การฟื้นฟูดินด่างที่ปนเปื้อนฟีแนนทรีนด้วยฟักทองและผักกาดขาว

Phytoremediation of Phenanthrene Contaminated Calcareous Soil with *Cucurbita moschata* and *Brassica pekinensis*

วราภรณ์ ฉุยฉาย [1*] เบญจมาศ มีฤทธิ์ [1] และ ขนิษฐา สมตระกูล [2]

Waraporn Chouychai [1*] Benjamas Meerit [1] and Khanitta Somtrakoon [2]

บทคัดย่อ

พอลิไซคลิก อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนเป็นสารมลพิษที่ต้องเร่งกำจัดออกจากสิ่งแวดล้อม การฟื้นฟูสภาพแวดล้อมด้วยพืชเป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพแต่จำเป็นต้องศึกษาผลของปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง เช่น ปฏิกิริยาดิน (pH) การศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการฟื้นฟูดินด่างที่ปนเปื้อนฟีแนนทรีนด้วยการปลูกฟักทองและผักกาดขาว โดยนำชุดดินตาคลีมาเติมฟีแนนทรีนให้มีความเข้มข้นสุดท้ายเป็น 200 มก./กก. ปลูกฟักทองและผักกาดขาวอายุ 10 วันหลังจากเพาะเมล็ดลงในดินชุดตาคลีทั้งที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนฟีแนนทรีนแล้ว ทำการวิเคราะห์ปริมาณ ฟีแนนทรีนที่เหลืออยู่หลังจากปลูกพืชเป็นเวลา 5-30 วัน โดยเปรียบเทียบกับชุดดินตาคลีที่ปนเปื้อนฟีแนนทรีนและไม่ปลูกพืช ผลการทดลองพบว่าการปนเปื้อนฟีแนนทรีนที่ระดับความเข้มข้น 200 มก./กก. ไม่เป็นพิษต่อการเจริญเติบโตของพืชทั้งสองชนิด การย่อยสลายฟีแนนทรีนในดินด่างเกิดขึ้นได้ดีทั้งในดินที่ปลูกและไม่ปลูกพืช แต่ดินที่ปลูกพืชมีอัตราการย่อยสลายเร็ว โดยเมื่อผ่านไป 5 วัน ดินที่ไม่ปลูกพืชมีปริมาณฟีแนนทรีนเหลือในดิน 65.2% ของปริมาณเริ่มต้น ในขณะที่ดินที่ปลูกผักกาดขาวและฟักทองมีปริมาณฟีแนนทรีนเหลืออยู่ 28.6 % และ 12.4% ของปริมาณเริ่มต้นตามลำดับ ระดับฟีแนนทรีนที่เหลือในวันที่ 30 หลังย้ายปลูกทั้งดินที่ปลูกและไม่ปลูกพืชจะอยู่ที่ 6-8% ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

คำสำคัญ: การฟื้นฟูสภาพสิ่งแวดล้อมด้วยพืช, ดินด่าง, สารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

---

[1] สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ อำเภอเมืองนครสวรรค์ จังหวัดนครสวรรค์ 60000

[1] Biology Program, Faculty of Science and Technology, Nakhon Sawan Rajabhat University, Muang, Nakhon Sawan 60000, Thailand.

[2] ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

[2] Department of Biology, Faculty of Science, Mahasarakham University, Kantharawichai, Mahasarakham 44150, Thailand.

[*] ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): chouychai@yahoo.com โทร 0 89218 4478

ABSTRACT

Polycyclic aromatic hydrocarbons are pollutants which have to remove from the environment rapidly. Phytoremediation is one of the effective choice then the relevant factors should to be studied, such as pH. The efficiency of phytoremediation of phenanthrene contaminated calcareous soil with *Cucurbita moschata* and *Brassica pekinensis* were studied. Takhli soil series was spiked with phenanthrene at 200 mg/kg. The 10-days old *C. moschata* and *B. pekinensis* seedlings were planted in phenanthrene contaminated and non-contaminated soil. The remaining phenanthrenes were analyzed with GC-MS compared with unplanted soil with phenanthrene contaminants. The results showed that 200 mg/kg phenanthrene contaminated alkaline soil were not toxic to both plants growth. Phenanthrene was degraded well in both planted and unplanted soil but the degradation in unplanted soil was the slowest. At 5 days after transplantation, phenanthrene remaining in unplanted soil, soil planted with *C. moschata*, and soil planted with *B. pekinensis* were 65.2%, 12.4%, and 28.6 %, respectively. At day 30 after transplantation, the phenanthrene remaining in these soils was 6-8% that was not significantly different.

Key words: phytoremediation, calcareous soil, polycyclic aromatic hydrocarbons

บทนำ

พอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนหรือพีเอเอช เป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างประกอบด้วยวงแหวนเบนซีนตั้งแต่ 2 วงขึ้นไปมาเชื่อมต่อกัน จัดเป็นสารมลพิษอินทรีย์ที่ย่อยสลายโดยกระบวนการทางธรรมชาติได้ยาก และตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้นานโดยเฉพาะในดินและตะกอนดิน ระดับการปนเปื้อนของพีเอเอชที่ก่อให้เกิดความกังวลถึงอันตรายแก่มนุษย์และสิ่งแวดล้อมมาจากการกระทำของมนุษย์เป็นส่วนใหญ่ เช่น กระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรม การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของน้ำมันเชื้อเพลิงและสารอินทรีย์ การรั่วไหลของปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนเป็นต้น (Xu *et al*., 2009) พีเอเอชมีสมบัติที่สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ และในเนื้อเยื่อไขมันของสิ่งมีชีวิต จึงมีพฤติกรรมชอบยึดเกาะกับอนุภาคกับสารอินทรีย์แล้วสะสมในดิน ทำให้มีแนวโน้มปนเปื้อนและคงทนในสิ่งแวดล้อมได้เป็นเวลานาน พีเอเอชหลายชนิดถูกจัดให้เป็นสารมลพิษที่ต้องรีบกำจัดออกจากสิ่งแวดล้อมตามประกาศของ USEPA เช่น ฟีแนนทรีน แอนทราซีน ฟลูออแรนทีน (วราภรณ์, 2554) ตัวอย่างรายงานการปนเปื้อนพีเอเอชในสิ่งแวดล้อม ได้แก่ พบฟลูออแรนทีนและเบนโซเอไพรีนปนเปื้อนที่บริเวณริมทางหลวงในประเทศสาธารณรัฐเช็ก 0.40 และ 0.12 มก./กก. (Zehetner *et al*., 2009) นอกจากนั้น พบพีเอเอชรวม 18 ชนิดในตะกอนดินของแม่น้ำลางัต ประเทศมาเลเซียระหว่าง 0.3 – 7.9 มก./กก. (Bakhtiari *et al*., 2009) ดังนั้น การปนเปื้อนของพีเอเอชในสิ่งแวดล้อมจึงเป็นปัญหาที่ควรรีบดำเนินการแก้ไข

ปัจจุบันมีการนำกระบวนการทางชีวภาพมาใช้ในการบำบัด ฟื้นฟูสภาพแวดล้อมที่ปนเปื้อน

พีเอเอช โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การฟื้นฟูสภาพแวดล้อมด้วยพืช (Phytoremediation) ซึ่งเป็นการใช้ระบบทางสรีรวิทยาของพืชและการทำงานร่วมกันระหว่างพืชและจุลินทรีย์ที่อยู่ในบริเวณรากพืช เพื่อเคลื่อนย้าย เปลี่ยนรูป ย่อยสลายหรือสะสมสารมลพิษที่ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมมาใช้ในการบำบัดสารมลพิษ ซึ่งข้อดีของการใช้พืชฟื้นฟูสภาพแวดล้อมมีหลายประการ เช่น ต้นทุนต่ำ ไม่ทำลายระบบนิเวศของบริเวณที่ปนเปื้อน รวมทั้งมีประสิทธิภาพในการฟื้นฟูแหล่งปนเปื้อนที่มีความเข้มข้นของสารมลพิษในระดับต่ำ และได้รับการยอมรับจากประชาชนโดยทั่วไป (วราภรณ์, 2551) กลไกที่พืชใช้บำบัดพีเอเอชในดิน ส่วนมากเป็นการกระตุ้นการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในบริเวณ ไรโซสเฟียร์ของพืช (Rhizosphere biodegradation) พืชที่มีประสิทธิภาพในการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนพีเอเอชในดินมีหลายชนิด เช่น การปลูกข้าวโพดทำให้การย่อยสลายฟีแนนทรีนในดินได้ 80-90% ส่วนดินที่ไม่ปลูกพืชได้ 60 – 70% ภายในเวลา 60 วัน (Chouychai *et al*., 2009) การปลูกข้าวโพดและถั่วฝักยาว ทำให้ปริมาณแอนทราซีนในดินรอบรากลดลง 90% และ 45% ตามลำดับ (ขนิษฐา และคณะ, 2555ข) การปลูกมัสตาร์ดลดปริมาณพีเอเอชทั้งหมดจาก 2,203.4 เป็น 1,370.4 มก./กก. (Liste and Prutz, 2006) การปลูกถั่วอัลฟัลฟาสามารถทำให้แอนทราซีน 100 มก./กก. ในดินถูกย่อยสลายจนหมดภายใน 4 สัปดาห์ (Reilley *et al*., 1996) และการปลูกข้าวโอ๊ตทำให้ปริมาณไพรีนในดินลดลง 68% ภายในเวลา 32 วัน (List and Alexander, 2000) เป็นต้น ส่วนการสะสมพีเอเอชในชีวมวลของพืชนั้นพบว่ามีการสะสมได้น้อย โดยมีรายงานว่าพบฟีแนนทรีนสะสมในส่วนรากของบรอกโคลี และผักกวางตุ้งเป็น 0.81 และ 2.38 มก./กก. และพบในส่วนต้น 0.76 และ 0.78 มก./กก. ตามลำดับ หลังจากปลูกในดินที่ปนเปื้อนฟีแนนทรีน 133 มก./กก. เป็นเวลา 45 วัน (Gao and Zhu, 2004) ในขณะที่การปลูกข้าวโพดหวาน ถั่วพู และแตงกวาในดินที่ปนเปื้อนแอนทราซีน 138.9 มก./กก. และฟลูออรีน 95.9 มก./กก. เป็นเวลา 30 วัน ไม่พบการปนเปื้อนของพีเอเอชทั้งสองชนิดในชีวมวลของพืช (Somtrakoon *et al*., 2014)

ปฏิกิริยาดิน (pH) เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์โดยอาศัยจุลินทรีย์ในดินตามธรรมชาติและการย่อยสลายพีเอเอชด้วย ซึ่งดินในจังหวัดนครสวรรค์โดยเฉพาะชุดดินตาคลีเป็นดินที่มีหินปูนเป็นองค์ประกอบมาก pH ของดินสูง (กรมพัฒนาที่ดิน, 2556) อย่างไรก็ตาม ค่าปฏิกิริยาดินส่งผลต่อการย่อยสลาย พีเอเอชโดยอาศัยจุลินทรีย์ในดิน ตัวอย่าง เช่น การย่อยสลายฟีแนนทรีน 1,200 มก./กก. ในดินที่มี pH 6 และ 10 ในระยะเวลา 112 วัน พบว่าดินที่มี pH 6 เหลือฟีแนนทรีนในดิน 600 มก./กก. ส่วนดินที่มี pH 10 เหลือฟีแนนทรีนในดินอยู่ 1,000 มก./กก. (Betancur-Galvis *et al*. 2006) นอกจากนั้น ดินด่างยังทำให้การละลายของธาตุอาหารในดินลดลง ทำให้พืชขาดเหล็กและสังกะสีได้ (Clark and Zeto, 1996) พื้นที่ที่เป็นดินด่างในประเทศไทยมีการแพร่กระจายในหลายพื้นที่ โดยเฉพาะในจังหวัดนครสวรรค์ และดินด่างในพื้นที่เหล่านี้มีโอกาสเกิดการปนเปื้อนพีเอเอชทั้งจากการคมนาคมขนส่งและการพัฒนาอุตสาหกรรมในพื้นที่ ดังนั้น ประสิทธิภาพของการฟื้นฟูดินด่างที่ปนเปื้อนพีเอเอชด้วยพืชจึงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจ

การทดลองครั้งนี้ได้ศึกษาการฟื้นฟูดินด่าง

ที่ปนเปื้อนสารฟีแนนทรีนด้วยพืช 2 ชนิด คือ ฟักทอง (*Cucurbita moschata*) และผักกาดขาวปลี (*Brassica pekinensis*) ซึ่งเป็นตัวแทนของพืชในวงศ์ Cucurbitaceae และ Brassicaceae ตามลำดับ ทั้งนี้ ฟักทอง เป็นพืชที่มีรายงานว่ามีประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพแวดล้อม โดยฟักทองบางสายพันธุ์ เช่น *Cucurbita pepo* spp. สามารถสะสมดีดีที พอลิคลอริเนตไบเฟนิล (Whitfield Aslund *et al*., 2007) และพอลิไซคลิกอะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอนที่มีมวลโมเลกุลสูงได้ (Kobayashi *et al*., 2008) ผักกาดขาวมีรายงานว่าสามารถสะสมแคดเมียมในชีวมวลได้ (Liu *et al*., 2007) และทั้งฟักทองและผักกาดขาวยังมีความทนทานต่อเอนโดซัลแฟน ซัลเฟตและเฮปตาคลอร์ที่ปนเปื้อนในดิน (ขนิษฐา และ สุนันทา, 2554ก และ 2554ข) ทั้งนี้ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไปประโยชน์ทางด้านการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนสารมลพิษกลุ่มนี้ต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมดิน

ดินที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นชุดดินตาคลี pH 8.9 ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากกรมพัฒนาที่ดิน จังหวัดนครสวรรค์ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2556) วิเคราะห์ปริมาณฟีแนนทรีนที่ตกค้างในดินด้วย GC-MS ตามวิธีการที่จะกล่าวถึงต่อไป จากนั้นละลายฟีแนนทรีน (ความบริสุทธิ์ 98% บริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา) ในไดคลอโรมีเทนแล้วเติมลงในดินให้มีความเข้มข้นสุดท้ายในดินเป็น 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ผึ่งดินที่ผสมแล้ว ที่อุณหภูมิห้อง (29±2°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวทำละลายระเหยไป ก่อนนำไปปลูกพืช

การเตรียมต้นกล้า

นำเมล็ดพันธุ์ฟักทอง (*Cucurbita moschata*) และผักกาดขาวปลี (*Brassica pekinensis*) โดยใช้เมล็ดพันธุ์ของบริษัทเจียไต๋ ประเทศไทย จำกัด มาแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วเพาะในถาดพลาสติกที่บรรจุดินปนเปื้อนฟีแนนทรีนความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของดิน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องให้ได้รับแสงธรรมชาติ รดน้ำทุกวันเพื่อรักษาความชื้นในดินให้คงที่ เมื่อต้นกล้าอายุ 10 วันหลังการเพาะเมล็ด คัดเลือกต้นกล้าที่แข็งแรงไว้ใช้ในการทดลองต่อไป

การวางแผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomize Design; CRD) จำนวน 3 ตำรับทดลองและ 3 ซ้ำ คือ ดินที่ไม่ปลูกพืช ดินที่ปลูกฟักทอง และดินที่ปลูกผักกาดขาวปลี โดยย้ายต้นกล้าฟักทองหรือผักกาดขาวปลีอายุ 10 วันหลังการเพาะเมล็ด ลงปลูกในกระถางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 นิ้ว ซึ่งบรรจุดินปนเปื้อนฟีแนนทรีน 1 กิโลกรัม ปลูกพืชแต่ละชนิดในกระถางที่บรรจุดินปนเปื้อน รดน้ำทุกวันเพื่อรักษาความชื้นในดินไว้ที่ประมาณร้อยละ 60 เป็นเวลา 30 วัน จากนั้นเก็บตัวอย่างดินรอบรากพืช (Rhizospheric soil) โดยเก็บจากดินที่ยึดเกาะกับรากพืชแน่น เขย่าเบาๆ แล้วไม่หลุดร่วงลงมา ดินที่เหลือเก็บเป็นดินรอบนอกรากพืช (Bulk soil) นำมาวิเคราะห์ปริมาณฟีแนนทรีนที่เหลือในดินด้วย GC-MS ซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป สำหรับการเปรียบเทียบผลของฟีแนน-ทรีนต่อการเจริญเติบโตของพืช มีจำนวน 4 ตำรับทดลองและ 3 ซ้ำ คือ ดินที่ไม่ปนเปื้อนและปลูกฟักทอง ดินที่ไม่ปนเปื้อนและปลูกผักกาดขาวปลี ดินที่

ปนเปื้อนฟีแนนทรีนและปลูกฟักทอง และดินที่ปนเปื้อนฟีแนนทรีนและปลูกผักกาดขาวปลี

ศึกษาการเจริญเติบโตของพืชโดยเก็บตัวอย่างพืชจากกระถางที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนในวันที่ 5, 12, และ 30 หลังวันย้ายปลูก เพื่อวิเคราะห์ความสูงของต้นและความยาวของราก น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งของต้นและราก แล้วเก็บตัวอย่างพืชในวันสุดท้ายไปวิเคราะห์ปริมาณฟีแนนทรีนภายในชีวมวลของพืชด้วย GC-MS ดังจะแสดงรายละเอียดต่อไป

การสกัดฟีแนนทรีนจากดินและการวิเคราะห์ปริมาณฟีแนนทรีนด้วย GC-MS

การสกัดฟีแนนทรีนจากตัวอย่างดินและตัวอย่างพืชใช้วิธีการสกัดและวิธีวิเคราะห์ที่ดัดแปลงจากวิธีของ Chouychai *et al*. (2009) และ ขนิษฐา และคณะ (2555ข) สกัดฟีแนนทรีนที่ตกค้างในดินด้วยเครื่องซอกห์เลท โดยนำตัวอย่างดินแห้ง 1 กรัมมาบดผสมกับ Na_2SO_4 (anhydrous) ในอัตราส่วน 1:1 เติมฟลูออรีน (บริษัท Sigma-Aldrich ประเทศเยอรมัน ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98) ให้มีความเข้มข้นสุดท้ายในดินเป็น 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เป็น internal standard จากนั้น นำตัวอย่างดินมาสกัดด้วยเฮกเซน: อะซีโตน (อัตราส่วน 1:1) ด้วยเครื่องซอกห์เลทเป็นเวลา 8 ชั่วโมง และปรับอุณหภูมิบนเตาให้ตัวทำละลายหมุนเวียนในหลอดบรรจุสารตัวอย่าง (thimble) ได้ 4 รอบต่อชั่วโมง นำสารละลายที่ได้จากการสกัดมาระเหยแห้งด้วยเครื่องกลั่นสารระเหยแบบหมุน (rotary evaporator) ละลายตัวอย่างในเฮกเซน จากนั้น วิเคราะห์ปริมาณฟีแนนทรีนด้วยเครื่อง GC-MS ประสิทธิภาพในการสกัดฟีแนนทรีนต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 80 คำนวณจากการเปรียบเทียบปริมาณฟีแนนทรีนและ internal standard ที่สกัดออกมาได้เทียบกับปริมาณสารที่ทราบความเข้มข้นก่อนนำไปสกัดการสกัดจากตัวอย่างพืชทำเช่นเดียวกัน

การวิเคราะห์ปริมาณฟีแนนทรีนและ internal standard ในสารละลายเฮกเซนใช้เครื่อง GC (บริษัท Shimadzu รุ่น AOC-5000) ติดตั้งร่วมกับดีเทคเตอร์ คือ Mass Spectroscopy สภาวะในการแยกสารจะใช้คะปิลารีคอลัมน์ชนิด Rtx®-5MS (บริษัท Restek) (30 เมตร x 25 มิลลิเมตร, I.D. 0.25 ไมโครเมตร) สภาวะที่ใช้ในการฉีดสารแบบ split ใช้อัตราส่วนในการ split เป็น 30:1 อัตราการไหลของแก๊สฮีเลียม 0.6 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิของคอลัมน์เริ่มต้น 150°C โดยคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 1 นาที จากนั้น เพิ่มอุณหภูมิขึ้นด้วยอัตรา 15°C ต่อนาที จนอุณหภูมิคอลัมน์สูงถึง 250°C และคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 1 นาที อุณหภูมิของอินเจคเตอร์และดีเทคเตอร์เป็น 250°C

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ร้อยละของฟีแนนทรีนที่เหลืออยู่แสดงด้วยค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างทรีทเมนต์ด้วยการทดสอบทางสถิติด้วย One-way ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยด้วย LSD's test

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

การปนเปื้อนฟีแนนทรีน 200 มก./กก. ในดินด่างไม่แสดงความเป็นพิษต่อการเจริญเติบโตของต้นและรากของทั้งฟักทองและผักกาดขาว และไม่พบความแตกต่างทางสถิติระหว่างการเจริญเติบโตของทั้งฟักทองและผักกาดขาวเมื่อ

เปรียบเทียบระหว่างต้นที่ปลูกในดินด่างที่มีหรือไม่มีฟีแนนทรีน (ตารางที่ 1) โดยเฉพาะความสูงของต้นของฟักทองที่ปลูกในดินด่างที่ปนเปื้อนฟีแนนทรีน 200 มก./กก. ในวันที่ 12 ของการย้ายปลูกที่มีความสูงของต้นสูงกว่าต้นที่ปลูกในดินที่ไม่มีฟีแนนทรีน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่อย่างไรก็ตาม ไม่พบอาการใบเหลืองในพืชทุกชนิดในช่วงเวลาที่ทดลอง (ภาพที่ 1)

ตารางที่ 1 การเจริญเติบโตของฟักทองและผักกาดขาวในดินที่ไม่เติมและเติมฟีแนนทรีน 200 มก./กก. เป็นเวลา 30 วันหลังการย้ายปลูก

ฟีแนนทรีน / พืช	วันที่ 5		วันที่ 12		วันที่ 30	
	ไม่ปนเปื้อน	**200 มก./กก.**	**ไม่ปนเปื้อน**	**200 มก./กก.**	**ไม่ปนเปื้อน**	**200 มก./กก.**
ฟักทอง						
ความสูงของต้น (ซม.)	15.4 ± 0.4	16.0 ± 2.7	15.8 ± 0.8	20.7 ± 1.8*	29.2 ± 0.8	29.8 ± 0.3
ความยาวราก (ซม.)	10.1 ± 3.5	9.5 ± 2.7	12.7 ± 4.1	11.4 ± 2.2	14.5 ± 3.5	15.2 ± 7.6
น้ำหนักสดต้น (กรัม)	1.75 ± 0.3	1.54 ± 0.4	2.41 ± 0.4	2.16 ± 0.6	3.61 ± 0.5	3.72 ± 0.6
น้ำหนักแห้งต้น (กรัม)	0.11 ± 0.0	0.12 ± 0.0	0.24 ± 0.0	0.23 ± 0.1	0.83 ± 0.0	0.66 ± 0.0
น้ำหนักสดราก (กรัม)	0.16 ± 0.1	0.13 ± 0.1	0.26 ± 0.1	0.42 ± 0.0	0.38 ± 0.1	0.42 ± 0.1
น้ำหนักแห้งราก (กรัม)	0.02 ± 0.0	0.02 ± 0.0	0.02 ± 0.0	0.05 ± 0.0	0.06 ± 0.0	0.06 ± 0.2
ผักกาดขาว						
ความสูงของต้น (ซม.)	6.6 ± 0.6	6.6 ± 0.6	7.8 ± 1.1	7.9 ± 0.3	6.4 ± 1.6	5.4 ± 1.5
ความยาวราก (ซม.)	3.5 ± 0.3	4.4 ± 0.2	6.3 ± 0.9	7.9 ± 0.2	7.0 ± 2.0	6.2 ± 0.8
น้ำหนักสดต้น (กรัม)	0.06 ± 0.1	0.08 ± 0.0	0.5 ± 0.1	0.3 ± 0.2	0.65 ± 0.4	0.33 ± 0.1
น้ำหนักแห้งต้น (กรัม)	0.005 ± 0.0	0.005 ± 0.0	0.01 ± 0.0	0.02 ± 0.0	0.04 ± 0.0	0.03 ± 0.0
น้ำหนักสดราก (กรัม)	0.002 ± 0.0	0.002 ± 0.0	0.04 ± 0.0	0.05 ± 0.0	0.05 ± 0.0	0.02 ± 0.0
น้ำหนักแห้งราก (กรัม)	0.001 ± 0.0	0.001 ± 0.0	0.001 ± 0.0	0.001 ± 0.0	0.004 ± 0.0	0.002 ± 0.0

* แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จากต้นที่เจริญในดินที่ไม่มีฟีแนนทรีนในวันเดียวกัน

(A) (B)

ภาพที่ 1 ลักษณะของต้นฟักทอง (A) และลักษณะของต้นผักกาดขาว (B) หลังจากปลูกในดินที่ไม่ปนเปื้อน (ซ้าย) และปนเปื้อนฟีแนนทรีน 200 มก./กก. (ขวา) เป็นเวลา 12 วัน

ฟีแนนทรีนจัดเป็นพีเอเอชที่มีพิษต่อพืชชนิดหนึ่ง *Arabidopsis thaliana* ที่ได้รับฟีแนนทรีน 0.05 – 0.5 mM ในสภาพปลอดเชื้อแสดงอาการใบเหลือง และเกิดจุดแห้งที่เกิดจากเซลล์ตายบนใบ ไตรโคมเปลี่ยนรูปร่าง ขนรากน้อยลง (Alkio *et al*., 2005) ความเป็นพิษของฟีแนนทรีนต่อพืชที่สำคัญคือการยับยั้งการเจริญของราก ทำให้รากสั้นลง เช่น ฟีแนนทรีน 80 มก./กก.ในดินกรด ทำให้ความยาวรากของถั่วลิสงที่ปลูกในดินดังกล่าวเป็นเวลา 60 วันสั้นกว่าต้นที่ปลูกในดินกรดที่ไม่ปนเปื้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Chouychai *et al*., 2008) ส่วนฟีแนนทรีนความเข้มข้น 200 มก./กก. ทำให้ความสูงของต้นผักบุ้ง ความยาวรากของต้นกล้าถั่วเขียว ถั่วพุ่ม และถั่วฝักยาว ลดลง และยังทำให้น้ำหนักสดของผักบุ้ง ข้าวฟ่าง ถั่วพุ่ม และถั่วฝักยาวลดลง (ขนิษฐา และคณะ, 2554; 2555ก) แต่ในการศึกษานี้ ฟีแนนทรีนไม่แสดงความเป็นพิษต่อพืชทั้งสองชนิดไม่ว่าจะพิจารณาจากความสูงของต้น ความยาวราก หรือน้ำหนักสด

ปริมาณฟีแนนทรีนในดินชุดตาคลีลดลงอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 30 วันหลังการย้ายปลูก แม้ไม่ได้ปลูกพืช โดยเหลือ 65.2% ในวันที่ 5 และเหลือเพียง 6.7% ในวันที่ 30 อย่างไรก็ตาม การปลูกพืชไม่ว่าจะเป็นฟักทองหรือผักกาดขาวส่งผลให้ปริมาณฟีแนนทรีนลดลงเร็วกว่าการไม่ปลูกพืชอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 2) โดยดินที่ปลูกผักกาดขาวมีฟีแนนทรีนเหลืออยู่ในดินเพียง 28.6% และดินที่ปลูกฟักทองมีฟีแนนทรีนเหลือเพียง 12.4%ในวันที่ 5 หลังการย้ายปลูก โดยดินรอบรากของฟักทอง เหลือปริมาณฟีแนนทรีน 6.8% ซึ่งไม่ต่างจากดินรอบนอกที่ปลูกฟักทอง ส่วนดินรอบรากของการปลูกผักกาดขาวเหลือฟีแนนทรีน 4.0% ซึ่งน้อยกว่าดินรอบนอกที่ปลูกผักกาดขาวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ไม่พบปริมาณฟีแนนทรีนในตัวอย่างพืชทั้งฟักทองและผักกาดขาวปลี โดยขีดจำกัดของการวิเคราะห์ (Detection limit) ของ GC-MS ที่ใช้อยู่ที่ 0.4 มก./กก.

ตารางที่ 2 ปริมาณฟีแนนทรีนที่เหลืออยู่ในดินหลังจากปลูกฟักทองและผักกาดขาวในดินที่เติมฟีแนนทรีน 200 มก./กก. เป็นเวลา 30 วัน

ฟีแนนทรีน / พืช	ปริมาณที่เหลือ (%)		
	วันที่ 5	**วันที่ 12**	**วันที่ 30**
ไม่ปลูกพืช	65.2 ± 0.2a*	21.1 ± 0.0a*	6.7 ± 0.0
ฟักทอง			
ดินรอบนอก (Bulk soil)	12.4 ± 9.1c	7.1 ± 2.8b	8.6 ± 2.2
ดินรอบราก	6.8 ± 5.3c	6.8 ± 2.4b	1.2 ± 1.5
ผักกาดขาว			
ดินรอบนอก (Bulk soil)	28.6 ± 20.9b	20.4 ± 3.0a	6.4 ± 2.8
ดินรอบราก	4.0 ± 0.4c	6.4 ± 1.8b	7.0 ± 0.9

*อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ภายในวันเดียวกัน

ฟักทองเป็นพืชที่มีรายงานว่ามีประสิทธิภาพในการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ โดยสามารถสะสม พอลิคลอริเนทเตดไบฟีนิลในรากได้ถึง 290 มก./กก. หลังจากปลูกในดินปนเปื้อน (pH 7.1) เป็นเวลา 10 สัปดาห์ โดยไม่แสดงอาการผิดปกติใดๆ (Whitfield Aslund *et al*., 2007) และสามารถสะสมไพรีนในยอดได้ 25 – 125 มก./กก. น้ำหนักแห้ง และสะสมในรากได้ 2-4 มก./กก. น้ำหนักแห้ง เมื่อปลูกในดินปนเปื้อนไพรีน (pH 6.43) เป็นเวลา 3 สัปดาห์ โดยการสะสมขึ้นกับสายพันธุ์ด้วย (Kobayashi *et al*., 2008) ส่วนพืชวงศ์ผักกาดส่วนใหญ่มีประสิทธิภาพในการสะสมโลหะหนักในชีวมวล เช่นการสะสมแคดเมียมในผักกาดหัว (Kashem *et al*., 2008) ผักกาดขาวและผักกวางตุ้ง (Liu *et al*., 2007) มีเพียงการศึกษาของ Batty and Anslow (2008) ที่รายงานว่าเมื่อปลูก *Brassica juncea* ซึ่งเป็นพืชที่สะสมสังกะสีได้ดี ลงในดินที่ปนเปื้อนไพรีนและสังกะสี พบว่า การปนเปื้อนทั้งไพรีนและสังกะสีทำให้ชีวมวลของพืชลดลง แต่ทำให้มีการสะสมสังกะสีในเนื้อเยื่อของพืชมากขึ้น ส่วนผลต่อการย่อยสลายไพรีนนั้นไม่มีการศึกษา ซึ่งจากการศึกษาครั้งนี้ไม่พบการสะสมฟีแนนทรีนในเนื้อเยื่อพืชภายในระยะเวลา 30 วัน ในขณะที่ปริมาณฟีแนนทรีนในดินลดลงอย่างรวดเร็ว จึงแสดงว่าทั้งฟักทองและผักกาดขาวสามารถกระตุ้นให้ จุลินทรีย์ในดินย่อยสลายได้ดีขึ้น โดยไม่มีการสะสมไว้ในชีวมวลของพืชทั้งสองชนิด ซึ่งมีรายงานมาก่อนหน้านี้ว่าการปลูกพืชลงในดินแล้วปริมาณพีเอเอชในดินลดลงนั้น พบว่า จำนวนแบคทีเรียที่ย่อยสลายพีเอเอชได้ (PAH-degrading bacteria) จะเพิ่มขึ้น เช่น ในการปลูกข้าวโพดลงในดินที่ปนเปื้อนฟีแนนทรีน (Chouychai *et al*., 2012) อีกทั้งในดินที่นำไปฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันไอที่ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แล้วจึงเติมฟีแนนทรีนหรือไพรีนลงไป จะมีปริมาณฟีแนนทรีนหรือไพรีนเหลืออยู่ในดินมากกว่าดินที่ผสมฟีแนนทรีนหรือไพรีนโดยไม่ได้ฆ่าเชื้อก่อน และดินที่ผสมฟีแนนทรีนหรือไพรีนแล้วปลูกข้าวโพดโดยไม่ได้ฆ่าเชื้อ จะมีฟีแนนทรีนหรือไพรีนเหลืออยู่น้อยกว่าดินที่ไม่ปลูกพืช ในระยะเวลา 60 วัน (Chouychaiet *et al*., 2009) ดังนั้น การลดลงของฟีแนนทรีนในดินที่ปลูกฟักทองและผักกาดขาวจึงควรจะเกิดจากการที่พืชทั้งสองชนิดสามารถเร่งการเจริญเติบโตและการย่อยสลายฟีแนนทรีนของจุลินทรีย์ในดินได้

การศึกษาการย่อยสลายฟีแนนทรีนในดินด่าง (pH 8.1) และดินกรด (pH 3.3) พบว่า การย่อยสลายในดินที่ไม่ปลูกพืชนั้นจะเกิดในดินด่างได้เร็วกว่า โดยเหลือฟีแนนทรีนในดินด่าง 50% และเหลือฟีแนนทรีนในดินกรด 70% ภายในเวลา 30 วัน ส่วนการปลูกข้าวโพดลงในดินทั้งดินกรดและดินด่างล้วนทำให้มีปริมาณฟีแนนทรีนในดินต่ำกว่า 20% ภายในเวลา 30 วัน (Chouychai *et al*. , 2012) จากการศึกษานี้ แสดงให้เห็นเช่นเดียวกันว่าการย่อยสลายฟีแนนทรีนในดินชุดตาคลีซึ่งเป็นดินด่าง (pH ประมาณ 8.5 – 8.9) เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งต่างจากการย่อยสลายฟีแนนทรีนที่รายงานโดย Betancur-Galvis *et al*. (2006) ซึ่งมีฟีแนนทรีนเหลืออยู่ในดินที่มี pH 6 50% แต่ในดินที่มี pH 10 เหลืออยู่ 83.3% หลังจากผ่านไป 112 วัน เป็นไปได้ว่าความเป็นด่างในระดับเดียวกับดินชุดตาคลีนี้ ไม่ได้ส่งผลต่อการย่อยสลายฟีแนนทรีน และการปลูกฟักทองหรือผักกาดขาวจะช่วยให้การย่อยสลายฟีแนนทรีนเกิดได้เร็วขึ้น

สรุป

การฟื้นฟูดินด่างที่ปนเปื้อนฟีแนนทรีน 200 มก./กก. ด้วยการปลูกฟักทองหรือผักกาดขาว สามารถช่วยให้ระดับของฟีแนนทรีนในดินลดลงได้เร็วกว่าการไม่ปลูกพืชในช่วงวันที่ 5-12 หลังจากนั้นจะลดลงมาอยู่ในระดับเดียวกันในวันที่ 30 โดยการปลูกฟักทองจะลดระดับของฟีแนนทรีนได้เร็วกว่าผักกาดขาวในวันที่ 5 นอกจากนั้น ฟีแนนทรีนในระดับที่ใช้นี้ ยังไม่แสดงความเป็นพิษต่อการเจริญเติบโตของพืชทั้งสองชนิดด้วย และไม่พบการสะสมฟีแนนทรีนในเนื้อเยื่อของพืชทั้งสองชนิด ดังนั้นการใช้ฟักทองในการฟื้นฟูดินด่างที่ปนเปื้อนฟีแนนทรีนจึงมีความเป็นไปได้ และควรศึกษาประสิทธิภาพในการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนพีเอเอชชนิดอื่นๆ ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่สนับสนุนเครื่องซอกห์เลทจากทุนพัฒนาศักยภาพการทำวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ (เลขที่สัญญา MRG5480043) ในการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน. 2556. **ลักษณะและคุณสมบัติของชุดดินภาคเหนือ: ชุดดินตาคลี.** แหล่งที่มา: http://osl101.ldd.go.th/thaisoils_museum/pf_desc/north/Tk.htm, 17 มีนาคม 2556.

ขนิษฐา สมตระกูล, ดวงกมล ผลาผล, จำปี ไชยเมืองคูณ และ วราภรณ์ ฉุยฉาย. 2554. ความเป็นพิษของฟลูออแรนทีนและฟีแนนทรีนที่ปนเปื้อนในดินต่อการเจริญของพืชเศรษฐกิจระยะต้นกล้า. **วารสารวิชาการและวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน** 4(1): 19-26.

ขนิษฐา สมตระกูล, ดวงกมล ผลาผล และ วราภรณ์ ฉุยฉาย. 2555ก. ความเป็นพิษของแอนทราซีนและฟีแนนทรีนที่ปนเปื้อนในดินต่อการงอกของเมล็ดและการเจริญของต้นกล้าพืชตระกูลถั่วหลังการงอก. **วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)** 4(7): 1-12.

ขนิษฐา สมตระกูล, วาสนา วงษ์สมศรี, จีรพรรณ วรรณรัตน์ และ วราภรณ์ ฉุยฉาย. 2555ข. การฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อน แอนทราซีนโดยการปลูกถั่วฝักยาวและข้าวโพดหวาน. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี** 14(4): 1-12.

ขนิษฐา สมตระกูล และ สุนันทา ประทุมมา. 2554ก. ความเป็นพิษของเอ็นโดซัลแฟน-ซัลเฟตที่ปนเปื้อนในดินต่อการเจริญของพืชเศรษฐกิจในระยะต้นกล้า. **แก่นเกษตร** 39(พิเศษ): 295 – 299.

ขนิษฐา สมตระกูล และ สุนันทา ประทุมมา. 2554ข. ความเป็นพิษของเฮปตาคลอร์ต่อการงอกและการเจริญในระยะต้นกล้าของพืชผัก, น. 8. *ใน* **รายงานการประชุมวิชาการพฤกษศาสตร์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5** มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วราภรณ์ ฉุยฉาย. 2551. การฟื้นฟูสภาพสิ่งแวดล้อมด้วยพืช. **วารสารวิชาการราชภัฏตะวันตก** 3(1): 134 – 145.

วราภรณ์ ฉุยฉาย. 2554. การแพร่กระจายและความเป็นพิษต่อพืชของโพลีไซคลิกอะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน. **วารสารวิชาการและวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร** 5(1): 140 – 152.

Alkio, M., Tabuchi, T.M., Wang, X. and Colon-Carmona, A. 2005. Stress response to polycyclic aromatic hydrocarbons in Arabidopsis include growth inhibition and hypersensitive response-like symptoms. **Journal of Experimental Botany** 56: 2983 – 2994.

Bakhtiari, A.R., Zakaria, M.P., Yaziz, M.I., Lajis, M.N.H. and Bi, X. 2009. Polycyclic aromatic hydrocarbons and n-alkanes in suspended particulate matter and sediments from the Langat River, Peninsular Malaysia. **EnvironmenyAsia** 2: 1-10.

Batty, L.C. and Anslow, M. 2008. Effect of a polycyclic aromatic hydrocarbon on the phytoremediation of zinc by two plant species (*Brassica juncea* and *Festuca arundinacea*). **International Journal of Phytoremediation** 10: 236 – 251.

Betancur-Galvis, L.A., Alvarez-Bernal, D., Ramos-Valdivia, A.C. and Dendooven, L. 2006. Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated saline–alkaline soils of the former Lake Texcoco. **Chemosphere** 62: 1749 – 1760.

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, pp. 8**.** *In* **9th National Graduate Research Conference.** Burapha University, Chonburi.

Chouychai, W., Tongkukiatkul, A., Upatham, S., Lee, H., Pokethitiyook, P. and Kruatrachue, M. 2009. Plant-enhanced phenanthrene and pyrene biodegradation in acidic soil. **Journal of Environmental Biology** 30: 139 – 144.

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

Clark, R.B. and Zeto, S.K. 1996. Growth and root colonization of mycorrhizal maize grown on acid and alkaline soil. **Soil Biology and Biochemistry** 28: 1505 – 1511.

Gao, Y. and Zhu, L. 2004. Plant uptake, accumulation and translocation of phenanthrene and pyrene in soils. **Chemosphere** 55: 1169 – 1178.

Kashem, M.A., Singh, B.R., Huq, S.M.I. and Kawai, S. 2008. Cadmium phytoextraction efficiency of arum (*Colocasia antiquorum*), Radish (*Raphanus sativus* L.) and water spinach (*Ipomoea aquatica*) grown in hydroponics. **Water, Air and Soil Pollution** 192: 273 – 279.

Kobayashi, T., Navarro, R.R., Tatsumi, K. and Imura, Y. 2008. Influence of compost amendment on pyrene availability from artificially apiked soil to two subspecies of

Cucurbita pepo. **Science of the Total Environment** 404: 1-9.

Liste, H. and Alexander, M. 2000. Accumulation of phenanthrene and pyrene in rhizosphere soil. **Chemosphere** 40: 11-14.

Liste, H. and Prutz, I. 2006. Plant performance, dioxygenase-expressing rhizosphere bacteria, and biodegradation of weathered hydrocarbons in contaminated soil. **Chemosphere** 62: 1411 – 1420.

Liu, C.P., Shen, Z.G. and Li, X.D. 2007. Accumulation and detoxification of cadmium in *Brassica pekinensis* and *B. chinensis*. **Biologia Plantarum** 51: 116 – 120.

Reilley, K.A., Banks, M.K. and Schwab, A.P. 1996. Organic chemicals in the environment: Dissipation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the rhizosphere. **Journal of Environmental Quality** 25: 212-219.

Somtrakoon, K., Chouychai, W. and Lee, H. 2014. Comparing anthracene and fluorene degradation in anthracene and fluorene contaminated soil by single and mixed plant cultivation. **International Journal of Phytoremediation** 16: 415 – 428.

Whitfield Aslund, M.L., Zeeb, B.A., Rutter, A. and Reimer, K.J. 2007. In situ phytoextraction of polychlorinated biphenyl—(PCB) contaminated soil. **Science of the Total Environment** 374: 1-12.

Xu, S.Y., Chen, Y.X., Lin, K.F., Chen, X.C., Lin , Q., Li, F. and Wang, Z.W. 2009. Removal of pyrene from contaminated soils by white clover. **Pedosphere** 19: 265-272.

Zehetner, F., Rosenfellner, U., Mentler, A., 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.