



การปนเปื้อนของพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในสิ่งแวดล้อม

Contamination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Environment

ขนิษฐา สมตระกูล¹, วราภรณ์ ฉุยฉาย^{2,*}

¹ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม มหาสารคาม 44150

²สาขาวิชาชีววิทยาและเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์

นครสวรรค์ 60000

Khanitta Somtrakoon¹, Waraporn Chouychai^{2,*}

¹Department of Biology, Faculty of Science, Mahasarakham University, Mahasarakham 44150

²Biology and Biotechnology programme, Faculty of Science and Technology, Nakhonsawan Rajabhat University, Nakhonsawan 60000

Received 16 August 2021; Received in revised from 30 November 2021; Accepted 25 January 2022

บทคัดย่อ

พอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนหรือพีเอเอชเป็นกลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ที่โครงสร้างประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติกตั้งแต่ 2 วงขึ้นไปเชื่อมต่อกัน จัดเป็นสารมลพิษที่ก่อให้เกิดความวิตกกังวล เนื่องจากสะสมในสิ่งมีชีวิตผ่านห่วงโซ่อาหารได้ดี เป็นสารก่อมะเร็ง สารก่อกลายพันธุ์ และคงทนในสิ่งแวดล้อม การย่อยสลายพีเอเอชในสิ่งแวดล้อมเกิดขึ้นได้ทั้งการย่อยสลายทางชีวภาพ การย่อยสลายโดยการกระตุ้นด้วยพลังงานแสง และการย่อยสลายทางเคมี แหล่งที่มาของพีเอเอชที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมมีได้หลายแหล่ง ทั้งจากแหล่งกำเนิดไพโรเจนิค แหล่งกำเนิดปิโตรเจนิค และแหล่งกำเนิดจากสิ่งมีชีวิต ทำให้พบการปนเปื้อนและการแพร่กระจายของพีเอเอชในสิ่งแวดล้อมได้หลากหลาย แต่สาเหตุที่สำคัญที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนพีเอเอชในสิ่งแวดล้อมคือเกิดจากการกระทำของมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากกิจกรรมทางอุตสาหกรรม ในบทความนี้ ได้รวบรวมข้อมูลการปนเปื้อนพีเอเอชในบรรยากาศ ดินชั้นบน ตะกอน แหล่งน้ำ และอาหาร ทั้งนี้การปนเปื้อนพีเอเอชในบรรยากาศถือเป็นสาเหตุสำคัญในการแพร่กระจายพีเอเอชไปสู่แหล่งอื่นๆ จึงควรกำจัดพีเอเอชที่ปนเปื้อนออกโดยเร่งด่วน

คำสำคัญ: พอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน; ดิน; น้ำ; บรรยากาศ

Abstract

Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are a group of organic chemicals consisting of two or more fused benzene ring. These compounds were seriously concerned with the pollution because they could be biomagnified through food chain. In addition, they are carcinogenic and mutagenic compounds and are stable in the environment. The degradation of PAHs in the atmosphere could occur through biodegradation, photodegradation, and chemical degradation. Several sources of PAHs are contaminated in the environment: pyrogenic, petrogenic and biological source. This caused PAHs to be spoiled and distributed in widely environment. However, the most crucial cause of PAH contamination in the environment was an anthropogenic source, especially industrial activity. In this article, the data of PAH contamination were collected, including PAH contamination in the atmosphere, soil, sediment, water, and food. However, PAH contamination in the atmosphere is the primary source of distributing PAHs to other environments. The urgent removal of PAHs in the atmosphere is necessary.

Keywords: Polycyclic aromatic hydrocarbons; Soil; Water; Atmosphere

1. บทนำ

พอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนหรือพีเอเอช (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons; PAHs) เป็นสารมลพิษที่สำคัญในสิ่งแวดล้อม พีเอเอชเป็นกลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ที่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจน โครงสร้างประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติกตั้งแต่ 2 วงขึ้นไปเชื่อมต่อกันเป็นระนาบเดียว เป็นกลุ่ม หรือเป็นมุม [1-2] โครงสร้าง จำนวนและการจัดเรียงตัวที่ต่างกันอย่างนี้ ทำให้พีเอเอชประกอบด้วยกลุ่มของสารประกอบมากกว่า 100 ชนิด อย่างไรก็ตาม แนฟทาลีน (Naphthalene) ซึ่งโครงสร้างเป็นวงแหวนอะโรมาติก 2 วงที่มีระนาบร่วมกันไม่จัดเป็นพีเอเอชที่แท้จริง การจัดจำแนกอย่างเป็นทางการได้จัดให้แนฟทาลีนเป็นไบไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Bicyclic Aromatic Hydrocarbon) [1] การจัดเรียงตัวของวงแหวนอะโรมาติกที่ต่างกันอย่างนี้ ทำให้พีเอเอชต่างชนิดกันเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตต่างกันไปด้วย [2] ที่มาของพีเอเอชที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมมีได้หลากหลายทั้งเกิดขึ้นเองตาม

ธรรมชาติ การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ และเป็นส่วนประกอบในปิโตรเลียม และพบการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมหลายประเภท อันตรายที่เกิดจากความเป็นพิษที่สำคัญของพีเอเอชที่ทำให้เกิดความกังวลคือเป็นสารก่อมะเร็งและการก่อกลายพันธุ์ อีกทั้งยังสามารถสะสมในสิ่งมีชีวิตผ่านทางห่วงโซ่อาหารได้ ดังนั้น การศึกษาถึงแหล่งที่มาและการปนเปื้อนของสารมลพิษชนิดนี้ จึงเป็นประโยชน์ในการทำความเข้าใจสภาพปัญหาและการหาแนวทางแก้ไขการปนเปื้อนของสารมลพิษชนิดนี้ต่อไปในอนาคต ในบทความนี้ จะกล่าวถึงพีเอเอชในด้านของคุณสมบัติแหล่งกำเนิด การเปลี่ยนแปลงในสิ่งแวดล้อม และสถานการณ์การปนเปื้อนพีเอเอชในสิ่งแวดล้อมทั้งดิน น้ำ และอากาศ เพื่อให้ตระหนักถึงความสำคัญของปัญหามลพิษที่เกิดจากการปนเปื้อนพีเอเอชในสิ่งแวดล้อมต่อไป

1.1 แหล่งกำเนิดของพีเอเอช

แหล่งกำเนิดของพีเอเอชมีที่มาจากทั้งการกระทำทางธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ โดยทั่วไป

สามารถจัดแบ่งแหล่งกำเนิดของพีเอเอชออกเป็น 3 แหล่ง ได้แก่ แหล่งกำเนิดจากสิ่งมีชีวิต (Biological Source) เกิดจากกิจกรรมของพืช สาหร่าย และแบคทีเรียบางชนิดซึ่งมักเกิดจากการย่อยสลายวัสดุที่มีต้นกำเนิดจากพืช [3] แหล่งกำเนิดไพโรเจนิค (Pyrogenic Source) และแหล่งกำเนิดปิโตรเจนิค (Petrogenic Source) [4] ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1.1 แหล่งกำเนิดไพโรเจนิค

แหล่งกำเนิดไพโรเจนิคผลิตพีเอเอชขึ้นโดยบังเอิญ เป็นผลพลอยได้ของการเผาไหม้สารอินทรีย์ กระบวนการนี้จึงเรียกว่าไพโรไลซิส (Pyrolysis) โดยอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการนี้ค่าตั้งแต่ 350°C จนถึงมากกว่า 1,200°C พีเอเอชที่ผลิตขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสมักเป็นพีเอเอชที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น พีเอเอชที่มีวงแหวนหกเหลี่ยม เนื่องจากในกระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการที่วัตถุประสงค์กำเนิดเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจึงทำให้เกิดพีเอเอชที่มีความเสถียร [3] กระบวนการไพโรไลซิสเกิดขึ้นได้ทั้งจากการกระทำของมนุษย์และการกระทำทางธรรมชาติ ตัวอย่างกระบวนการไพโรไลซิสที่เกิดจากการกระทำทางธรรมชาติ เช่น การระเบิดของภูเขาไฟและการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของต้นไม้เมื่อไฟไหม้ป่า [5] ตัวอย่างของกระบวนการไพโรไลซิสที่เกิดขึ้นจากการกระทำของมนุษย์ในกิจการอุตสาหกรรม เช่น การกลั่นทำลายถ่านหินไปเป็นถ่านโค้ก และน้ำมันดิน และการใช้อุณหภูมิสูงในการเปลี่ยนปิโตรเลียมดิบ (Crude Petroleum) ไปเป็นไฮโดรคาร์บอนเบา (Light hydrocarbons) [6]

1.1.2 แหล่งกำเนิดปิโตรเจนิค

แหล่งกำเนิดปิโตรเจนิคผลิตพีเอเอชขึ้นเองตามธรรมชาติโดยกระบวนการกำเนิดปิโตรเลียมซึ่งใช้ระยะเวลาหลายล้านปี เกิดขึ้นในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 100-150°C [6] ชนิดของพีเอเอชที่พบในแหล่งกำเนิด

ปิโตรเจนิคหลากหลายมากกว่าแหล่งกำเนิดไพโรเจนิค พบพีเอเอชที่มีโครงสร้างวงแหวนแบบเฮกไซคลิกซึ่งมีอะตอมของธาตุอื่นที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ รวมทั้งพีเอเอชที่มีจำนวนวงแหวนห้าเหลี่ยมในแหล่งกำเนิดปิโตรเจนิคมากกว่าแหล่งกำเนิดไพโรเจนิคเช่นกัน [3, 7] แหล่งกำเนิดปิโตรเจนิคเป็นสาเหตุให้พีเอเอชแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้จากการรั่วไหลของน้ำมันดิบและน้ำมันเชื้อเพลิงระหว่างการขนส่งและการเก็บรักษา การใช้ น้ำมันดิบและผลิตภัณฑ์จากน้ำมันดิบ เป็นต้น [4]

แหล่งกำเนิดของพีเอเอชที่แตกต่างกันทำให้พบพีเอเอชที่ต่างชนิดกัน เช่น พีเอเอชในรูปของสารตั้งต้นมักเกิดจากกระบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงซึ่งเป็นอุณหภูมิที่กำจัดหมู่ฮัลคิลซึ่งเป็นโมเลกุลแบบกิ่งของพีเอเอชได้ ส่วนพีเอเอชที่มีหมู่ฮัลคิลในโมเลกุลแบบกิ่งมักเป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ไม่ผ่านกระบวนการเผาไหม้ สัดส่วนเชิงปริมาณของ พีเอเอชแต่ละชนิดที่พบในสิ่งแวดล้อมที่ปนเปื้อนจึงใช้ทำนายแหล่งกำเนิดของพีเอเอชในบริเวณนั้นได้ เช่น หากพบสัดส่วนของ พีเอเอชที่อยู่ในรูปสารตั้งต้นเป็นปริมาณมาก และมีชนิดของพีเอเอชที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่อยู่ในรูปสารตั้งต้นเป็นปริมาณมาก เป็นไปได้ว่าการปนเปื้อนนั้นมาจากแหล่งกำเนิดไพโรเจนิค [7] นอกจากนี้สัดส่วนระหว่างปริมาณผลรวมของพีเอเอชที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ได้แก่ พีเอเอชที่มีวงแหวนอะโรมาติกจำนวน 2-3 วง และปริมาณผลรวมของพีเอเอชที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ได้แก่ พีเอเอชที่มีจำนวนวงแหวนอะโรมาติก 4-5 วง ใช้ทำนายแหล่งกำเนิดของพีเอเอชได้เช่นกัน โดยหากสัดส่วนระหว่างผลรวมของพีเอเอชที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำต่อผลรวมของพีเอเอชที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากกว่า 1 เป็นไปได้ว่าพีเอเอชที่ตรวจพบนั้นมาจากแหล่งกำเนิดปิโตรเจนิค และหากสัดส่วนน้อยกว่า 1 คาดว่าการปนเปื้อนนั้นมี

แหล่งกำเนิดมาจากแหล่งกำเนิดไพโรเจนิค เป็นต้น [8] สัดส่วนที่ใช้วินิจฉัยแหล่งกำเนิดของพีเอเอช เช่น สัดส่วนระหว่างอินดีโน(ซี,ดี)ไพรีน (Indeno(c,d)pyrene) และผลรวมของอินดีโน(ซี,ดี)ไพรีนกับเบนโซ(จี,เอช,ไอ)เพอริลีน(Benzo(g,h,i)perylene) ซึ่งมีค่าระหว่าง 0.35-0.70 สันนิษฐานได้ว่าการปนเปื้อนนั้นมีแหล่งกำเนิดมาจากเครื่องยนต์ดีเซล และยังทำนายด้วยสัดส่วนระหว่างฟลูออรีน (Fluorene) และผลรวมของฟลูออรีนกับไพรีนเช่นกัน โดยหากสัดส่วนดังกล่าวมากกว่า 0.5 แสดงว่าการปนเปื้อนนั้นมีแหล่งกำเนิดจากเครื่องยนต์ดีเซล หากสัดส่วนต่ำกว่า 0.5 แสดงว่าการปนเปื้อนนั้นมีแหล่งกำเนิดจากเครื่องยนต์เบนซิน เป็นต้น อย่างไรก็ตาม สัดส่วนเหล่านี้ใช้แยกความแตกต่างระหว่างแหล่งกำเนิดพีเอเอชไม่ได้ชัดเจน แต่ใช้เฝ้าระวังการปนเปื้อนของพีเอเอชในสิ่งแวดล้อมเท่านั้น [9]

1.2 คุณสมบัติและการเปลี่ยนแปลงในสิ่งแวดล้อม

พีเอเอชเป็นสารที่มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูง มีความดันไอต่ำ และละลายน้ำได้ต่ำมาก โดยความดันไอและความสามารถในการละลายน้ำนี้มีแนวโน้มลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น แต่พีเอเอชที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะทนทานต่อการเกิดออกซิเดชันและรีดักชันเพิ่มมากขึ้น ตามปกติความสามารถในการละลายน้ำของพีเอเอชจะลดลงเมื่อมีจำนวนวงแหวนอะโรมาติกเพิ่มขึ้น โดยพีเอเอชที่มีวงแหวนอะโรมาติกตั้งแต่ 3 วงขึ้นไปจะละลายน้ำได้ต่ำมาก ระเหยได้น้อย และละลายในไขมัน

ได้มากกว่าพีเอเอชที่มีวงแหวนอะโรมาติกน้อยกว่า 3 วง [3, 5] พีเอเอชที่ปรากฏในสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติมักพบร่วมกันมากกว่าหนึ่งชนิด ส่วนพีเอเอชที่สังเคราะห์ขึ้นมักเป็นพีเอเอชบริสุทธิ์ไม่มีสี ไม่มีชิว หรือสีเหลืองอ่อน ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) อยู่ในสถานะผลึกของแข็ง [1, 10] คุณสมบัติอื่นๆ ของพีเอเอช ได้แก่ ไวต่อแสง ทนทานต่อความร้อน นำไฟฟ้า ทนทานต่อการกัดกร่อน และเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ได้ นอกจากนี้พีเอเอชยังดูดกลืนรังสียูวีแล้วเรืองแสงได้ โดยพีเอเอชแต่ละไอโซเมอร์จะดูดกลืนรังสียูวีได้ต่างกัน และใช้ในการระบุชนิดของพีเอเอชได้ [3] คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีบางประการของพีเอเอชบางชนิดได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 1

พีเอเอชมักไม่ปรากฏในสิ่งแวดล้อมในรูปของสารตั้งต้น (Parent Compound) โดยอาจปรากฏในรูปของอนุพันธ์ของพีเอเอชที่มีหมู่ไฮดรอกซี (Hydroxy) ไนโตร (Nitro) และออกซิเจนปรากฏในโมเลกุล อนุพันธ์ของพีเอเอชสามารถถูกผลิตขึ้นได้ทั้งจากกระบวนการเผาไหม้ กระบวนการเปลี่ยนแปลงจากปฏิกิริยาที่เกิดโดยกิจกรรมของสิ่งมีชีวิตและสิ่งไม่มีชีวิต [7] การย่อยสลายพีเอเอชที่เกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อมประกอบด้วย การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) การย่อยสลายด้วยแสง (Photooxidation) และการย่อยสลายทางเคมี (Chemical Oxidation) กระบวนการย่อยสลายพีเอเอชเหล่านี้เป็นกระบวนการที่นำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดพีเอเอชที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันด้วย ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละกระบวนการดังต่อไปนี้

Table 1 Some physical and chemical properties of some PAHs

| PAHs | Number of rings | Molecular weight | Boiling point (°C) | Melting point (°C) | Water solubility (mg/l) | Vapor pressure (mmHg) | LogK _{ow} ^a | LogK _{oc} ^b | BCF ^c |
|--------------------------------|-----------------|------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------|
| Naphthalene | 2 | 128.19 | 218 | 80 | 31 | 0.087 | 3.36 | 2.97 | 2.33 |
| Acenaphthylene | 3 | 152.20 | 207 | 92 | 16.1 | 2.9x10 ⁻² | 4.07 | 1.40 | 2.79 |
| Acenaphthene | 3 | 154.21 | 279 | 95 | 3.9 | 4.5x10 ⁻³ | 3.98 | 3.66 | 2.63 |
| Fluorene | 3 | 166.20 | 295 | 116 | 1.68 | 3.2x10 ⁻⁴ | 4.18 | 3.86 | 3.10 |
| Anthracene | 3 | 178.20 | 342 | 216 | 0.043 | 1.7x10 ⁻⁵ | 4.45 | 4.15 | 3.14 |
| Phenanthrene | 3 | 178.20 | 340 | 100 | 1.18 | 6.8x10 ⁻⁴ | 4.45 | 4.15 | 3.27 |
| Fluoranthene | 4 | 202.26 | 248 | 110 | 0.26 | 5.0x10 ⁻⁶ | 4.90 | 4.58 | 2.87 |
| Pyrene | 4 | 202.30 | 404 | 150 | 0.135 | 2.5x10 ⁻⁶ | 4.88 | 4.58 | 3.41 |
| Benzo[a]anthracene | 4 | 228.29 | 435 | 160 | 0.0009 | 2.2x10 ⁻⁸ | 5.61 | 5.30 | 4.13 |
| Chrysene | 4 | 228.30 | 448 | 254 | 0.00179 | 6.3x10 ⁻⁷ | 5.16 | 5.30 | 3.19 |
| Benzo[a]pyrene | 5 | 252.30 | 310 | 217 | 0.0038 | 5.6x10 ⁻⁹ | 6.06 | 6.74 | 3.74 |
| Benzo[b]fluoranthene | 5 | 252.30 | 481 | 168 | 0.0015 | 5.0x10 ⁻⁷ | 6.04 | 5.74 | 2.58 |
| Benzo[k]fluoranthene | 5 | 252.30 | 480 | 217 | 0.0008 | 9.6x10 ⁻¹¹ | 6.06 | 5.74 | 2.67 |
| Dibenz[<i>a,h</i>]anthracene | 5 | 278.35 | 524 | 266 | 0.0005 | 1.0x10 ⁻¹⁰ | 6.84 | 6.52 | 3.91 |
| Benzo[<i>g,h,i</i>]perylene | 6 | 276.34 | 500 | 278 | 0.0026 | 1.0x10 ⁻¹⁰ | 6.50 | 6.20 | 5.00 |

Note ^a Octanol-water partition coefficient; K_{ow} is used to show hydrophobicity of molecules ^b Soil organic carbon-water partition coefficient; K_{oc} is used to show molecular binding to organic carbon in soil ^c concentration ratio of chemical in organism or tissue to concentration in mediated environment Ref. [2, 6, 10]

1.3 การย่อยสลายทางชีวภาพของพีเอเอช

การย่อยสลายทางชีวภาพของพีเอเอชเกิดขึ้นได้ทั้งในสภาวะที่มีออกซิเจนและไร้ออกซิเจน การย่อยสลายพีเอเอชที่ถูกขบขยู่กับดินเกิดขึ้นได้อย่างจำกัดเนื่องจากเอนไซม์จากแบคทีเรียเข้าถึงพีเอเอชได้ยาก ความสามารถในการละลายน้ำของ พีเอเอชส่งผลโดยตรงต่อการย่อยสลายพีเอเอช พีเอเอชที่มีบริเวณเปิด (Bay regions) เกิดขึ้นระหว่างวงแหวนอะโรมาติกจะเป็นบริเวณที่ถูกย่อยสลายได้ง่ายด้วยเอนไซม์ ดังนั้นพีเอเอชที่มีโครงสร้างเป็นเหลี่ยมหรือมุมจึงถูกย่อยสลายได้ง่ายกว่าพีเอเอชที่มีโครงสร้างเป็นระนาบเดี่ยวหรือเป็นกลุ่ม การย่อยสลายพีเอเอชในสภาพแวดล้อมยังขึ้นอยู่กับปัจจัยที่หลากหลาย ได้แก่ ระดับธาตุอาหารอินทรีย์ สารอาหารอินทรีย์ อุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบส การสัมผัสสารเคมีชนิดอื่น ปริมาณออกซิเจน และการปรับตัวของจุลินทรีย์ แม้แต่การมีพีเอเอชหลายชนิดปนเปื้อนร่วมกัน ก็จะส่งผลต่อ

การย่อยสลายพีเอเอชต่างชนิดกันได้ เช่น การปนเปื้อนของพีเอเอชน้ำหนักโมเลกุลสูงร่วมกับพีแนทรินจะเพิ่มการย่อยสลายพีเอเอชน้ำหนักโมเลกุลสูงโดย *Burkholderia* sp. VUN10013 แต่จะไม่พบปรากฏการณ์นี้หากปนเปื้อนร่วมกับแอนทราซิน [11] การคัดแยกและเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายพีเอเอชได้ หรือการส่งเสริมการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มนี้ในธรรมชาติ ทั้งการเติมสารเติมแต่งและการปลูกพืช เป็นวิธีการบำบัดพีเอเอชในสิ่งแวดล้อมที่สำคัญที่ใช้ประโยชน์จากการย่อยสลายทางชีวภาพ [12]

1.4 กระบวนการแยกสลายสารประกอบโดยอาศัยการกระตุ้นจากการดูดกลืนพลังงานแสง

ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นเมื่อพีเอเอชดูดกลืนพลังงานแสงแล้วกระตุ้นอิเล็กตรอนภายในโมเลกุล สภาวะกระตุ้นนี้ทำให้การจัดเรียงตัวภายในโครงสร้างไม่เสถียรทำให้เกิด

ปฏิกิริยาได้ดีจากกระบวนการทางกายภาพและเคมีอื่นๆ ในสิ่งแวดล้อม [1] ปฏิกิริยานี้เกิดได้ดีกับพีเอเอชที่อยู่ในรูปของไอหรือของเหลว เมื่อพีเอเอชถูกจับอยู่กับอนุภาคในอากาศหรืออนุภาคในดินจะเป็นปัจจัยจำกัดการเกิดปฏิกิริยาโฟโตไลซิส และปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีขึ้นเมื่อพื้นผิวของอนุภาค การแตกตัวด้วยแสงของพีเอเอชที่ผิวดินเมื่อได้รับรังสียูวีเป็นที่สนใจศึกษาเพื่อบำบัดพีเอเอชที่ปนเปื้อนในดิน [3, 13]

การกระตุ้นการย่อยสลายพีเอเอชด้วยพลังงานแสงขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุลของพีเอเอช โดยพีเอเอชที่วงแหวนอะโรมาติกเรียงตัวเป็นเส้นตรง จัดตัวเป็นกลุ่มหรือพีเอเอชที่มีวงแหวนอะโรมาติกเพียงสองวงบางชนิดถูกกระตุ้นด้วยแสงได้ดีเมื่อได้รับแสงโดยตรง ในขณะที่พีเอเอชที่วงแหวนอะโรมาติกจัดเป็นเหลี่ยมเป็นมุม เช่น พีแนนทรินและโดเบนซ(เอ)แอนทราซีน (Dibenz[a]anthracene) จะถูกกระตุ้นการย่อยสลายด้วยพลังงานแสงอย่างช้าๆ พีเอเอชที่ซับซ้อนอยู่ในช่องของถ้ำปลิวจะถูกกระตุ้นการย่อยสลายด้วยพลังงานแสงได้ลดลงเพราะแสงเข้าไม่ถึง [3] การย่อยสลายพีเอเอชด้วยแสงเกิดขึ้นในน้ำได้โดยตรง หรืออาจเกิดโดยอ้อมด้วยกระบวนการโฟโตเซนซิทิเซชัน (Photosensitization) ซึ่งอาศัยอนุพันธ์ของโมเลกุลที่ว่องไว เช่น Singlet Oxygen ($1O_2$) ไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot OH$) และอนุพันธ์ที่ว่องไวที่ผลิตขึ้นในแหล่งน้ำที่มีแสงส่องถึง [7] พีเอเอชหลายชนิด เช่น อะซีแนฟทาซีน แอนทราซีน ฟลูออรีน และแนฟทาซีน จะถูกย่อยสลายด้วยแสงได้ดีในสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้รับแสงจากหลอดไฟหรือแสงอาทิตย์ ส่วนพีแนนทรินที่ละลายด้วยน้ำได้น้อยกว่าจะถูกย่อยสลายด้วยแสงได้ดีในสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้รับรังสียูวี [13]

1.5 การย่อยสลายพีเอเอชด้วยกระบวนการทางเคมี

การย่อยสลายพีเอเอชด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมีเป็นกลไกที่เกิดขึ้นได้น้อยในธรรมชาติ อัตราการเกิดออกซิเดชันขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้าง

ของพีเอเอช สถานะทางกายภาพของพีเอเอช อุณหภูมิ และความรุนแรงของสารออกซิไดซ์ [3]

1.6 การปนเปื้อนของพีเอเอชในสิ่งแวดล้อม

การปนเปื้อนของพีเอเอชในสิ่งแวดล้อมมีแหล่งกำเนิดมาจากการกระทำทางธรรมชาติและ การกระทำของมนุษย์ การกระทำของมนุษย์โดยเฉพาะอุตสาหกรรมเป็นแหล่งปลดปล่อยพีเอเอชที่สำคัญทั้งการใช้งานเชื้อเพลิงประเภทถ่านหินซึ่งมีองค์ประกอบเป็นถ่านโค้ก ถ่านหินเลน ถ่านไม้ และน้ำมันดินเป็นแหล่งปลดปล่อยพีเอเอชที่สำคัญ ตัวอย่างอุตสาหกรรมที่ผลิตพีเอเอชแล้วปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม เช่น โรงงานผลิตอะลูมิเนียมจากสินแร่ โรงงานผลิตถ่านโค้ก โรงงานปิโตรเคมี โรงงานผลิตยางยนต์ โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ โรงงานผลิตน้ำยารักษาเนื้อไม้ โรงไฟฟ้าพลังงานถ่านหิน และโรงงานผลิตกระดาษ เป็นต้น [1, 6, 14] ชนิดของพีเอเอชที่พบมากในน้ำเสียและกากตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานผลิตกระดาษ เช่น ไพรีน พีแนนทริน และฟลูออแรนทีน (Fluoranthene) เป็นต้น [14]

ตามปกติมักไม่สังเคราะห์พีเอเอชขึ้นเพื่อใช้ในอุตสาหกรรม พีเอเอชบางชนิดเท่านั้นที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้เป็นสารตัวกลางในการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับเภสัชกรรม ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ ผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายภาพ เทอร์โมเซตติงพลาสติก วัสดุเพื่อการหล่อขึ้น อุตสาหกรรมเคมีอื่นๆ เช่น สีและสารเคมีที่ใช้เป็นวัสดุเคลือบอุปกรณ์ประเภทไฮดรอลิก ท่อ และเสาเข็ม เป็นต้น [6, 15] ตัวอย่างชนิดของพีเอเอชที่ถูกใช้งานในอุตสาหกรรม เช่น แอนทราซีนใช้เป็นสารเจือจางในผลิตภัณฑ์รักษาเนื้อไม้ สารสีและสีย้อม ฟลูออแรนทีน ใช้ในอุตสาหกรรมสารเคมีทางการแพทย์ สีย้อม และเภสัชกรรม ฟลูออรีนใช้ในงานเภสัชกรรม สารสี สีย้อม สารกำจัดศัตรูพืช และเทอร์โมพลาสติก และ พีแนนทริน ใช้ในอุตสาหกรรมเรซินและสารกำจัดศัตรูพืช เป็นต้น [3] นอกจากนี้พีเอเอชยังปนเปื้อนในสินค้าบางชนิด เช่น รองเท้ากีฬาและอุปกรณ์กีฬา ซึ่งเกิดจากการ

ใช้น้ำมันดินเป็นสารทดแทนน้ำมัน (Extender oil) ในการผลิตพลาสติกเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นของพลาสติก [6] นอกจากนี้ ยังพบการปนเปื้อนพีเอเอชจากภาคเกษตรกรรมที่มีสาเหตุจากการใช้งานสารกำจัดศัตรูพืชที่มีพีเอเอชเป็นส่วนประกอบ นอกจากนี้พีเอเอชอาจเกิดจากการเผาไหม้วัสดุทางการเกษตรในระบบเปิด เช่น กิ่งไม้ ฟางข้าว ทุ่งหญ้า และตอซังข้าว การเผาวัสดุทางการเกษตรในภาคเกษตรกรรมมักเป็นการเผาโดยใช้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมจึงเกิดพีเอเอชได้ ปัจจัยที่ส่งผลต่อชนิดของพีเอเอชที่เกิดจากการเผาไหม้ ได้แก่ ชนิดของวัสดุทางการเกษตร ชนิดของเตาเผา และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา เป็นต้น [1] โดยการเผาตอซังข้าว ปลูกปล่อยพีเอเอชสู่สิ่งแวดล้อมในประเทศเกษตรกรรม ในทวีปเอเชียหลายประเทศ เช่น ไทย ฟิลิปปินส์ และ อินเดีย เป็นต้น [16]

1.7 การปนเปื้อนของพีเอเอชในบรรยากาศ

พีเอเอชมีคุณสมบัติเป็นสารอินทรีย์กึ่งระเหยได้ เมื่อถูกปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมจึงเคลื่อนย้ายสู่บรรยากาศได้ โดยบรรยากาศจัดเป็นแหล่งรองรับและเป็นตัวกลางที่แพร่กระจายพีเอเอชให้เกิดการปนเปื้อนในระยะไกลจากแหล่งกำเนิดได้ดี การเคลื่อนย้ายพีเอเอชไปกับมวลอากาศทำให้เกิดการปนเปื้อนข้ามทวีปได้ [7] อย่างไรก็ตามระดับความเข้มข้นของพีเอเอชในบรรยากาศขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ฤดูกาลที่แตกต่างกันจะปลดปล่อยพีเอเอชในปริมาณที่ต่างกันด้วย สภาวะทางอุตุนิยมวิทยา (ความชื้น อุณหภูมิ ความเร็วลม) และระดับความเข้มข้นของสารออกซิไดส์ในบรรยากาศ (โอโซน ไฮดรอกซิลแรดิคัล ไนเตรตแรดิคัล และไนโตรเจนไดออกไซด์) เนื่องจากสารออกซิไดส์ที่พบในบรรยากาศทำปฏิกิริยากับพีเอเอชแล้วเปลี่ยนโครงสร้างของพีเอเอชได้ [17] ส่วนใหญ่แหล่งกำเนิดของพีเอเอชที่ปนเปื้อนในบรรยากาศมักมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของสารอินทรีย์ เช่น การระเบิดของภูเขาไฟและไฟไหม้ป่า คิวจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเครื่องยนต์ และการใช้เชื้อเพลิง

ในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น การปนเปื้อนของพีเอเอชพบได้มากในเมืองใหญ่มากกว่าชนบท เนื่องจากในเมืองใหญ่มักมีชุมชนและการจราจรที่หนาแน่น รวมทั้งมีโรงงานอุตสาหกรรมมาก [18] คิวบุนทรีย์และคิวจากยาสูบเป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญในอากาศเช่นกัน โดยการสูบบุหรี่เพียงหนึ่งมวนทำให้ผู้ที่สูบบุหรี่ได้รับเบนโซ(เอ)ไพรีน (Benzo(a)pyrene) เข้าสู่ร่างกายถึง 20-40 นาโนกรัม การสูบบุหรี่ชนิดที่ไม่มีก้นกรองหนึ่งกล่อง ทำให้ผู้สูบบัสมัสมักกับเบนโซ(เอ)ไพรีน 0.7 ไมโครกรัมต่อวัน การสูบบุหรี่ก้นกรองทำให้ผู้สูบบัสมัสมักกับเบนโซ(เอ)ไพรีน 0.4 ไมโครกรัมต่อวัน [1]

พีเอเอชในบรรยากาศปรากฏใน 2 รูปแบบ ได้แก่ พีเอเอชที่อยู่ในรูปของแก๊สและของแข็ง ซึ่งหมายถึงพีเอเอชที่ดูดซับอยู่กับอนุภาคที่แขวนลอยในบรรยากาศ พีเอเอชที่ละลายน้ำได้ต่ำถูกดูดซับอยู่กับอนุภาคในบรรยากาศได้มากกว่าสารเคมี ที่มีความดันไอสูงกว่า พีเอเอชที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำซึ่งมีจำนวนวงแหวนอะโรมาติก 2-3 วง จะมีความดันไอสูงและพบมากในสถานะแก๊ส เช่น แนฟทาลีน ส่วนพีเอเอชที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงซึ่งมีจำนวนวงแหวนอะโรมาติก 5-6 วงจะมีความดันไอต่ำ มักพบยึดเกาะกับอนุภาคในบรรยากาศ ในขณะที่พีเอเอชที่มีน้ำหนักโมเลกุลปานกลางซึ่งมีจำนวนวงแหวนอะโรมาติก 4 วง แพร่กระจายอยู่ได้ทั้งสถานะแก๊สและยึดเกาะอยู่กับอนุภาคที่แขวนลอยในบรรยากาศ [19] พีเอเอชที่ยึดเกาะอยู่กับอนุภาคที่แขวนลอยในบรรยากาศเป็นอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์มากกว่าสถานะแก๊ส เพราะมีพีเอเอชชนิดที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ [19] ความคงทนของพีเอเอชในบรรยากาศขึ้นอยู่กับจำนวนวงแหวนอะโรมาติกที่พบในโมเลกุลของพีเอเอช จากการวิเคราะห์แบบจำลองพบว่าพีเอเอชที่มีจำนวนวงแหวนอะโรมาติก 3-5 วง จะมีค่าครึ่งชีวิตในระดับหลายชั่วโมงจนถึงหลายวัน เมื่อปนเปื้อนในบรรยากาศ ซึ่งต่ำกว่าการปนเปื้อนของพีเอเอชชนิดเดียวที่ปนเปื้อนในดินซึ่งนานนับสิบปี อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติกึ่งระเหยได้ของพีเอเอชทำให้พีเอเอชที่ปนเปื้อนในดินระเหยกลับไปปนเปื้อนในบรรยากาศและ

เกิดการเคลื่อนย้ายในระยะไกลได้อีก [7]

พีเอเอชออกจากอากาศได้หลายสาเหตุ เช่น การตกสะสมแห้ง (Dry Deposition) การตกสะสมเปียก (Wet Deposition) และการย่อยสลายโดยปฏิกิริยาต่างๆ ในบรรยากาศ การตกสะสมแห้งเกิดขึ้นในกรณีที่พีเอเอชที่ยึดเกาะอยู่กับอนุภาคที่แขวนลอยในบรรยากาศตกตะกอนลงสู่พื้นโลกได้เอง อัตราการตกสะสมแห้งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของพีเอเอช อนุภาคที่พีเอเอชยึดเกาะอยู่ และสภาวะของอากาศ เช่น หากอนุภาคที่ยึดเกาะอยู่มีขนาดใหญ่จะตกตะกอนเร็วกว่าอนุภาคขนาดเล็ก อนุภาคที่แขวนลอยในบรรยากาศจะตกตะกอนสู่พื้นโลกได้เร็วในสภาวะที่บรรยากาศสงบ เพราะกระแสลมในอากาศรบกวนการตกตะกอนได้ อุณหภูมิส่งผลต่ออัตราการตกตะกอน เมื่ออุณหภูมิสูงจะทำให้พีเอเอชบางชนิดอยู่ในสถานะแก๊ส ส่วนที่อุณหภูมิต่ำจะเพิ่มอัตราการจับของพีเอเอชเข้ากับอนุภาคในบรรยากาศ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ในกรณีของพีเอเอชที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีความดันไอต่ำ เช่น เบนโซ(เอ)ไพรีนและไดเบนซ์(เอ)แอนทรซิน (Dibenz(a)anthracene) พบว่าการแพร่กระจายของพีเอเอชกลุ่มนี้ไม่แตกต่างกันระหว่างการแพร่กระจายในสถานะแก๊สและการยึดเกาะอยู่กับอนุภาคที่แขวนลอยในบรรยากาศในช่วงเปลี่ยนระหว่างฤดูร้อนกับฤดูหนาว [3] ส่วนการสะสมเปียกที่หมายถึง การล้างอนุภาคที่แขวนลอยในอากาศโดยฝนที่ตกลงมา และการละลายของแก๊สลงมากับฝน ปริมาณพีเอเอชที่ถูกกำจัดโดยกระบวนการสะสมเปียกขึ้นอยู่กับวัฏภาคของพีเอเอช พีเอเอชที่ถูกจับอยู่กับอนุภาคที่แขวนลอยจะออกจากบรรยากาศได้ง่ายกว่าพีเอเอชที่อยู่ในวัฏภาคของแก๊ส เป็นต้น [3] ตามปกติปริมาณพีเอเอชในระดับพื้นหลังในบรรยากาศของชนบทและในเมืองใหญ่มีค่าระหว่าง 0.02-1.2 และ 0.15-19.3 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ [1] การสำรวจพบพีเอเอชปนเปื้อนในบรรยากาศมักมีสาเหตุเกี่ยวข้องกับการใช้ถ่านหิน และเขตพื้นที่เมือง อาทิเช่น การสำรวจบริเวณชานเมืองต้าเหลียน ในคาบสมุทรเหลียวตง ประเทศจีน ระหว่างเดือน

พฤศจิกายน พ.ศ. 2559 - เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2560 พบผลรวมของพีเอเอช 15 ชนิด 4.32-112 นาโนกรัม/ลูกบาศก์เมตร [17] การสำรวจที่อำเภอเถิน จังหวัดลำปาง ระหว่าง มีนาคม พ.ศ. 2556 พบผลรวมของพีเอเอช 10 ชนิด 4.2-224 นาโนกรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยมาจากการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการประกอบอาหาร[20] การสำรวจฤดูหมอกควันทางภาคเหนือของไทยระหว่างเดือนมีนาคม พ.ศ. 2558 ผลรวมของพีเอเอชที่มีวงแหวนอะโรมาติก 3-4 วงเป็น 346 ± 512 และ ผลรวมของพีเอเอชที่มีวงแหวนอะโรมาติก 5-6 วงเป็น $4,313 \pm 3,427$ พิโคกรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยเป็นปริมาณพีเอเอชที่ยึดเกาะอยู่กับฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอนในจังหวัดเชียงราย เชียงใหม่ ลำปาง ลำพูน แม่ฮ่องสอน แพร่ น่าน พะเยา อุตรดิตถ์ [21] เนื่องจากในประเทศไทยยังไม่ได้กำหนดมาตรฐานของปริมาณพีเอเอชที่พบในอากาศ แต่หากเทียบเคียงจากมาตรฐานของ Agency for Toxic Substance and Disease Registry (ATSDR) ซึ่งกำหนดความเข้มข้นของพีเอเอชในสถานประกอบการต้องไม่เกิน 100 ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร เมื่อต้องทำงานต่อเนื่อง 8 ชั่วโมง การปนเปื้อนพีเอเอชในบรรยากาศของประเทศไทยยังไม่เกินมาตรฐานนี้ [22]

1.8 การปนเปื้อนของพีเอเอชในดินชั้นบน

ปริมาณของพีเอเอชที่พบในดินชั้นบนเกิดจากการตกสะสมของพีเอเอชในบรรยากาศลงสู่พื้นดินเป็นหลัก โดยอาจมาจากบรรยากาศที่อยู่ใกล้เคียงหรือมาจากบริเวณที่อยู่ไกลตามการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ ดินจึงเป็นแหล่งรองรับพีเอเอชที่สำคัญและเป็นตัวกลางที่ทำให้เกิดการระเหย การทับถม และการย่อยสลายพีเอเอช [23] พีเอเอชเมื่อปนเปื้อนในดินมักยึดเกาะอยู่กับอนุภาคของดิน แต่ก็เคลื่อนย้ายภายในดินและออกจากดินไปปนเปื้อนยังบริเวณอื่น หรือสะสมในสิ่งมีชีวิตและถ่ายทอดเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารได้ ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเคลื่อนย้ายของพีเอเอชที่ยึดเกาะอยู่กับอนุภาคในดินชั้นบน ได้แก่ ขนาดของอนุภาคที่พีเอเอชยึดเกาะและช่องว่าง

ระหว่างเม็ดดิน หากพีเอเอชยึดเกาะอยู่กับอนุภาคที่เคลื่อนย้ายไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดินไม่ได้ถือเป็นการจำกัดการเคลื่อนย้ายพีเอเอชในดิน [1, 3] แนวโน้มในการยึดเกาะกับอนุภาคของดินขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของพีเอเอชและดิน เช่น ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในดินและค่าการนำไฟฟ้าของดิน เป็นต้น ความสามารถของพีเอเอชในการยึดเกาะกับอนุภาคของดินพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของสารในชั้นน้ำและชั้นออกทานอล (Octanol-water Partitioning Coefficient; K_{ow}) โดยหากมีค่าสูงหมายถึงสารชนิดนั้นมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำและมีแนวโน้มที่จะถูกดูดซับอยู่กับอนุภาคของดินได้ดี [3] ระดับการปนเปื้อนของพีเอเอชในดินชั้นบนมีความสัมพันธ์กับระดับการพัฒนาทางเศรษฐกิจ ความหนาแน่นของประชากร การขยายตัวของเมืองและอุตสาหกรรม [23] ระดับการปนเปื้อนของพีเอเอชในดินแบ่งได้เป็น 4 ระดับตามมาตรฐานการจัดจำแนกดินที่ปนเปื้อนของยุโรป (European Classification System of Soil Contamination) ได้แก่ ระดับของดินที่ไม่ปนเปื้อน ปนเปื้อนระดับต่ำ ระดับปานกลาง และระดับสูง ซึ่งหมายถึงดินที่ตรวจพบพีเอเอชทั้ง 16 ชนิดตามรายการขององค์การปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกาในปริมาณที่ต่ำกว่า 200, 200-600, 600-1000 และมากกว่า 1,000 ไมโครกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ [8] การปนเปื้อนพีเอเอชในดินพบได้ในบริเวณที่หลากหลาย เช่น การสำรวจที่เขากหลัก จังหวัดพังงา ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากสึนามิในปี พ.ศ. 2547 เมื่อเดือนกรกฎาคม 2552 พบผลรวมของพีเอเอช 12 ชนิด 132.31 ไมโครกรัม/กิโลกรัม [24] การสำรวจบริเวณอ่าวต่างๆ โดยรอบเกาะเสม็ดจำนวน 69 สถานี ระหว่าง 14-18 พฤศจิกายน พ.ศ. 2558 ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากการปนเปื้อนคราบน้ำมันเมื่อ 27-31 ตุลาคม พ.ศ. 2556 พบผลรวมของพีเอเอช 11 ชนิด 32.5 ไมโครกรัม/กิโลกรัม [25] การสำรวจสนามเด็กเล่นในจังหวัดกาฬงูระหว่างฤดูร้อนปี พ.ศ. 2556 พบพีเอเอช

ที่มีวงแหวนอะโรมาติก 4-5 วงมาก พบพีเอเอช 13.2-145.5 ไมโครกรัม/กิโลกรัม โดยพบพีเอเอชที่มีวงแหวนอะโรมาติก 2 วง น้อย พบพีเอเอชที่ก่อมะเร็งได้ 7 ชนิด สูงถึงร้อยละ 55 ของปริมาณพีเอเอชที่พบทั้งหมดในดิน [26] ซึ่งหากเทียบกับมาตรฐานของยุโรปแล้ว การปนเปื้อนในพื้นที่ที่ยกตัวอย่างมา ยังไม่เกินมาตรฐานแต่อย่างใด

1.9 การปนเปื้อนของพีเอเอชในตะกอน

การสะสมพีเอเอชในตะกอนอาศัยกลไกเดียวกับการสะสมในดินชั้นบน พีเอเอชที่ซบอยู่กับอนุภาคในอากาศจะตกลงสู่พื้นผิวทะเลสาบ กระแสน้ำและมหาสมุทร พีเอเอชที่ตกลงสู่ผิวน้ำแพร่กระจายโดยกระแสน้ำและจมลงสู่ตะกอนตามแรงโน้มถ่วงของโลก การปนเปื้อนของพีเอเอชในตะกอนบริเวณเมืองขนาดใหญ่ได้รับอิทธิพลจากพีเอเอชที่สะสมในบรรยากาศรวมทั้งตะกอนในเมืองใหญ่ยังเป็นแหล่งรองรับพีเอเอชที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดและพีเอเอชที่ถูกชะมาจากพื้นถนนด้วย พีเอเอชเหล่านี้จะซบเข้ากับอนุภาคในแหล่งน้ำและตกตะกอนลงในพื้นที่น้ำ บางครั้งพีเอเอชที่สะสมในตะกอนไม่เคลื่อนย้ายไปสู่บริเวณอื่นหรือเปลี่ยนรูปไม่ได้ เนื่องจากพีเอเอชละลายน้ำได้ต่ำ จึงเป็นปัจจัยจำกัดการเคลื่อนย้ายของพีเอเอช ส่วนพีเอเอชชนิดที่ละลายน้ำได้บ้างจะถูกเปลี่ยนจากปัจจัยทางกายภาพ เคมี และชีวภาพและเคลื่อนย้ายไปสู่ระบบนิเวศได้เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม พีเอเอชที่ละลายน้ำได้ต่ำยึดเกาะกับอนุภาคของคอลลอยด์ในกลุ่มของสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ ซึ่งถือเป็นกลไกเพิ่มการเคลื่อนย้ายของพีเอเอชที่สะสมในตะกอนได้ [3]

การจำแนกแหล่งกำเนิดของพีเอเอชในตะกอนพิจารณาจากการวิเคราะห์สัดส่วนของผลรวมของเมทิลพีแนนทรีน (Methylphenanthrene) และผลรวมของพีแนนทรีน โดยหากสัดส่วนมากกว่า 2 แสดงว่าพีเอเอชมาจากแหล่งกำเนิดปิโตรเจนิก และหากสัดส่วนต่ำกว่า

0.5 แสดงว่าพีเอเอชที่ปนเปื้อนนั้นมาจากแหล่งกำเนิดไพโรเจนิค ในการศึกษาตะกอนที่เก็บจากคลองในกรุงเทพฯ เมื่อปี พ.ศ. 2546 พบพีเอเอชที่มีโอกาสมาจากแหล่งกำเนิดปิโตรเจนิค เพราะค่าสัดส่วนระหว่างผลรวมของเมทิลพีแนทรีนและผลรวมของพีแนทรีนเป็น 1.84 ± 0.98 และฝุ่นจากถนนที่มาจากการตกสะสมเป็นสาเหตุหลักของการปนเปื้อนพีเอเอชในตะกอนที่พบในเมืองใหญ่ [27] พีเอเอชยังเป็นสารมลพิษที่ก่อให้เกิดความกังวลเมื่อเกิดการรั่วไหลของคราบน้ำมันดิบเนื่องจากน้ำมันดิบจากบ่อน้ำมันมีพีเอเอชเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 3.9 โดยน้ำหนัก [28] นอกจากนี้ การปนเปื้อนพีเอเอชในดินตะกอนที่สำรวจพบมีสาเหตุมาจากการปนเปื้อนน้ำมันเป็นส่วนใหญ่ อาทิ เช่น การสำรวจชายฝั่งทะเลบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ระหว่างฤดูฝนเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2553 และฤดูร้อนเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2554 พบพีเอเอชทั้งหมด 167.7 - 2,467.6 ไมโครกรัม/กิโลกรัม โดยพีเอเอชที่พบมาก ได้แก่ ฟลูออแรนทีน ไพรีน ไครซิน เบนโซ(เค)ฟลูออแรนทีน และเบนโซ(เอ)ไพรีน โดยฤดูกาลไม่ส่งผลต่อปริมาณพีเอเอชที่ปนเปื้อนในตะกอน [29] การสำรวจตะกอนพื้นผิวจากคลองในกรุงเทพฯ แม่น้ำเจ้าพระยา ปากแม่น้ำเจ้าพระยา และชายฝั่งอ่าวไทย ระหว่าง พ.ศ. 2546 พบผลรวมของพีเอเอชที่มีวงแหวนอะโรมาติก 3-7 วง จำนวน 17 ชนิด 6-8,399 ไมโครกรัม/กิโลกรัม [27] และการสำรวจตะกอนบริเวณชายฝั่งในเมืองการาจี้ รัฐซินธ์ ประเทศปากีสถาน ระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ 2557 ซึ่งชายฝั่งนี้ได้รับผลกระทบจากการปนเปื้อนคราบน้ำมันเมื่อ 27 กรกฎาคม พ.ศ. 2546 ประมาณ 31,000 ตัน พบการปนเปื้อนพีเอเอชในตะกอนระดับที่สูงที่บริเวณปากแม่น้ำและท่าเรือ พบพีเอเอชในรูปสารตั้งต้น 121.9-735.4 ไมโครกรัม/กิโลกรัมและพีเอเอชที่มีหมู่อัลคิลอยู่ในโมเลกุล 42.3-1149.9 ไมโครกรัม/กิโลกรัม [30]

1.10 การปนเปื้อนของพีเอเอชในแหล่งน้ำ น้ำเสีย และภาคตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย

น้ำที่ใช้ในการบริโภคไม่ควรปนเปื้อนพีเอเอช โดยองค์การปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกาได้กำหนดไว้ว่าน้ำดื่มที่สะอาดได้มาตรฐานไม่ควรตรวจพบเบนโซ(เอ)ไพรีนเกิน 0.2 ส่วนในพันล้านส่วน อย่างไรก็ตาม แหล่งน้ำตามธรรมชาติซึ่งเป็นแหล่งรองรับน้ำเสียจากทั้งชุมชน เกษตรกรรม และอุตสาหกรรมพบการปนเปื้อนพีเอเอชได้ส่วนใหญ่แล้วพีเอเอชในแหล่งน้ำมักมาจากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม และการรั่วไหลของสารในกลุ่มปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนจากอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นในระหว่างการขนส่งและการรั่วไหลของแท่นขุดเจาะในทะเล [1] ในปี พ.ศ. 2545 พบว่ามีการปล่อยพีเอเอชลงสู่แหล่งน้ำทั่วโลกมากกว่า 80,000 ตันต่อปี การปนเปื้อนของพีเอเอชในแหล่งน้ำที่ระบุได้มาจากท่อน้ำทิ้งของโรงงานบำบัดน้ำเสียของชุมชนและจุดระบายน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนที่ระบุแหล่งที่มาไม่ได้มักเกิดจากน้ำชะจากผิวดินและอากาศ ซึ่งน้ำอาจถูกพัดพามาจากแผ่นดินซึ่งมีการทำกิจกรรมหลายประเภท [6] พีเอเอชที่ปนเปื้อนในดินจะดูดซับอยู่กับส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ของดินอย่างแน่นหนา พีเอเอชจึงไม่แพร่กระจายสู่ดินที่อยู่ลึกลงไป การชะพีเอเอชลงสู่น้ำใต้ดินจึงเกิดขึ้นได้จำกัดด้วย พีเอเอชที่ดูดซับอยู่กับดินบางชนิดมีคุณสมบัติกึ่งระเหยได้ แต่มักไม่ระเหยออกไปเพราะถูกดูดซับอยู่กับสารอินทรีย์ของดิน พีเอเอชที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำถูกย่อยสลายอย่างรวดเร็วเมื่อปนเปื้อนในแหล่งน้ำ [3] เมื่อพีเอเอชเข้าสู่แหล่งน้ำแล้ว พีเอเอชจะถูกดูดซึมเข้าสู่อนุภาคที่แขวนลอยในและจะสะสมอยู่ในตะกอนของแหล่งน้ำ พบเพียงเล็กน้อยที่ผิวน้ำและห้วงน้ำ [6] ตัวอย่างการปนเปื้อนของพีเอเอชในแหล่งน้ำ เช่น การสำรวจน้ำทะเลรอบเกาะลังกาวิ ประเทศมาเลเซีย พบพีเอเอช 18 ชนิด มีค่าระหว่าง 6.1 ± 0.43 ถึง 46 ± 0.42 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งมากกว่าระดับพีเอเอชที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานของสหภาพยุโรป [31]

1.11 การปนเปื้อนของฟิเอเอซในอาหาร

บุคคลที่ไม่ได้สัมผัสกับฟิเอเอซในการประกอบอาชีพนั้นจะได้รับฟิเอเอซจากอาหาร เช่น ร้อยละ 70 ของคนที่ไม่สูบบุหรี่ได้รับฟิเอเอซเข้าสู่ร่างกายทางอาหาร [1] ตัวอย่างฟิเอเอซที่มักพบปนเปื้อนในอาหาร เช่น แนนพาทิน ฟลูออรีน แอนทราซีน ฟิแนนทริน ฟลูออแรนทีน ไพรีน ไครซิน และเบนโซ[เอ]ไพรีน เป็นต้น [32] ปริมาณฟิเอเอซที่พบในเนื้อที่ใหม่ก็ประมาณสูงถึง 10-20 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม [1] ฟิเอเอซที่พบในผักและผลไม้ มักมีที่มาจากดินหรืออากาศ เช่น พืชผลทางการเกษตรที่ปลูกอยู่ใกล้กับบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่น [32] การปนเปื้อนของฟิเอเอซในแหล่งน้ำทำให้มนุษย์ สัตว์บก และสัตว์น้ำรับฟิเอเอซเข้าสู่ร่างกายโดยตรงจากการบริโภค [32] นอกจากนี้ อาหารที่ผ่านการปรุงให้สุกโดยใช้อุณหภูมิสูง เช่น ทอด ร่มควัน อบ ปิ้ง ย่าง ทำให้ฟิเอเอซปนเปื้อนในอาหารได้ [3] การผลิตอาหารในระดับอุตสาหกรรม โดยชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ แหล่งพลังงาน ความร้อน ระยะห่างจากความร้อน รวมทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบอาหาร มีผลต่อการเกิดฟิเอเอซในผลิตภัณฑ์อาหารด้วย [32] อาหารที่ยังไม่ผ่านการปรุงพบการปนเปื้อนฟิเอเอซในระดับต่ำ ระดับของฟิเอเอซที่พบในอาหารที่ยังไม่ผ่านการปรุงจะสะท้อนให้เห็นถึงระดับการปนเปื้อนพื้นหลังในเมืองที่ตั้งอยู่ไกลจากเมืองใหญ่ และเมืองอุตสาหกรรม โดยฟิเอเอซที่ปนเปื้อนอยู่ในเมืองมาจากการเคลื่อนย้ายฟิเอเอซกับมวลอากาศจากบรรยากาศที่อยู่ไกลออกไป หรือการปลดปล่อยฟิเอเอซออกมาจากกิจกรรมตามธรรมชาติ เช่น การระเบิดของภูเขาไฟ หรือไฟไหม้ป่า พืชที่เจริญอยู่ในเมืองอุตสาหกรรมหรือใกล้กับบริเวณทางหลวงที่มีการจราจรหนาแน่น จะมีระดับของฟิเอเอซสูงกว่าในเมืองเล็กถึง 10 เท่า [3]

ฟิเอเอซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมักยึดเกาะกับอนุภาคในอากาศแล้วตกลงสู่พื้นดิน รวมทั้งดินที่ปนเปื้อนเองซึ่งเป็นช่องทางที่ทำให้ฟิเอเอซปนเปื้อนในพืชผักและส่งต่อไปยังสัตว์กินพืชได้ พบฟิเอเอซปริมาณมากบริเวณพื้นผิวของพืช เช่น เปลือก และใบพืชส่วนนอกมากกว่า

เนื้อเยื่อชั้นในของพืช อนุภาคที่ฟิเอเอซจับอยู่ล้างออกจากพื้นผิวได้ง่าย การทำความสะอาดกำจัดฟิเอเอซได้มากกว่าร้อยละ 50 โชที่เคลือบผิวใบพืชและผลไม้สะสมฟิเอเอซได้จากการที่ฟิเอเอซดูดซึมบนใบซึ่งกำจัดออกได้ยาก [3] ในขณะที่ สัตว์ที่อาศัยบริเวณตะกอนมักไม่สะสมฟิเอเอซและไม่ถ่ายทอดฟิเอเอซผ่านทางโซ่อาหาร เพราะเมแทบอลิท์ฟิเอเอซได้ อย่างไรก็ตาม หอยสองฝาบางชนิด เช่น หอยแมลงภู่และหอยนางรมซึ่งกินอาหารแบบการกรอง หอยกลุ่มนี้เมแทบอลิท์ฟิเอเอซได้ต่ำจึงสะสมฟิเอเอซได้มากกว่าสัตว์ชนิดอื่น [3] แต่ใช้เป็นสัตว์ดัชนีตรวจสอบการปนเปื้อนของฟิเอเอซได้ เช่น หอยแมลงภู่สีน้ำตาล (*Perna perna* Linnaeus 1758) โดยพบฟิเอเอซทั้ง 16 ชนิดในหอยแมลงภู่สีน้ำตาลที่ความเข้มข้นระหว่าง 38.96–63.47 และ 62.92–94.24 นาโนกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งในหอยที่เก็บจากแหล่งเกษตรกรรมที่เกาะชานตาคาดารินาในเดือนตุลาคม พ.ศ. 2557 และอ่าวกวนาบารา ริโอเดจาเนโรในเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2558 ตามลำดับ [33]

2. สรุป

ฟิเอเอซเป็นสารมลพิษที่มีแหล่งกำเนิดที่หลากหลายทั้งจากสิ่งมีชีวิต แหล่งกำเนิดโพโนจีนิก และแหล่งกำเนิดปิโตรจีนิก แต่ที่ส่งผลให้เกิดการแพร่กระจายของฟิเอเอซในสิ่งแวดล้อมอย่างกว้างขวางนั้นมาจากการกระทำของมนุษย์โดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้ถ่านหินซึ่งมีองค์ประกอบเป็นถ่านโค้ก ถ่านหินเลน ถ่านไม้ และน้ำมันดิน คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของฟิเอเอซที่ไม่ละลายน้ำแต่ละลายในไขมันได้ดี ทำให้สะสมในสิ่งมีชีวิตได้ง่าย และพบการปนเปื้อนฟิเอเอซในดินและดินตะกอนมากกว่าการปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน การปนเปื้อนฟิเอเอซในบรรยากาศเป็นสาเหตุสำคัญของการแพร่กระจายฟิเอเอซในระยะไกลไปสู่ดิน แหล่งน้ำ และแหล่งอาหารของมนุษย์ จึงควรเป็นแหล่งที่ต้องบำบัดฟิเอเอซออกไปโดยเร่งด่วน เทคโนโลยีที่ใช้การบำบัดฟิเอเอซทั้งทางเคมีและชีวภาพพัฒนาขึ้นจากการย่อยสลายของฟิเอ

เอชตามธรรมชาติ ซึ่งเกิดได้ทั้งจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน การกระตุ้นด้วยแสง และการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ที่มี เอนไซม์สำหรับย่อยสลายและเปลี่ยนรูปพีเอเอช

3. References

- [1] Rengarajan, T., Rajendran, P., Nandakumar, N., Lokeshkumar, B., Rajendran P. and Nishigaki, I., 2015, Exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons with special focus on cancer, *Asian Pac. J. Trop. Biomed.* 5: 182-189.
- [2] Alagić, S.Č., Maluckov, B.S. and Radojičić, V.B., 2015, How can plants manage polycyclic aromatic hydrocarbons? May these effects represent a useful tool for an effective soil remediation? A review, *Clean Technol. Environ. Policy.* 17: 597-614.
- [3] Abdel-Shafy, H.I. and Mansour, M.S.M., 2016, A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation, *Egypt. J. Pet.* 25: 107-123.
- [4] Baran, A., Tarnawski, M., Urbański, K., Klimkowicz-Pawlas, A. and Spatek, I., 2017, Concentration, sources and risk assessment of PAHs in bottom sediments, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24: 23180-23195.
- [5] Edokpayi, J.N., Odiyo, J.O., Popoola, O.P. and Msagati, T.A.M., 2016, Determination and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in rivers, sediments and wastewater effluents in Vhembe District, South Africa, *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 13: 387.
- [6] Behera, B.K., Das, A., Sarkar, D.J., Weerathunge, P., Parida, P.K., Das, B.K., Thavamani, P., Ramanathan, R., Bansal, V., 2018, Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in inland aquatic ecosystems: Perils and remedies through biosensors and bioremediation, *Environ. Pollut.* 241: 212-233.
- [7] Balmer, J.E., Hung, H., Yu, Y., Letcher, R.J. and Muir, D.C.G., 2019, Sources and environmental fate of pyrogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the Arctic, *Emerging Contam.* 5: 128-142.
- [8] Wang, D., Ma, J., Li, H. and Zhang, X., 2018, Concentration and potential ecological risk of PAHs in different layers of soil in the petroleum-contaminated areas of the Loess Plateau, China, *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 15: 1785.
- [9] Rubailo, A.I. and Oberenko, A.V., 2018, Polycyclic aromatic hydrocarbons as priority pollutants, *J. Sib. Fed. Univ., Chem.* 4: 344-354.
- [10] Kim, K.-H., Jahan, S.A., Kabir, E. and Brown, R.J.C., 2013, A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their human health effects, *Environ. Int.* 60: 71-80.
- [11] Somtrakoon, K., Suanjit, S., Pokethitiyook, P., Kruatrachue, M., Lee, H., and Upatham, S., 2008, Phenanthrene stimulates the degradation of pyrene and fluoranthene by *Burkholderia* sp. VUN10013, *World J Microbiol. Biotechnol.* 24:523-531

- [12] Glick, B.R., 2010, Using soil bacteria to facilitate phytoremediation, *Biotechnol. Advances*. 28: 367–374.
- [13] EL-Saeid, M.H., Al-Turki, A.M., Nadeem, M.E.A., Hassanin, A.S. and Al-Wabel, M.I., 2015, Photolysis degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) on surface sandy soil, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22:9603–9616
- [14] Gupta, H., 2018, PAH determination in effluent and sludge samples of paper industry, *Environ. Technol. Innovation*. 9: 115-121.
- [15] Wilson, S. C., and Jones, K. C., 1993, Bioremediation of soil contaminated with polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs): A review, *Environ Pollut.* 81: 229-249.
- [16] Gadde, B., Bonnet, S., Menke, C. and Garivait, S., 2009, Air pollutant emissions from rice straw open field burning in India, Thailand and the Philippines, *Environ. Pollut.* 157: 1554-1558.
- [17] Wang, Y., Zhang, Q., Zhang, Y., Zhao, H., Tan, F., Wu, X., and Chen, J., 2019, Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the air of Dalian, China: Correlations with six criteria air pollutants and meteorological conditions, *Chemosphere*. 216: 516-523.
- [18] Srogi, K., 2007, Monitoring of environmental exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: a review, *Environ. Chem. Let.* 5:169–195
- [19] Dat, N.-D. and Chang, M.B., 2017, Review on characteristics of PAHs in atmosphere, anthropogenic sources and control technologies, *Sci. Total Environ.* 609: 682-693.
- [20] Orakij, W., Chetiyankornkul, T., Chue-saard, T., Kaganoi, Y., Uozaki, W., Homma, C., Boongla, Y., Tang, N., Hayakawa, K., and Toriba, A., 2017, Personal inhalation exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons and their nitro-derivatives in rural residents in northern Thailand, *Environ. Monit. Assess.* 189, 510.
- [21] Pongpiachan, S., Hattayanone, M., and Cao, J., 2017, Effect of agricultural waste burning season on PM_{2.5}-bound polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) levels in Northern Thailand, *Atmos. Pollut. Res.* 8: 1069-1080.
- [22] Ketsakorn, A., and Sahanavin, N., 2017, Relationship between particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbon and PM₁₀ with environmental factors: A case study on a religion place in Pathum Thani Provinces, *J. KMUTNB.* 27 (3): 493-500.
- [23] Zhang, P. and Chen, Y., 2017, Polycyclic aromatic hydrocarbons contamination in surface soil of China: A review, *Sci. Total Environ.* 605-606: 1011-1020.
- [24] Pongpiachan, S., Tipmadee, D., Deelman, W., Muprasit, J., Feldensand, P. and Schwarzer, K., 2013, Baseline risk assessment of the presence of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coastal areas of Thailand affected by the 2004 tsunami, *Mar. Pollut. Bull.* 76: 370-378.
- [25] Pongpiachan, S., Hattayanone, M., Tipmanee, D., Suttinun, O., Khumsup, C.,

- Kittikoon, I., and Hirunyatrakul, P., 2018, Chemical characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in 2013 Rayong oil spill-affected coastal areas of Thailand, *Environ. Pollut.* 233: 992-1002.
- [26] Islam, M.N., Jo, Y.-T., Chung, S.-Y. and Park, J.-H., 2018, Assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in school playground soils in Urban Gwangju, South Korea, *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 74: 431-441.
- [27] Boonyatumanond, R., Wattayakorn, G., Togo, A. and Takada, H., 2006, Distribution and origins of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) In riverine, estuarine, and marine sediments in Thailand, *Mar. Pollut. Bull.* 52: 942-956.
- [28] Reddy, C.M., Arey, J.S., Seewald, J.S., Sylva, S.P., Lemkau, K.L., Nelson, R.K., Carmichael, C.A., McIntyre, C.P., Fenwick, J., Ventura, G.T., Van Mooy, B.A.S., and Camilli, R., 2012, Composition and fate of gas and oil released to the water column during the Deepwater Horizon oil spill, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 109: 20229-20234.
- [29] Chunharat, S., Wattayagorn, G., Suthanaruk, P. and Salaenoi, J., 2015, Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments in Map Ta Phut industrial estate area, Rayong Province, Thailand, *Kasetsart J. (Nat. Sci.)*. 49: 747-760.
- [30] Kakhkashan, S., Wang, X., Ya, M., Chen, J., Wu, Y., Cai, Y., Saleem, M., Inam, A., and Aftab, J., 2019, Evaluation of marine sediment contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons along the Karachi coast, Pakistan, 11 years after the Tasman Spirit oil spill, *Chemosphere.* 233: 652-659.
- [31] Nasher, E., Heng, L.Y., Zakaria, Z. and Surif, S., 2013, Concentrations and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the seawater around Langkawi Island, Malaysia. *J. Chem.* ID 975781.
- [32] Bansal, V. and Kim, K.-H., 2015, Review of PAH contamination in food products and their health hazards, *Environ. Int.* 84: 26-38.
- [33] Ramos, A.B.A., Farias, C.O., Hamacher, C. and Araújo, M., 2017, Assessment of PAHs occurrence and distribution in brown mussels (*Perna perna* Linnaeus 1758) subject to different levels of contamination in Brazil, *Reg. Stud. Mar. Sci.* 14: 145-151.