

**ความเป็นพิษร่วมกันของฟิแนนทรีน ฟลูออรีน และฟลูออแรนทีนต่อการเจริญระยะ  
ต้นกล้าของข้าวเหนียว พันธุ์ กข. 6 และฝักบัว**

**Combined Phytotoxicity of Phenanthrene, Fluorene and Fluoranthene in  
Seedling Growth of Sticky Rice cv. RD 6 and Water Morning Glory**

**ขนิษฐา สมตระกูล<sup>1</sup> จำปี ไชยเมืองคุณ<sup>1</sup> ดวงอนงค์ ผลาผล<sup>1</sup> และ วราภรณ์ นุชฉาย<sup>2</sup>**

**Khanitta Somtrakoon<sup>1</sup>, Champee Chaimuangkoon<sup>1</sup>, Duanganong Phalaphol<sup>1</sup> and  
Waraporn Chouychai<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ต.ขามเรียง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

<sup>2</sup>สาขาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ อ.เมือง จ.นครสวรรค์ 60000

E-mail: skhanitta@hotmail.com โทรศัพท์ 083-0605316

**บทคัดย่อ**

การปนเปื้อนร่วมกันของพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (พีเอเอช) พบได้ทั่วไปในสภาพแวดล้อมแต่การศึกษาความเป็นพิษร่วมกันของพีเอเอชต่อพืชยังมีน้อย การศึกษานี้ได้ศึกษาผลของการปนเปื้อนร่วมกันระหว่างฟลูออรีนและฟลูออแรนทีน ฟิแนนทรีนและฟลูออรีน ฟิแนนทรีนและฟลูออแรนทีน หรือการปนเปื้อนร่วมกันทั้งสามชนิดในอัตราส่วน 1:1 ที่ระดับความเข้มข้นรวมตั้งแต่ 2 - 400 mg/kg dried soil ต่อการเจริญระยะต้นกล้าของข้าวเหนียวพันธุ์ กข. 6 และฝักบัว โดยเก็บข้อมูลความยาวยอด ความยาวราก น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของต้นกล้าทั้งต้นหลังจากเพาะได้ 10 วัน และนำมาคำนวณความเข้มข้นที่ทำให้การเจริญของพืชลดลงร้อยละ 20 ผลการศึกษาพบว่า ความยาวรากของต้นกล้าฝักบัวและข้าวเหนียวไวต่อการปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชมากกว่าความยาวยอดและน้ำหนัก เมื่อพิจารณาจากความเข้มข้นที่ทำให้การเจริญของพืชลดลงร้อยละ 20 ต้นกล้าฝักบัวไวต่อการปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชมากกว่าต้นกล้าข้าวเหนียวคู่ของพีเอเอชที่เป็นพิษต่อความยาวยอดและความยาวรากของต้นกล้าข้าวเหนียวมากที่สุดคือฟลูออรีนและฟลูออแรนทีน แต่ไม่มีการปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชที่เป็นพิษต่อน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของต้นกล้าข้าวเหนียวทั้งต้น ส่วนคู่ของพีเอเอชที่เป็นพิษต่อความยาวราก ความยาวยอด และน้ำหนักสดของต้นกล้าฝักบัวมากที่สุด คือ ฟิแนนทรีนและฟลูออแรนทีน ส่วนฟิแนนทรีนและฟลูออรีนเป็นพิษต่อน้ำหนักแห้งของฝักบัวมากที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและพืชใบเลี้ยงคู่ตอบสนองต่อการปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชได้ต่างกัน

**คำสำคัญ:** พอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ความเป็นพิษต่อพืช ข้าวเหนียว ฝักบัว

## Abstract

Co-contamination of Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) is normally found in environment but the study of combine PAH-phytotoxicity has been limited. The combine toxicity of fluorene + fluoranthene, phenanthrene + fluorene, phenanthrene + fluoranthene, or total 3 PAHs in 1:1 ratio as total concentration on 2-400 mg/kg dried soil on seedling growth of sticky rice cv. RD 6 and water morning glory were studied. After 10 days, Shoot length, root length, fresh and dried weight of entire plant was measured and 20% effective concentration to plant growth was calculated. The result showed that root length of water morning glory and sticky rice seedling were sensitive to co-contamination of PAHs more than shoot length and plant weight. When considered from 20% effective concentration to plant growth, water morning glory was sensitive to combine toxicity of PAHs more than sticky rice. Fluorene + fluoranthene was the most toxic to shoot and root length of sticky rice but none of PAHs was toxic to fresh and dried weight of sticky rice. Phenanthrene + fluoranthene was the most toxic to shoot and root length of water morning glory while phenanthrene + fluorene was the most toxic to fresh and dried weight of water morning glory. These results showed that there are different respond to co-contaminated PAHs between dicot and monocot.

**Keywords:** Polycyclic aromatic hydrocarbons, Phytotoxicity, Sticky rice, Water morning glory.

## 1. บทนำ

พอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (พีเอเอช) จัดเป็นกลุ่มของสารก่อมะเร็งและสารก่อกลายพันธุ์ที่ปนเปื้อนทั่วไปในสิ่งแวดล้อม แหล่งกำเนิดที่สำคัญของพีเอเอชมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของสารอินทรีย์ เช่น การเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิง และวัสดุทางการเกษตร (Oanh et al., 2000 และ Gadde et al., 2009) แหล่งเกษตรกรรมของหลายประเทศพบการปนเปื้อนพีเอเอชด้วย เช่น ในฮ่องกง มีรายงานการปนเปื้อนพีเอเอช 14 ชนิดรวมกันเป็น 35.4 µg/kg ในทุ่งหญ้า 31.1 µg/kg ในพื้นที่การเกษตร และ 169 µg/kg ในเขตเมือง (Zhang et al., 2006) การปนเปื้อนพีเอเอชในดินทางการเกษตรนี้จะทำให้เกิดการสะสมพีเอเอชในพืชได้ เช่น ใน Tianjin ทางภาคเหนือของจีนพบพีเอเอชรวมกัน 16 ชนิดในดินทางการเกษตรเป็น 1.08-6.25 µg/kg และพบพีเอเอชสะสมในส่วนเหนือดินของพืชที่ปลูกในบริเวณนั้น 0.48-0.98 µg/kg โดยที่กะหล่ำดอกเป็นพืชที่สะสมได้มากที่สุด (Tao et al., 2004) ซึ่งการปนเปื้อนพีเอเอชในพืชนี้จะส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนพีเอเอชในอาหารได้ด้วย (Teixeira et al., 2007)

ความเป็นพิษของพีเอเอชต่อพืชมีรายงานในพืชหลายชนิด เช่น แนนพทาลินทำให้การงอกของข้าวโพด ถั่วอัลฟัลฟา หญ้าไรน์ *Lupinus albus*, *Hordeum vulgare*, *Festuca rubra*, *Brassica napus*, และ *Trifolium pretense* ซ้ำลงได้ (Henner et al., 1999) นอกจากนี้พีเอเอชยังเป็นพิษต่อไม้ยืนต้นด้วย เช่น ฟลูออเรนที่ความเข้มข้นเพียง 0.1 mg/mg ยับยั้งการเจริญและการรับสารอาหารของต้นสน (*Populus nigra* L. cv. Loenen) รวมทั้งรบกวน การสังเคราะห์ด้วยแสงของต้นสน (*Pinus densiflora* Sieb et. Zucc.) การปนเปื้อนร่วมกันของ

ฟิเออเฮหลายชนิดมีความเป็นพิษต่อพืชต่างไปจากการปนเปื้อนด้วยฟิเออเฮชนิดเดียว อย่างไรก็ตาม การศึกษาความเป็นพิษร่วมกันของฟิเออเฮหลายชนิดต่อการเจริญเติบโตของพืชเศรษฐกิจยังมีน้อย ทั้งที่การปนเปื้อนของฟิเออเฮในสภาพแวดล้อมจริงจะพบการปนเปื้อนร่วมกันระหว่าง ฟิเออเฮหลายชนิดเสมอ การศึกษานี้จึงได้ประเมินความเป็นพิษของฟิเออเฮ ได้แก่ ฟลูออรีน ฟลูออแรนทีน ฟิแนนทริน ที่ปนเปื้อนร่วมกันสามชนิดและปนเปื้อนร่วมกันสองชนิด ต่อการเจริญระยะต้นกล้าของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ได้แก่ ข้าวเหนียว พันธุ์ กข. 6 (*Oryza sativa* var. *glutinosa* cv. RD6) และพืชใบเลี้ยงคู่ ได้แก่ ผักบุ้ง (*Ipomoea aquatic*) ทั้งนี้ ข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนการทำเกษตรกรรมและการฟื้นฟูดินบริเวณที่มีการปนเปื้อนด้วยฟิเออเฮหลายชนิดร่วมกันต่อไป

## 2. วิธีการทดลอง

### 2.1 การเตรียมดิน

เก็บดินที่ไม่มีประวัติการปนเปื้อนด้วยพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจากวัดป่าแก้วแก้ว ต. ขามเรียง อ. กันทรวิชัย จ. มหาสารคาม นำดินมาผึ่งให้แห้งแล้วร่อนด้วยตะแกรงที่มีขนาดรูพรุน 2 มิลลิเมตร วิเคราะห์ปริมาณฟิแนนทริน ฟลูออรีนและฟลูออแรนทีนที่ตกค้างในดินด้วย GC-MS เพื่อยืนยันการไม่ปนเปื้อนด้วยสารทั้งสามชนิดมาก่อน วิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของดิน ณ บริษัทห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด สาขาขอนแก่น ดินที่ใช้มีร้อยละขนาดอนุภาคทราย (% sand) ขนาดอนุภาคทรายแป้ง (% silt) และขนาดอนุภาคดินเหนียว (% clay) เท่ากับ 10.23, 15.33 และ 74.44 ตามลำดับ ส่วนคุณสมบัติอื่นๆ ของดิน ได้แก่ ฟิเออ 8.11 ความนำไฟฟ้า 109.5  $\mu\text{s}/\text{cm}$  ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 2.40 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดร้อยละ 0.29 ปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชนำไปใช้ได้ 58.38 mg/kg dried soil

ละลายฟิแนนทริน (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 บริษัท Sigma-Aldrich ประเทศเยอรมัน) ฟลูออรีน (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 บริษัท Sigma-Aldrich ประเทศเยอรมัน) หรือฟลูออแรนทีน (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 บริษัท Fluka ประเทศสหรัฐอเมริกา) ในอะซิโตนแล้วเติมลงดินให้มีความเข้มข้นสุดท้ายของสารผสมระหว่างฟลูออรีนและฟลูออแรนทีน ฟิแนนทรินและฟลูออรีน ฟิแนนทรินและฟลูออแรนทีนในดินในอัตราส่วน 1:1 เป็น 0, 2, 20, 200 และ 400 mg/kg dried soil ส่วนดินที่ปนเปื้อนด้วยพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนสามชนิดทำเช่นเดียวกันโดยให้มีอัตราส่วนของฟิแนนทริน ฟลูออรีน และฟลูออแรนทีนเป็น 1:1:1 และความเข้มข้นรวมสุดท้ายเป็น 0, 2, 20, 200 และ 400 mg/kg dried soil จากนั้นผึ่งดินที่ผสมแล้วในตู้กวนเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวทำละลายระเหยไป แล้วแบ่งดิน 50 กรัมใส่ลงในภาชนะพลาสติกที่มีความจุ 120 มิลลิตร โดยใช้ดินที่ไม่เติมฟิแนนทริน ฟลูออรีนหรือฟลูออแรนทีนเป็นชุดควบคุม และปรับความชื้นของดินให้เป็นร้อยละ 65 ก่อนการทดลอง

### 2.2 การทดสอบความเป็นพิษต่อพืช

การทดสอบความเป็นพิษคัดแปลงจากวิธีของ Kirk et al., (2002) โดยแช่เมล็ดพันธุ์ข้าวเหนียว (รวบรวมจาก อ. โพนทอง จ. ร้อยเอ็ด) และผักบุ้ง (เมล็ดพันธุ์ทางการค้าของบริษัทเจียไต๋ ประเทศไทย จำกัด) ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วเพาะในถาดพลาสติกที่มีดินที่ปนเปื้อนฟลูออรีนและฟลูออแรนทีน ฟิแนนทรินและฟลูออรีน ฟิแนนทรินและฟลูออแรนทีน และสารผสมระหว่างฟิแนนทริน ฟลูออรีนและ

ฟลูออแรนทีนแต่ละความเข้มข้น ความเข้มข้นละ 10 เมล็ด (ทำการทดลองทั้งหมดสามซ้ำ) ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องให้ได้รับแสงธรรมชาติ รดน้ำทุกวันเพื่อรักษาความชื้นในดินให้คงที่ เมื่อครบกำหนดเวลา 10 วัน วัดร้อยละการงอก ความยาวราก ความยาวยอด น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของต้นกล้าทั้งต้น ชูคควบคุมทำเช่นเดียวกัน

### 2.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

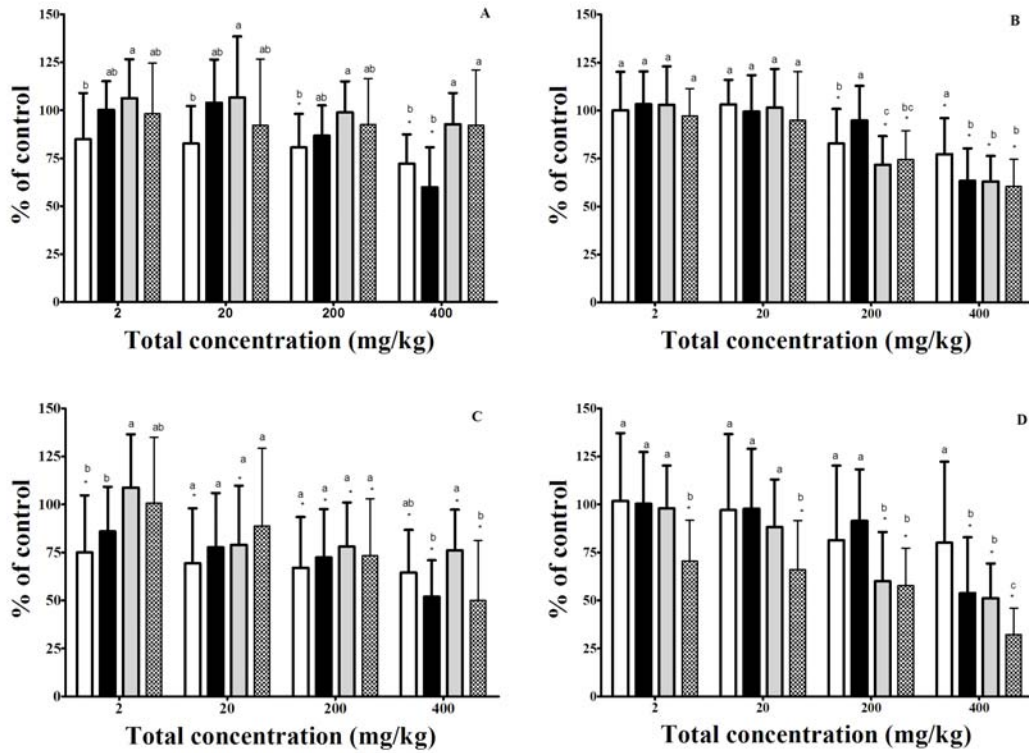
เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างทรีทเมนต์ด้วย One-way ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยด้วย Turkey's test การประเมินความเข้มข้นที่ทำให้การเจริญของพืชลดลงร้อยละ 20 ( $EC_{20}$ ) และร้อยละ 50 ( $EC_{50}$ ) ใช้วิธี probit analysis และคำนวณค่า additive index เพื่อประเมินผลร่วมของสารมลพิษตามวิธีของ Chen and Lu (2002)

## 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

### 3.1 ความเป็นพิษร่วมกันของพีแนทรีน ฟลูออรีนและฟลูออแรนทีนต่อข้าวเหนียวในระยะต้นกล้า

ความยาวยอดของข้าวเหนียวโตต่อความเป็นพิษของพีเอชต่ำกว่าความยาวราก โดยความยาวยอดของข้าวเหนียวโตต่อสารผสมระหว่างฟลูออรีนและฟลูออแรนทีนมากที่สุดเช่นเดียวกับความยาวราก (ภาพที่ 1A) โดยความเข้มข้นรวมของฟลูออรีนและฟลูออแรนทีนเป็น 49.2 mg/kg dried soil ทำให้ความยาวยอดของข้าวเหนียวลดลงร้อยละ 20 ส่วนการปนเปื้อนร่วมกันระหว่างพีแนทรีนและฟลูออแรนทีนจะทำให้ความยาวรากลดลงร้อยละ 20 เมื่อความเข้มข้นรวมเป็น 247.7 mg/kg dried soil ในขณะที่การปนเปื้อนร่วมกันระหว่างฟลูออรีนและฟลูออแรนทีนหรือการปนเปื้อนร่วมกันของพีเอชสามชนิดที่ทำให้ความยาวยอดของข้าวเหนียวลดลงร้อยละ 20 เมื่อความเข้มข้นรวมสูงกว่า 400 mg/kg dried soil (ตารางที่ 1) ที่ความเข้มข้นรวมสูงสุดเป็น 400 mg/kg dried soil การปนเปื้อนร่วมกันระหว่างฟลูออรีนและฟลูออแรนทีนกับพีแนทรีนและฟลูออแรนทีนจะทำให้ความยาวยอดของข้าวเหนียวน้อยกว่าการปนเปื้อนร่วมกันระหว่างพีแนทรีนและฟลูออแรนทีนหรือการปนเปื้อนร่วมกันของพีเอชสามชนิดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 1A)

ความยาวรากของข้าวเหนียวโตต่อความเป็นพิษของสารผสมระหว่างฟลูออรีนและฟลูออแรนทีนมากที่สุด โดยที่ระดับความเข้มข้นของสารผสมเพียง 2 mg/kg dried soil ทำให้ความยาวรากของข้าวเหนียวพันธุ์ กข. 6 ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) (ภาพที่ 1C) ความเข้มข้นรวมของฟลูออรีนและฟลูออแรนทีนที่ทำให้ความยาวรากของข้าวเหนียวพันธุ์ กข.6 ลดลงร้อยละ 20 เป็น 0.045 mg/kg dried soil (ตารางที่ 1) ส่วนสารผสมระหว่างพีแนทรีนและฟลูออรีนจะทำให้ความยาวรากของข้าวเหนียวลดลงเมื่อปนเปื้อนอยู่ในดินในระดับความเข้มข้นตั้งแต่ 20 mg/kg dried soil ขึ้นไป และความเข้มข้นรวมของพีแนทรีนและฟลูออรีนที่ส่งผลให้ความยาวรากของข้าวเหนียวลดลงร้อยละ 20 เป็น 11.25 mg/kg dried soil (ตารางที่ 1) การปนเปื้อนของพีเอชทั้งสามชนิดร่วมกันทำให้ความยาวรากของข้าวเหนียวลดลงร้อยละ 20 เมื่อความเข้มข้นของรวมสารผสมเป็น 74.8 mg/kg dried soil (ตารางที่ 1) ส่วนการปนเปื้อนร่วมกันระหว่างพีแนทรีนและฟลูออแรนทีนนั้นค่าความเข้มข้นรวมที่ทำให้ความยาวรากของข้าวเหนียวลดลงร้อยละ 20 สูงสุดคือ 119.6 mg/kg dried soil (ตารางที่ 1) แต่ที่ความเข้มข้นรวมสูงสุดเป็น 400 mg/kg dried soil พีแนทรีนและฟลูออแรนทีน ทำให้ความยาวรากของข้าวเหนียวลดลงเกือบร้อยละ 50 ซึ่งมากกว่าพีเอชอีก 2 คู่ (ภาพที่ 1C)



ภาพที่ 1 ความยาวยอดของข้าวเหนียวพันธุ์ กข. 6 (A) ผักบุ้ง (B) และความยาวรากของข้าวเหนียวพันธุ์ กข. 6 (C) ผักบุ้ง (D) ระยะต้นกล้าที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน

□ ฟลูออรีนและฟลูออแรนทีน    ■ ฟีนานทีนและฟลูออรีน    ■ ฟีนานทีนและฟลูออแรนทีน    ▣ ฟีนานทีน ฟลูออรีนและฟลูออแรนทีน

โดยตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างฟีเอเอช แต่ละคู่ที่ความเข้มข้นเดียวกัน ส่วน \* หมายถึงมีความแตกต่างจากการทดลองชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

น้ำหนักสดของข้าวเหนียวลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อได้รับฟลูออรีนและฟลูออแรนทีนที่ความเข้มข้นรวมเป็น 400 mg/kg dried soil ( $P < 0.05$ ) (ภาพที่ 2A) ความเข้มข้นรวมของฟีเอเอชทุกแบบต้องมากกว่า 400 mg/kg dried soil จึงทำให้น้ำหนักสดลดลงร้อยละ 20 (ตารางที่ 1) ในขณะที่การปนเปื้อนร่วมกันระหว่างฟลูออรีนและฟลูออแรนทีน ฟีนานทีนและฟลูออรีน ฟีนานทีนและฟลูออรีน และสารผสมทั้งสามชนิด ไม่มีผลต่อน้ำหนักแห้งของข้าวเหนียว โดยไม่ทำให้แตกต่างไปจากน้ำหนักแห้งของข้าวเหนียวในชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) (ภาพที่ 2C)

เมื่อพิจารณาผลร่วมกันของฟีเอเอชผสมแต่ละแบบต่อความยาวรากและน้ำหนักสดของข้าวเหนียวจาก Additive index พบว่าการปนเปื้อนร่วมกันของฟีเอเอชแต่ละแบบไม่พบผลรวมของฟีเอเอชต่อน้ำหนักสดของข้าวเหนียว แต่เมื่อพิจารณาจากความยาวราก พบว่า การปนเปื้อนของฟีเอเอชแต่ละคู่ล้วนเสริมฤทธิ์กันทั้งสิ้น

ส่วนการปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชทั้งสามชนิดจะพบการเสริมฤทธิ์กันระหว่างพีเอเอชแต่ละตัว และการเสริมฤทธิ์ระหว่างฟลูออรีนกับคู่ของฟลูออรีนและฟลูออเรนทีน (ตารางที่ 1)

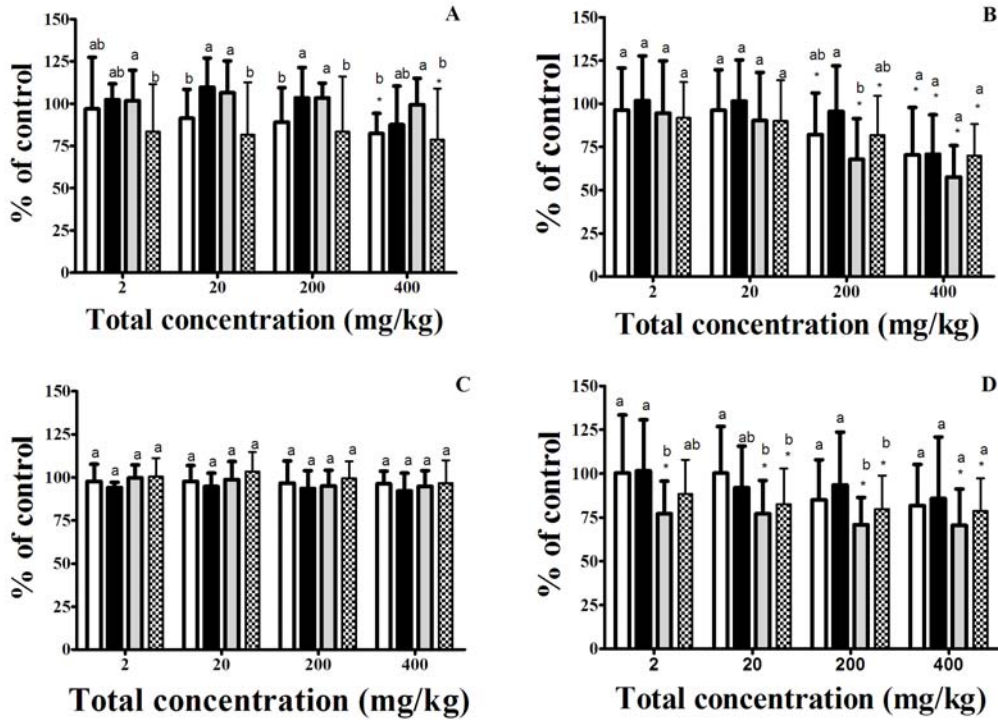
### 3.2 ความเป็นพิษร่วมกันของพีแนนทริน ฟลูออรีนและฟลูออเรนทีนต่อผักนึ่งระยะต้นกล้า

เมื่อความเข้มข้นรวมของพีเอเอชทุกแบบเป็น 2-20 mg/kg dried soil จะไม่มีผลความยาวยอดของผักนึ่ง ความยาวยอดของผักนึ่งลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อความเข้มข้นรวมของฟลูออรีนและฟลูออเรนทีน พีแนนทรินและฟลูออรีน และพีเอเอชรวมสามชนิดเป็น 200 mg/kg dried soil หรือมากกว่า ( $P<0.05$ ) การปนเปื้อนร่วมกันระหว่างพีแนนทรินและฟลูออเรนทีนเป็นพิษต่อความยาวยอดของผักนึ่งต่ำที่สุด โดยความเข้มข้นต้องสูงถึง 294.9 mg/kg dried soil จึงจะทำให้ความยาวยอดลดลงร้อยละ 20 (ภาพที่ 1B) และการปนเปื้อนร่วมกันของพีเอเอชสามชนิดเป็นพิษต่อความยาวยอดของผักนึ่งมากที่สุด โดยความเข้มข้นที่ทำให้ความยาวยอดของผักนึ่งลดลงร้อยละ 20 คือ 99.2 mg/kg dried soil

ความเป็นพิษต่อความยาวรากของผักนึ่งแตกต่างกัน ขึ้นกับชนิดของพีเอเอช โดยการปนเปื้อนร่วมกันระหว่างพีเอเอชสามชนิดเป็นพิษต่อความยาวรากของผักนึ่งมากที่สุด โดยที่ความเข้มข้นรวมเพียง 2 mg/kg dried soil ทำให้ความยาวรากของผักนึ่งลดลงมากกว่าความยาวรากของชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P<0.05$ ) และเมื่อความเข้มข้นรวมเป็น 400 mg/kg dried soil จะทำให้ความยาวรากลดลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับคู่ของสารผสมคู่อื่นๆ (ภาพที่ 1D) เมื่อความเข้มข้นรวมของพีเอเอชทั้งสามชนิดเป็น 0.56 และ 130.8 mg/kg dried soil จะทำให้ความยาวรากของผักนึ่งลดลงร้อยละ 20 และร้อยละ 50 ตามลำดับ ส่วนการปนเปื้อนร่วมกันระหว่างพีแนนทรินและฟลูออเรนทีนทำให้ความยาวรากของผักนึ่งลดลงร้อยละ 20 เมื่อความเข้มข้นเป็น 46.8 mg/kg dried soil ส่วนการปนเปื้อนร่วมกันระหว่างฟลูออรีนและฟลูออเรนทีน หรือพีแนนทรินและฟลูออรีนจะทำให้ความยาวรากของผักนึ่งลดลงร้อยละ 20 เมื่อมีความเข้มข้นรวมในดินเป็น 307.3 และ 206.6 mg/kg dried soil (ตารางที่ 1)

ทั้งน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของผักนึ่งไวต่อการปนเปื้อนของพีเอเอชในดินมากกว่าข้าวเหนียว และน้ำหนักแห้งไวต่อพีเอเอชมากกว่าน้ำหนักสด น้ำหนักสดของผักนึ่งจะแตกต่างจากชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อความเข้มข้นรวมของฟลูออรีนและฟลูออเรนทีน พีแนนทรินและฟลูออรีน และพีเอเอชรวมกันทั้งสามชนิดเป็น 200 mg/kg dried soil หรือมากกว่า ส่วนการปนเปื้อนร่วมกันระหว่างพีแนนทรินและฟลูออเรนทีนจะทำให้น้ำหนักสดของผักนึ่งลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อความเข้มข้นรวมสูงถึง 400 mg/kg dried soil ( $P<0.05$ ) (ภาพที่ 2B) การปนเปื้อนร่วมกันระหว่างพีแนนทรินและฟลูออเรนทีนเป็นพิษต่อน้ำหนักสดมากที่สุด โดยความเข้มข้นรวมที่ทำให้น้ำหนักสดลดลงร้อยละ 20 ได้แก่ 51.6 mg/kg dried soil (ตารางที่ 1)

น้ำหนักแห้งของผักนึ่งไวต่อความเป็นพิษของพีเอเอชมากกว่าน้ำหนักสด โดยพีแนนทรินและฟลูออรีนที่ความเข้มข้นรวมตั้งแต่ 2 mg/kg dried soil ขึ้นไปทำให้น้ำหนักแห้งของผักนึ่งลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนพีเอเอชคู่อื่นๆ (ฟลูออรีนและฟลูออเรนทีน พีแนนทรินและฟลูออเรนทีน) ไม่ทำให้น้ำหนักแห้งของผักนึ่งแตกต่างไปจากการทดลองในชุดควบคุม ส่วนพีเอเอชที่ปนเปื้อนร่วมกันสามชนิดทำให้น้ำหนักแห้งของผักนึ่งลดลงที่ความเข้มข้นรวมตั้งแต่ 20 mg/kg dried soil ขึ้นไป (ภาพที่ 2A)



ภาพที่ 2 น้ำหนักสดของข้าวเหนียวพันธุ์ กข. 6 (A) ผักบุ้ง (B) และน้ำหนักแห้งของข้าวเหนียวพันธุ์ กข. 6 (C) ผักบุ้ง (D) ระยะต้นกล้าที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน

□ฟลูออรีนและฟลูออแรนทีน    □ฟีแนนทีนและฟลูออรีน    ■ฟีแนนทีนและฟลูออแรนทีน    ▣ฟีแนนทีน ฟลูออรีนและฟลูออแรนทีน

ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างฟิเอเอช แต่ละคู่ที่ความเข้มข้นเดียวกัน ส่วน \* หมายถึงมีความแตกต่างจากการทดลองชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

เมื่อพิจารณาผลร่วมกันของฟิเอเอชผสมแต่ละแบบต่อความยาวรากและน้ำหนักสดของผักบุ้งจาก Additive index พบว่าความเป็นพิษของการปนเปื้อนร่วมกันระหว่างฟลูออรีนและฟลูออแรนทีนเกิดการหักล้างฤทธิ์กันต่อความยาวรากของผักบุ้ง ในขณะที่ความเป็นพิษของการปนเปื้อนร่วมกันระหว่างฟิเอเอชคู่อื่นๆ หรือการปนเปื้อนร่วมกันระหว่างฟิเอเอชสามชนิดเกิดการเสริมฤทธิ์กันต่อความยาวรากของผักบุ้งทั้งสิ้น ในขณะที่ความเป็นพิษร่วมกันของฟิเอเอชแต่ละแบบต่อน้ำหนักสดของผักบุ้งส่วนใหญ่จะเป็นการหักล้างฤทธิ์กัน โดยพบความเป็นพิษร่วมแบบเสริมฤทธิ์เมื่อมีการปนเปื้อนร่วมกันของฟิเอเอชสามชนิด โดยพิจารณาจากความเป็นพิษร่วมของฟิเอเอชแต่ละตัว หรือพิจารณาจากความเป็นพิษร่วมกันระหว่างฟีแนนทีนกับคู่ของฟลูออรีนและฟลูออแรนทีน และพิจารณาจากความเป็นพิษร่วมกันระหว่างฟลูออแรนทีนกับคู่ของฟีแนนทีนกับฟลูออรีน (ตารางที่ 1)

**ตารางที่ 1** ค่าความเข้มข้นของฟิเอเอช (mg/kg dried soil) ที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ร้อยละ 20 (EC<sub>20</sub>) และค่า Additive index ของต้นกล้าข้าวเหนียวและผักบุ้งที่เจริญในดินที่ปนเปื้อนฟิเอเอชชนิดต่างๆ ร่วมกัน

จุดยู่/ชนิดฟิเอเอช	ข้าวเหนียวพันธุ์ กข. 6			ผักบุ้ง		
	EC <sub>20</sub>	Additive index	Effect	EC <sub>20</sub>	Additive index	Effect
<b>ความยาวยอด</b>						
ฟิแนนทริน	>400	NC	NC	173.8	NC	NC
ฟลูออรีน	>400	NC	NC	>400	NC	NC
ฟลูออแรนทีน	>400	NC	NC	>400	NC	NC
ฟลูออรีน + ฟลูออแรนทีน	49.2	0.123	+	294.9	0.74	+
ฟิแนนทริน + ฟลูออรีน	247.7	0.62	+	288.4	1.19	-
ฟิแนนทริน + ฟลูออแรนทีน	>400	1	0	174.1	0.72	+
ฟิเอเอช 3 ชนิด (ฟลูออรีน + ฟลูออแรนทีน) + ฟิแนนทริน	>400	4.56	-	99.2	0.45	+
(ฟิแนนทริน + ฟลูออแรนทีน) + ฟลูออรีน		1	0		0.41	+
(ฟิแนนทริน + ฟลูออรีน) + ฟลูออแรนทีน		1.31	-		0.29	+
<b>ความยาวราก</b>						
ฟิแนนทริน	184.9	NC	NC	208.7	NC	NC
ฟลูออรีน	218.9	NC	NC	246.6	NC	NC
ฟลูออแรนทีน	118.7	NC	NC	288.3	NC	NC
ฟลูออรีน + ฟลูออแรนทีน	0.045	0.0003	+	307.3	1.15	-
ฟิแนนทริน + ฟลูออรีน	11.25	0.06	+	206.6	0.91	+
ฟิแนนทริน + ฟลูออแรนทีน	119.6	0.83	+	46.8	0.19	+
ฟิเอเอช 3 ชนิด (ฟลูออรีน + ฟลูออแรนทีน) + ฟิแนนทริน	74.8	831.3	-	0.56	0.002	+
<b>น้ำหนักสด</b>						
ฟิแนนทริน	>400	NC	NC	147.4	NC	NC
ฟลูออรีน	>400	NC	NC	220.2	NC	NC
ฟลูออแรนทีน	>400	NC	NC	237.1	NC	NC
ฟิแนนทริน + ฟลูออรีน	>400	1	0	318.3	1.17	-
ฟิแนนทริน + ฟลูออแรนทีน	>400	1	0	51.6	1.30	-
ฟิเอเอช 3 ชนิด	>400			132.9		



ข้าวเหนียวและผักนึ่งตอบสนองต่อการสัมผัสกับฟิเอเอชที่ปนเปื้อนในดินต่างกัน โดยผักนึ่งไวต่อความเป็นพิษของฟิเอเอชสามชนิดที่ปนเปื้อนร่วมกันระหว่างฟลูออรีน ฟิแนนทรินและฟลูออแรนทีนมากกว่าข้าวเหนียว ความเป็นพิษของฟลูออรีน ฟิแนนทริน และฟลูออแรนทีนแต่ละชนิดต่อพืชมีความแตกต่างกันได้บ้าง โดยฟิแนนทรินทำให้พืชเกิดอาการเหลืองและเนื้อเยื่อตายจากการผลิต  $H_2O_2$  ภายในเซลล์และยับยั้งการแสดงออกของโปรตีนที่กระตุ้นการขยายตัวของ *Arabidopsis thaliana* ในสภาพปลอดเชื้อ (Alkio et al., 2005) ผลผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนรูปไปของฟลูออแรนทีนรบกวนกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและขัดขวางกระบวนการขนส่งอิเล็กตรอนในพืช (Kummerová et al., 2008) การสัมผัสกับฟลูออแรนทีนในพืชวงศ์ถั่วส่งผลให้การลำเลียงแร่ธาตุ เช่น ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสลดลงได้ ส่วนฟลูออรีนรบกวนการสะสมน้ำในต้นกล้า *Trifolium pratense* (Sverdrup et al., 2003) น้ำหนักสดของผักนึ่งได้รับผลกระทบจากการปนเปื้อนร่วมกันของฟิเอเอชมากที่สุด ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะมีการลำเลียงฟิเอเอชเข้าสู่ชีวมวลของผักนึ่ง ทั้งนี้เพราะผักนึ่งเป็นพืชที่มีรายงานว่ามีความไวต่อพิษของสารพิษทั้งแคดเมียม ตะกั่ว ทองแดง รวมทั้งสารอินทรีย์ เช่น di-n-butyl phthalate ไวได้ทั้งในชีวมวลของราก ลำต้นและใบ (Cai et al., 2008) ฟิเอเอชที่เข้าไปสะสมนี้จึงส่งผลต่อการสะสมน้ำและการสร้างชีวมวลของผักนึ่งจากการสังเคราะห์ด้วยแสง และน่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้น้ำหนักแห้งของผักนึ่งได้รับผลกระทบจากการปนเปื้อน ฟิเอเอชในดินด้วย การที่พืชมีการสะสมน้ำและดูดซึมสารอาหารได้ลดลงอาจเนื่องมาจากการพัฒนาการของรากที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้มีพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซึมน้ำและสารอาหารลดลง เป็นต้น ซึ่งเคยมีรายงานว่า การปนเปื้อนร่วมกันของฟิแนนทรินและฟลูออแรนทีน หรือฟลูออแรนทีนและไพรีนทำให้ *Populus nigra* L. มีอัตราการนำน้ำเข้าสู่เซลล์ลดลงอีกด้วย

ในการศึกษานี้ได้นั้นศึกษาความเป็นพิษร่วมกันของฟิเอเอชที่ปนเปื้อนในดินร่วมกัน ซึ่งพบว่าฟิเอเอชแต่ละคู่แสดงความเป็นพิษต่อข้าวเหนียว และผักนึ่งได้แตกต่างกันโดยคู่ของฟิเอเอชที่แสดงความเป็นพิษต่อความยาวยอดและความรากของข้าวเหนียว มากที่สุดคือฟลูออรีนและฟลูออแรนทีน ส่วนคู่ของฟิเอเอชที่เป็นพิษต่อความยาวราก ความยาวยอด และน้ำหนักสดของผักนึ่งมากที่สุด ได้แก่ ฟิแนนทรินและฟลูออแรนทีน ความเป็นพิษร่วมกันของฟิเอเอชแต่ละแบบต่อความยาวรากข้าวเหนียวและผักนึ่ง ส่วนใหญ่เป็นแบบเสริมฤทธิ์กัน ในขณะที่ความเป็นพิษร่วมกันของฟิเอเอชแต่ละแบบต่อความยาวรากข้าวเหนียวและผักนึ่ง ส่วนใหญ่เป็นแบบหักล้างฤทธิ์กัน ความเป็นพิษร่วมกันของฟิเอเอช 2 ชนิดต่อพืชชนิดอื่นๆ ที่มีรายงานได้แก่ การปนเปื้อนร่วมกันของแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนแสดงความเป็นพิษต่อความยาวยอด ความยาวรากและน้ำหนักสดของต้นกล้าฟักทองมากกว่าการปนเปื้อนร่วมกันคู่อื่นๆ แต่การปนเปื้อนร่วมกันของฟิแนนทรินและฟลูออรีนแสดงความเป็นพิษต่อน้ำหนักแห้งของฟักทอง (ขนิษฐาและคณะ, 2554a) การปนเปื้อนของฟิแนนทรินร่วมกับฟลูออรีนและฟลูออแรนทีนเป็นพิษต่อการเจริญระยะต้นกล้าของข้าวเจ้า ข้าวโพดข้าวเหนียวและข้าวฟ่างมากกว่าการปนเปื้อนเฉพาะฟลูออรีนและฟลูออแรนทีน (ขนิษฐา และคณะ, 2554b) ซึ่งตรงข้ามกับผลของฟลูออรีนและฟลูออแรนทีนต่อความยาวยอดของข้าวเหนียวซึ่งเป็นพิษมากกว่าการปนเปื้อนร่วมกันของฟิเอเอชทั้งสามชนิด ด้วยเหตุนี้ การศึกษากลไกเชิงลึกในระดับสรีรวิทยาและระดับโมเลกุลเพื่ออธิบายความแตกต่างดังกล่าวนี้ จึงเป็นสิ่งที่ควรศึกษาต่อไป

#### 4. สรุป

ผักบุ้งไวต่อการปนเปื้อนร่วมกันระหว่างฟลูออรีน พีแนนทรินและฟลูออแรนทีนมากกว่าข้าวเหนียว โดยทั้งความยาวราก ความยาวยอดและน้ำหนักสดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่น้ำหนักสดของข้าวเหนียวไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อสัมผัสกับฟิเอเอชที่ปนเปื้อนร่วมกันสามชนิดในช่วงความเข้มข้นที่ทดสอบ คู่ของฟิเอเอชที่แสดงความเป็นพิษต่อความยาวยอดและความรากของข้าวเหนียวมากที่สุดคือฟลูออรีนและฟลูออแรนทีน ส่วนคู่ของฟิเอเอชที่เป็นพิษต่อความยาวราก ความยาวยอด และน้ำหนักสดของผักบุ้งมากที่สุดได้แก่ พีแนนทรินและฟลูออแรนทีน พบการเสริมฤทธิ์กันเมื่อมีการปนเปื้อนร่วมกันระหว่างฟลูออรีนกับฟลูออแรนทีนแล้วมีพีแนนทรินร่วมด้วย หรือพีแนนทรินกับฟลูออแรนทีนแล้วมีฟลูออรีนร่วมด้วยต่อความยาวรากและน้ำหนักสดของผักบุ้ง แต่พบการหักล้างฤทธิ์กันเฉพาะต่อความยาวรากในข้าวเหนียว ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงการตอบสนองต่อการปนเปื้อนของฟิเอเอชที่ต่างกันระหว่างพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและพืชใบเลี้ยงคู่ ทำให้ดินที่ปนเปื้อนฟิเอเอชในแต่ละบริเวณที่มีชนิดของฟิเอเอชต่างกันจะส่งผลการเจริญของพืชต่างกันได้ และพืชใบเลี้ยงเดี่ยวมีแนวโน้มทนทานต่อการปนเปื้อนร่วมกันของฟิเอเอชมากกว่าพืชใบเลี้ยงคู่

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- ขนิษฐา สมตระกูล ดวงอนงค์ ผลาผล และวราภรณ์ นุชฉาย. 2554a. “การตอบสนองของต้นกล้าพืชทองต่อการปนเปื้อนร่วมกันระหว่างพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน 4 ชนิด” การประชุมทางวิชาการนเรศวร วิจัย ครั้งที่ 7. 29-30 กรกฎาคม 2554. 10 หน้า.
- ขนิษฐา สมตระกูล จำปี ไชยเมืองคุณ และวราภรณ์ นุชฉาย. 2554b. “ความเป็นพิษร่วมของแอนทราซีนและพีแนนทรินในดินที่ปนเปื้อนฟลูออรีนและฟลูออแรนทีนต่อการเจริญในระยะต้นกล้าของพืชเศรษฐกิจหัวเผ้า” วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 1: 31-42
- Alkio, M., Tabuchi, T.M., Wang, X. and Carmona, C. 2005. **Stress responses to polycyclic aromatic hydrocarbons in *Arabidopsis* include growth inhibition and hypersensitive response-like symptoms**, Journal of Experimental Botany. 56: 2983-2984.
- Cai, Q.Y., Mo, C.H., Zeng, Q.Y., Wu, Q.T., Ferrard, J.F. and Antizar-Ladislao, B. 2008. **Potential of *Ipomoea aquatica* cultivars in phytoremediation of soil contaminated with di-*n*-butyl phthalate**, Environmental and Experimental Botany. 62: 205-211.
- Chen, C. and Lu, C. 2002. **An analysis of the combine effect of organic toxicants**, Science of the Total Environment. 289: 123-132.
- Gadde, B., Bonnet, S., Menke, C. and Garivait, S. 2009. **Air pollutant emission from rice straw open field burning in India, Thailand and the Philippines**, Environmental Pollution. 157: 1554-1558.
- Henner, P., Schiavon, M., Druelle, V. and Lichtfouse, E. 1999. **Phytotoxicity of ancient gaswork soils: Effect of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) on plant germination**, Organic Geochemistry. 30: 963-969.

- 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 Zuzulka, Š. 2008. **The use of physiological characteristics for comparison of organic compounds phytotoxicity**, Chemosphere. 71: 2050-2059.
- Oanh, N.T.K., Reutergårdh, L.B., Dung, N.T., Yu, M.H., Yao, W. X. and Co, H. X. 2000. **Polycyclic aromatic hydrocarbons in the airborne particulate matter at a location 40 km north of Bangkok, Thailand**, Atmospheric Environment. 34: 4557-4563.
- Oguntimehin, I., Nakatani, N. and Sakugawa, H. 2008. **Phytotoxicities of fluoranthene and phenanthrene deposited on needle surfaces of the evergreen conifer, Japanese red pine (*Pinus densiflora* Sieb. Et Zucc.)**, Environmental Pollution. 154: 264-271.
- 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 perenne*), and mustard (*Sinapis alba*)**, Chemosphere. 53: 993-1003.
- Tao, S., Cui, Y.H., Xu, F.L., Li, B.G., Cao, J., Liu, W.X., Schmitt, G., Wang, X.J., Shen, W.R., Qing, B.P. and Sun, R. 2004. **Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in agricultural soil and vegetables from Tianjin**, Science of the Total Environment. 320: 11-24.
- Teixeira, V.H., Casal, S. and Oliveira, M.B.P.P. 2007. **PAHs content in sunflower, soybean and virgin olive oils: Evaluation in commercial samples and during refining process**, Food Chemistry. 104: 106-112.
- Zhang, H.B., Luo, Y.M., Wong, M.H., Zhao, Q.G. and Zhang, G.L. 2006. **Distribution and concentration of PAHs in Hong Kong soils**, Environmental Pollution. 141: 107-114.