การบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอีน โดยใช้พืชร่วมกับกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน

The Integration of Phytoremediation and Fenton Oxidation for Trinitrotoluene – contaminated Water Treatment

พันเอกหญิง พนิตตา ปัญญาดิลก
Colonel Panitta Panyadilog

อาจารย์ส่วนการศึกษา กองวิชาเคมี โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
ต.พรหมณี อ.เมือง จ.นครนายก 26000
Instructor, Department of Chemistry, Chulachomklao Royal Military Academy
Prommanee Subdistrict, Mueang District, Nakhon Nayok Province, 26000
Corresponding Author: panitta1915@gmail.com
(Received: May 16, 2019, Revised: June 20, 2019, Accepted: August 16, 2019)

บทคัดย่อ : 2 4 6-ไตรไนโตรโทลูอีน (Trinitrotoluene) หรือทีเอ็นที (TNT) เป็นวัตถุระเบิดแรงสูง จัดเป็นวัตถุระเบิดมาตรฐานที่สำคัญในราชการทหาร มีโครงสร้างเป็นสารประกอบไนโตรอะโรมาติก ซึ่งย่อยสลายยาก ประกอบกับผลอันตรายที่มีต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ทำให้มีการศึกษาวิจัยเพื่อบำบัดสารอันตรายชนิดนี้ งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผสมผสานการบำบัดโดยใช้พืชร่วมกับกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันในการบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอีน ทำการทดลองโดยใช้ชุดการทดลองขนาด 40×40×60 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใช้หญ้าแฝกลุ่มสายพันธุ์สุราษฎร์ธานี (*Vetiveria Zizanioides*) และดินลูกรังเป็นสารตั้งต้นของกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน ทำการทดลองหาอัตราการลดความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอีน เข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงระยะเวลา 12 วัน ผลการวิจัยพบว่า การบำบัดโดยใช้หญ้าแฝกลุ่ม สายพันธุ์สุราษฎร์ธานี ได้ผลใกล้เคียงกับการบำบัดโดยดินลูกรังจากกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน มีอัตราการลดลงของไตรไนโตรโทลูอีน 91.80% และ 91.76% ตามลำดับ ขณะที่การผสมผสานการบำบัดโดยใช้หญ้าแฝกร่วมกับกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน มีอัตราการลดลงของไตรไนโตรโทลูอีน 95.08% ในช่วงระยะเวลา 3 วันแรกของการทดลอง ดินลูกรังสามารถลดความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอีนลงได้ดี ขณะที่หญ้าแฝกสามารถลดความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอีนลงได้ดีในช่วงระยะเวลา 6 วันแรกของการทดลอง

คำสำคัญ : ไตรไนโตรโทลูอีน การบำบัดโดยใช้พืช กระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน หญ้าแฝก ดินลูกรัง

Abstract : 2,4,6-Trinitrotoluene or TNT is one of the high explosive which is defined as the standard explosive in the military. Because of its toxicity and persistence in the environment for a long time. The study of TNT degradation was investigated. The main objective was to determine the feasibility of the integration of phytoremediation and fenton oxidation for TNT- contaminated water treatment. The 40×40×60 cubic centimeter reactors with Vetiveria zizanioides and laterite soil were prepared. The laterite soil was used as the iron sources of the fenton oxidation. The TNT degradation efficiencies at the concentration of 40 milligrams per liter were investigated during the experimental period of 12 days. The results indicated that the TNT degradation efficiency by phytoremediation with Vetiveria zizanioides was similar to fenton oxidation with laterite soil, which were 91.80 % and 91.76 % respectively. Whereas the degradation efficiency by the integration of phytoremediation and fenton oxidation was 95.08 %. The TNT degradation by laterite soil was found most effective during the first 3 days of experiments, whereas the TNT degradation by Vetiveria zizanioides was found most effective during the first 6 days of experiments.

Keywords : Trinitrotoluene, phytoremediation, fenton oxidation, Vetiveria zizanioides, laterite

1. บทนำ

ไตรไนโตรโทลูอีน (Trinitrotoluene) หรือ ทีเอ็นที (TNT) เป็นวัตถุระเบิดแรงสูงชนิดหนึ่ง จัดเป็นวัตถุระเบิดมาตรฐานที่สำคัญในราชการทหาร มีความคงทนสูง ค่อนข้างเสถียร มีความว่องไวต่ำ สามารถใช้ในการหลอมทำวัตถุระเบิดผสมได้ ไตรไนโตรโทลูอีนมีวิธีการผลิตไม่ยุ่งยาก จึงมีใช้อย่างกว้างขวาง นอกจากนี้ยังใช้สำหรับบรรจุลูกกระสุนปืนใหญ่ ลูกระเบิดยิง ดินระเบิดทำลาย ใช้เป็นส่วนประกอบของดินเริ่ม และส่วนประกอบของดินส่งกระสุนบางชนิด เมื่อเก็บรักษาในที่มีอากาศร้อน อาจเกิดการไหลเยิ้มได้ (Exudation) เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำประมาณ 80 องศาเซลเซียส

จากข้อมูลของ The Agency for Toxic Substances and Disease Registry, ATSDR รายงานถึงความเป็นพิษของไตรไนโตรโทลูอีนว่า มีผู้ได้รับอันตรายจากไตรไนโตรโทลูอีน ไม่น้อยกว่า 17,000 ราย และกว่า 475 ราย เสียชีวิตจากกระบวนการผลิตในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 1 ผู้หญิงที่ทำงานในโรงงานผลิตวัตถุระเบิดซึ่งสัมผัสไตรไนโตรโทลูอีน มีความผิดปกติที่สังเกตได้ชัดเจน คือ มีผิวเป็นสีเหลือง จนมีชื่อเรียกลักษณะดังกล่าวนี้ว่า Canary Girls เส้นทางสำคัญในการเข้าสู่ร่างกายได้แก่ การหายใจการบริโภคสารปนเปื้อน และการสัมผัสผิวหนัง อันตรายที่เกิดขึ้นอาจได้แก่ ความผิดปกติของเนื้อเยื่อตับ ตับโตมะเร็งตับ โลหิตจางจากไขกระดูกฝ่อ ต้อกระจก United States Environmental Protection Agency, U.S.EPA ได้กำหนดให้ไตรไนโตรโทลูอีน เป็นสารก่อมะเร็ง คลาส ซี (Possible Human Carcinogen) จากการศึกษาในสัตว์ พบว่าการได้รับไตรไนโตรโทลูอีนในปริมาณสูงอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อตับ เลือด ระบบภูมิคุ้มกัน และระบบสืบพันธุ์

ในประเทศไทยการศึกษาเกี่ยวกับการบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอีนยังมีน้อย ทั้งที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในหน่วยทหาร ทั้งการประกอบขึ้นรูป การทดสอบ การใช้งาน ตลอดจนการระเบิดทำลาย

ด้วยโครงสร้างทางเคมีของไตรไนโตรโทลูอีนที่เป็นสารประกอบไนโตรอะโรมาติก มีโครงสร้างเป็นโซ่ปิด ทำให้สลายตัวยาก เป็นปัญหาต่อสุขภาพมนุษย์และตกค้างในสิ่งแวดล้อมได้เป็นเวลานาน ผู้เขียนจึงสนใจทำการศึกษาการบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอีน โดยพืชเสริมด้วยกระบวนการทางเคมีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดระยะเวลาในการบำบัด จากการศึกษาพบว่า การใช้พืชชนิดหญ้าแฝกสามารถใช้บำบัดน้ำปนเปื้อนสารอินทรีย์ได้ สำหรับกระบวนการทางเคมีโดยกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน สามารถใช้บำบัดน้ำปนเปื้อนสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนได้ดี จึงทำการศึกษาการบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอีนโดยใช้หญ้าแฝกร่วมกับกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้หญ้าแฝกบำบัด น้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอีน

2.2 เพื่อศึกษาผลของกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันโดยใช้เหล็กจากดินลูกรังในการบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอีน

2.3 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผสมผสานการใช้พืชร่วมกับกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน ในการบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอีน

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ไตรไนโตรโทลูอีน (Trinitrotoluene) ชื่อในระบบ IUPAC คือ 2-Methyl-1,3,5-Trinitrobenzene มีลักษณะเป็นผลึกสีเหลืองอ่อน เรียวคล้ายเข็ม ละลายน้ำได้น้อย แต่จะละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ มีความคงทนสูง มีความว่องไวต่ำ ถ้าลุกไหม้ในที่โล่งจะเกิดควันสีดำ เมื่อเก็บรักษาในสถานที่มีอากาศร้อน อาจเกิดการไหลเยิ้มได้ (Exudation) เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำ ประมาณ 80 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงสามารถหลอมไตรไนโตรโทลูอีนโดยใช้ความร้อนจากไอน้ำได้

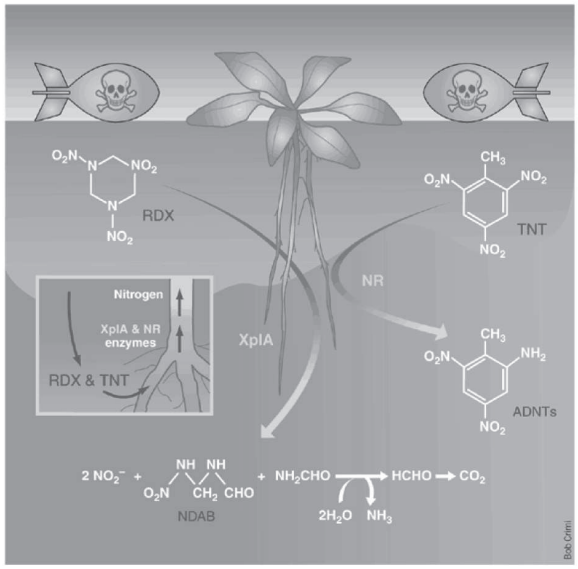
ไตรไนโตรโทลูอีน มีค่าจำกัดการสัมผัสที่ยอมรับได้ (Permissible Exposure Limit, PEL) = 1.5 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร ค่าอันตรายทันทีต่อชีวิตหรือสุขภาพ (Immediately Dangerous to Life or Health, IDLH) = 500 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร และขนาดที่ทำให้ตายครึ่ง(mouse, oral) (Lethal Dose, LD50) = 660 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับในระยะสั้น คือ ระคายเคืองตา ผิว และทางเดินหายใจ อาจส่งผลกระทบต่อระบบเลือด ทำให้เซลล์เม็ดเลือดแดงแตก (Hemolysis) หรือมีอาการของเมตาโมโกลบิล (Methaemoglobin) การได้รับไตรไนโตรโทลูอีนในระยะยาว มีผลต่อการทำงานของตับ ระบบเลือด และสายตา อาจมีภาวะตัวเหลือง ตาเหลือง โลหิตจาง ตลอดจนอาการของต้อกระจก

Kongtip และคณะ [5] ทำการศึกษาการรับสัมผัสไตรไนโตรโทลูอีนและผลกระทบต่อสุขภาพคนงานในโรงงานผลิตอาวุธปืนและกระสุน พบ 2-Amino-4,6-Dinitrotoluene และ 4-Amino-2,6-Dinitrotoluene ซึ่งเป็นสารอนุพันธ์ของไตรไนโตรโทลูอีนในปัสสาวะกำลังพลที่สัมผัสไตรไนโตรโทลูอีน คนงานที่รับสัมผัสมีอาการระคายเคืองตา จมูก ลำคอ อ่อนเพลีย ปวดศีรษะมากกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับสัมผัส ข้อมูลดังกล่าวสอดคล้องกับข้อมูลของ U.S. EPA ที่กล่าวถึง ผลอันตรายของไตรไนโตรโทลูอีนทั้งต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม สามารถก่อให้เกิดความผิดปกติต่อร่างกาย ส่งผลต่อการทำงานของตับ ระบบภูมิคุ้มกัน และอาจเป็นสารก่อมะเร็ง ประกอบกับความคงทนในสิ่งแวดล้อม สลายตัวยาก และสามารถสะสมได้ในสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ จึงนับว่าการปนเปื้อนของไตรไนโตรโทลูอีนเป็นปัญหาที่กองทัพควรให้ความสนใจเป็นอย่างยิ่ง การแพร่กระจายของไตรไนโตรโทลูอีน มักเกิดขึ้นในบริเวณที่เป็นแหล่งผลิต แหล่งใช้ และแหล่งทำลาย ซึ่งหน่วยทหารเป็นพื้นที่สำคัญที่จะได้รับผลกระทบโดยตรงจากผลอันตรายของสารพิษชนิดนี้ การปนเปื้อนของไตรไนโตรโทลูอีนเป็นไปได้ทั้งการตกค้างบนดิน ปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ

ใต้ดิน ไหลชะลงสู่แหล่งน้ำผิวดิน ตลอดจนอาจมีการสะสมในพืชและสัตว์ที่อาศัยในบริเวณดังกล่าว นอกจากนี้ พบว่าสารอนุพันธ์ของไตรไนโตรโทลูอีนบางชนิดที่เกิดจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในดิน มีความเป็นพิษมากกว่าไตรไนโตรโทลูอีนหลายเท่า จากผลอันตรายดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาการบำบัดไตรไนโตรโทลูอีนที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม เพื่อสุขภาพ อนามัยที่ดีของทหารและชุมชนโดยรอบ ทั้งนี้ เทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดไตรไนโตรโทลูอีน มีหลากหลาย ได้แก่ การเผา (Incineration) การฝังกลบ (Landfill) การดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Granular Activation Carbon) ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) การบำบัดทางชีวภาพ (Bioremediation) และการใช้พืชในการบำบัด (Phytoremediation)

การใช้พืชในการบำบัดมลสารเป็นกระบวนการใช้พืชกำจัดความเป็นพิษของมลสารที่ปนเปื้อนและตกค้างในสิ่งแวดล้อม ซึ่งกลไกของพืชในการกำจัดมลสารนี้อาจเกิดขึ้นโดยทางตรงหรือโดยทางอ้อม ได้แก่ การดูดซึมมลสารเข้าสู่พืชและเปลี่ยนรูปหรือย่อยสลายมลสารนั้นให้มีความเป็นพิษลดลง (Phytodegradation) การทำให้มลสารเปลี่ยนสถานะกลาย เป็นไอ (Volatilization) การสะสมในต้นพืช (Phytoaccumulation) ตลอดจนการย่อยหรือสลายมลสารด้วยจุลินทรีย์ โดยพืชมีส่วนสำคัญในการกระตุ้นหรือช่วยกระบวนการย่อยสลายดังกล่าว (Plant-assisted Bioremediation)

การกำจัดความเป็นพิษของไตรไนโตรโทลูอีน ซึ่งเป็นสารประกอบไนโตรอะโรมาติกโดยพืช เกิดขึ้นได้จากกิจกรรมของเอนไซม์ที่สำคัญ คือ เอนไซม์ไนโตรรีดักเตส (Nitroreduc- tase Enzyme, NR) โดยจะเปลี่ยนหมู่ไนโตร (-NO2) ให้เป็นหมู่ไฮดรอกซิลอะมิโน (-NHOH) และต่อไปเป็นหมู่อะมิโน (-NH2) ตามลำดับ เกิดเป็นสารใหม่คือ 2-Amino-4,6-Dinitrotoluene (ADNTs) ที่มีความเป็นพิษลดลง



ภาพที่ 1 การใช้พืชในการบำบัดไตรไนโตรโทลูอีน

กระบวนการเฟนตัน (Fenton Reaction) เป็นหนึ่งในกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน (Advanced Oxidation Processes, AOPs) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมีที่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะเมื่อใช้กับมลสารที่เป็นสารอินทรีย์ กระบวนการเฟนตันมีสารละลายเฟนตันเป็นสารตั้งต้น ซึ่งประกอบด้วย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) เกิดปฏิกิริยาที่มีลักษณะเฉพาะเกิดไฮดรอกซิลเรดิเคิล (Hydroxyl Radical, HO°) ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระที่สามารถบำบัดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากในน้ำเสียได้ดี เช่น ฟีนอล และสารประกอบอะโรมาติก กลไกของปฏิกิริยาเฟนตันออกซิเดชันเป็นดังสมการ

$$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + OH^- + HO^{\cdot} \quad (1)$$

$$R\text{-}H\ (\text{Organic Compounds}) + HO^{\cdot} \rightarrow R^{\cdot} + H_2O \quad (2)$$

$$R^{\cdot} + HO^{\cdot} \rightarrow R\text{-}OH \quad (3)$$

Li Comfort และ Shea [6] ได้ทำการศึกษาการบำบัด 2,4,6-ไตรไนโตรโทลูอีนโดยกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน พบว่าเมื่อใช้สารละลายเฟนตันที่ประกอบด้วย H_2O_2 เข้มข้น 1% โดยปริมาตร และ Fe^{2+} เข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตรบำบัดสารละลายไตรไนโตรโทลูอีนเข้มข้น 70 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้สภาวะไร้แสง สามารถกำจัดไตรไนโตรโทลูอีนได้ 100% ภายในเวลา 24 ชั่วโมง และได้ตรวจพบอนุพันธ์ของ ไตรไนโตรโทลูอีน คือ 2,4,6 ไตรไนโตรเบนโซอิกแอซิด และ 1,3,5 ไตรไนโตรเบนซีน ภายในเวลา 15 นาที หลังทำปฏิกิริยา

Matta และ [7] ทำการศึกษา การใช้ออกซิเดนท์ชนิดต่างๆ ในการทำปฏิกิริยากับไตรไนโตรโทลูอีน พบว่าสารละลายเฟนตันเท่านั้นที่สามารถใช้ในการลดความเป็นพิษของไตรไนโตรโทลูอีนได้ และเมื่อทำการศึกษาแร่เหล็กที่ทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาเฟนตัน พบว่าเหล็กออกไซด์ในรูปของแมกนีไทด์มีประสิทธิภาพดีที่สุด

มนต์ชัย จันทร์ศิริ [1] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของหญ้าแฝกที่ปลูกด้วยเทคนิคแท่นลอยน้ำในการบำบัดน้ำเสียชุมชน พบว่า การปลูกหญ้าแฝกด้วยเทคนิคแท่นลอยน้ำเพื่อบำบัดน้ำเสียชุมชน ควรใช้ระยะเวลา 7 วัน และหญ้าแฝกลุ่ม สายพันธุ์สุราษฎร์ธานี มีการเจริญเติบโตของรากดี เหมาะกับการบำบัดน้ำเสียชุมชน

Shakya และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาศักยภาพในการใช้หญ้าแฝกบำบัดไตรไนโตรโทลูอีนที่ปนเปื้อนในน้ำ โดยทดลองปลูกหญ้าแฝกในระบบไฮโดรโปนิก (Hydroponic System) ที่มีสารละลายไตรไนโตรโทลูอีนเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงระยะเวลา 8 วัน พบว่าหลังการทดลอง ความเข้มข้นของสารละลายไตรไนโตรโทลูอีนลดลงต่ำกว่าระดับที่ตรวจวัดได้ คือ ต่ำกว่า 1 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยปราศจากการตรวจพบผลอันตราย

Das และคณะ [2] ได้พบ ADNTs สารอนุพันธ์ของไตรไนโตรโทลูอีน ในเนื้อเยื่อพืชที่ใช้ในการบำบัดไตรไนโตรโทลูอีน ซึ่งเป็นผลผลิตจากเอนไซม์ไนโตรรีดักเตส และได้ทำการศึกษาผลของเอนไซม์ไนโตรรีดักเตสที่มีต่อการบำบัดไตรไนโตรโทลูอีนโดยหญ้าแฝก ได้ทำการทดลองปลูกหญ้าแฝกที่มีชีวมวล 50 กรัมต่อลิตร ในระบบไฮโดรโปนิกที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในระบบที่มีสารละลายไตรไนโตรโทลูอีน ความเข้มข้นต่างๆ พบว่าเอนไซม์ไนโตรรีดักเตสมีปริมาณสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่เนื้อเยื่อรากและหน่อของหญ้าแฝกที่ปลูกในระบบมีสารละลายไตรไนโตรโทลูอีนเมื่อเทียบกับกลุ่มตัวอย่าง กิจกรรมของเอนไซม์ไนโตรรีดักเตสเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายไตรไนโตรโทลูอีน และเพิ่มสูงสุดภายในระยะ 5 วันของการทดลอง

Saeed และคณะ [14] ได้รายงานข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติทางเคมีของดินลูกรังว่า ดินลูกรังประกอบด้วยเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ถึง 29.40% และเป็นองค์ประกอบสูงที่สุดในดินลูกรัง ซึ่ง Fe^{3+} จาก Fe_2O_3 สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันไปเป็น Fe^{2+} ได้ ภายใต้ภาวะที่มีความชื้น

Hung และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับบทบาทของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับความเครียดของพืช พบว่าเมื่อพืชอยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม จะเกิดความเครียด พืชจะแปลงและส่งสัญญาน (Signal Transduction) ให้มีการเปลี่ยนแปลงระดับยีน และผลิต H_2O_2 ซึ่งเป็นสัญญานที่พืชแสดงออกถึงความเครียด

Jiamjitrpanich และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาการบำบัดไตรไนโตรโทลูอีนปนเปื้อนในดิน โดยใช้อนุภาคเหล็กขนาดนาโน พบว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้อนุภาคเหล็กขนาดนาโนในการบำบัดสารไตรไนโตรโทลูอีนปนเปื้อนในดิน เป็นการบำบัดขั้นที่ 1 และควรตามด้วยการบำบัดขั้นที่ 2 โดยใช้พืชหรือกระบวนการทางชีวภาพ จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดได้

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่าในการบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอีนสามารถใช้ได้ทั้งการบำบัดโดยใช้พืช และกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมี พืชที่ศึกษาคือ หญ้าแฝก เป็นพืชที่หาได้ง่ายในไทย สามารถใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน เช่น ไตรไนโตรโทลูอีน จึงนำมา

เป็นข้อพิจารณาในการทดลอง ส่วนกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน เป็นกระบวนการที่มีเฟอร์รัส อิออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารตั้งต้น การใช้ดินลูกรังที่มีองค์ประกอบของเหล็กออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักเพื่อเลี่ยงการใช้สารเคมี จึงเป็นวัตถุดิบที่ผู้วิจัยนำมาศึกษา สำหรับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าพืชสามารถผลิตได้เองเมื่อมีความเครียดอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีสารปนเปื้อน

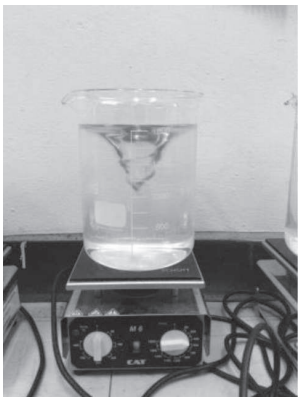
ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยมุ่งเน้นการแก้ปัญหาในบริเวณหน่วยทหาร เทคโนโลยีที่เลือกใช้จึงควรเป็นเทคโนโลยีที่ไม่ยุ่งยาก ซับซ้อน ราคาในการบำบัดไม่สูง ดูแลง่าย และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จึงเลือกใช้พืชในการบำบัดโดยใช้หญ้าแฝก ซึ่งเป็นพืชที่พบเห็นได้ทั่วไป ดูแลง่าย ผสมผสานกับปฏิกิริยา เฟนตันออกซิเดชัน โดยใช้เหล็กไอออนจากดินลูกรัง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดโดยเน้นถึงความปลอดภัย ประหยัด และสามารถดำเนินการได้จริง

4. วิธีดำเนินการศึกษา

การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้หญ้าแฝกบำบัดน้ำปนเปื้อนสารไตรไนโตรโทลูอีน เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) โดยการใช้หญ้าแฝกลุ่มสายพันธุ์สุราษฎร์ธานี เป็นพืชในการบำบัดน้ำปนเปื้อนใช้เหล็กไอออนจากดินลูกรัง ในการทำปฏิกิริยาเฟนตันออกซิเดชัน มีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

4.1 เตรียมหญ้าแฝก โดยนำกล้าหญ้าแฝกเลี้ยงด้วยสาร ละลายผสมปุ๋ยอินทรีย์และยูเรีย เพื่อให้หญ้าแฝกแข็งแรงและงอกราก เป็นเวลา 30 วัน

4.2 เตรียมสารละลายไตรไนโตรโทลูอีน เข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ไตรไนโตรโทลูอีน มวล 4 กรัม ละลายในน้ำ เพิ่มความสามารถในการละลายโดยใช้เครื่องกวนสารแม่เหล็กจน ได้สารละลายปริมาตร 100 ลิตร



ภาพที่ 2 การเตรียมสารละลายไตรไนโตรโทลูอีน

4.3 เตรียมกรวดหยาบ ขนาด ¾ นิ้ว ล้างทำความสะอาด และบรรจุลงในภาชนะที่เตรียมเป็นชุดการทดลอง โดยบรรจุไว้ด้านล่างสุดในทุกชุดการทดลอง

4.4 เตรียมดินลูกรัง คัดขนาดโดยการร่อนผ่านตะแกรงร่อน เบอร์ 100 เพื่อให้ได้ขนาดเม็ดดินเล็กกว่า 0.15 มิลลิเมตร บรรจุในชุดการทดลองที่ 3 และ 4 โดยบรรจุลงบนชั้นของกรวดหยาบ

4.5 ทำการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กไอออนในดินลูกรัง โดยใช้เทคนิคไอออนโครมาโทกราฟี

4.6 เตรียมชุดการทดลอง ขนาด 40×40×60 ลูกบาศก์เซนติเมตร บรรจุกรวดหยาบ ดินลูกรัง และหญ้าแฝก ลงในชุดการทดลอง ดังนี้

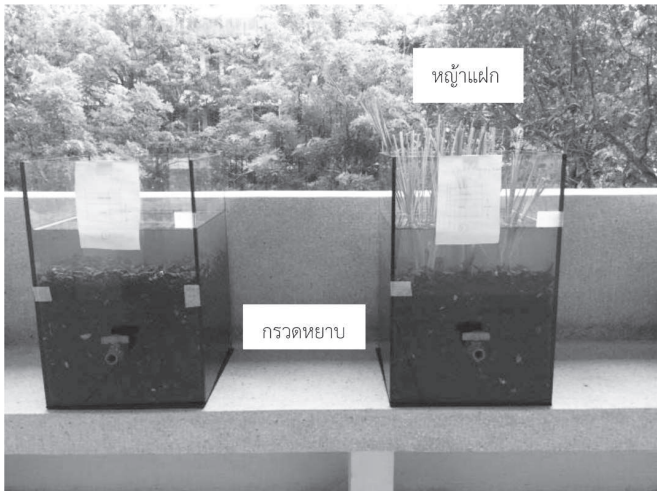
4.6.1 กรวดหยาบปริมาตร 40×40×30 ลูกบาศก์เซนติเมตร

4.6.2 กรวดหยาบปริมาตร 40×40×30 ลูกบาศก์เซนติเมตรและหญ้าแฝก 10 ต้น

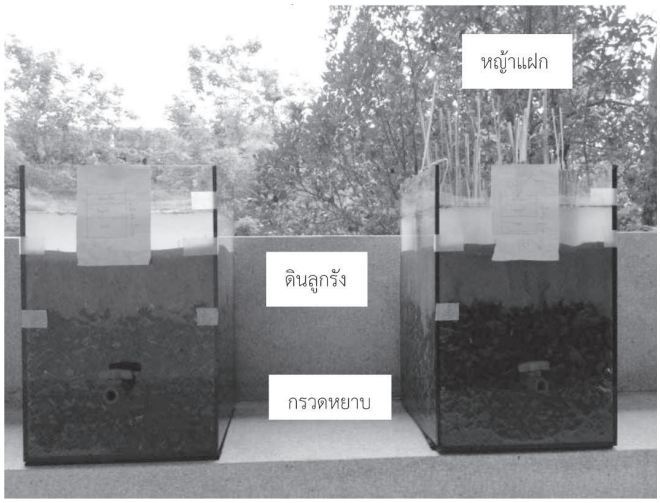
4.6.3 กรวดหยาบปริมาตร 40×40×30 ลูกบาศก์เซนติเมตรและดินลูกรังปริมาตร 40×40×10 ลูกบาศก์เซนติเมตร

4.6.4 กรวดหยาบปริมาตร 40×40×30 ลูกบาศก์เซนติเมตรดินลูกรังปริมาตร 40×40×10 ลูกบาศก์เซนติเมตร และหญ้าแฝก 10 ต้น

4.7 เติมสารละลายไตรไนโตรโทลูอีนเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 ลิตร ลงในชุดการทดลองทั้ง 4 ดังภาพที่ 3 และ 4



ภาพที่ 3 ชุดการทดลองที่ 1 และ 2



ภาพที่ 4 ชุดการทดลองที่ 3 และ 4

4.8 เก็บตัวอย่างน้ำ ปริมาตร 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากแต่ละชุดการทดลอง ในวันที่ 0, 3, 6, 9 และ 12 ของการทดลอง

4.9 วิเคราะห์ความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอีนจากน้ำปนเปื้อน โดยใช้เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography) ตามวิธีการของ U.S.EPA Standard Method 8330

4.10 ทำการทดลองซ้ำ ตั้งแต่ขั้นตอนที่ 4.1-4.7 จำนวน 5 ครั้ง เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยที่ถูกต้องที่สุด

5. ผลการศึกษา

5.1 การวิเคราะห์ปริมาณเหล็กอิออนจากดินลูกรัง

การวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กอิออนจากดินลูกรังในบริเวณโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า เป็นการวิเคราะห์ตัวอย่างดินลูกรังเพื่อหาปริมาณเหล็กไอออนในรูปของเฟอร์รัสไอออน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาเฟนตันออกซิเดชัน ใช้ดินตัวอย่างจาก 3 จุดรอบบริเวณโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยของเฟอร์รัสไอออนในดินลูกรังรอบบริเวณ ได้แก่ ดินบนเขาใกล้วัดพระฉาย ดินบริเวณอ่างเก็บน้ำหลังโรงพยาบาล และดินบริเวณริมบึงหลังส่วนการศึกษา จากการวิเคราะห์พบว่าดินบนเขาใกล้วัดพระฉาย ดินบริเวณอ่างเก็บน้ำหลังโรงพยาบาล และดินบริเวณริมบึงหลังส่วนการศึกษา มีเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 17.95%, 31.27% และ 16.32% ตามลำดับ เมื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย พบว่าดินลูกรังในบริเวณโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าที่นำมาใช้ในการทดลองมีปริมาณเฟอร์รัสไอออนเฉลี่ยเท่ากับ 21.85 %

5.2 ลักษณะทางกายภาพของสารละลายไตรไนโตรโทลูอีน

สารละลายไตรไนไนโตรโทลูอีน มีลักษณะเป็นสารละลายใส สีแดง ดังภาพที่ 5

ภาพที่ 5 สารละลายไตรไนโตรโทลูอีน

เมื่อนำสารละลายไตรไนโตรโทลูอีน เข้มข้น 40 ppm ที่เตรียมได้ เติมลงในชุดการทดลองทั้ง 4 จะมีลักษณะดังภาพที่ 6

ภาพที่ 6 ชุดการทดลองเมื่อเติมสารละลายไตรไนโตรโทลูอีน วันที่ 0

หมายเหตุ: ชุดการทดลองที่ 1 กรวดหยาบ
ชุดการทดลองที่ 2 กรวดหยาบ และหญ้าแฝก
ชุดการทดลองที่ 3 กรวดหยาบ และดินลูกรัง
ชุดการทดลองที่ 4 กรวดหยาบ ดินลูกรัง และหญ้าแฝก

จากนั้นเก็บตัวอย่างสารละลายไตรไนโตรโทลูอีนจากแต่ละชุดการทดลอง เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง ลักษณะของน้ำตัวอย่างที่เก็บได้ เป็นดังภาพที่ 7

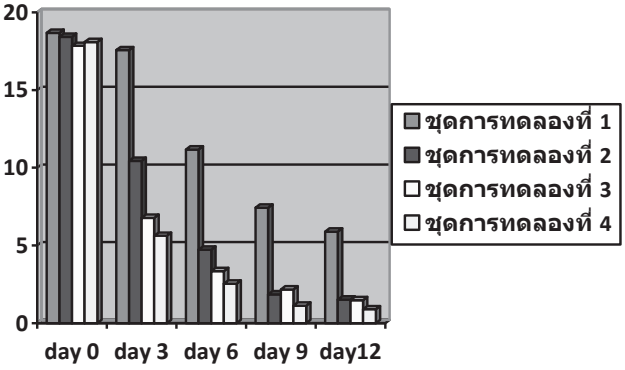
ภาพที่ 7 สารละลายไตรไนโตรโทลูอีนในวันที่ 9

จากภาพที่ 5 สีของสารละลายสารละลายไตรไนโตร-โทลูอีนในวันที่ 0 ก่อนการบำบัด เมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 7 แสดงสีของสารละลายไตรไนโตรโทลูอีนในวัน

ที่ 9 พบว่า ความเข้มสีของสารละลายไตรไนโตรโทลูอีนลดลง และเมื่อเปรียบเทียบความเข้มสีของสารละลายไตรไนโตรโทลูอีนในวันที่ 9 ตามภาพที่ 7 พบว่าความเข้มสีในแต่ละชุดการทดลองลดลงตามลำดับ โดยชุดการทดลองที่ 1 มีสีค่อนข้างเข้ม และเจือจางลงในชุดการทดลองที่ 2 และ 3 สำหรับชุดการทดลองที่ 4 พบว่า สารละลายที่ได้เป็นสารละลายใส ไม่มีสี แสดงให้เห็นว่าหญ้าแฝกและดินลูกรัง สามารถลดความเข้มสีของ ไตรไนโตรโทลูอีนได้ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการลดความเข้มสีของไตรไนโตรโทลูอีนจากหญ้าแฝกภายใต้ภาวะที่มีดินลูกรังมีประสิทธิภาพสูงสุด

5.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณไตรไนโตรโทลูอีน

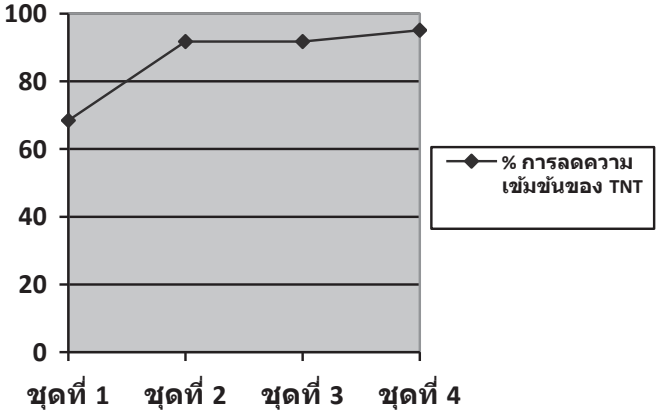
จากการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง และวิเคราะห์โดยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง พบว่าค่าเฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอีน (ส่วนในล้านส่วน, ppm) ที่ลดลงในระยะเวลา 12 วัน จากชุดการทดลองทั้ง 4 เป็นดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ปริมาณความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอีน (ppm) ในระยะเวลา 12 วัน

จากภาพที่ 8 เมื่อทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอีน โดยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง พบว่าในวันที่ 0 ความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอีน ในทุกชุดการทดลองลดลงจากความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 40 ppm เป็น 18.69, 18.43, 17.85 และ 18.10 ppm ตามลำดับ เนื่องจากไตรไนโตรโทลูอีนมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อย ประกอบกับในแต่ละชุดการทดลองประกอบด้วยวัสดุบรรจุต่าง ๆ ได้แก่ กรวดหยาบ ดินลูกรัง และหญ้าแฝก ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่สามารถดูดซับไตรไนโตรโทลูอีนได้ดี ในวันที่ 3 ของการทดลอง พบว่า ชุดการทดลองที่ 1 ความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอีนลดลง 1.12 ppm ขณะที่ ชุดการทดลองที่ 2, 3 และ 4 ความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอีน ลดลง 7.98, 11.07 และ 12.48 ppm ตามลำดับ ในวันที่ 6 ของการทดลอง พบว่า ชุดการทดลองที่ 1 ความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอีนลดลง 6.39 ppm ขณะที่ชุดการทดลองที่ 2, 3 และ 4 ความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอีนลดลง 5.73, 3.43 และ 3.09 ppm ตามลำดับ ในวันที่ 9 ของการทดลอง ชุดการทดลองที่ 1 พบว่าความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอีนลดลง 3.75 ppm ขณะที่ชุดการทดลองที่ 2 3 และ 4 ความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอีนลดลง 2.88, 1.19 และ 1.42 ppm ตามลำดับ สำหรับวันที่ 12 ชุดการทดลองที่ 1 ความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอีนลดลง 1.54 ppm ขณะที่ชุดการทดลองที่ 2, 3 และ 4 ความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอีนลดลง 0.33, 0.69 และ 0.22 ppm ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์อัตราการลดความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอีน (%) ในระยะเวลา 12 วัน จากชุดการทดลองทั้ง 4 เมื่อเปรียบเทียบกับวันที่ 0 สามารถแสดงผลได้ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 อัตราการลดความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอีน (%) ในระยะเวลา 12 วัน เมื่อเทียบกับวันที่ 0

ชุดการทดลองที่ 1 มีอัตราการลดความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอีนต่ำสุด โดยลดลง 85.28% เมื่อเทียบจากความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 40 ppm และเมื่อเทียบกับวันที่ 0 พบว่าลดลงเพียง 68.49% เนื่องจากชุดการทดลองที่ 1 เป็นการบำบัดโดยใช้แสง (Photolysis) เท่านั้น ขณะที่ชุดการทดลองที่ 2, 3 และ 4 มีอัตราการลดความเข้มข้นของ ไตรไนโตรโทลูอีนจากความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 40 ppm เป็น 96.23%, 96.32% และ 97.78% ตามลำดับ และเมื่อเทียบกับวันที่ 0 พบว่ามีอัตราการลดความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอีนเป็น 91.80%, 91.76% และ 95.08% ตามลำดับ สอดคล้องกับผลจากการสังเกตความเข้มสีของสารละลายไตรไนโตรโทลูอีนที่พบว่าชุดการทดลองที่ 1 สีค่อนข้างเข้มชัดเจน และสีเจือจางลงในชุดการทดลองที่ 2, 3 และในชุดการทดลองที่ 4 พบว่า สารละลายที่ได้เป็นสารละลายใส ไม่มีสี

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลองระหว่าง 0-12 วัน พบว่าชุดการทดลองที่ 2 การบำบัดโดยหญ้าแฝก มีอัตราการลดลงอย่างต่อเนื่องภายในระยะเวลา 6 วันของการทดลอง อัตราการลดลง 13.71 ppp ภายใน 6 วัน คิดเป็น 74.39% ขณะที่ชุดการทดลองที่ 1 มีอัตราการลดลง 7.5 ppm คิดเป็น 40.18% สอดคล้องกับงานวิจัยของ Das และคณะ [2] ซึ่งพบว่า กิจกรรมของเอนไซม์ไนโตรรีดักเตสในพืชจะเพิ่มสูงสุดภายในระยะ 5 วันของการทดลอง แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการบำบัดไตรไนโตรโทลูอีนโดยใช้หญ้าแฝก มีความเกี่ยวข้องกับเอนไซม์ไนโตรรีดักเตสเป็นหลัก จากการทดลองหญ้าแฝกจึงมีประสิทธิภาพในการบำบัดไตรไนโตรโทลูอีน ได้ดีในช่วงเวลา 6 วันของการทดลอง

ในช่วงระยะเวลา 3 วันแรกของการทดลอง ชุดการทดลองที่ 3 และ 4 ซึ่งมีดินลูกรังเป็นองค์ประกอบ ความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอีนลดลงจากวันที่ 0 ถึง 11.07 ppmและ 12.48 ppm คิดเป็น 62.02% และ 68.95% ขณะที่ชุดการทดลองที่ 1 และ 2 ซึ่งไม่มีดินลูกรังเป็นองค์ประกอบ ความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอีนลดลง 1.12 ppm และ 7.98 ppm คิดเป็น 5.99% และ 43.30% แสดงให้เห็นว่าดินลูกรังสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยา เฟนตันออกซิเดชัน ช่วยในการบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอีนในช่วงระยะเวลาสั้น สอดคล้องกับ Li, Comfort and Shea (1997) ที่พบว่า กระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน สามารถบำบัดสารละลายไตรไนโตรโทลูอีน ในระยะเวลาสั้นได้ดี

สำหรับชุดการทดลองที่ 4 ที่ประกอบไปด้วย หญ้าแฝกและดินลูกรัง ในช่วงวันที่ 0 – 3 มีอัตราการลดความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอีนสูงสุดจาก 18.10 ppm เป็น 5.62 ppm โดยลดลงถึง 12.48% จากนั้นอัตราการลดของความเข้มข้นไตรไนโตรโทลูอีนน้อยลงตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อความเข้มข้นต่ำมาก ทำให้อัตราการลดไม่สูงเท่าช่วงแรก อย่างไรก็ตามชุดการทดลองที่ 4 มีอัตราการลดลงของไตรไนโตรโทลูอีนสูงที่สุด เมื่อเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 40 ppm พบว่า เมื่อเวลาผ่านไป 12 วัน มีอัตราการลด 97.78% และเมื่อเทียบกับความเข้มข้นวันที่ 0-12 พบว่ามีอัตราการลดลงของไตรไนโตรโทลูอีน 95.08% แสดงให้เห็นว่า หญ้าแฝกและดินลูกรังสามารถใช้ในการบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอีนได้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน ขณะที่ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอีนโดยการผสมผสานหญ้าแฝกและกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันโดยใช้เหล็กจากดินลูกรังมีประสิทธิภาพสูงสุด

6. สรุปและอภิปรายผล

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการผสมผสานการใช้พืชร่วมกับปฏิกิริยาเฟนตันออกซิเดชันในการบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอีน พืชที่ใช้ศึกษา คือ หญ้าแฝกลุ่มสายพันธุ์ สุราษฎร์ธานี ปฏิกิริยาที่ใช้ร่วมคือเฟนตันออกซิเดชัน โดยใช้เหล็กจากดินลูกรังที่เก็บในบริเวณรอบโรงเรียนนายร้อย พระจุลจอมเกล้าเป็นสารตั้งต้น ในการบำบัดน้ำปนเปื้อนสารไตรไนโตรโทลูอีน ซึ่งเป็นสารละลายที่เตรียมขึ้น มีความเข้มข้น 40 ppm ทำการศึกษาในระยะ

เวลา 12 วัน จากนั้นทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

6.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้หญ้าแฝกบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอีน

หญ้าแฝกลุ่ม สายพันธุ์สุราษฎร์ธานี ความหนาแน่น 10 ต้นต่อ 1,600 ตารางเซนติเมตร สามารถลดความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอีน จาก 40 ppm ลงจนเหลือค่าเฉลี่ย 1.51 ppm ในระยะเวลา 12 วัน อัตราการลดลงของ ไตรไนโตรโทลูอีนโดยใช้หญ้าแฝกในการบำบัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 96.23% และเมื่อเทียบกับวันที่ 0 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 91.80% สรุปได้ว่า มีความเป็นไปได้ในการใช้หญ้าแฝกบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอีน และมีประสิทธิภาพสูงสุดในช่วง 6 วันแรกของการทดลอง

6.2 ศึกษาผลของกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันโดยใช้เหล็กจากดินลูกรังบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอีน

ดินลูกรังในบริเวณโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า มีปริมาณเหล็กไอออนเฉลี่ยเท่ากับ 21.85% สามารถลดความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอีน จาก 40 ppm ลงจนเหลือค่าเฉลี่ย 1.47 ppm ในระยะเวลา 12 วัน อัตราการลดลงของไตรไนโตรโทลูอีนโดยใช้ดินลูกรังในการบำบัดเทียบกับ ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 ppm มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 96.32% และเมื่อเทียบกับวันที่ 0 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 91.76% สรุปได้ว่า มีความเป็นไปได้ในการใช้ดินลูกรังเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันเพื่อบำบัดน้ำปนเปื้อน ไตรไนโตรโทลูอีน โดยเฉพาะในช่วงระยะเวลา 3 วันแรกของการทดลอง

6.3 ศึกษาความเป็นไปได้ในการผสมผสานการใช้พืชร่วมกับกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน ในการบำบัดน้ำปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอีน

การใช้หญ้าแฝกร่วมกับดินลูกรังสามารถลด ความเข้มข้นของไตรไนโตรโทลูอีน จาก 40 ppm ลงจนเหลือค่าเฉลี่ย 0.89 ppm ในระยะเวลา 12 วัน อัตราการลดลงของไตรไนโตรโทลูอีนโดยใช้หญ้าแฝกและดินลูกรังในการบำบัดมีค่าเฉลี่ยเมื่อเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น 40 ppm เท่ากับ 97.78% และเมื่อเทียบกับวันที่ 0 พบว่าอัตราการลดลงของไตรไนโตรโทลูอีนเท่ากับ 95.08% สรุปได้ว่า มีความเป็นไปได้ในการใช้หญ้าแฝกร่วมกับดินลูกรังบำบัดน้ำปนเปื้อน ไตรไนโตรโทลูอีน ดินลูกรังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเปื้อนไตรไนโตรโทลูอีนได้ดี โดยเฉพาะในช่วงระยะเวลาเริ่มต้นของการทดลอง

ผลการทดลองสนับสนุนสมมติฐานงานวิจัย ที่ว่าการบำบัดสารปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอีนโดยใช้พืชกลุ่มหญ้าแฝก ร่วมกับการใช้กระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน ภายใต้ภาวะที่มีเหล็กจากดินลูกรัง สามารถลดปริมาณไตรไนโตรโทลูอีนจากน้ำปนเปื้อน อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่าการบำบัดด้วยการใช้หญ้าแฝกหรือกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันเพียงอย่างเดียว

อย่างไรก็ตามการใช้เหล็กจากดินลูกรังในการบำบัดน้ำเปื้อนไตรไนโตรโทลูอีน อาจให้ผลแตกต่างกัน เนื่องจากปริมาณเหล็กในดินลูกรังจากแต่ละแหล่งมีความแตกต่างกัน ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดไตรไนโตรโทลูอีนให้มีผลแตกต่างกันได้ จากขอบเขตการวิจัย การวิจัยนี้เป็นการศึกษาทดลองเพื่อวัดความเข้มข้นที่ลดลงของไตรไนโตรโทลูอีนจากสารละลายแต่ละชุดการทดลอง ในช่วงระยะเวลา 12 วัน เท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้การศึกษาประสิทธิภาพในการผสมผสานการใช้พืชร่วมกับปฏิกิริยาเฟนตันออกซิเดชันในการบำบัดน้ำเปื้อนไตรไนโตรโทลูอีนเป็นไปอย่างสมบูรณ์ ควรดำเนินการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปในด้านต่างๆ เช่น ศึกษาวิเคราะห์ปริมาณไตรไนโตรโทลูอีนที่ตกค้างในวัสดุปลูก กรวด ดินลูกรัง ตลอดจนรากและลำต้นหญ้าแฝก ศึกษาวิเคราะห์ชนิดและปริมาณอนุพันธ์ของไตรไนโตรโทลูอีนจากน้ำปนเปื้อนที่ผ่านการบำบัดแล้วในดินลูกรัง รากและลำต้นหญ้าแฝก โดยเฉพาะอนุพันธ์ที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้เพื่อเป็นการตรวจสอบและยืนยันผลการวิจัยในห้องปฏิบัติการควรทำการทดลองบำบัดฟื้นฟู ในสถานที่จริงที่มีการ

ปนเปื้อนไตรไนโตรโทลูอีนโดยใช้วิธีการใช้พืชกลุ่มหญ้าแฝกร่วมกับกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน

7. กิตติกรรมประกาศ

ในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากกองทุนวิจัยและพัฒนา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า และผู้วิจัยขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร. จงรักษ์ ผลประเสริฐ ที่ปรึกษางานวิจัย พันเอก รองศาสตราจารย์ ดร. สุรัตน์ เลิศล้ำ ในการกรุณาตรวจสอบและให้คำแนะนำปรับปรุงแก้ไขให้ผลงานวิจัยฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่กองวิชาเคมี ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าทุกท่านที่อำนวยความสะดวก อนุเคราะห์การใช้อุปกรณ์ เครื่องมือ ตลอดจนสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ จนทำให้งานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

บรรณานุกรม

(1) มนต์ชัย จันทร์ศิริ, 2549. ประสิทธิภาพของหญ้าแฝกที่ปลูกด้วยเทคนิคแท่นลอยน้ำในการบำบัดน้ำเสียชุมชน. วิทยานิพนธ์ สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

(2) P. Das R. Datta, D. Sarkar, 2012. Nitroreductase Enzyme Mediated Phytodegradation of 2,4,6 Trinitrotoluene by Vetiver Grass, ASA, CSSA, and SSSA International Annual Meetings, p. 21-24.

(3) S.H. Hung, C.W. Yu, C.H. Lin, 2005. Hydrogen Peroxide Function as a Stress Signal in Plants, Bot. Bull. Acad., Vol. 46, p. 1-10.

(4) W. Jiamjitrpanich et al., 2012. Enhanced Phytoremediation Efficiency of TNT-Contaminated Soil by Nanoscale Zero Valent Iron, IPCBEE 2012, Vol. 35, No. 82-86.

(5) P. Kongtip et al., 2012. Exposure to Trinitrotoluene and Health Effects among Workers in an Artillery and Ammunition Plant Journal Medicine Association Thai, Vol.95, No. 6, p. 154-160.

(6) Z.M. Li, S.D. Comfort, P.J. Shea, 1997. Destruction of 2,4,6-Trinitrotoluene by Fenton Oxidation. Journal of Environmental Quality Abstract, Vol.26, No. 2, p. 480-487.

(7) R. Matta K. Hanna, S. Chiron, 2007. Fenton-Like Oxidation of 2,4,6-trinitrotoluene using Different Iron Minerals Science of the Total Environment, Vol. 385, p. 242-251.

(8) R.B. Meagher, 2006. Plants Tackle Explosive Contamination, Nature Biotechnology, Vol. 24, p. 161 – 163.

(9) K.A. Saeed et al., 2014. Strength of Lime-Cement Stabilized Tropical Lateritic Clay Contaminated by Heavy Metalss, KSCE Journal of Civil Engineering, p. 1-6.

(10) Shakya et al., 2006. High uptake of 2,4,6-trinitrotoluene by Vetiver Grass - Potential for Phytoremediation, Ecotoxicol. Environ, Vol. 64, p. 136-138.

(11) U.S. EPA. Integrated Risk Information System (IRIS), 1991. Risk Estimate for Carcinogenicity and Reference Dose for Oral Exposure for 2,4,6-Trinitrotoluene, Office of Health and Environmental Assessment, Cincinnati: OH