http://journal.rmutp.ac.th/

ความเป็นพิษร่วมกันระหว่างพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนกับไทรทรอนเอ็กซ์-100 หรือทวีน 80 ต่อการเจริญเติบโตระยะต้นกล้าของบานเย็นและกระเจี๊ยบเขียว

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

[1] หน่วยวิจัยจุลชีววิทยาและจุลชีววิทยาประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44150

[2] สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ จังหวัดนครสวรรค์ 60000

รับบทความ 7 มิถุนายน 2017; ตอบรับบทความ 15 กันยายน 2017

บทคัดย่อ

การใช้สารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์เป็นวิธีการหนึ่งที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนหรือพีเอเอชด้วยพืช ในการศึกษานี้ได้ศึกษาความเป็นพิษของแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่ปนเปื้อนร่วมกันในดินที่ความเข้มข้นรวมเป็น 0, 200 และ 800 มก./กก. ร่วมกับการใช้สารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ 2 ชนิด คือ ไทรทรอนเอ็กซ์-100 และทวีน 80 ที่ความเข้มข้น 0, 1 และ 10 เท่าของค่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเริ่มเกิดไมเซลล์ต่อการเจริญเติบโตระยะต้นกล้าของกระเจี๊ยบเขียวและบานเย็น โดยรดสารลดแรงตึงผิวในวันที่ 13 หลังเพาะเมล็ด และวัดการเจริญเติบโตของพืชในวันที่ 20 หลังเพาะ ผลปรากฏว่าทั้งบานเย็นและกระเจี๊ยบเขียวสามารถเจริญเติบโตในดินที่ปนเปื้อนแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนทุกความเข้มข้นร่วมกับการได้รับสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ทั้งสองชนิดได้ โดยทวีน 80 ที่ความเข้มข้น 1 เท่าของค่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเริ่มเกิดไมเซลล์เป็นพิษต่อกระเจี๊ยบเขียวน้อยที่สุด ในขณะที่สารลดแรงตึงผิวทุกชนิดเป็นพิษต่อบานเย็นไม่แตกต่างกัน การเจริญเติบโตของพืชที่ลดลงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของพีเอเอชในดินที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นพืชทั้งสองชนิดนี้จึงมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ปลูกเพื่อฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนพีเอเอชความเข้มข้นในระดับ 200 มก./กก. ร่วมกับการใช้สารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ได้

คำสำคัญ: ความเป็นพิษต่อพืช; ฟลูออแรนทีน; สารลดแรงตึงผิว; แอนทราซีน

** ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 0755 7771, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: khanitta.s@msu.ac.th*

http://journal.rmutp.ac.th/

Combined Phytotoxicity of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Triton X-100 or Tween 80 on Seedling Growth of *Mirabilis jalapa* and *Hibiscus sabdariffa*

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

[1] Microbiology and Applied Microbiology Research Unit, Faculty of Science, Mahasarakham University, Mahasarakham, 44150

[2] Faculty of Science and Technology, Nakhonsawan Rajabhat University, Nakhonsawan, 60000

Received 7 June *2017; accepted 15 September 2017*

Abstract

Use of synthetic surfactant is another choice to increase efficiency of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) phytoremediation in soil. In this study the toxicity of soil contaminated with anthracene and fluoranthene at total concentration as 0, 200 and 800 mg/kg in combination with 2 synthetic surfactants, that were triton x-100 and tween 80, at concentration as 0, 1 and 10 times of critical micelle concentration (CMC) on seedling growth of *Hibiscus sabdariffa* and *Mirabilis jalapa*. Both synthetic surfactants were watered separately on day 13 after inoculation and seedling growth were measured on day 20 after inoculation. The result shown that both *H. sabdariffa* and *M. jalapa* could grow in soil contaminated with anthracene and fluoranthene at all concentrations in combination with both synthetic surfactants. Tween 80 at 1 time of CMC were the least toxic to *H. sabdariffa* while toxicity of all surfactants on *M. jalapa* were not different. Decrease of plant growth depended on the increasing of PAH concentration in soil. With these reasons, both plants were possible to use for PAH phytoremediation at total concentration 200 mg/kg in combination with synthetic surfactant.

Keywords: Anthracene; Fluoranthene; Phytotoxicity; Surfactant

**** Corresponding Author. Tel.: +668 0755 7771, E-mail Address: khanitta.s@msu.ac.th***

1. บทนำ

พอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนหรือพีเอเอชเป็นสารมลพิษอินทรีย์ที่มีโครงสร้างประกอบด้วยวงแหวนเบนซีนตั้งแต่สองวงขึ้นไปมาเชื่อมต่อกัน พีเอเอชเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตโดยมักมีแนวโน้มเป็นสารก่อกลายพันธุ์และก่อมะเร็ง ตัวอย่างของพีเอเอชที่เป็นอันตรายและอยู่ในรายการที่ต้องเร่งกำจัดออกจากสิ่งแวดล้อมตามรายการของ USEPA มีหลายชนิด เช่น ฟีแนนทรีน แอนทราซีน ฟลูออแรนทีน ไพรีน เบนโซ[เอ]แอนทราซีน ไครซีน และเบนโซ[เอ]ไพรีน เป็นต้น [1] การปนเปื้อนของพีเอเอชในสิ่งแวดล้อมมีสาเหตุมาจากปัจจัยหลายประการ เช่น การเผาไหม้ของถ่านหิน การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ และอุบัติเหตุจากการรั่วไหลของน้ำมันดิบหรือผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม เป็นต้น แหล่งสะสมที่สำคัญของพีเอเอชในสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ดินและตะกอนในแหล่งน้ำ [1-3] พบรายงานการปนเปื้อนของพีเอเอชในประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก เช่น การปนเปื้อนของพีเอเอช 16 ชนิดตามรายการของ USEPA ในดินพื้นผิวและดินชั้นล่างบริเวณดินดอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำแยงซี ประเทศจีน มีค่าเฉลี่ย 471.30 ไมโครกรัม/กก. และ 341.40 ไมโครกรัม/กก. ตามลำดับ [3] การปนเปื้อนของพีเอเอช 13 ชนิดตามรายการของ USEPA มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 348.8 ไมโครกรัม/กก. ในดินบริเวณที่มีการจราจรคับคั่งในเมืองดันแบด ประเทศอินเดีย [4] ส่วนในประเทศไทยพบรายงานการปนเปื้อนพีเอเอชหลายบริเวณ เช่น พีเอเอช 16 ชนิดตามรายการของ USEPA ที่สำรวจจากตะกอนบริเวณชายฝั่งอ่าวไทยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 19.4 ไมโครกรัม/กก. [2] และพีเอเอชที่มีจำนวนวงแหวนเบนซีนตั้งแต่ 3-7 วงที่ตรวจพบในตะกอนบริเวณพื้นผิวที่เก็บจากคลองที่ได้รับผลกระทบจากกิจกรรมของมนุษย์ในกรุงเทพ แม่น้ำและปากแม่น้ำเจ้าพระยา รวมทั้งชายฝั่งอ่าวไทยมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 8-8,399 ไมโครกรัม/กก. [5] นอกจากนี้บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา ซึ่งเคยได้รับผลกระทบจากสึนามิ มีพีเอเอช 12 ชนิดที่อยู่ในรายการของ USEPA ปนเปื้อนอยู่ในดินที่ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.60-31.40 ไมโครกรัม/กก. เป็นต้น [1]

การปนเปื้อนของพีเอเอชมีโอกาสเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่มีโอกาสสัมผัสกับพีเอเอชที่ปนเปื้อนในดินได้ โดยเฉพาะพืชซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่กับดินตลอดระยะเวลาของการเจริญเติบโต การปนเปื้อนของพีเอเอชในดินส่งผลต่อพืชในลักษณะที่แตกต่างกัน เช่น การปนเปื้อนของฟีแนนทรีนที่ระดับความเข้มข้นมากกว่า 100 มก./กก.และไพรีนที่ระดับความเข้มข้นมากกว่า 40 มก./กก. ลดการเจริญของถั่วลิสง (*Arachis hypogea*) และถั่วเขียว (*Vigna radiata*) โดยทำให้ความยาวรากและความยาวยอดของพืชทั้งสองสั้นลง [6] การปนเปื้อนของเบนโซ[เอ]ไพรีนในดินที่ระดับความเข้มข้น 5, 10 และ 20 ไมโครกรัม/ก. และแนฟทาลีนที่ระดับความเข้มข้น 25, 50 และ 100 ไมโครกรัม/ก. เป็นพิษต่อยีนของพืชโดยทำให้ลำดับดีเอ็นเอที่ยอดและรากของถั่วโคลเวอร์ขาว (*Trifolium repens*) เปลี่ยนแปลงโดยจะส่งผลที่รากมากกว่าที่ยอด ซึ่งอาจเกิดจากการเคลื่อนย้ายของสารจากรากไปสู่ยอดเกิดได้จำกัด [7] การได้รับฟลูออแรนทีนหรือแอนทราซีนผ่านทางรากของ *Populus nigra* ยับยั้งพัฒนาการของยอดและการนำสารอาหารเข้าสู่พืชได้ [8] ความเป็นพิษของ พีเอเอชบางชนิด เช่น แอนทราซีนสามารถชักนำให้เพิ่มขึ้นได้จากการถูกออกซิเดชันโดยแสง และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเกิดออกซิเดชันโดยแสงของแอนทราซีนส่งผลในการยับยั้งการเจริญและกิจกรรมเกี่ยวกับการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชได้ [9] สำหรับความเป็นพิษของพีเอเอชชนิดอื่น ๆ เช่น แนฟทาลีนและฟลูออแรนทีนที่ระดับความเข้มข้น 0.2 มก./มล. ทำให้การงอกของต้นกล้าของพืชหลายชนิดช้าลง เช่น ข้าวโพด (*Zea mays*) ลูพิน (*Lupinus albus*) ข้าวบาร์เลย์ (*Hordeum vulgare*) หญ้าเฟสคิว (*Festusca rubra*) หญ้าไรน์ (*Lolium perenne*) อัลฟัลฟา (*Medicago sativa*) ถั่วโคลเวอร์แดง (*Trifolium pratense*) และผักกาดก้านขาว (*Brassica napus*)

[10] ฟลูออแรนทีนที่ระดับความเข้มข้น 5 และ 10 มก./ล. ยับยั้งการงอก ลดความยาวรากและยอดของต้นกล้าผักกาดหอม (*Lactuca sativa*) หอมหัวใหญ่ (*Allium cepa*) และมะเขือเทศ (*Lycopersicum esculentum*) [11] ฟลูออแรนทีนที่ระดับความเข้มข้น 5 ไมโครโมลาร์/ล. ยับยั้งการเจริญของรากถั่วลันเตา (*Pisum sativum*) [12] เป็นต้น

สารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์เป็นเคมีภัณฑ์อีกชนิดที่นิยมผลิตขึ้นใช้ในระดับอุตสาหกรรม [13] และยังนิยมใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของการบำบัดสารมลพิษอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมหลายชนิด เช่น สารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีนและพีเอเอช [14] อย่างไรก็ตามสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์มีรายงานว่าเป็นพิษต่อพืชด้วย เช่น ทวีน 80 สามารถยับยั้งการสังเคราะห์ด้วยแสงในข้าวโพดได้ [15] ส่วนไทรทรอนเอ็กซ์-100 ที่ระดับความเข้มข้น 5.0, 2.5 และ 1.25 ก./ล. ยับยั้งการเจริญของรากหอมใหญ่ (*Allium cepa*) เป็นต้น [16] นอกจากความเป็นพิษเฉพาะตัวของสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิดแล้ว คุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิวเองที่มีความสามารถในการลดแรงตึงระหว่างวัฏภาคทำให้เกิด อีมัลชัน ช่วยในการชะสารที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำออกจากดิน และสนับสนุนให้สารที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำสามารถละลายน้ำได้ดีขึ้น [17] ซึ่งเมื่อนำมาใช้ร่วมกับการบำบัดดินที่ปนเปื้อนพีเอเอชแล้ว นอกเหนือจากการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทและการย่อยสลายทางชีวภาพของพีเอเอชแล้ว คุณสมบัตินี้คาดว่าอาจทำให้พีเอเอชที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำและปนเปื้อนอยู่ในดินสามารถถ่ายเทเข้าสู่เนื้อเยื่อพืชได้มากขึ้นและเป็นพิษต่อพืชมากขึ้นด้วย ดังนั้นพืชที่จะนำมาใช้ในการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อน พีเอเอชร่วมกับการใช้สารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์จึงต้องสามารถทนทานต่อความเป็นพิษทั้งพีเอเอชและสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ได้ งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาความเป็นพิษของ พีเอเอชร่วมกับสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ต่อกระเจี๊ยบเขียวและบานเย็น โดยเลือกใช้แอนทราซีนและฟลูออแรนทีนเป็นตัวแทนของพีเอเอช เนื่องจากพีเอเอชทั้งสองชนิดเคยมีรายงานว่าเป็นพิษต่อพืช รวมทั้งเป็นชนิดของพีเอเอชที่เป็นอันตรายตามรายการของ USEPA ตามที่ได้ยกตัวอย่างข้างต้น ส่วนสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์เลือกใช้ไทรทรอนเอ็กซ์-100 และทวีน 80 โดยผลการศึกษาที่ได้นี้นอกจากจะทราบความเป็นพิษที่เกิดขึ้นร่วมกันแล้วยังสามารถใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนการใช้พืชทั้งสองชนิดเพื่อบำบัดบริเวณที่ปนเปื้อนร่วมกันได้ต่อไป

2. วิธีการทดลอง

2.1 ลักษณะของดินที่ใช้ในการทดลอง

ดินที่ใช้ในการทดลองเก็บจากคณะเทคโนโลยีทางการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ ดินที่เก็บมาจะถูกตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจนมีน้ำหนักคงที่ จากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงที่มีขนาดรูพรุน 2 มม. แล้วจึงแบ่งดินไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่บริษัทห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด และศูนย์บริการตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยดินที่ใช้มีลักษณะเนื้อดินเป็น sandy clay ปริมาณฟอสฟอรัสมากกว่า 2.9 ก./กก. ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด 2.1 ก./กก. ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด 1.3 ก./กก. และปริมาณสารอินทรีย์ในดิน 11.78 ก./กก. ตามลำดับ

2.2 การเตรียมดินที่ปนเปื้อนแอนทราซีนและฟลูออแรนทีน

นำดินที่ใช้ในการทดลองซึ่งเก็บในขั้นตอนแรกมาทำให้ปนเปื้อนแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนซึ่งความบริสุทธิ์ของสารทั้งสองเป็น 99% (บริษัท Fluka ประเทศสหรัฐอเมริกา) โดยชั่งแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนแล้วละลายใน ไดคลอโรมีเทนเพื่อให้มีความเข้มข้นสุดท้ายของแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนในดิน

อย่างละ 100 มก./กก. (ความเข้มข้นรวมของสารทั้งสองเป็น 200 มก./กก.) และอย่างละ 400 มก./กก. (ความเข้มข้นรวมของสารทั้งสองเป็น 800 มก./กก.) เมื่อผสมดินเรียบร้อยแล้วตั้งดินทิ้งไว้ในตู้ดูดควันเป็นเวลาอย่างน้อย 48 ชม. เพื่อให้ตัวทำละลายระเหยไป จากนั้นแบ่งดินที่มีแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่ระดับความเข้มข้นรวมเป็น 200 และ 800 มก./กก. ใส่ลงในถ้วยพลาสติกถ้วยละ 50 กรัม ความเข้มข้นละ 30 ถ้วย เพื่อใช้เป็นดินทดสอบสำหรับเพาะต้นกล้ากระเจี๊ยบเขียวและบานเย็น ส่วนดินที่ไม่ปนเปื้อนซึ่งใช้เป็นการทดลองในชุดควบคุมเตรียมทั้งสิ้น 30 ถ้วยเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 1 รายละเอียดของแต่ละทรีทเมนต์ต่อชนิดของต้นกล้ากระเจี๊ยบเขียวหรือบานเย็น

ทรีทเมนต์	ลักษณะดิน	ไทรทรอนเอ็กซ์-100	ทวีน 80
1 และ 2	ไม่ปนเปื้อน	-	-
3 และ 4	ไม่ปนเปื้อน	1 เท่าของ CMC	-
5 และ 6	ไม่ปนเปื้อน	10 เท่าของ CMC	-
7 และ 8	ไม่ปนเปื้อน	-	1 เท่าของ CMC
9 และ 10	ไม่ปนเปื้อน	-	10 เท่าของ CMC
11 และ 12	แอนทราซีน + ฟลูออแรนทีน (200 มก./กก.)	-	-
13 และ 14	แอนทราซีน + ฟลูออแรนทีน (200 มก./กก.)	1 เท่าของ CMC	-
15 และ 16	แอนทราซีน + ฟลูออแรนทีน (200 มก./กก.)	10 เท่าของ CMC	-
17 และ 18	แอนทราซีน + ฟลูออแรนทีน (200 มก./กก.)	-	1 เท่าของ CMC
19 และ 20	แอนทราซีน + ฟลูออแรนทีน (200 มก./กก.)	-	10 เท่าของ CMC
21 และ 22	แอนทราซีน + ฟลูออแรนทีน (800 มก./กก.)	-	-
23 และ 24	แอนทราซีน + ฟลูออแรนทีน (800 มก./กก.)	1 เท่าของ CMC	-
25 และ 26	แอนทราซีน + ฟลูออแรนทีน (800 มก./กก.)	10 เท่าของ CMC	-
27 และ 28	แอนทราซีน + ฟลูออแรนทีน (800 มก./กก.)	-	1 เท่าของ CMC
29 และ 30	แอนทราซีน + ฟลูออแรนทีน (800 มก./กก.)	-	10 เท่าของ CMC

หมายเหตุ: CMC หมายถึง critical micellar concentration หรือค่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเริ่มเกิดไมเซลล์

2.3 การทดสอบความเป็นพิษของแอนทราซีน ฟลูออแรนทีนและสารลดแรงตึงผิว

การทดสอบความเป็นพิษของแอนทราซีน ฟลูออแรนทีน และสารลดแรงตึงผิวจะแบ่งชุดการทดลองออกเป็นทรีทเมนต์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 1 วางแผนการทดลองแบบ factorial in CRD มี 2 ปัจจัย 3x5 ปัจจัยแรกคือระดับของพีเอเอชในดินมี 3 ระดับ ปัจจัยที่สองคือ สารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ มี 5 ระดับ แต่ละทรีทเมนต์จะทำทั้งหมด 3 ซ้ำ สำหรับร้อยละการรอดชีวิต แต่ละซ้ำจะเพาะต้นกล้าลงไปซ้ำละ 10 เมล็ด สำหรับสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ ได้แก่ ไทรทรอนเอ็กซ์-100 ซึ่งมีค่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเริ่มเกิดไมเซลล์เท่ากับ 0.24 มิลลิโมล/กก. ส่วนทวีน 80 มีค่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเริ่มเกิดไมเซลล์เท่ากับ 0.12 มิลลิโมล/กก. เติมสารลดแรงตึงผิวลงสู่ดินที่ปนเปื้อนร่วมกันระหว่างแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนหลังจากเพาะเมล็ดได้ 13 วัน การพิจารณาความเป็นพิษของ แอนทราซีน

ฟลูออแรนทีน และสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิดต่อพืชทดสอบพิจารณาจากร้อยละของการรอดชีวิต ซึ่งคำนวณจากจำนวนต้นกล้าที่มีชีวิตในวันสุดท้ายของการทดลองต่อจำนวนเมล็ดที่เพาะทั้งหมด วัดความยาวราก ความยาวยอด น้ำหนักสดของราก น้ำหนักสดของยอด น้ำหนักแห้งของราก และน้ำหนักแห้งของยอดต้นกล้าในวันที่ 20 ของการทดลอง

2.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ร้อยละการรอดชีวิต ความยาวยอดและราก น้ำหนักสดของยอดและราก น้ำหนักแห้งของยอดและรากจะแสดงด้วยค่าเฉลี่ย ± ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน และใช้ Two-way ANOVA ในการทดสอบความแตกต่างทางสถิติระหว่างทรีทเมนต์ จากนั้นวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยด้วย LSD's test ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ยอมรับคือน้อยกว่า 0.05

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

ผลของแอนทราซีน ฟลูออแรนทีนและสารลดแรงตึงผิวต่อการรอดชีวิตของบานเย็นและกระเจี๊ยบเขียว

จากผลการทดลองในตารางที่ 2 จะเห็นว่าการเติมสารลดแรงตึงผิว ได้แก่ ไทรทรอนเอ็กซ์-100 หรือทวีน 80 ที่ระดับความเข้มข้นเป็น 1 เท่า หรือ 10 เท่าของค่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเริ่มเกิดไมเซลล์ไม่ส่งผลต่อร้อยละการรอดชีวิตของพืช เมื่อพิจารณาการรอดชีวิตของพืชภายใต้สภาวะของดินที่มีลักษณะเดียวกัน ได้แก่ ดินที่ไม่ปนเปื้อน ดินที่ปนเปื้อนแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่ระดับความเข้มข้นรวมเป็น 200 หรือ 800 มก./กก. พบว่าไม่ว่าจะเติมสารลดแรงตึงผิวลงสู่ดินหรือไม่ก็ตาม กระเจี๊ยบเขียวที่ปลูกในดินที่ไม่ปนเปื้อนมีร้อยละการรอดชีวิตระหว่าง 70.0-80.0 ส่วนกระเจี๊ยบเขียวที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน แอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่ระดับความเข้มข้นรวม 200 มก./กก. มีร้อยละการรอดชีวิตอยู่ระหว่าง 58.3-93.3 และกระเจี๊ยบเขียวที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่ระดับความเข้มข้นรวม 800 มก./กก. มีค่าร้อยละการรอดชีวิตระหว่าง 36.7-86.7

ตารางที่ 2 ร้อยละการรอดชีวิตของกระเจี๊ยบเขียวที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนและดินที่ปนเปื้อนแอนทราซีนร่วมกับฟลูออแรนทีนในสภาวะที่ได้รับไทรทรอนเอ็กซ์-100 และทวีน 80 ที่ระดับความเข้มข้นเป็น 1 เท่า และ 10 เท่าของค่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเริ่มเกิดไมเซลล์

ทรีทเมนต์	ร้อยละการรอดชีวิต	
	กระเจี๊ยบเขียว	บานเย็น
ดินไม่ปนเปื้อน		
น้ำกลั่น	73.3 ± 9.8a	33.3 ± 9.0b
T-100 (1xCMC)	70.0 ± 8.2a	50.0 ± 5.9ab
T-100 (10xCMC)	76.7 ± 7.2a	25.0 ± 10.2b
Tw (1xCMC)	80.0 ± 0.0a	66.7 ± 9.0a
Tw (10xCMC)	80.0 ± 4.7a	58.3 ± 12.3ab
200 มก./กก.		
น้ำกลั่น	70.0 ± 8.2a	37.5 ± 5.9a
T-100 (1xCMC)	93.3 ± 5.4a	45.8 ± 9.0a
T-100 (10xCMC)	83.3 ± 9.8a	45.8 ± 5.9a
Tw (1xCMC)	58.3 ± 17.1a	62.5 ± 17.7a
Tw (10xCMC)	61.1 ± 4.5a	37.5 ± 0.0a
800 มก./กก.		
น้ำกลั่น	86.7 ± 5.4a	25.0 ± 5.9a
T-100 (1xCMC)	70.0 ± 4.7a	29.2 ± 3.4a
T-100 (10xCMC)	56.7 ± 7.2a	25.0 ± 0.0a
Tw (1xCMC)	36.7 ± 9.8a	41.7 ± 14.8a
Tw (10xCMC))	66.7 ± 13.6a	25.0 ± 5.9a*

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกัน หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ระหว่างลักษณะการเจริญของพืชที่ปลูกในดินที่มีลักษณะเหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกัน ส่วนเครื่องหมาย * หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ระหว่างดินปนเปื้อนที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ และดินที่ไม่ปนเปื้อนภายใต้สภาวะการได้รับสารลดแรงตึงผิวชนิดเดียวกันและระดับความเข้มข้นเดียวกัน สัญลักษณ์: T-100 = ไทรทรอนเอ็กซ์-100 Tw = ทวีน 80

สำหรับการรอดชีวิตของต้นกล้าบานเย็นมีแนวโน้มของร้อยละการรอดชีวิตต่ำกว่าร้อยละการรอดชีวิตของต้นกล้ากระเจี๊ยบเขียว สารลดแรงตึงผิวทั้งไทรทรอนเอ็กซ์-100 และทวีน 80 ไม่ส่งผลต่อร้อยละการรอดชีวิตของต้นกล้าบานเย็นที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนแอนทราซีนและ ฟลูออแรนทีนที่ระดับความเข้มข้นรวมเป็น 200 หรือ 800 มก./กก. เช่นกัน สำหรับค่าร้อยละของการรอดชีวิตของบานเย็นที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนแอนทราซีนและ ฟลูออแรนทีนที่ระดับความเข้มข้นรวมเป็น 200 หรือ 800 มก./กก. มีค่าระหว่าง 37.5-62.5 และ 25.0-41.0 โดยระดับความเข้มข้นของแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่สูงขึ้นเป็นตัวส่งผลให้ร้อยละการรอดชีวิตของต้นกล้าบานเย็นลดลง เช่น ภายใต้สภาวะที่ได้รับทวีน 80 ที่ระดับความเข้มข้น 10 เท่าของค่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเริ่มเกิดไมเซลล์เหมือนกันทำให้ร้อยละการรอดชีวิตของต้นกล้าบานเย็นเหลือเพียงร้อยละ 25.0 เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนพีเอเอชความเข้มข้นรวม 800 มก./กก. ในขณะที่ร้อยละการรอดชีวิตของบานเย็นที่ปลูกในดินที่ไม่ปนเปื้อนมีค่าสูงถึง 58.3

3.1 ผลของแอนทราซีน ฟลูออแรนทีนและสารลดแรงตึงผิวต่อการเจริญของกระเจี๊ยบเขียว

ผลการทดลองในตารางที่ 3 จะเห็นว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวทั้งสองชนิด ได้แก่ ไทรทรอนเอ็กซ์-100 หรือทวีน 80 ที่ระดับความเข้มข้นเป็น 1 เท่าและ 10 เท่าของค่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเริ่มเกิดไมเซลล์ไม่ส่งผลให้น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของยอดกระเจี๊ยบเขียวมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สิ่งที่ส่งผลต่อการเจริญของกระเจี๊ยบเขียว ได้แก่ ระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกันของแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่ปนเปื้อนในดิน โดยที่ระดับความเข้มข้นรวมของแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนเป็น 800 มก./กก. จะส่งผลให้น้ำหนักสดของยอดกระเจี๊ยบเขียวมีค่าเพียง 0.2-0.3 ก. ในขณะที่น้ำหนักสดของยอดกระเจี๊ยบเขียวที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่ระดับความเข้มข้นรวม 200 มก./กก. มีค่าน้ำหนักสดของยอดโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 0.4 ก. ส่วนกระเจี๊ยบเขียวที่ปลูกในดินที่ไม่ปนเปื้อนจะมีค่าน้ำหนักสดของยอดสูงที่สุดโดยมีค่าระหว่าง 0.4-0.5 ก. โดยระดับความเข้มข้นรวมของแอนทราซีนและ ฟลูออแรนทีนที่ปนเปื้อนในดินสูงสุดคือ 800 มก./กก. ส่งผลต่อความยาวยอดของกระเจี๊ยบเขียวเช่นกัน จะเห็นว่าความยาวยอดของกระเจี๊ยบเขียวที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่ระดับความเข้มข้นรวม 800 มก./กก. มีค่าระหว่าง 3.8-7.6 ซม. ในขณะที่ความยาวยอดของกระเจี๊ยบเขียวที่ปลูกในดินที่ไม่ปนเปื้อนและดินที่ปนเปื้อนแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่ระดับความเข้มข้นรวม 200 มก./กก. มีความยาวที่มากกว่า โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 11.9-13.4 และ 10.0-13.5 ซม. ตามลำดับ นอกจากนี้ชนิดและความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวยังส่งผลต่อความยาวยอดของกระเจี๊ยบเขียวอีกด้วย เช่น การได้รับทวีน 80 ที่ระดับความเข้มข้นเป็น 10 เท่าของค่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเริ่มเกิดไมเซลล์มีแนวโน้มกระตุ้นให้กระเจี๊ยบเขียวมีความยาวยอดที่ยาวกว่ากระเจี๊ยบเขียวที่ไม่ได้รับสารลดแรงตึงผิวชนิดใดเลย ทั้งที่ปลูกในดินที่ไม่ปนเปื้อนหรือปลูกในดินปนเปื้อนแอนทราซีนและ ฟลูออแรนทีนที่ระดับความเข้มข้นรวม 200 มก./กก.โดยความยาวยอดของกระเจี๊ยบเขียวมีค่าเท่ากับ 13.5 ซม. เมื่อปลูกในดินที่ปนเปื้อนที่ระดับความเข้มข้นรวมเป็น 200 มก./กก. และได้รับทวีน 80 ที่ระดับความเข้มข้น 10 เท่าของค่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเริ่มเกิดไมเซลล์ ส่วนความยาวของกระเจี๊ยบเขียวจะมีค่าเพียง 10 ซม. เมื่อปลูกในดินปนเปื้อนที่ระดับความเข้มข้นรวมของแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนเป็น 200 มก./กก. เช่นกัน แต่ไม่ได้รับสารลดแรงตึงผิวชนิดใดเลย นอกจากนี้ยังพบว่าการได้รับ ไทรทรอนเอ็กซ์-100 และทวีน 80 ที่ระดับความเข้มข้น 1 เท่า และ 10 เท่าของค่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเริ่มเกิด ไมเซลล์มีแนวโน้มแสดงความเป็นพิษร่วมกับแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่ปนเปื้อนในดินที่ระดับความเข้มข้นรวมเป็น 800 มก./กก. เนื่องจากความยาวยอดของกระเจี๊ยบเขียวที่ปลูกในดินดังกล่าวและไทรทรอนเอ็กซ์-100 หรือทวีน 80 จะมีความยาวเพียง 2.8-6.6 ซม. ในขณะที่ความยาวยอดของกระเจี๊ยบเขียวที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนที่ระดับความเข้มข้นเดียวกันนี้ แต่ไม่ได้รับสารลดแรงตึงผิวชนิดใดเลยมีความยาวยอดเท่ากับ 7.6 ซม.

สำหรับผลของแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนร่วมกับสารลดแรงตึงผิวต่อการเจริญของรากกระเจี๊ยบเขียวพบว่าสารลดแรงตึงผิวทั้งสองชนิดที่ระดับความเข้มข้นแตกต่างกันไม่ส่งผลต่อความยาวรากและน้ำหนักแห้งของรากกระเจี๊ยบเขียวที่ปลูกในดินที่มีลักษณะเดียวกัน การปลูกกระเจี๊ยบเขียวในดินที่มีระดับการปนเปื้อนของแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่สูงขึ้นส่งผลต่อการเจริญของรากกระเจี๊ยบเขียวได้มากกว่า โดยเมื่อได้รับสารลดแรงตึงผิวชนิดเดียวกันและระดับความเข้มข้นเดียวกัน พบว่ากระเจี๊ยบเขียวที่ปลูกในดินปนเปื้อน แอนทราซีนและฟลูออแรนทรีนที่ระดับความเข้มข้นรวมเป็น 800 มก./กก. มีแนวโน้มของความยาวรากและน้ำหนักสดของรากมีค่าต่ำกว่าความยาวรากและน้ำหนักสดของรากกระเจี๊ยบเขียวที่ปลูกในดินที่

ไม่ปนเปื้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ความยาวรากของกระเจี๊ยบเขียวที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่ระดับความเข้มข้นรวม 800 มก./กก. มีค่าระหว่าง 1.6-2.3 ซม. ส่วนความยาวรากของกระเจี๊ยบเขียวที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่ระดับความเข้มข้นรวม 200 มก./กก. มีค่าระหว่าง 3.3-6.3 ซม. ในขณะที่ความยาวรากของกระเจี๊ยบเขียวที่ปลูกในดินที่ไม่ปนเปื้อนมีค่าอยู่ระหว่าง 6.6-7.8 ซม. สำหรับแนวโน้มของน้ำหนักสดของรากกระเจี๊ยบเขียวที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่ระดับความเข้มข้นรวม 800 มก./กก. มีค่าระหว่าง 0.04-0.05 ก. ซึ่งเป็นค่าที่น้อยกว่าน้ำหนักสดของรากกระเจี๊ยบเขียวที่ปลูกในดินที่ไม่ปนเปื้อนซึ่งมีค่าระหว่าง 0.05-0.10 ก. สำหรับน้ำหนักแห้งของรากกระเจี๊ยบเขียวไม่ได้รับผลกระทบจากการปนเปื้อนร่วมกันระหว่างแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนรวมทั้งการได้รับสารลดแรงตึงผิว ถึงแม้ชนิดและระดับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวจะไม่ส่งผลต่อความยาวรากและน้ำหนักแห้งของราก แต่กลับส่งผลกระทบต่อน้ำหนักสดของรากกระเจี๊ยบเขียว โดยการได้รับทวีน 80 ที่ระดับความเข้มข้น 1 เท่าของค่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเริ่มเกิดไมเซลล์มีแนวโน้มกระตุ้นให้น้ำหนักสดของรากกระเจี๊ยบเขียวทั้งที่ปลูกในดินที่ไม่ปนเปื้อนและปลูกในดินที่ปนเปื้อนแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่ระดับความเข้มข้นรวม 200 มก./กก. มีแนวโน้มสูงกว่าการไม่ได้รับสารลดแรงตึงผิวชนิดใดๆ หรือการได้รับทวีน 80 ที่ระดับความเข้มข้น 10 เท่าของค่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเริ่มเกิดไมเซลล์หรือการได้รับไทรทรอนเอ็กซ์-100 ที่ทั้งสองระดับความเข้มข้น ลักษณะของต้นกล้ากระเจี๊ยบเขียวที่เจริญในดินที่ปนเปื้อนพีเอเอชและได้รับสารลดแรงตึงผิวแสดงในรูปที่ 1

ตารางที่ 3 การเจริญของกระเจี๊ยบเขียวที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนและดินที่ปนเปื้อนแอนทราซีนร่วมกับฟลูออแรนทีนในสภาวะที่ได้รับไทรทรอนเอ็กซ์-100 และทวีน 80 ที่ระดับความเข้มข้นเป็น 1 เท่า และ 10 เท่าของค่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเริ่มเกิดไมเซลล์

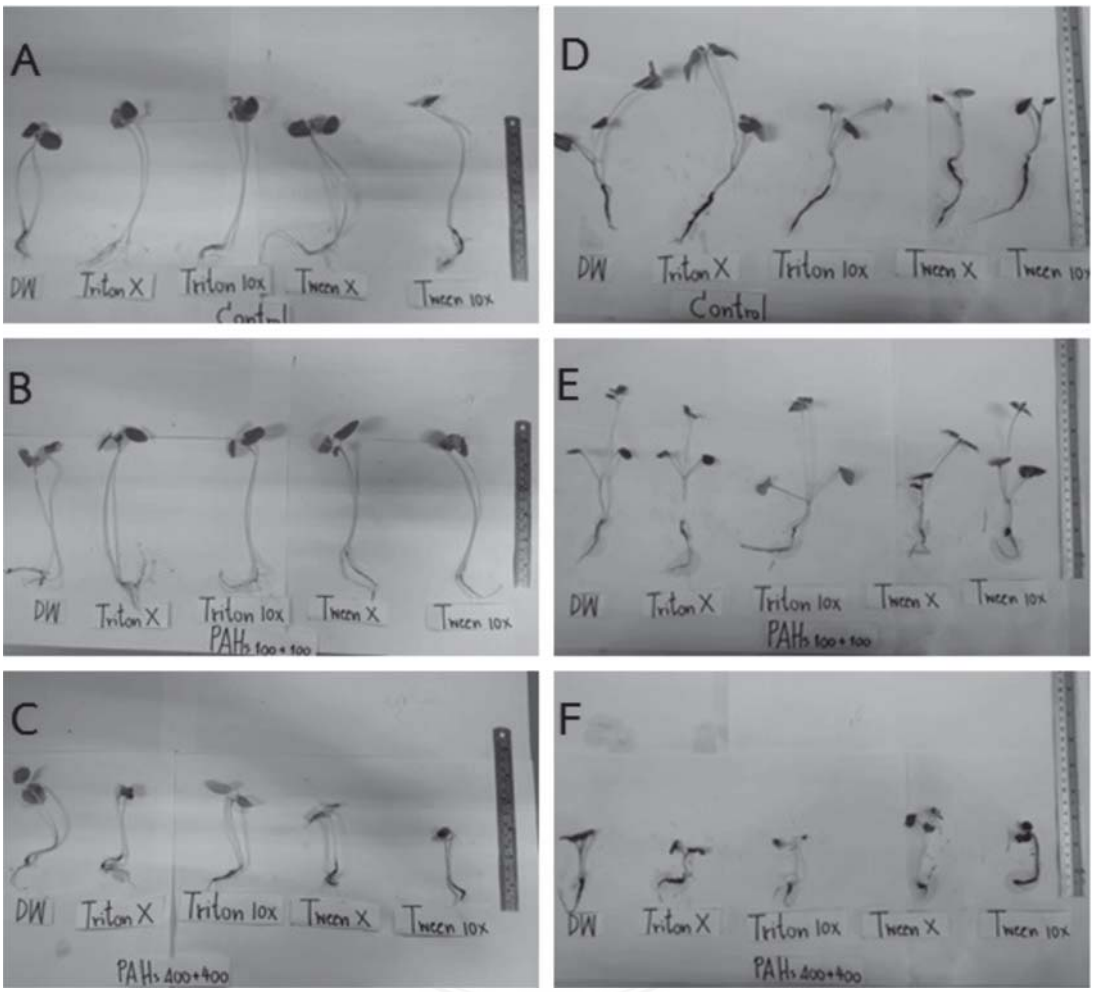
ทรีทเมนต์	การเจริญของยอด			การเจริญของราก		
	ความยาว (ซม.)	น้ำหนักสด (ก.)	น้ำหนักแห้ง (ก.)	ความยาว (ซม.)	น้ำหนักสด (ก.)	น้ำหนักแห้ง (ก.)
<u>ดินไม่ปนเปื้อน</u>						
น้ำกลั่น	11.9±0.4^{c}	0.37±0.03^{a}	0.04±0.004^{a}	7.3±0.7^{a}	0.05±0.004^{c}	0.003±0.0004^{a}
ไทรทรอนเอ็กซ์-100 (1xCMC)	12.2±0.4^{bc}	0.43±0.03^{a}	0.04±0.003^{a}	7.3±0.9^{a}	0.06±0.007^{bc}	0.003±0.0004^{a}
ไทรทรอนเอ็กซ์-100 (10xCMC)	12.8±0.3^{abc}	0.44±0.02^{a}	0.03±0.002^{a}	7.8±0.8^{a}	0.08±0.008^{ab}	0.004±0.0004^{a}
ทวีน 80 (1xCMC)	13.0±0.3^{ab}	0.49±0.03^{a}	0.04±0.003^{a}	7.2±0.8^{a}	0.10±0.010^{a}	0.004±0.0005^{a}
ทวีน 80 (10xCMC)	13.4±0.3^{a}	0.45±0.02^{a}	0.03±0.003^{a}	6.6±0.7^{a}	0.07±0.006^{bc}	0.003±0.0003^{a}
<u>ดินปนเปื้อน (ความเข้มข้นรวม 200 มก./กก.)</u>						
น้ำกลั่น	10.0±0.4^{c*}	0.35±0.02^{a}	0.04±0.003^{a}	3.3±0.2^{a*}	0.05±0.004^{b}	0.004±0.0003^{a}
ไทรทรอนเอ็กซ์-100 (1xCMC)	11.5±0.2^{b}	0.39±0.02^{a}	0.04±0.004^{a}	4.7±0.3^{a*}	0.06±0.004^{b}	0.003±0.0003^{a}
ไทรทรอนเอ็กซ์-100 (10xCMC)	11.9±0.3^{b}	0.39±0.02^{a}	0.04±0.004^{a}	5.6±0.4^{a*}	0.06±0.004^{b*}	0.003±0.0002^{a}
ทวีน 80 (1xCMC)	12.1±0.6^{b}	0.38±0.03^{a*}	0.04±0.005^{a}	6.3±0.5^{a}	0.08±0.007^{a*}	0.004±0.0004^{a}
ทวีน 80 (10xCMC)	13.5±0.4^{a}	0.37±0.02^{a}	0.03±0.004^{a}	4.7±0.6^{a*}	0.05±0.004^{b*}	0.003±0.0003^{a}
<u>ดินปนเปื้อน (ความเข้มข้นรวม 800 มก./กก.)</u>						
น้ำกลั่น	7.6±0.3^{a*}	0.30±0.02^{a*}	0.03±0.004^{a}	2.2±0.3^{a*}	0.04±0.002^{a}	0.003±0.0002^{a}
ไทรทรอนเอ็กซ์-100 (1xCMC)	5.5±0.2^{b*}	0.30±0.02^{a*}	0.02±0.003^{a}	2.0±0.3^{a*}	0.04±0.005^{a*}	0.003±0.0004^{a}
ไทรทรอนเอ็กซ์-100 (10xCMC)	4.8±0.5^{bc*}	0.23±0.02^{a*}	0.03±0.004^{a}	2.3±0.3^{a*}	0.04±0.005^{a*}	0.004±0.0004^{a}
ทวีน 80 (1xCMC)	3.8±0.3^{c*}	0.19±0.03^{a*}	0.03±0.007^{a}	1.9±0.3^{a*}	0.05±0.006^{a*}	0.004±0.0012^{a}
ทวีน 80 (10xCMC)	6.6±0.6^{ab*}	0.29±0.02^{a*}	0.01±0.006^{a}	1.6±0.3^{a*}	0.05±0.006^{a*}	0.003±0.0014^{a}

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกัน หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ระหว่างลักษณะการเจริญของพืชที่ปลูกในดินที่มีลักษณะเหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกัน ส่วนเครื่องหมาย * หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ระหว่างดินปนเปื้อนที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ และดินที่ไม่ปนเปื้อนภายใต้สภาวะการได้รับสารลดแรงตึงผิวชนิดเดียวกันและระดับความเข้มข้นเดียวกัน

3.2 ผลของแอนทราซีน ฟลูออแรนทีนและสารลดแรงตึงผิวต่อการเจริญของบานเย็น

จากผลการทดลองในตารางที่ 4 จะเห็นว่าสารลดแรงตึงผิวทั้งสองชนิด ได้แก่ ไทรทรอนเอ็กซ์-100 และทวีน 80 ที่ระดับความเข้มข้น 1 เท่า และ 10 เท่าของค่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเริ่มเกิดไมเซลล์ไม่ส่งผลต่อการเจริญของทั้งยอดและรากของบานเย็น สิ่งที่ส่งผลต่อการเจริญที่ยอดและรากของบานเย็น ได้แก่ ระดับความเข้มข้นของแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่ปนเปื้อนในดิน เช่น ในสภาวะที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดใดเลยพบว่าความยาวยอดของบานเย็นที่ปลูกในดินที่ไม่ปนเปื้อนมีค่าเท่ากับ 11.2 ซม. ในขณะที่บานเย็นที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน แอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่ระดับความเข้มข้นอย่างละ 400 มก./กก. มีความยาวยอดเพียง 2.9 ซม. หรือในสภาวะที่เติมสารลดแรงผิวทวีน 80 ที่ระดับความเข้มข้นเป็น 10 เท่าของค่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเริ่มเกิดไมเซลล์ทำให้ความยาวยอดและความยาวรากของบานเย็นที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนแอนทราซีนและฟลูออแรนทรีนมีค่าเพียง 3.0 และ 3.1 ซม. ตามลำดับ ในขณะที่ความยาวยอดและความยาวรากของบานเย็นที่ปลูกในดินที่ไม่ปนเปื้อนภายใต้สภาวะการได้รับสารลดแรงตึงผิวทวีน 80 ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกันมีค่าสูงถึง 9.1 และ 7.8 ซม. ตามลำดับ

การปนเปื้อนร่วมกันของแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนส่งผลต่อน้ำหนักสดของยอดและรากในลักษณะเดียวกับความยาวของยอดและราก โดยสารลดแรงตึงผิวทั้งสองชนิดในระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ไม่ส่งผลให้น้ำหนักสดของยอดหรือราก และน้ำหนักแห้งของยอดหรือรากที่ปลูกในดินลักษณะเดียวกันแตกต่างกัน แต่ระดับการปนเปื้อนของแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อน้ำหนักของยอดและราก เช่น ในสภาวะที่ได้รับสารลดแรงตึงผิวไทรทรอนเอ็กซ์-100 ที่ระดับความเข้มข้น 10 เท่าของค่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเริ่มเกิด ไมเซลล์พบว่าน้ำหนักสดของรากบานเย็นที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่ระดับความเข้มข้นอย่างละ 100 และ 400 มก./กก. มีค่าเพียง 0.06 และ 0.08 ก. ส่วนบานเย็นที่ปลูกในดินที่ไม่ปนเปื้อนมีน้ำหนักสดของรากเท่ากับ 0.15 ก. เป็นต้น โดยแนวโน้มของแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่ระดับความเข้มข้นอย่างละ 400 มก./กก. มีแนวโน้มเป็นพิษต่อบานเย็นมากกว่าที่ระดับการปนเปื้อนของสารทั้งสองเป็นอย่างละ 100 มก./กก. ลักษณะของต้นกล้าบานเย็นที่เจริญในดินที่ปนเปื้อนพีเอเอชและได้รับสารลดแรงตึงผิวแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะของต้นกล้ากระเจี๊ยบเขียว (A-C) และบานเย็น (D-F) ที่เจริญในดินที่ปนเปื้อนแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนเป็นเวลา 20 วัน และได้รับสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน ในวันที่ 13 หลัง เพาะเมล็ด

ตารางที่ 4 การเจริญของบานเย็นที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนและดินที่ปนเปื้อนแอนทราซีนร่วมกับฟลูออแรนทีนในสภาวะที่ได้รับไทรทรอนเอ็กซ์-100 และทวีน 80 ที่ระดับความเข้มข้นเป็น 1 เท่า และ 10 เท่าของค่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเริ่มเกิดไมเซลล์

ทรีทเมนต์	การเจริญของยอด			การเจริญของราก		
	ความยาว (ซม.)	น้ำหนักสด (ก.)	น้ำหนักแห้ง (ก.)	ความยาว (ซม.)	น้ำหนักสด (ก.)	น้ำหนักแห้ง (ก.)
<u>ดินไม่ปนเปื้อน</u>						
น้ำกลั่น	11.2±1.2[a]	0.51±0.08[a]	0.02±0.005[a]	6.6±1.2[a]	0.09±0.02[a]	0.013±0.006[a]
ไทรทรอนเอ็กซ์-100 (1xCMC)	7.1±1.2[a]	0.52±0.09[a]	0.03±0.004[a]	6.2±0.8[a]	0.13±0.02[a]	0.017±0.003[a]
ไทรทรอนเอ็กซ์-100 (10xCMC)	7.8±1.8[a]	0.56±0.09[a]	0.02±0.004[a]	7.0±2.0[a]	0.15±0.02[a]	0.020±0.003[a]
ทวีน 80 (1xCMC)	7.8±1.0[a]	0.42±0.05[a]	0.02±0.002[a]	5.8±1.0[a]	0.09±0.01[a]	0.011±0.002[a]
ทวีน 80 (10xCMC)	9.1±1.0[a]	0.52±0.05[a]	0.02±0.001[a]	7.8±0.6[a]	0.10±0.01[a]	0.010±0.002[a]
<u>ดินปนเปื้อน (ความเข้มข้นรวม 200 มก./กก.)</u>						
น้ำกลั่น	7.7±1.5[a]	0.34±0.05[a]	0.02±0.002[a]	5.6±1.0[a]	0.09±0.02[a]	0.008±0.002[a]
ไทรทรอนเอ็กซ์-100 (1xCMC)	7.6±0.9[a]	0.39±0.05[a]	0.03±0.006[a]	5.9±0.5[a]	0.09±0.01[a]	0.006±0.001[a]*
ไทรทรอนเอ็กซ์-100 (10xCMC)	6.4±0.9[a]	0.30±0.04[a]*	0.02±0.004[a]	2.8±0.5[a]*	0.06±0.00[a]*	0.004±0.001[a]*
ทวีน 80 (1xCMC)	7.7±1.4[a]	0.39±0.08[a]	0.02±0.004[a]	5.4±1.7[a]	0.10±0.02[a]	0.016±0.007[a]
ทวีน 80 (10xCMC)	10.5±0.8[a]	0.54±0.04[a]	0.02±0.003[a]	7.4±1.7[a]	0.09±0.02[a]	0.012±0.002[a]
<u>ดินปนเปื้อน (ความเข้มข้นรวม 800 มก./กก.)</u>						
น้ำกลั่น	2.9±0.4[a]*	0.19±0.02[a]*	0.02±0.002[a]	2.9±0.4[a]*	0.08±0.01[a]	0.011±0.003[a]
ไทรทรอนเอ็กซ์-100 (1xCMC)	4.5±1.1[a]	0.26±0.08[a]*	0.02±0.006[a]	3.8±0.7[a]*	0.10±0.03[a]	0.006±0.002[a]*
ไทรทรอนเอ็กซ์-100 (10xCMC)	3.9±0.6[a]	0.24±0.04[a]*	0.02±0.004[a]	2.4±0.8[a]*	0.08±0.02[a]*	0.009±0.002[a]*
ทวีน 80 (1xCMC)	5.6±1.0[a]	0.24±0.04[a]	0.02±0.002[a]	4.1±0.3[a]*	0.09±0.02[a]	0.017±0.005[a]
ทวีน 80 (10xCMC)	3.0±1.0[a]*	0.22±0.07[a]*	0.02±0.004[a]	3.1±0.4[a]*	0.05±0.02[a]*	0.008±0.004[a]

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกัน หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ระหว่างลักษณะการเจริญของพืชที่ปลูกในดินที่มีลักษณะเหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกัน ส่วนเครื่องหมาย * หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ระหว่างดินปนเปื้อนที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ และดินที่ไม่ปนเปื้อนภายใต้สภาวะการได้รับสารลดแรงตึงผิวชนิดเดียวกันและระดับความเข้มข้นเดียวกัน

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าสารลดแรงตึงผิวทั้งสองชนิดที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ ไทรทรอนเอ็กซ์-100 และทวีน 80 ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 1 เท่า (0.24 มิลลิโมล/กก. สำหรับไทรทรอนเอ็กซ์-100 และ 0.12 มิลลิโมล/กก. สำหรับทวีน 80) และ 10 เท่าของค่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเริ่มเกิดไมเซลล์ (2.40 มิลลิโมล/กก. สำหรับไทรทรอนเอ็กซ์-100 และ 1.20 มิลลิโมล/กก. สำหรับทวีน 80) ไม่ส่งผลต่อร้อยละการรอดชีวิตของกระเจี๊ยบเขียวและร้อยละการรอดชีวิตของบานเย็นที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนร่วมกันระหว่างแอนทราซีนและ ฟลูออแรนทีนที่ระดับความเข้มข้นรวมเป็น 200 และ 800 มก./กก. การใช้ทวีน 80 ที่ระดับความเข้มข้นเป็น 1 เท่าของค่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเริ่มเกิดไมเซลล์ส่งผลกระตุ้นให้ร้อยละการรอดชีวิตของบานเย็นเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับบานเย็นที่ไม่ได้รับสารลดแรงตึงผิวชนิดใดเลย ซึ่งทวีน 80 เคยมีรายงานว่าเป็นพิษต่อพืชต่ำ โดยการรดถั่วอัลฟัลฟาที่เจริญในดินไม่ปนเปื้อนด้วยทวีน 80 ที่ความเข้มข้น 0.25 -3 เท่าของค่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเริ่มเกิดไมเซลล์ทุกสัปดาห์ เป็นเวลา 3 สัปดาห์ ไม่ส่งผลต่อการงอกของถั่วอัลฟัลฟาและการรดให้ต้นกล้าอัลฟัลฟาในช่วงสองสัปดาห์แรกทวีน 80 ที่ความเข้มข้น 0.25-1 เท่าของค่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเริ่มเกิดไมเซลล์ทำให้น้ำหนักแห้งของยอดอัลฟัลฟาเพิ่มขึ้นด้วย [14] ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ พบว่าทวีน 80 สามารถเพิ่มความยาวยอดและน้ำหนักสดของรากกระเจี๊ยบเขียวได้ในดินที่ไม่ปนเปื้อนหรือปนเปื้อนพีเอเอชที่ความเข้มข้นรวม 200 มก./กก. แต่ไม่พบผลเช่นนี้ในบานเย็น การที่สารมลพิษอินทรีย์ที่ความเข้มข้นต่ำจะกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช แต่แสดงความเป็นพิษ เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นนั้นเรียกว่า ฮอร์เมซิส (Hormesis) ซึ่งพบได้ในการตอบสนองของพืชต่อสารมลพิษอินทรีย์หลายชนิด เกิดจากการปรับตัวทางเมทาบอลิซึมของพืช [18] ซึ่งพบการเกิดฮอร์เมซิสกับสารลดแรงตึงผิวในการทดลองนี้ด้วย

ความเป็นพิษส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นกับกระเจี๊ยบเขียวและบานเย็นมีสาเหตุหลักมาจากการได้รับแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่ปนเปื้อนร่วมกันในดิน การเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปในวันที่ 13 หลังจากที่พืชงอกเป็นต้นกล้าและมีใบจริงแล้วไม่ทำให้ความเป็นพิษของทั้งแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนต่อพืชเพิ่มขึ้น โดยการเจริญเติบโตของกระเจี๊ยบเขียวและบานเย็นที่ลดลงซึ่งประเมินจากความยาวของยอดกับรากและน้ำหนักของยอดกับรากมาจากการเพาะต้นกล้าในดินที่ปนเปื้อนแอนทราซีนและ ฟลูออแรนทีนในดินที่มีความเข้มข้นรวมของสารทั้งสองชนิดสูงขึ้น และเมื่อความเข้มข้นรวมของแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนเพิ่มขึ้นเป็น 800 มก./กก. จะส่งผลให้การเจริญของพืชลดลงได้มากกว่าต้นกล้าที่เจริญในดินที่มีระดับความเข้มข้นรวมของแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนเป็น 200 มก./กก. พืชที่เลือกใช้ในการศึกษานี้ถือว่ามีความทนทานต่อความเป็นพิษของแอนทราซีนและ ฟลูออแรนทีนมาก เนื่องจากในการศึกษาอื่นๆ ที่ทำการทดสอบความเป็นพิษของแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่ระดับต่ำกว่านี้ แต่สารทั้งสองกลับส่งผลเป็นพิษต่อพืช เช่น แอนทราซีนที่ปนเปื้อนในดินที่ความเข้มข้น 400 มก./กก. ทำให้ความยาวรากของถั่วพุ่ม ถั่วฝักยาว และถั่วเขียวลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับชุดควบคุม [19] หรือฟลูออแรนทีนที่ระดับความเข้มข้น 5 ไมโครโมลาร์/ล. ยับยั้งการเจริญของรากถั่วลันเตา [12] อย่างไรก็ตามความเป็นพิษของสารมลพิษต่อพืชยังอาจขึ้นอยู่กับชนิดของพืชด้วย โดยพืชแต่ละชนิดจะมีความไวต่อการได้รับสารมลพิษแตกต่างกัน เช่น การได้รับฟลูออแรนทีนที่ระดับความเข้มข้นเพียง 0.1 มก./กก. ผ่านทางรากของ *Populus nigra* สามารถยับยั้งพัฒนาการของยอดและการนำสารอาหารเข้าสู่ต้นพืชได้ [8]

ส่วนการเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปแล้วไม่สนับสนุนให้พีเอเอชทั้งสองชนิดมีความเป็นพิษต่อพืชมากขึ้นอาจเกิดจากปัจจัยหลายประการ เช่น พืชทั้งสอง

มีความทนทานต่อแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนได้อยู่แล้ว โดยบานเย็นมักใช้เป็นไม้ประดับที่ปลูกอยู่ริมถนน ทำให้มีโอกาสสัมผัสกับพีเอเอชที่ปลดปล่อยมาจากการไหม้เครื่องยนต์เป็นประจำซึ่งเป็นเหตุผลหนึ่งที่เลือกใช้บานเย็นโดยคาดว่าบานเย็นอาจจะสามารถปรับตัวให้ทนทานต่อ พีเอเอชได้ ส่วนกระเจี๊ยบเขียวนั้นมีรายงานว่าเคยใช้บำบัดดินที่ปนเปื้อนร่วมกันระหว่างแอนทราซีน (ความเข้มข้น 70 มก./กก.) ฟลูออแรนทีน (150 มก./กก.) และตะกั่วมาก่อน [20] ถึงแม้การศึกษานี้จะใช้ระดับของแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่สูงกว่ารวมทั้งเติมสารลดแรงตึงผิวร่วมด้วย แต่กระเจี๊ยบก็ยังคงมีความทนทานต่อการปนเปื้อนของสารมลพิษทั้งสามในดินได้ดี ตามทฤษฎีแล้วการเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปสามารถเพิ่มการชะสารที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำให้ถูกชะออกจากดินได้มากขึ้นก็ตาม [17] โดยแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่ปนเปื้อนในดินทดสอบอาจถูกชะออกมา แต่อาจไม่ถูกลำเลียงเข้าสู่เซลล์พืชจึงทำให้ความเป็นพิษที่เกิดขึ้นกับกระเจี๊ยบและบานเย็นในการศึกษานี้พบไม่มากนัก เนื่องจากสารที่มีรายงานว่าจะสามารถลำเลียงเข้าสู่ภายในเนื้อเยื่อพืชได้จะต้องมีค่า Log K_{ow} อยู่ระหว่าง 0.5-3 [21] ในขณะที่แอนทราซีนและฟลูออแรนทีนมีค่า Log K_{ow} เท่ากับ 4.45 และ 5.33 ตามลำดับ [22] เมื่อพิจารณาจากค่า Log K_{ow} แล้วจะเห็นว่าสารทั้งสองมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำมาก ดังนั้นโอกาสที่จะถูกลำเลียงเข้าสู่พืชจะต่ำไปด้วย การที่สารทั้งสองไม่ถูกลำเลียงเข้าสู่พืชอาจเพียงถูกดูดซับอยู่ที่รากเท่านั้น [23] และอาจเป็นสาเหตุให้มีความเป็นพิษต่อพืชต่ำได้ โดยผลการทดลองที่ได้นับว่าเป็นข้อดีเนื่องจากพืชทดสอบมีความทนทานต่อความเป็นพิษของพีเอเอชและสารลดแรงตึงผิวได้ดี ดังนั้นในอนาคตหากมีการนำพืชทั้งสองไปใช้บำบัดในบริเวณที่ปนเปื้อนเพื่อกระตุ้นกิจกรรมการย่อยสลายพีเอเอชโดยจุลินทรีย์ที่อาศัยในดินและบริเวณรอบรากพืชร่วมกับการใช้สารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ย่อมทำได้

4. สรุป

ทั้งบานเย็นและกระเจี๊ยบเขียวสามารถเจริญเติบโตในดินที่ปนเปื้อนแอนทราซีนและฟลูออแรนทีนที่ความเข้มข้นรวม 200 และ 800 มก./กก. ร่วมกับการได้รับสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ทั้งไทรทรอนเอ็กซ์-100 และทวีน 80 ได้ โดยทวีน 80 ที่ความเข้มข้น 1 เท่าของค่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเริ่มเกิดไมเซลล์เป็นพิษต่อกระเจี๊ยบเขียวน้อยที่สุด ในขณะที่สารลดแรงตึงผิวทุกชนิดเป็นพิษต่อบานเย็นไม่แตกต่างกัน ความเป็นพิษมีผลกระทบเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของพีเอเอชในดินเพิ่มขึ้น ดังนั้นพืชทั้งสองชนิดนี้จึงมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ปลูกเพื่อฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนพีเอเอชความเข้มข้นในระดับ 200 มก./กก. ร่วมกับการใช้สารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณงบประมาณสนับสนุนในการทำวิจัยจากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ 2560 และ Prof. Dr. Hung Lee สำหรับคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] S. Pongpiachan, D. Tipmanee, W. Deelaman, J. Muprasit, P. Feldens and K. Schwarzer, “Risk assessment of the presence of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coastal areas of Thailand affected by the 2004 tsunami,” *Marine Pollution Bulletin*, vol. 76, no. 1-2, pp. 370-378, 2013.

[2] L. Hu, X. Shi, S. Qiao, T. Lin, Y. Li, Y. Bai, B. Wu, S. Liu, N. Kornkanitnan and S. Khokiattiwong, “Sources and mass inventory of sedimentary polycyclic

aromatic hydrocarbons in the Gulf of Thailand: Implications for pathways and energy structure in SE Asia," *Science of the Total Environment*, vol. 575, pp. 982–995, 2017.

[3] J. Wang, X. Zhang, W. Ling, R. Liu, J. Liu, F. Kang and Y. Gao, "Contamination and health risk assessment of PAHs in soils and crops in industrial areas of the Yangtze River Delta region, China," *Chemosphere*, vol. 168, pp. 976-987, 2017.

[4] S. Suman, A. Sinha and A. Tarafdar, "Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) concentration levels, pattern, source identification and soil toxicity assessment in urban traffic soil of Dhanbad, India," *Science of the Total Environment*, vol. 545-546, pp. 353-360, 2016.

[5] R. Boonyatumanond, G. Wattayakorn, A. Togo and H. Takada, "Distribution and origins of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in riverine, estuarine, and marine sediments in Thailand," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 52, pp. 942-956, 2006.

[6] W. Chouychai, A. Thongkukiatkul, S. Upatham, H. Lee, P. Pokethitiyook and M. Kruatrachue, "Phytotoxicity assay of crop plants to phenanthrene and pyrene contaminants in acidic Soil," *Environmental Toxicology*, vol. 22, no. 6, pp. 597-604, 2007.

[7] R. Aina, L. Palin and S. Citterio, "Molecular evidence for benzo[a]pyrene and naphthalene genotoxicity in *Trifolium repens* L.," Chemosphere, vol. 65, no. 4, pp. 666-673, 2006.

[8] R. Witting, H.-J. Ballach and A. Kuhn, "Exposures of the root of *Populus nigra* L. cv. Loenen to PAHs and its effect on growth and water balance," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 10, no. 4, pp. 235-244, 2003.

[9] A. Mallakin, T. S. Babu, D. G. Dixon and B. M. Greenberg, "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*, vol. 17, no. 5, pp. 462-471, 2002.

[10] P. Henner, M. Schiavon, V. Druelle and E. Lichtfouse, "Phytotoxicity of ancient gaswork soils: Effect of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) on plant germination," *Organic Geochemistry*, vol. 30, no. 8, pp. 963-969, 1999.

[11] M. Kummerová and E. Kmentová, "Photoinduced toxicity of fluoranthene on germination and early development of plant seedling," *Chemosphere*, vol. 56, no. 4, pp. 387-393, 2004.

[12] M. Kummerová, L. Váňová, J. Krulová and Š. Zezulka, "The use of physiological characteristics for comparison of organic compounds phytotoxicity," *Chemosphere*, vol. 71, no. 11, pp. 2050-2059, 2008.

[13] J. Tong, M. Nakajima, H. Nabetani and Y. Kikuchi, "Surfactant effect on production of monodispersed by microchannel emulsification methods," *Journal of Surfactant Detergent*, vol. 3, no. 3, pp. 285-293, 2000.

[14] A. C. Agnello, D. Huguenot, D. van Hullebusch and G. Esposito, "Phytotoxicity of citric acid and Tween®80 for potential use as soil amendments in enhanced phytoremediation," *International Journal of Phytoremediation*, vol. 17, no. 7, pp. 669-677, 2015.

[15] C. Liao, X. Liang, G. Lu, T. Thai, W. Xu and Z. Dang, "Effect of surfactant amendment to phytoremediation by maize (*Zea mays* L.).," *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 112, pp. 1-6, 2015.

[16] D. Ferruzan, Y. Güden, A. Halide, Ö. Fatmanur and L. Sinem, "Phytotoxic effects of non-ionic surfactant octylphenol series (Triton X-100, Triton X-114, Triton X-405) on onion," *Asian Journal of Chemistry*, vol. 24, no. 12, pp. 5746-5748, 2012.

[17] X. Mao, R. Jiang, W. Xiao and J. Yu, "Use of surfactants for the remediation of contaminated soils: A Review," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 285, pp. 419-435, 2015.

[18] V. F. Medina, E. Maestri, A. C. Dietz and S.C. McCutcheon, "Plant tolerances to contaminants" *in Phytoremediation: Transformation and Control of Contaminants*, S.C. McCutchoen and J. L. Schnoor, Eds. Hoboken: Wiley-Interscience, 2003, pp.189-232.

[19] K. Somtrakoon, D. Phalaphol and W. Chouychai, "Phytotoxicity of anthracene and phenanthrene contaminants in soil on legume seed germination and subsequence seedling growth," *Srinakharinwirot Univeristy Journal of Science and Technology*, vol. 4, no. 7, pp. 1-12, 2012.

[20] K. Somtrakoon, W. Chouychai and H. Lee, "Removal of anthracene and fluoranthene by waxy corn, long bean and okra in lead-contaminated soil," *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 95, no. 3., pp. 407-413, 2015.

[21] E. Pilon-Smits, "Phytoremediation," *Annual Review of Plant Biology*, vol. 56, pp. 15-39, 2005.

[22] W. Chouychai, "Distribution and Phytotoxicity of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons," *RMUTP Research Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 140-152, 2011.

[23] K. E. Gerhardt, X.-D. Huang, B. R. Glick and B.M. Greenberg, "Phytoremediation and rhizoremediation of organic soil contaminants: Potential and challenge," *Plant Science*, vol. 176, no. 1, pp. 20-30, 2009.