ่มอย่างชัดเจน และพบเห็นอยู่มากกว่าการปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชสองชนิด

โดยที่ระดับความเข้มข้นรวมของพีเอเอชตั้งแต่ 20 mg/kg ขึ้นไปส่งผลทำให้ความยาวยอดของถั่วพุ่มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ส่วนคู่ของพีเอเอชที่แสดงความเป็นพิษต่อความยาวยอดของถั่วพุ่มรองลงมาจากพีเอเอชทั้งสี่ชนิด ได้แก่ การปนเปื้อนร่วมกันระหว่างแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนซึ่งส่งผลทำให้ความยาวยอดลดลง

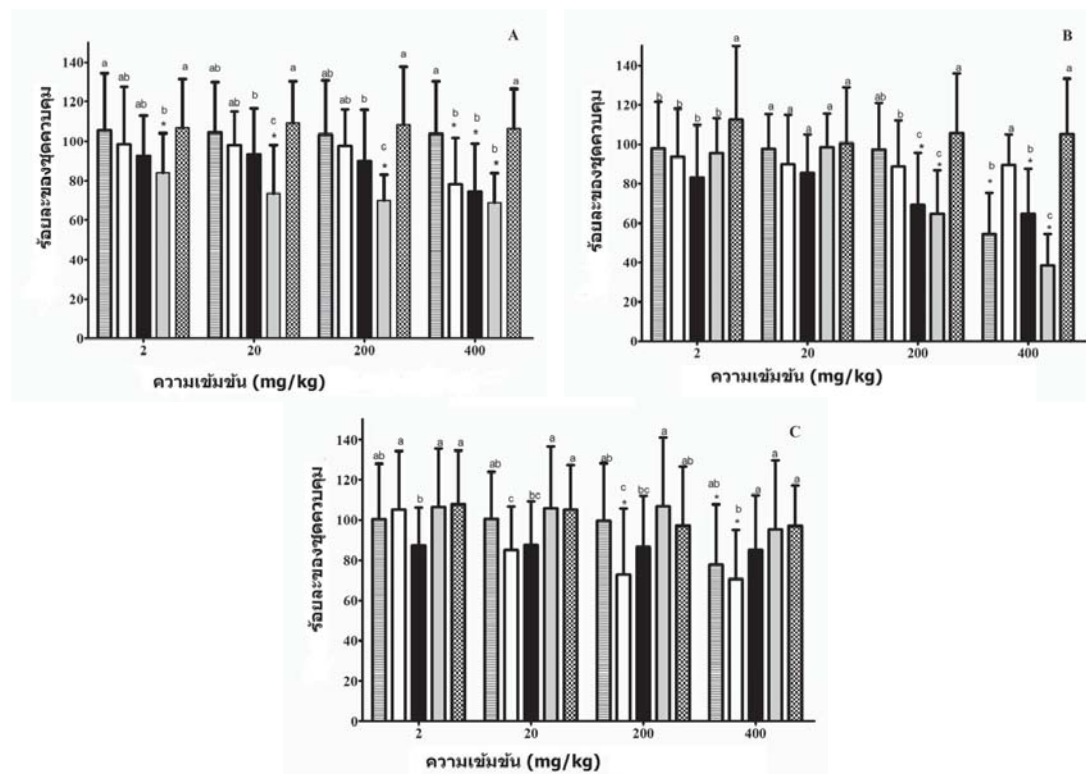
เมื่อระดับความเข้มข้นรวมตั้งแต่ 200 mg/kg ขึ้นไป ส่วนคู่ของพีเอเอชอื่น ๆ จะเป็นพิษต่อถั่วพุ่มเมื่อมีการปนเปื้อนอยู่ในดินที่ความเข้มข้น 400 mg/kg และเป็นพิษในระดับต่ำกว่าการปนเปื้อนของพีเอเอชทั้งสี่ชนิดหรือคู่ของแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่ความเข้มข้นเดียวกัน



รูปที่ 1 ลักษณะความยาวยอดของถั่วพุ่ม (A) ถั่วเขียว (B) และถั่วฝักยาว (C) ในระยะต้นกล้าที่เจริญในดินที่ปนเปื้อนพีเอเอชเป็นเวลา 10 วัน สัญลักษณ์ : ■ ฟลูออรีนและพีแนทรีน; □ แอนทราซีนและฟลูออแรนทีน; ■ ฟลูออรีนและแอนทราซีน; ▨ พีแนทรีนและฟลูออแรนทีน และ ■ พีเอเอชทั้งสี่ชนิด ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ระหว่างพีเอเอชผสมแต่ละแบบที่ระดับความเข้มข้นรวมเดียวกัน ส่วน * หมายถึง พีเอเอชผสมแต่ละความเข้มข้นมีความแตกต่างจากดินที่ไม่ปนเปื้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ลักษณะความเป็นพิษของพีเอเอชต่อความยาวรากของถั่วพุ่มแตกต่างออกไปจากความเป็นพิษต่อความยาวยอด โดยคู่ของสารที่ทำให้ความยาวรากของถั่วพุ่มลดลงมากที่สุด ได้แก่ ฟลูออรีนและแอนทราซีน ซึ่งลดความยาวรากของถั่วพุ่มลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตั้งแต่ระดับความเข้มข้นรวมตั้งแต่ 2 mg/kg ขึ้นไป (รูปที่ 2) โดยความเข้มข้นที่ทำให้ความยาวรากของถั่วพุ่มลดลงร้อยละ 20 คือ 5.41 mg/kg (ตารางที่ 1) ในขณะที่การปนเปื้อนของพีเอเอชทั้ง 4 ชนิด หรือการปนเปื้อนร่วมกันของแอนทราซีนและฟลูออแรนทินแสดง

ความเป็นพิษต่อความยาวรากที่ความเข้มข้นรวมเป็น 400 mg/kg ซึ่งทำให้ความยาวรากลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ในขณะที่คู่ของฟลูออรีนและพีแนทรีนหรือพีแนทรีนและฟลูออแรนทินไม่แสดงความเป็นพิษต่อถั่วพุ่ม (รูปที่ 2) นอกจากผลของฟลูออรีนและแอนทราซีนแล้ว การปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชชนิดอื่น ๆ หรือการปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชสี่ชนิดยังมีผลทำให้ความยาวรากของถั่วพุ่มลดลงร้อยละ 20 เมื่อมีระดับความเข้มข้นรวมของสารในดินมากกว่า 400 mg/kg (ตารางที่ 1)



รูปที่ 2 ลักษณะความยาวรากของถั่วพุ่ม (A) ถั่วเขียว (B) และถั่วฝักยาว (C) ในระยะต้นกล้าที่เจริญในดินที่ปนเปื้อนพีเอเอชเป็นเวลา 10 วัน สัญลักษณ์ : ▨ ฟลูออรีนและพีแนทรีน; □ แอนทราซีนและฟลูออแรนทิน; ▩ ฟลูออรีนและแอนทราซีน; ▤ พีแนทรีนและฟลูออแรนทิน และ ■ พีเอเอชทั้งสี่ชนิด ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ระหว่างพีเอเอชผสมแต่ละแบบที่ระดับความเข้มข้นรวมเดียวกัน ส่วน * หมายถึง พีเอเอชผสมแต่ละความเข้มข้นมีความแตกต่างจากดินที่ไม่ปนเปื้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ตารางที่ 1 ค่าความเข้มข้นของฟิเอเอช (mg/kg) ที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชร้อยละ 20 (EC_{20}) และค่า Additive Index (AI) ของต้นกล้า ถั่วพุ่ม ถั่วเขียว และถั่วฝักยาวที่เจริญในดินที่ปนเปื้อนฟิเอเอชชนิดต่าง ๆ ร่วมกัน

ชนิดของฟิเอเอช	ถั่วพุ่ม		ถั่วเขียว		ถั่วฝักยาว	
	ความยาวราก	AI น้ำหนักสด	AI	ความยาวราก	AI	น้ำหนักสด
ฟลูออรีน+พีแนมทรีน	>400	-	>400	-	201.9	>400
ฟลูออรีน+พีแนมทรีน	>400	-	>400	-	>400	>400
ฟลูออรีน+พีแนมทรีน	5.41	-	233.8	-	56.9	>400
ฟลูออรีน+พีแนมทรีน	>400	-	>400	-	>400	>400
4 ฟิเอเอช	>400	-	58.4	-	16.0	>400
(ฟลูออรีน+ พีแนมทรีน) + (ฟลูออรีน+พีแนมทรีน)	1	0.15	0.06	0.08	0.06	1.07
(ฟลูออรีน+พีแนมทรีน) + (ฟลูออรีน+พีแนมทรีน)	3.75	0.2	0.16	0.09	0.16	0.09
(ฟลูออรีน+พีแนมทรีน) + (ฟลูออรีน+พีแนมทรีน)						

สำหรับลักษณะความเป็นพิษร่วมกันของพีเอเอช 4 ชนิด พบว่า มีการเสริมฤทธิ์ซึ่งกันและกัน เพราะการปรากฏของพีเอเอช 4 ชนิด แสดงความเป็นพิษต่อการเจริญเติบโตมากกว่าการปนเปื้อนพีเอเอช 2 ชนิด โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการปนเปื้อนร่วมกันของฟลูออรีนและแอนทราซีนกับการปนเปื้อนร่วมกันของฟลูออแรนทรีนและพีแนทรีน ต่อความยาวรากของถั่วพุ่ม (ตารางที่ 1)

การปนเปื้อนของพีเอเอชแต่ละคู่และการปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชสี่ชนิดมีผลทำให้น้ำหนักสดของถั่วพุ่มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ที่ระดับความเข้มข้นรวม 400 mg/kg (รูปที่ 3) การปนเปื้อนของพีเอเอชสี่ชนิดยังแสดงความเป็นพิษต่อน้ำหนักสดมากที่สุดและรองลงมาคือ การปนเปื้อนร่วมกันระหว่างฟลูออรีนและแอนทราซีน โดยระดับความเข้มข้นรวมของพีเอเอช 4 ชนิด และฟลูออรีนและแอนทราซีนที่ทำให้น้ำหนักสดลดลงร้อยละ 20 คือ 58.4 และ 233.8 mg/kg ตามลำดับ (ตารางที่ 1) ส่วนความเป็นพิษร่วมกันของพีเอเอช 4 ชนิด พบว่า มีการเสริมฤทธิ์ กล่าวคือ ถ้าพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการปนเปื้อนร่วมกันของฟลูออรีนและพีแนทรีนกับคู่ของฟลูออแรนทรีนและแอนทราซีน หรือการปนเปื้อนของฟลูออรีนและแอนทราซีนรวมกันกับคู่ของฟลูออแรนทรีนและพีแนทรีน (ตารางที่ 1)

น้ำหนักแห้งของถั่วพุ่มมีความไวต่อการปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอช 4 ชนิดมากที่สุดเช่นกัน โดยที่ระดับความเข้มข้น 2 และ 20 mg/kg มีผลทำให้น้ำหนักแห้งลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ในขณะที่การปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชคู่อื่น ๆ ที่ระดับความเข้มข้นรวมเดียวกันนี้

กลับไม่ทำให้น้ำหนักแห้งของถั่วพุ่มลดลง การปนเปื้อนร่วมกันของฟลูออรีนและพีแนทรีน หรือฟลูออรีนและแอนทราซีนมีส่วนทำให้น้ำหนักแห้งของถั่วพุ่มลดลงเมื่อระดับความเข้มข้นรวมเป็น 200 mg/kg ขึ้นไป และการปนเปื้อนร่วมกันของพีแนทรีนและฟลูออแรนทรีนเป็นพิษต่อน้ำหนักแห้งของถั่วพุ่มต่ำที่สุดโดยความเข้มข้นรวมต้องสูงถึง 400 mg/kg จึงจะส่งผลทำให้น้ำหนักแห้งของถั่วพุ่มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

3.2 ผลของพีเอเอชต่อการเจริญของถั่วเขียว

การปนเปื้อนของฟลูออรีนและแอนทราซีน หรือพีแนทรีนและฟลูออแรนทรีนที่ระดับความเข้มข้น 2 mg/kg สามารถกระตุ้นความยาวยอดของถั่วเขียวเช่นกัน นอกจากนี้ การปนเปื้อนของพีเอเอช 4 ชนิดและการปนเปื้อนร่วมกันของแอนทราซีนและฟลูออแรนทรีนมีแนวโน้มเป็นพิษต่อความยาวยอดของถั่วเขียวอย่างชัดเจนตั้งแต่ความเข้มข้น 20 mg/kg ขึ้นไป โดยชัดเจนมากขึ้นที่ระดับความเข้มข้น 200 และ 400 mg/kg ตามลำดับ ส่วนการปนเปื้อนร่วมกันของฟลูออรีนและพีแนทรีน ฟลูออรีนและแอนทราซีน หรือ พีแนทรีนและฟลูออแรนทรีนเริ่มส่งผลเป็นพิษต่อความยาวยอดของถั่วเขียวเมื่อระดับความเข้มข้นมากกว่า 200 mg/kg ขึ้นไป (รูปที่ 1)

ลักษณะการปนเปื้อนร่วมกันของฟลูออรีนและแอนทราซีน หรือการปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชทั้งสี่ชนิดแสดงความเป็นพิษต่อความยาวรากของถั่วเขียวเมื่อความเข้มข้นรวมตั้งแต่ 200 mg/kg ขึ้นไป ในขณะที่ฟลูออรีนและพีแนทรีนจะส่งผลเป็นพิษต่อความยาวรากของถั่วเขียวเมื่อระดับความเข้มข้นเท่ากับ 400 mg/kg (รูปที่ 2)

จากตารางที่ 1 พบว่า การปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชสี่ชนิดยังแสดงความเป็นพิษต่อตัวเขี้ยวมากที่สุดโดยความเข้มข้นเพียง 16 mg/kg ทำให้ความยาวรากของตัวเขี้ยวลดลงร้อยละ 20 ในขณะที่การปนเปื้อนร่วมกันของฟลูออรีนและแอนทราซีนเป็นพิษรองลงมาโดยที่ระดับความเข้มข้น 56.9 mg/kg ทำให้ความยาวรากลดลงร้อยละ 20 ส่วนคู่ของฟลูออแรนทีนและแอนทราซีน หรือฟลูออแรนทีนและพีแนนทรินมีผลเป็นพิษต่อความยาวรากของตัวเขี้ยวเกิดขึ้นต่ำที่สุด โดยระดับความเข้มข้นที่ทำให้ความยาวรากของตัวเขี้ยวลดลงร้อยละ 20 ต้องมีค่าสูงมากกว่า 400 mg/kg ขึ้นไป

การปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชสี่ชนิดยังแสดงความเป็นพิษต่อน้ำหนักสดของตัวเขี้ยวเกิดได้มากที่สุด โดยส่งผลทำให้น้ำหนักสดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตั้งแต่ระดับความเข้มข้น 2 mg/kg และความเป็นพิษเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นรวมทั้งเพิ่มขึ้น ส่วนคู่อื่น ๆ ของพีเอเอชไม่เป็นพิษต่อน้ำหนักสดของตัวเขี้ยว ยกเว้นคู่ของฟลูออรีนและพีแนนทรินซึ่งทำให้น้ำหนักสดของตัวเขี้ยวลดลงที่ความเข้มข้นรวมสูงสุดเท่านั้น (รูปที่ 3) ส่วนน้ำหนักสดของตัวเขี้ยวลดลงร้อยละ 20 เมื่อมีการปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชสี่ชนิดที่ระดับความเข้มข้นรวมเพียง 33.3 mg/kg หรือเมื่อมีการปนเปื้อนของฟลูออรีนและพีแนนทรินในระดับความเข้มข้น 360.8 mg/kg ในขณะที่คู่ของพีเอเอชอื่น ๆ ต้องมีระดับความเข้มข้นรวมอยู่สูงมากกว่า 400 mg/kg จึงจะส่งผลทำให้น้ำหนักสดของตัวเขี้ยวลดลงร้อยละ 20 (ตารางที่ 1)

ในการพิจารณาการปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอช 4 ชนิด ยังพบว่า มีการเสริมฤทธิ์เกิดขึ้นอีกด้วย กล่าวคือ ถ้าพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการปนเปื้อน

ร่วมกันของฟลูออรีนและแอนทราซีนกับการปนเปื้อนร่วมกันของฟลูออแรนทีนและพีแนนทรินหรือในทางกลับกันต่อทั้งน้ำหนักสดและความยาวรากต่อตัวเขี้ยว (ตารางที่ 1)

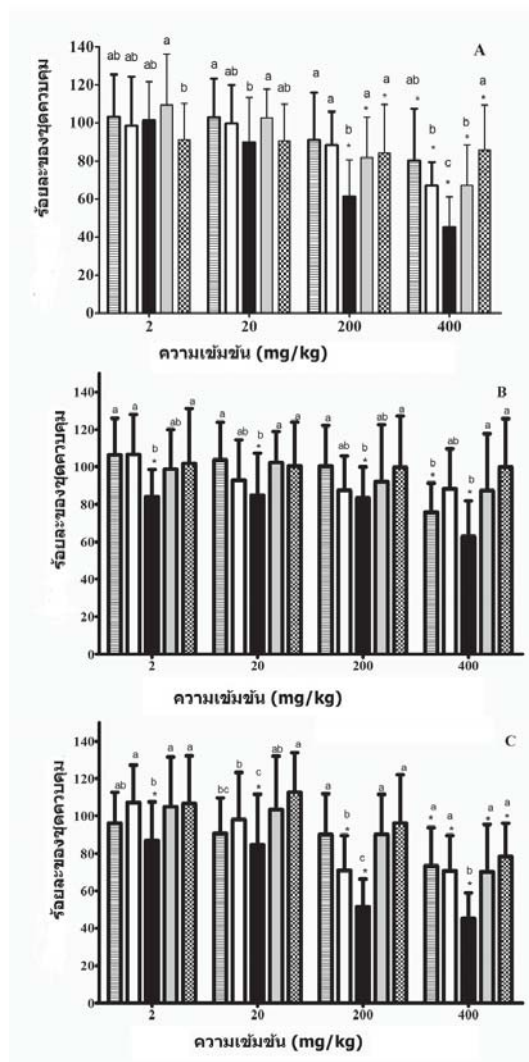
การปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชสี่ชนิดและการปนเปื้อนร่วมกันของแอนทราซีนและฟลูออแรนทีน หรือพีแนนทรินและฟลูออแรนทีนจะแสดงความเป็นพิษต่อน้ำหนักแห้งของตัวเขี้ยวในระดับเดียวกัน โดยที่ระดับความเข้มข้น 200 mg/kg สามารถส่งผลทำให้น้ำหนักแห้งลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ในขณะที่การปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชคู่อื่น ๆ มีผลทำให้น้ำหนักแห้งลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อระดับความเข้มข้นสูงถึง 400 mg/kg

3.3 ผลของพีเอเอชต่อการเจริญของตัวฟักยา

การปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชทั้งสี่ชนิดและคู่ของแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนแสดงความเป็นพิษต่อความยาวยอดของตัวฟักยาเกิดมากที่สุด โดยพบความเป็นพิษชัดเจนที่ระดับความเข้มข้น 200 และ 400 mg/kg ส่วนคู่ของฟลูออรีนและพีแนนทริน หรือฟลูออรีนและแอนทราซีน จะแสดงความเป็นพิษต่อตัวฟักยาที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน แต่มีระดับของความเป็นพิษที่เกิดขึ้นต่ำกว่าคู่ของแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนหรือการปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชทั้งสี่ชนิด คู่ของพีแนนทรินและฟลูออแรนทีนมีความเป็นพิษต่อความยาวยอดของตัวฟักยาเกิดขึ้นต่ำที่สุดเนื่องจากที่ระดับความเข้มข้นสูงสุดที่ใช้ในการทดลองเท่านั้นจึงจะมีผลทำให้ความยาวยอดของตัวฟักยาลดลง (รูปที่ 1)

นอกจากนี้ ความยาวรากของถั่วฝักยาวลดลงอย่างชัดเจนเมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนแอนทราซีน และฟลูออแรนทีนที่ระดับความเข้มข้นรวม 200

mg/kg ขึ้นไป คู่ของพีเอเอชอีกคู่หนึ่งที่แสดงความสัมพันธ์ต่อความยาวรากของถั่วฝักยาว คือ



รูปที่ 3 น้ำหนักสดของถั่วพุ่ม (A) ถั่วเขียว (B) และถั่วฝักยาว (C) ในระยะต้นกล้าที่เจริญในดินที่ปนเปื้อนพีเอเอชเป็นเวลา 10 วัน สัญลักษณ์ : ฟลูออรีนและฟิแนนทริน; แอนทราซีนและฟลูออแรนทีน; ฟลูออรีนและแอนทราซีน; ฟิแนนทรินและฟลูออแรนทีน และ พีเอเอชทั้งสี่ชนิด ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ระหว่างพีเอเอชผสมแต่ละแบบที่ระดับความเข้มข้นรวมเดียวกัน ส่วน * หมายถึง พีเอเอชผสมแต่ละความเข้มข้นมีความแตกต่างจากดินที่ปนเปื้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ฟลูออรีนและฟิแนทรีน โดยเป็นพืชชัดเจน ที่ระดับความเข้มข้นรวม 400 mg/kg ส่วนคู่ของ ฟิเอเอชอื่น ๆ รวมทั้งการปนเปื้อนของฟิเอเอชสี่ชนิด ไม่เป็นพิษต่อความยาวรากของถั่วฝักยาว (รูปที่ 2) จากรายละเอียดที่พบในตารางที่ 1 คู่ของฟลูออแรนทีน และแอนทราซีนเป็นพิษต่อความยาวรากเกิดขึ้น มากที่สุด โดยที่ระดับความเข้มข้น 350.8 mg/kg ส่งผลให้ความยาวรากลดลงร้อยละ 20 และพบ การหักล้างฤทธิ์กันเมื่อมีการปนเปื้อนของฟิเอเอช 4 ชนิดเมื่อเปรียบเทียบกับคู่ของการปนเปื้อน ฟิเอเอชสองชนิดในดิน (ตารางที่ 1)

การปนเปื้อนร่วมกันของฟิเอเอชสี่ชนิดแสดง ความเป็นพิษต่อน้ำหนักสดของถั่วฝักยาวเกิดขึ้น มากที่สุด ที่ระดับความเข้มข้นตั้งแต่ 2-400 mg/kg โดยทำให้น้ำหนักสดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คู่ของแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนมีความเป็นพิษ เกิดขึ้นรองลงมา โดยที่ระดับความเข้มข้นรวม 200 mg/kg ส่งผลให้น้ำหนักสดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติ ($P < 0.05$) ในขณะที่คู่ของฟิเอเอชอื่น ๆ ทำ ทำให้น้ำหนักสดของถั่วฝักยาวลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติ เมื่อระดับความเข้มข้นรวมสูงถึง 400 mg/kg (รูปที่ 3) น้ำหนักสดของถั่วฝักยาวยังมีความไว ต่อความเป็นพิษของฟิเอเอชทุกคู่ โดยลักษณะ การปนเปื้อนร่วมกันของฟิเอเอชสี่ชนิดได้ทำให้น้ำหนักสดลดลงร้อยละ 20 เมื่อมีระดับความเข้มข้นรวมเพียง 12.31 mg/kg เท่านั้น ส่วนคู่ของ ฟลูออแรนทีนและแอนทราซีน ฟลูออรีนและ แอนทราซีน หรือฟลูออรีนและฟิแนทรีนส่งผลให้ น้ำหนักสดลดลงร้อยละ 20 เมื่อระดับความเข้มข้น รวมเป็น 165.8, 292.8 และ 355.6 mg/kg ตาม ลำดับ นอกจากนี้ ในกรณีการปนเปื้อนร่วมกันของ ฟิเอเอช 4 ชนิด พบว่า มีการเสริมฤทธิ์ ถ้าพิจารณา เปรียบเทียบระหว่างการปนเปื้อนร่วมกันของ

ฟลูออรีนและแอนทราซีนกับการปนเปื้อนร่วมกัน ของฟลูออแรนทีนและฟิแนทรีนหรือในทางกลับ กันต่อน้ำหนักสดของถั่วฝักยาว (ตารางที่ 1)

น้ำหนักแห้งของถั่วฝักยาวมีความไวต่อการ ปนเปื้อนของฟิแนทรีนและฟลูออแรนทีนเกิดขึ้น มากที่สุดโดยที่ระดับความเข้มข้น 200 mg/kg ทำให้น้ำหนักแห้งของถั่วฝักยาวลดลงอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่คู่ของฟิเอเอชอื่น ๆ และการปนเปื้อนร่วมกันของฟิเอเอชสี่ชนิดเป็นพิษ ต่อน้ำหนักแห้งต่ำกว่า โดยที่ระดับความเข้มข้น ต้องสูงถึง 400 mg/kg จึงจะสามารถทำให้น้ำหนัก แห้งของถั่วฝักยาวลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

การปนเปื้อนร่วมกันระหว่างฟลูออรีนและ แอนทราซีนมีแนวโน้มเป็นพิษต่อพืชวงศ์ถั่วที่เลือก มาทดสอบสูงที่สุด ส่วนคู่ของฟลูออรีนและฟิแน- ทรีน และคู่ของฟลูออแรนทีนและแอนทราซีนมี ความเป็นพิษในระดับปานกลาง ส่วนคู่ของฟิเอเอช ที่ความเป็นพิษเกิดขึ้นต่ำที่สุดต่อพืชวงศ์ถั่ว คือ ฟลูออแรนทีนและฟิแนทรีน ในขณะที่เมื่อเปรียบ เทียบกับการตอบสนองของฟักทองซึ่งเป็นพืชวงศ์ แตง พบว่า คู่ของแอนทราซีนกับฟลูออแรนทีน เป็นพิษต่อความยาวยอด ความยาวรากและน้ำหนัก สดของต้นกล้าฟักทองมากที่สุด ส่วนคู่ของฟิแน- ทรีนกับฟลูออรีนแสดงความเป็นพิษต่อน้ำหนักแห้ง ของฟักทองมากที่สุด โดยคู่ที่แสดงความเป็นพิษ มากที่สุดต่อฟักทองนี้จะแสดงความเป็นพิษมากกว่า การมีฟิเอเอชทั้งสี่ชนิด ได้แก่ ฟลูออรีน ฟิแนทรีน แอนทราซีนและฟลูออแรนทีนร่วมกัน ซึ่งแสดง ว่า อาจมีการหักล้างฤทธิ์ระหว่างฟิเอเอชบางตัว เกิดขึ้นได้เมื่อมีการปนเปื้อนร่วมกัน (ชนิษฐา และ คณะ, 2554b) ลักษณะความแตกต่างที่พบเช่นนี้

แสดงให้เห็นว่า กลไกการออกฤทธิ์ของฟิเอเอซ รวมทั้งกลไกการลดพิษของพืชต่างวงศ์กันอาจจะแตกต่างกันหรือมีฉะนั้นตำแหน่งในการออกฤทธิ์ของฟิเอเอซแต่ละชนิดในพืชแต่ละวงศ์มีความแตกต่างกัน จึงส่งผลทำให้ความเป็นพิษร่วมแตกต่างกันออกไปด้วย ซึ่งควรมีการศึกษาเปรียบเทียบในระดับสรีรวิทยาและระดับโมเลกุลต่อไป ในโอกาสข้างหน้า

ความเป็นพิษของฟิเอเอซต่อพืชจึงขึ้นอยู่กับอวัยวะเป้าหมายของฟิเอเอซแต่ละชนิด รวมไปถึงความสามารถในการละลายน้ำของสารด้วย โดยสารที่ละลายน้ำได้แตกต่างกันจะถูกลำเลียงเข้าสู่พืชได้ต่างกัน ชนิดของฟิเอเอซที่เลือกมาศึกษาครั้งนี้เป็นพืชต่อพืชได้แตกต่างกัน เช่น แอนทราซีน และฟลูออแรนทินรบกวนกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง กระบวนการขนส่งอิเล็กตรอน รวมไปถึงการขนส่งธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเข้าสู่เซลล์พืช (Kummerová et al., 2006) ในขณะที่ฟลูออรีนทำให้การสะสมน้ำของ *Trifolium pratense* และหญ้าไรน์ลดลง (Sverdrup et al., 2003)

สำหรับการปนเปื้อนร่วมกันของฟิเอเอซสี่ชนิดแสดงความเป็นพิษต่อน้ำหนักสดของถั่วทุกชนิดมากกว่าการปนเปื้อนร่วมกันของฟิเอเอซแต่ละคู่ มีเพียงถั่วเขียวเท่านั้นที่ความยาวรากลดลงด้วย เมื่อสัมผัสกับฟิเอเอซทั้งสี่ชนิด โดยทั้งนี้จะพบการเสริมฤทธิ์และหักล้างฤทธิ์กันของฟิเอเอซสี่ชนิดต่อพืช โดยการปนเปื้อนของฟลูออรีนและฟิแนทรีนแล้วมีคู่ของฟลูออแรนทินและแอนทราซีนร่วมด้วย หรือการปนเปื้อนของฟลูออแรนทินและแอนทราซีน

แล้วมีฟลูออแรนทินและฟิแนทรีนร่วมด้วย จะส่งผลทำให้พืชวงศ์ถั่วที่เลือกทดสอบมีน้ำหนักสดลดลงเกือบทุกชนิด โดยที่สารในกลุ่มฟิเอเอซมีรายงานว่ามีความเป็นพิษต่อการสะสมน้ำในพืช การสัมผัสกับฟิเอเอซที่ปนเปื้อนร่วมกันสองชนิดลดการนำน้ำเข้าสู่พืช เช่น การได้รับฟิแนทรีนร่วมกับฟลูออแรนทิน หรือฟลูออแรนทินร่วมกับไพรีนเมื่อเปรียบเทียบร่วมกับการได้รับฟลูออแรนทินหรือไพรีนเพียงอย่างเดียว (Witting et al., 2003)

4. สรุป

ความเป็นพิษของการปนเปื้อนร่วมกันระหว่างฟลูออรีน ฟิแนทรีน ฟลูออแรนทิน และแอนทราซีนต่อพืชวงศ์ถั่วเพิ่มขึ้นเมื่อมีการปนเปื้อนร่วมกันของฟิเอเอซทั้งสี่ชนิด โดยส่งผลต่อน้ำหนักสดและมากกว่าความยาวราก และพบการเสริมฤทธิ์กันเมื่อมีการปนเปื้อนร่วมกันของฟิเอเอซตั้งแต่สี่ชนิดขึ้นไปต่อน้ำหนักสด โดยถั่วเขียวเป็นพืชที่ไวต่อความเป็นพิษของฟิเอเอซมากที่สุดทั้งที่ปนเปื้อนร่วมกันทั้งสองชนิดและสี่ชนิดด้วยกันตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปี 2554 เลขที่สัญญา 5405016/2554 และ Prof.Dr. Hung Lee, School of Environmental Science, University of Guelph ประเทศแคนาดา ที่ให้คำแนะนำและเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- ชนิษฐา สมตระกูล ดวงกมล ผลาผล จำปี
ไชยเมืองคุณ และวราภรณ์ อูยฉาย. 2554a.
ความเป็นพิษของฟลูออแรนทีนและฟิแนน-
ทรินทีนเปื้อนในดินต่อการเจริญของพืช
เศรษฐกิจระยะต้นกล้า. วารสารวิชาการ
และวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
อีสาน 4 (1): 19-26.
- ชนิษฐา สมตระกูล ดวงอนงค์ ผลาผล และ
วราภรณ์ อูยฉาย. 2554b. การตอบสนอง
ของต้นกล้าพืชต่อการปนเปื้อนร่วมกัน
ระหว่างพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดร-
คาร์บอน 4 ชนิด. การประชุมทางวิชาการ
นเรศวรวิจัย ครั้งที่ 7 29-30 กรกฎาคม 2554
10 หน้า.
- วราภรณ์ อูยฉาย. 2554. การแพร่กระจาย
และความเป็นพิษต่อพืชของโพลีไซคลิก
อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน. วารสารวิชาการ
และวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
พระนคร 5(1): 140-152.
- Chen, C. and Lu, C. 2002. **An analysis of
the combine effect of organic
toxicants.** Science and Total
Environmental. 289: 123-132.
- Hao, R., Wan, H., Song, Y., Jiang, H., and
Peng, S. 2007. **Polycyclic aromatic
hydrocarbons in agricultural soils
of the southern subtropics, China.**
Pedosphere. 17: 673-680.
- 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., Krulová, J., Zezulka, š., and
Tříška, J., 2006. **Evaluation of
fluoranthene phytotoxicities in pea
plants by Hill reaction and chlorophyll
fluorescence.** Chemosphere. 65: 489-
496.
- Sverdrup, L.E., Krogh, P.H., Nielsen, T.,
Kjaer, C., and Stenersen, J. 2003.
**Toxicity of eight polycyclic aromatic
compounds to red clover (*Trifolium
pratense*), ryegrass (*Lolium parenne*),
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
Environmental Safety 71: 465-472.
- Wieczorek, J.K. and Wieczorek, Z.J. 2007.
**Phytotoxicity and accumulation of
anthracene applied to the foliage
and sandy substrate in lettuce and
radish plants.** Ecotoxicology
Environmental Safety. 66: 369-377.
- Witting, R., Ballach, H., and Kuhn, A. 2003.
**Exposure of the roots of *Populus
nigra* L. cv.Loenen to PAHs and its
effect on growth and water balance.**
Environmental Science and Pollution
Research. 10: 235-244.