

ผลกระทบของไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติกต่อสิ่งแวดล้อม Effects of Microplastics and Nanoplastics on the Environment

รุ่งกานต์ นุ้ยสินธุ์*

Roongkan Nuisin*,

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ ประเทศไทย

Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

สุดา เกียรติกำจรวงศ์

Suda Kiatkamjornwong

สำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสภา กรุงเทพฯ ประเทศไทย

The Academy of Science, The Royal Society of Thailand, Bangkok, Thailand

*Corresponding author E-mail: Roongkan.N@Chula.ac.th

Received 26 February 2025; Revised 30 May 2025; Accepted 23 June 2025

บทคัดย่อ

ความเป็นมาและวัตถุประสงค์ : การผลิตและการใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกทำให้เกิดไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติก ซึ่งเป็นชิ้นส่วนพลาสติกขนาดเล็กที่อาจมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า และสามารถแพร่กระจายทั้งบนบก ในแหล่งน้ำ และในอากาศ เข้าสู่ระบบนิเวศและแหล่งผลิตอาหารที่มนุษย์ใช้บริโภค อากาศที่มนุษย์หายใจ ส่งผลเชิงลบต่อสุขภาพ ก่อให้เกิดโรคอุบัติใหม่ที่ต้องใช้เวลารักษาหรือไม่สามารถรักษาได้ในมนุษย์ นับเป็นปัญหาที่สำคัญที่ต้องได้รับการแก้ไข บทความนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อนำเสนอภาพรวมที่ครอบคลุมแหล่งที่มาของไมโครพลาสติกและ/หรือนาโนพลาสติก การแพร่กระจายเข้าสู่สิ่งแวดล้อมทางน้ำ ดิน ระบบนิเวศ และ ความทำลายที่เกี่ยวข้องกับการมีอยู่ของไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติก นอกจากนี้ บทความยังได้รวบรวม ตัวอย่างของกระบวนการบำบัดและการจัดการมลพิษ พร้อมทั้งแนวทางสำหรับการวิจัยในอนาคตที่เกี่ยวกับการควบคุมปัญหา การแพร่กระจาย วิธีการเข้าสู่และดิน มุ่งเน้นการลดผลกระทบต่อระบบนิเวศ ลดภาวะคุกคามทางชีวภาพที่เกิดจากไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติก อนึ่ง ประเทศสมาชิกในภาคอุตสาหกรรมทั่วโลก รวมถึงประเทศไทย อยู่ในระหว่างการจัดทำสัตยาบันพลาสติกโลก ซึ่งมีเป้าหมายให้ทั้ง 175 ประเทศสมาชิกยึดถือเป็นแนวทางปฏิบัติร่วมกันในการลดปริมาณไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติกในอนาคตอันใกล้

เนื้อหา : ไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติกก่อให้เกิดอันตรายและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม รวมทั้งมนุษย์และสิ่งมีชีวิต เนื่องจากมีขนาดเล็กและสมบัติทางเคมี-กายภาพจำเพาะ ไมโครพลาสติกเป็นอนุภาคพลาสติกขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 5 มิลลิเมตร มีแหล่งกำเนิด 2 แหล่ง ได้แก่ ไมโครพลาสติกปฐมภูมิจากการสังเคราะห์พลาสติกให้มีขนาดอนุภาคเล็กเพื่อใช้งานตามวัตถุประสงค์ และไมโครพลาสติกทุติยภูมิ ซึ่งเกิดจากการแตกสลายของเทอร์โมพลาสติกขนาดใหญ่ภายใต้ภาวะต่าง ๆ ของสิ่งแวดล้อมภายนอก เช่น การผุกร่อน การแตกสลายเชิงกล และการทำปฏิกิริยากับรังสีอัลตราไวโอเลต แสงแดด ความร้อน คลื่น ลม ทั้งนี้ยังรวมถึง

พลาสติกขนาดเล็กมากอีกชนิดหนึ่ง คือ นาโนพลาสติกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 1 ถึง 1,000 นาโนเมตร วิธีการกระจายตัวเข้าสู่สิ่งแวดล้อมของพลาสติกขนาดเล็กดังกล่าวมีหลายวิธี เช่น การชะพาไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติกจากกิจกรรมของมนุษย์ลงสู่ดินชั้นบน การหมุนเวียนของพลาสติกในบรรยากาศจากแหล่งกำเนิดภายนอก เช่น การจราจร การฟุ้งกระจายจากฝุ่นละอองชุมชน อันตรายของไมโครพลาสติกในสิ่งแวดล้อมขึ้นกับองค์ประกอบของมอนอเมอร์ที่ใช้สังเคราะห์เป็นพลาสติก สารเติมแต่งในเนื้อพลาสติก และวิธีการแตกตัวเป็นไมโครพลาสติก สารเติมแต่งจากไมโครพลาสติกถูกชะล้างและเข้าสู่สิ่งแวดล้อมในน้ำหรือดิน เนื่องจากกระบวนการแพร่ของสารเติมแต่งออกจากเนื้อพื้นพลาสติกที่เกิดจากแรงยึดเหนี่ยวที่ไม่ถาวร ส่วน นาโนพลาสติกมีพื้นที่ผิวมากกว่าไมโครพลาสติก จึงเข้าสู่ร่างกายของสิ่งมีชีวิตได้ง่ายกว่า ดังนั้น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมพลาสติก และอุตสาหกรรมต่อเนื่องจากพอลิเมอร์หรือพลาสติก ต้องมีมาตรการป้องกันการเกิดไมโครพลาสติกหรือนาโนพลาสติกในสิ่งแวดล้อม ทั้งทางบก ทางน้ำ และทางอากาศ โดยความร่วมมือกันระหว่างองค์กรทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการผลิตสารปิโตรเคมี พอลิเมอร์ พลาสติก และผลิตภัณฑ์พลาสติกที่เป็นวัสดุปลายทาง รวมทั้งการจัดการขยะพลาสติกในสิ่งแวดล้อมอย่างถูกต้อง

คำสำคัญ : ไมโครพลาสติก, นาโนพลาสติก, สารเติมแต่ง, สิ่งแวดล้อม, ผลกระทบ, การจัดการขยะพลาสติก

Abstract

Background and Objectives: The production and use of plastic products result in the generation of microplastics and nanoplastics—tiny plastic particles that are often invisible to the naked eye. These particles can spread across land, water sources and the air, infiltrating ecosystems and food production systems consumed by humans as well as the air we breathe. This has negative impacts on health and can lead to emerging diseases that are difficult or even impossible to cure. It is a critical issue that requires urgent attention. The present article therefore aims to provide a comprehensive overview of the sources of microplastics and/or nanoplastics, their spread into aquatic and terrestrial environments and the associated challenges related to their presence in ecosystems. Additionally, the article compiles examples of treatment and pollution management processes, along with future research directions focused on controlling the problem, understanding the pathways of spread into water and soil, mitigating ecological impacts and reducing the biological threats posed by microplastics and nanoplastics. It is worth noting that industrial sector member countries around the world, including Thailand, are currently in the process of drafting a Global Plastics Treaty. Such a treaty aims to establish a unified framework for all 175 member countries to collaboratively reduce the amount of microplastics and nanoplastics in the near future.

Content: Microplastics and nanoplastics pose hazards and adverse effects on the environment as well as on humans and other living organisms due to their small sizes and unique physicochemical properties. Microplastics are small plastic particles with diameters less than 5 mm and originate from two primary sources viz. primary microplastics, which are intentionally manufactured to be small for specific applications, and secondary microplastics, which result from the breakdown of larger thermoplastics under various environmental conditions, such as weathering, mechanical degradation, and reactions with ultraviolet radiation, sunlight, heat, waves, and wind. Another category of extremely small plastics is nanoplastics, with diameters ranging from 1 to 1,000 nanometers. These tiny plastics can enter the environment through several pathways, e.g., via runoff from human activities that carry microplastics and nanoplastics into topsoil or through atmospheric circulation from such external sources as traffic or dust dispersion from communities. The environmental harm caused by microplastics depends on the monomer components used in plastic synthesis, additives within the plastic matrix and the fragmentation pathways. Additives in microplastics can leach into water or soil due to diffusion processes, as they are often weakly bound to the plastic matrix. Nanoplastics, having a larger surface-area-to-volume ratio than microplastics, can more easily penetrate the bodies of living organisms. Therefore, the petrochemical industry, plastics industry and all downstream polymer-related sectors must implement preventive measures to curb the release of microplastics and nanoplastics into the environment—on land, in water and in the air. Effective management requires collaboration among all stakeholders involved in the production of petrochemicals, polymers, plastics and plastic end-products as well as proper environmental waste management practices for plastic waste.

Keywords: Microplastics, Nanoplastics, Additive, Environment, Impact, Plastic Waste Management

Introduction

อุตสาหกรรมพลาสติกได้ถือกำเนิดครั้งแรกในราว ค.ศ. 1940-1950 จากการค้นพบน้ำมันดิบซึ่งประกอบด้วยของผสมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำนวนมากมาปะปนกัน สารผสมเหล่านี้มีจุดเดือดต่างกันน้อย จึงแยกด้วยวิธีการกลั่นลำดับส่วน ได้สารไฮโดรคาร์บอนหลายขนาดแยกออกมาเรียงตามจุดเดือด และนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์พอลิเมอร์ ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดใหญ่ มีน้ำหนักโมเลกุลมาก เพื่อใช้เป็นองค์ประกอบหลักในการผลิตพลาสติก ปัจจุบัน อุตสาหกรรมการผลิตพลาสติกมีการพัฒนาอย่างมาก เพื่อตอบสนองความต้องการใช้งานของผู้ใช้ ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของเทอร์โมพลาสติก เช่น

พอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) พอลิไวนิลคลอไรด์ [poly(vinyl chloride), PVC] พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (high-density polyethylene, HDPE) พอลิสไตรีน (polystyrene, PS) โฟมพอลิสไตรีน พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต [poly(ethylene terephthalate), PET] สำหรับเทอร์โมเซตพลาสติกชนิดที่มีการใช้งานมาก คือ พอลิยูรีเทน (polyurethanes, PUR) สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์สำหรับอุปโภคในหลายรูปแบบ เช่น เส้นใยสังเคราะห์ โฟม สารเคลือบผิว กาวและสารยึด ซึ่งมีการนำมาใช้งานในหลายรูปแบบ เช่น วัสดุก่อสร้าง บรรจุภัณฑ์ รถยนต์และชิ้นส่วนรถยนต์ วัสดุทางการแพทย์

ผลิตภัณฑ์จากพลาสติกมีประโยชน์มากในสังคมยุคใหม่ ทั้งความสะดวก ปลอดภัยต่อสุขภาพและด้านสิ่งแวดล้อมหลายประการ เช่น บรรจุภัณฑ์พลาสติกมีหน้าที่ปกป้องอาหารและสินค้าจากการปนเปื้อนสารเคมีหรือจุลินทรีย์ก่อโรค ทำให้สินค้าไม่เสียหายหรืออาหารถูกทิ้งแบบสูญเปล่าจากการเสียสภาพ พลาสติกมีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับวัสดุโลหะหรือเซรามิกส์ ช่วยประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงและลดการปล่อยไอเสียจากการขนส่งสินค้า ขวดน้ำพลาสติกช่วยรักษาคุณภาพน้ำได้โดยไม่เกิดการปนเปื้อน พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ใช้แทนที่วัสดุโลหะหรือเซรามิกส์ในรถยนต์และเครื่องบิน ทำใหยานพาหนะมีน้ำหนักเบาขึ้น พลาสติกในสิ่งทอ เสื้อผ้าและอุปกรณ์นรภัย เช่น เสื้อกันไฟ หมวกกันน็อก ถุงลมนิรภัย ช่วยปกป้องร่างกายจากอุบัติเหตุ ลดการบาดเจ็บอย่างรุนแรงได้ พลาสติกสำหรับการแพทย์ ช่วยทำให้การรักษามีความสะดวกและมีประสิทธิภาพดีขึ้น เช่น ถุงเลือด หลอดและท่อ เข็มฉีดยาชนิดใช้ครั้งเดียว อย่างไรก็ตาม ในเชิงปริมาณการอุปโภคพลาสติกและการทิ้งในรูปของมูลฝอย นำไปสู่การเกิดมูลฝอยที่มีองค์ประกอบพลาสติกจำนวนมาก มลพิษสิ่งแวดล้อมจากพลาสติกที่มีความหลากหลายทั้งชนิดและปริมาณขยะพลาสติก โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติกในผลิตภัณฑ์ที่มีอายุการใช้งานสั้น ทำให้เกิดปัญหาการจัดการขยะพลาสติกในสิ่งแวดล้อมตามมา ญุณแจสำคัญสำหรับกระบวนการจัดการปัญหาขยะพลาสติกในสิ่งแวดล้อม เช่น การกำจัด (disposal) และการบำบัดของเสีย (treatment) จึงนับเป็นความท้าทายทั้งด้านระบบสิ่งแวดล้อมและเทคโนโลยี เนื่องจากปริมาณขยะพลาสติกจากผลิตภัณฑ์ที่สิ้นสุดการใช้งาน รวมทั้งการเข้าสู่สิ่งแวดล้อมของสารเคมีสารเติมแต่งอื่น ๆ (additives) ที่เป็นองค์ประกอบรวมอยู่ในผลิตภัณฑ์พลาสติก เมื่อเกิดการหลุดรูดออกจากผลิตภัณฑ์นั้นเข้าสู่สิ่งแวดล้อมด้วยปัจจัยต่าง ๆ ทั้งเชิงกล กายภาพ เคมีและชีวภาพ สิ่งเจือปนเหล่านี้มีศักยภาพในการเกิดสารเคมีที่เป็นพิษสิ่งแวดล้อมได้ (toxic substances) รวมทั้งการจัดการขยะพลาสติกด้วยกระบวนการหมุนเวียนพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว ในกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ (recycling process) ตัวแปรด้านการผลิตพลาสติกใหม่ เช่น บด ตัด หลอม และความร้อน สามารถก่อให้เกิดการหลุดรูดของสารเคมีเข้าสู่ระบบการผลิตและสิ่งแวดล้อมโดยรอบได้เช่นกัน

กระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกเริ่มต้นจากการนำสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กซึ่งได้จากการกลั่นลำดับส่วนของน้ำมันดิบ สารตั้งต้นนี้เรียกว่า มอนอเมอร์ (monomer) กระบวนการพอลิเมอไรเซชัน โดยให้มอนอเมอร์มาทำปฏิกิริยากันจนได้เป็นสายโซ่ยาว เรียกว่า พอลิเมอร์ ซึ่งพอลิเมอร์แต่ละชนิดสังเคราะห์โดยใช้วัตถุดิบเริ่มต้นที่แตกต่างกันไป ทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติที่แตกต่างกันด้วย นำพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้นี้มาใช้เป็นองค์ประกอบของพลาสติกร่วมกับสารอื่น เรียกว่า คอมพาวนด์พลาสติก (plastic-

compound) ซึ่งมีสารเติมแต่งหลายชนิดทำหน้าที่เฉพาะเพื่อให้พลาสติกมีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานตามที่ต้องการ ความทนทานตามหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้าง โดยทั่วไป สารเติมแต่งเหล่านี้แบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

1. สารเติมแต่งที่มีหน้าที่เฉพาะ (functional additives) เช่น สารก่อโฟม สารช่วยเสถียร สารหล่อลื่น สารป้องกันไฟฟ้าสถิต สารกันเชื้อรา สารเสริมสภาพพลาสติกหรือพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) ช่วยให้พลาสติกมีความยืดหยุ่น สารกันกลิ่น และสารหน่วงไฟ (flame retardant) ช่วยให้พลาสติกติดไฟช้าลง

2. สารเติมแต่ง (additives) เป็นสารที่ปรับปรุงสมบัติด้านต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์พลาสติก เช่น ไมกา (mica) แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) ดินเหนียว แบเรียมซัลเฟต (barium sulfate) ช่วยเพิ่มปริมาตรของชิ้นพลาสติกหรือพอลิเมอร์ชนิดอื่น สีสําหรับตกแต่งผลิตภัณฑ์ให้สวยงาม สารที่ช่วยป้องกันการเสื่อมสลายของพลาสติกจากรังสีอัลตราไวโอเลต และสารที่ช่วยป้องกันไม่ให้พลาสติกเกาะติดผิววัสดุอื่น ๆ

3. สารให้สี (colorants) เป็นสารเคมีที่ให้สีแก่เนื้อพลาสติก สารให้สีหลายชนิดสามารถควบคุมความใสหรือความขุ่นของพลาสติก ทั้งนี้ ขึ้นกับชนิดของสารสีที่โปร่งใสหรือทึบแสง มีลักษณะเป็นผงละเอียด สารให้สีมีทั้งสารอนินทรีย์กลุ่มที่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบและสารอินทรีย์ที่มีหมู่ให้สีเป็นสารสีโปร่งใส เช่น สีย้อมกลุ่มแอโซ (azo-dye) แอนทราควิโนน (anthraquinone) หรือสารแต่งสีอื่น ๆ

4. วัสดุเสริมแรง (reinforcement substances) เพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านแรงดึงขาด ความยืดหยุ่น เช่น เส้นใยคาร์บอน (carbon fiber) และเส้นใยแก้ว (glass fiber)

สารเติมแต่งหลายชนิดไม่ได้สร้างพันธะกับพอลิเมอร์ จึงทำให้สารเติมแต่งเหล่านี้ถูกปลดปล่อยออกมาจากพลาสติกได้ตามอายุการใช้งาน หรือเกิดจากการจัดการขยะผิดวิธี เช่น ขยะอิเล็กทรอนิกส์และชิ้นส่วนต่าง ๆ จึงเกิดการปลดปล่อยสารเติมแต่งเหล่านี้เข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้ [1] การปลดปล่อยสารเติมแต่งออกมาจากพลาสติกขึ้นกับ (ก) ขนาดของชิ้นส่วนพอลิเมอร์ (ข) สมบัติทางกายภาพ-เคมีของตัวกลางในสิ่งแวดล้อมระหว่างชิ้นส่วนพลาสติกกับสิ่งแวดล้อมโดยรอบ รวมทั้งสารเติมแต่ง (ค) ขนาดโมเลกุลของสารเติมแต่ง [2] เช่น สารกลุ่มทาเลต (phthalate) สารกลุ่มโนนิลฟีนอล (nonyl phenol) ตัวอย่างของสารเติมแต่งที่พบบ่อยในพลาสติกและมักตรวจพบในไมโครพลาสติก ดังนี้

(ก) ทาเลต (phthalate) เป็นเอสเทอร์ของกรดทาเลียที่มีชื่อทางการ 1,2-benzene dicarboxylic acid ที่มีสภาพขี้ในช่องกว้าง ใช้งานในพลาสติกหลายชนิดในหน้าที่ของพลาสติกไซเซอร์ ซึ่งสารเหล่านี้มักมีความดันไอต่ำ ไม่ละลายในของเหลว มีความเสถียรทางเคมี เมื่อมีสารพลาสติกไซเซอร์แทรกอยู่ระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ จะช่วยลดแรงดึงดูดทางกายภาพระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ จึงเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์และทำให้เกิดความยืดหยุ่นในสายโซ่ พลาสติกไซเซอร์ชนิดที่นิยมใช้ ได้แก่ ได-(2-เอทิลเฮกซิล) ทาเลต [di(2-ethylhexyl) phthalate] หรือ DEHP สารได-นอร์มอลบิวทิลทาเลต (di-n-butyl phthalate หรือ DnBP) และเบนซิลบิวทิลทาเลต (benzyl butyl phthalate หรือ BBP) ปริมาณร้อยละ 0.1 ของเนื้อพอลิเมอร์ในส่วนประกอบพลาสติก มักพบในพลาสติกที่ผลิตเป็นของเล่นเด็ก เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ ซึ่งภายหลังถูกยับยั้งไม่ให้ใช้โดยรัฐสภายุโรป ใน ค.ศ. 2005 [3] DEHP ใช้ทั่วไปในพลาสติกสำหรับอุปกรณ์ทางการแพทย์

เครื่องสำอางและผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ สารทาลูเลทรบกวนการทำงานของต่อมไร้ท่อ (endocrine disrupting compounds: EDCs) ที่ขัดขวางการทำงานของฮอร์โมนซึ่งผลิตโดยต่อมไร้ท่อ เช่น ฮอร์โมนอีสโตรเจนคอร์ติซอล ไทรอยด์ ทำให้ระบบหรืออวัยวะต่าง ๆ ในร่างกายของสิ่งมีชีวิตที่ทำงานภายใต้การควบคุมของฮอร์โมน เกิดความผิดปกติไปจากสภาพตามธรรมชาติ [4] มีรายงานการพบสารทาลูเลทหลายชนิดปนเปื้อนในไมโครพลาสติกที่เก็บจากทะเลเหลือง สาธารณรัฐประชาชนจีน ในความเข้มข้นสูงถึง 6.09 นาโนกรัมต่อกรัมของไมโครพลาสติก [5]

(ข) บิสฟีนอล-เอ หรือ บีพีเอ (bisphenol-A หรือ BPA) เป็นสารประกอบสังเคราะห์ มีสูตรเคมี $C_{15}H_{16}O_2$ ในโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยหมู่ 4-ไฮดรอกซีฟีนิล (4-hydroxyphenyl) จำนวน 2 หมู่ ทำให้มีกลิ่นของฟีนอลอ่อน ๆ สาร BPA เป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตพลาสติกชนิดพอลิคาร์บอเนต มีรายงานว่า BPA เป็นสารที่สามารถเลียนแบบฮอร์โมนอีสโตรเจน รบกวนการทำงานของต่อมไร้ท่อในสิ่งมีชีวิต ทำให้ระบบเผาผลาญทำงานผิดปกติซึ่งเป็นพิษต่อระบบภูมิคุ้มกันทั้งหมดของร่างกายและเป็นพิษต่อระบบประสาท [6] พบสาร BPA ในพลาสติกชนิดพอลิคาร์บอเนตและอีพอกซีเรซิน การทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่า สาร BPA ถูกดูดซับบนพื้นผิวของไมโครพลาสติกชนิดพอลิไวนิลคลอไรด์ได้ [7] อย่างไรก็ตามมีการศึกษาค่อนข้างน้อย เกี่ยวกับการหลุดรอดของสารเติมแต่งออกมาจากผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม

(ค) สารหน่วงการติดไฟของพอลิโบรมีเนต (polybrominated flame retardant หรือ PBDE) เป็นกลุ่มของสารเคมีชนิดที่ทำหน้าที่ลดอัตราการเผาไหม้และกระจายไฟโดยการปล่อยอนุมูลโบรมีน สาร PBDE มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ในรูปแบบ pentaBDE, decaBDE และ octaBDE จากรายงานของ USEPA (2017) สาร PBDE เป็นสารก่อมะเร็งและทำให้อวัยวะของทารกพิการ รวมถึงเป็นพิษต่อระบบสืบพันธุ์ ตับ และระบบประสาทในหนูตะเภา [8]

จากเนื้อหาที่กล่าวมาข้างต้น พลวัตของอนุภาคพลาสติกมีความหลากหลายโดยประกอบด้วยสารเคมี 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มแรก คือ สารตั้งต้นมอนอเมอร์หรือโอลิโกเมอร์ สารเร่งปฏิกิริยา สารปนเปื้อน รวมทั้งสารเติมแต่งในกระบวนการผลิต และกลุ่มที่สอง คือ สารเคมีจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบที่ถูกดูดซับบนผิวของไมโครพลาสติกที่มีความหลากหลายของหมู่ฟังก์ชันที่ผิว ขนาด และรูปร่างนั้น ทำให้การทดสอบสมบัติของไมโครพลาสติกที่พบในสิ่งแวดล้อมมีความท้าทายมาก

การพยากรณ์การเกิดขยะพลาสติกและการเคลื่อนที่ขององค์ประกอบสารพิษในขยะพลาสติกกลับสู่สิ่งแวดล้อม (Forecasting plastics waste generation and its toxic chemical components mitigation to the environment)

วงจรชีวิตของพลาสติก โดยทั่วไปแบ่งได้ 3 ขั้นตอน ได้แก่ การผลิต การใช้งาน และการกำจัดเมื่อสิ้นสุดการใช้งาน (Figure 1) ความเป็นไปได้ของขยะพลาสติกและสารเคมีที่มีศักยภาพในการเกิดพิษเข้าสู่สิ่งแวดล้อม มีสาเหตุดังนี้

1. วิธีการจัดการขยะพลาสติกที่ไม่เหมาะสมทำให้เกิดขยะพลาสติกเข้าสู่ทะเล มหาสมุทรและชายฝั่ง การจัดการขยะพลาสติกเป็นส่วนสำคัญในวงจรชีวิตของพลาสติก วิธีที่นิยมใช้ ได้แก่ การฝังกลบ (landfill) และการเผาในที่เปิด ซึ่งวิธีหลังทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ แม้ว่าในหลายประเทศมีระบบการจัดการขยะที่มีความทันสมัยและเป็นระบบ มีการใช้พลังงานและเทคโนโลยีขั้นสูงในการจัดการของเสีย อย่างไรก็ตาม ของเสียส่วนหนึ่งจากการจัดการขยะพลาสติกก็กลับคืนสู่พื้นดินและไปสิ้นสุดภายในหลุมฝังกลบ ทำให้เกิดข้อถกเถียงด้านความเหมาะสมของวิธีการจัดการของเสียด้วยวิธีนี้ เช่น กระบวนการเผาขยะมูลฝอยสิ้นเปลืองพลังงานและเชื้อเพลิงมาก การปล่อยแก๊สเรือนกระจกระหว่างการเผาขยะด้วยความร้อนสูง ทำให้ของเสียที่ตกค้างในหลุมฝังกลบมีความซับซ้อน และเกิดการสูญเสียทรัพยากรแทนที่จะได้ประโยชน์จากการใช้ของเสียให้เป็นทรัพยากรอีกระดับหนึ่งที่น่ากลับมาใช้ใหม่ได้
2. สารเติมแต่งในพลาสติกและในบรรจุภัณฑ์ โดยเฉพาะบรรจุภัณฑ์อาหารหลายชนิดอาจหลุดรอดออกมาจากบรรจุภัณฑ์และปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อมในหลายรูปแบบ
3. การปลดปล่อยสารพิษจากขยะพลาสติกและสารเติมแต่งที่จัดการไม่เหมาะสมเข้าสู่สิ่งแวดล้อม

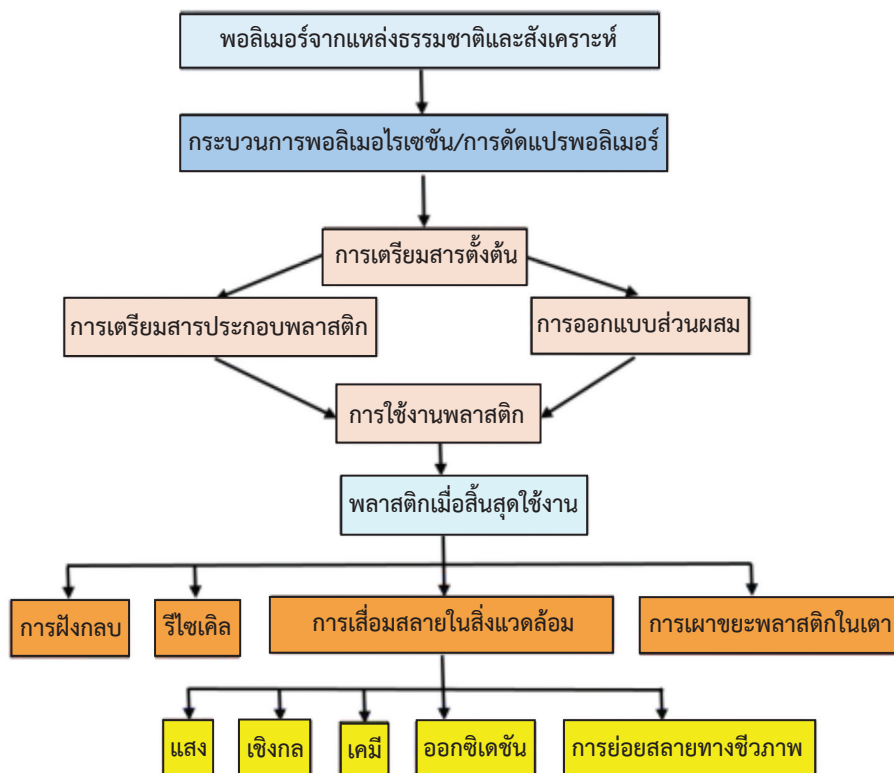


Figure 1 Flow chart representing the main steps in the life of plastic products from cradle-to-grave pathway

ชนิดและแหล่งของไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติก (Types and sources of microplastics and nanoplastics)

ไมโครพลาสติก (microplastics) คือ ชิ้นส่วนพลาสติกมีขนาดในช่วง 1-5,000 ไมโครเมตร และนาโนพลาสติก (nanoplastics) คือ พลาสติกมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร (ไม่เกิน 1,000 นาโนเมตร) การจำแนกตามขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ทำให้ไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติก มีความแตกต่างกันทางกายภาพ เคมีและชีวภาพ เนื่องจากพื้นที่ผิว (surface area) ต่างกัน ทำให้มีผลต่อการเกาะติดของสารอินทรีย์ที่ผิวนอก ขณะที่นาโนพลาสติกมีการกระจายตัวของขนาดความกว้างและม็อดประกอบหลากหลาย

อุตสาหกรรมพลาสติกมักเน้นการผลิตพลาสติกเพื่อตอบสนองความต้องการด้านอุปโภค การใช้งานพลาสติกทั้งชนิดและปริมาณในกิจกรรมต่าง ๆ ในชีวิตประจำวันของประชากรและภาคการผลิตในอุตสาหกรรมเกษตรกรรม อาหารและยา เมื่อสิ้นสุดความต้องการใช้งานหรือเสียสภาพ พลาสติกชิ้นใหญ่จะแตกสลายเป็นพลาสติกชิ้นส่วนขนาดเล็กลง จุดเริ่มต้นของการตรวจพบไมโครพลาสติกพบการปนเปื้อนในเปียร์ที่ผลิตในสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมัน [9] การปนเปื้อนในตัวอย่างน้ำและอากาศ [10] การผสมผงพลาสติกสังเคราะห์ไมโคร พลาสติกในผลิตภัณฑ์ เพื่อใช้ประโยชน์เฉพาะด้าน เช่น เม็ดพลาสติกขนาดเล็กสำหรับขัดผิวในเครื่องสำอาง เม็ดพลาสติกขนาดเล็กผสมในยาสีฟันเพื่อช่วยทำความสะอาดฟัน ผงพลาสติกพอลิเอทิลีน บริรจุภัณฑ์พลาสติก และชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า ฯลฯ พฤติกรรมการใช้พลาสติกที่หลากหลาย ก่อให้เกิดปัญหาขยะมูลฝอยที่มีองค์ประกอบพลาสติกที่ต้องกำจัดต่อไป รวมทั้งปัจจัยด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกและภาวะโลกร้อนที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการเข้าสู่ระบบสิ่งแวดล้อมของสารสังเคราะห์ด้วยตัวแปรของขนาดทั้งไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติกที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะนาโนพลาสติกที่มีขนาดเล็กมาก จึงนำไปสู่ความสนใจและความกังวลด้านผลกระทบของนาโนพลาสติกต่อสุขภาพด้วย

การจำแนกไมโครพลาสติกจากแหล่งกำเนิด ดังนี้

1. แหล่งกำเนิดพลาสติกปฐมภูมิ เช่น เม็ดพลาสติกขนาดเล็กจากผู้ผลิต เม็ดขัดสำหรับทำความสะอาดเชิงพาณิชย์ เกล็ดเม็ดพลาสติก และผงพลาสติกหรือเส้นใยขนปุ๋ยที่ใช้ในการผลิตสินค้าที่มีองค์ประกอบของพลาสติกเหล่านี้เป็นสารเติมแต่ง พลาสติกกลุ่มนี้ที่สังเคราะห์ได้ให้มีขนาดเล็ก เรียกว่า เม็ดลูกปัดขนาดระดับไมโครเมตร หรือ ไมโครบีด (microbeads) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางในช่วงระหว่าง 100-200 ไมโครเมตร ใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอางซึ่งทำหน้าที่ช่วยกำจัดสิ่งสกปรกบนผิวหนังและมือด้วยการขัดถูเบา ๆ สารเติมแต่งเพิ่มความหนืดในยาสีฟันและช่วยทำความสะอาดฟัน แต่ในเวลาต่อมา นักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบว่าพลาสติกขนาดเล็กจี้วนี้ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมาก ทั้งการตกค้างในน้ำ ปนเปื้อนในดิน และในอากาศ จึงเกิดความตระหนักด้านการใช้งานของพลาสติกขนาดเล็กที่เป็นสารเติมแต่งในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากขึ้น โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์สำหรับใช้ในการทำความสะอาดร่างกาย รวมทั้งเมื่อไมโครพลาสติกที่เกิดจากการแตกหักเป็นชิ้นส่วนขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวมาก เมื่อเข้าสู่สิ่งแวดล้อมจึงมีแนวโน้มเกิดการดูดซับสารเคมีต่าง ๆ ที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อมลงบนผิวหรือภายในของเนื้อไมโครพลาสติก เช่น พอลิคลอรีเนตไบฟีนิล (polychlorinated biphenyls หรือ PCBs) พอลิไซคลิกแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอน (polycyclic aromatic

hydrocarbons หรือ PAHs) ไดคลอโรไดฟีนิลไทรคลอโรอีเทน (dichlorodiphenyltrichloroethane หรือ DDT) สารเหล่านี้มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อย จึงมีแนวโน้มในการแยกตัวออกจากน้ำและดูดซับลงบนวัสดุภาคที่ไม่ชอบน้ำ เช่น สารอินทรีย์ ตะกอนและอนุภาคพลาสติก [11] ดังนั้น จึงพิจารณาได้ว่าไมโครพลาสติกปนเปื้อนสารที่ไม่ชอบน้ำ

2. แหล่งกำเนิดพลาสติกหุติยภูมิ เกิดจากการแตกหักของพลาสติกขนาดใหญ่จนมีขนาดเล็กลง โดยเริ่มขนาดระดับใหญ่กว่า 5 มิลลิเมตร เป็นขนาดระดับไมโครเมตรและนาโนเมตร ตามลำดับ ก่อนไหลออกสู่สิ่งแวดล้อม เนื่องจากปัจจัยที่เกิดจากสภาพแวดล้อมภายนอกที่มากกระทำต่อพลาสติก เช่น สภาพดินฟ้าอากาศ กระแสลม การเสียดสี การกระทำของคลื่นลม การย่อยสลายทางชีวภาพ การไฮโดรไลซิส และการย่อยสลายด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและแสงที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ ไมโครพลาสติกจากแหล่งกำเนิดหุติยภูมิมีความหลากหลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งชนิดขององค์ประกอบพอลิเมอร์ในพลาสติกนั้น จำแนกตามกลุ่มหลักของหมู่ฟังก์ชันเป็น 6 ประเภท ได้แก่ พอลิเอทิลีนทั้งชนิดความหนาแน่นสูงและความหนาแน่นต่ำ พอลิโพรพิลีน พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิสไตรีน พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และพอลิยูรีเทน นอกจากนี้ ยังมีพอลิเมอร์ร่วมชนิดสององค์ประกอบและสามองค์ประกอบอีกจำนวนหนึ่ง ที่สังเคราะห์ขึ้นในระดับอุตสาหกรรมและถูกใช้งานกันอย่างกว้างขวาง ซึ่งยังไม่ได้จัดระบบจัดการปัญหาที่เกิดจากการสลายตัวและผลกระทบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์

วิถีทางของไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติกในสิ่งแวดล้อม (Pathways of microplastics and nanoplastics in the environment)

การจำแนกชิ้นส่วนของเศษพลาสติกด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนั้นได้กำหนดว่า อนุภาคไมโครพลาสติกมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร นาโนพลาสติกมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 1 ถึง 1,000 นาโนเมตร [12] มีโซพลาสติก (mesoplastics) มีขนาดตั้งแต่ 1 ถึง 5 มิลลิเมตร และแมโครพลาสติก (macroplastics) มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 5 มิลลิเมตร [13] ตัวอย่างไมโครพลาสติกที่พบโดยทั่วไปมักมีรูปแบบหลากหลาย ขึ้นอยู่กับลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่สังเกตได้ [14] ซึ่ง "ไมโครพลาสติก" เป็นคำกลางที่ครอบคลุมรูปร่าง ขนาดและประเภทของพอลิเมอร์หลายประเภท [13] ดังนั้น ในด้านสิ่งแวดล้อม สมบัติทางกายภาพและเคมีของไมโครพลาสติกจึงแตกต่างจากเม็ดพลาสติกขนาดเล็กจิ๋วระดับปฐมภูมิที่ใช้กันทั่วไป เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของพอลิเมอร์มีความหลากหลาย ได้แก่ ชนิดของพอลิเมอร์ แหล่งที่มาชนิดของสารตั้งต้นและการใช้งาน เมื่อสิ้นสุดการใช้งานพลาสติกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากปัจจัยต่าง ๆ จึงเป็นสาเหตุที่มีผลต่อวิธีการแตกสลาย ขนาด รูปร่างลักษณะของพลาสติกขนาดเล็กที่เกิดขึ้น การกระจายตัวของพลาสติกและวิธีการเข้าสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้น การจำแนกชิ้นส่วนพลาสติกขนาดเล็กที่แตกสลายออกมา จึงจำเป็นต้องใช้ความรู้ทางด้านองค์ประกอบทางเคมีของพลาสติก เพื่อทำให้เกิดความเข้าใจพฤติกรรมของไมโครพลาสติกต่าง ๆ ในสิ่งแวดล้อม ลักษณะการแตกสลายของไมโครพลาสติก ความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมของไมโครพลาสติก

ปริมาณของไมโครพลาสติกเพิ่มมากขึ้นจากแหล่งกำเนิดและแพร่กระจายมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมในวงกว้าง การตกค้างของพลาสติกในสิ่งแวดล้อม เกิดจากองค์ประกอบของพลาสติกที่เป็นสารไฮโดรคาร์บอน น้ำหนัก

โมเลกุลสูง และมีสารเคมีตัวเติมอื่น ๆ โครงสร้างทางเคมีเป็นสารไฮโดรคาร์บอน ย่อยสลายทางชีวภาพยาก และคงทนอยู่เป็นเวลานานมานานับร้อยปี [15] การแตกสลายของพลาสติกเป็นอนุภาคของแข็งไมโครพลาสติก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 5 มิลลิเมตร และมีสมบัติไม่ละลายน้ำ จึงพบไมโครพลาสติกปนเปื้อนในสภาพแวดล้อมทุกภาคส่วนทั้งหมดของโลก เช่น บรรยากาศ อุทกภาคทั้งแหล่งน้ำผิวดิน ลำคลอง แหล่งน้ำจัดตามแนวชายฝั่ง ในตะกอนท้องมหาสมุทรและแม่น้ำ ระบบบำบัดน้ำเสีย รวมทั้งน้ำดื่มและผลิตภัณฑ์อาหาร และตกค้างในดินเกษตรกรรม สามารถจำแนกวิธีการแตกสลายของไมโครพลาสติก ดังนี้

วิธีที่ 1 การแตกสลายในวิธีไม่มีสิ่งมีชีวิตของพลาสติก (Abiotically environmental degradation of plastics)

พลาสติกสามารถแตกสลายได้ในสิ่งแวดล้อมโดยวิธีสิ่งมีชีวิต (biotic pathways) และวิธีไม่มีสิ่งมีชีวิต (abiotic pathways) ขึ้นกับธรรมชาติของพอลิเมอร์ที่ใช้ผลิตพลาสติก การแตกสลายของพลาสติกเริ่มต้นจากกระบวนการทางกายภาพ การแยกส่วนหรือทางเคมีผ่านกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน (photo-oxidation) การตัดสายโซ่พอลิเมอร์แบบไฮโดรไลซิส (hydrolysis) หรือออกซิเดชันด้วยความร้อน (thermal-oxidative degradation) การเสื่อมสลายของไมโครพลาสติกและกลไกการแตกสลายของสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์สายโซ่ยาวแตกสลายเป็นสายโซ่ขนาดเล็ก กระบวนการนี้เกิดจากปัจจัยภายนอกผ่านวิถีทางเคมี-กายภาพ เป็นปัจจัยที่ไม่มีสิ่งมีชีวิตมาเกี่ยวข้อง (abiotic degradation) เช่น พลังงานจากปฏิกิริยาเคมี รังสีอัลตราไวโอเลต รังสีความร้อน การแตกสลายด้วยพลังงานเหล่านี้นำไปสู่การแตกสลายของโซ่โมเลกุลของ พอลิเมอร์ชนิดนั้นในพลาสติก ได้เป็นชิ้นส่วนขนาดเล็กของพลาสติกหรือผ่านกลไกทางกลและความเค้นเชิงกล (Table 1) กระบวนการแตกสลายมีความซับซ้อนและรวมถึงการตัดสายโซ่พอลิเมอร์จนอาจได้มอนอเมอร์ (depolymerization) การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ เช่น ความแข็งแรงของผิว ในทางอุดมคติการแตกสลายของพลาสติกสามารถเกิดผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นของแข็ง ของเหลว จนถึงสิ้นสุดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ การแตกสลายพลาสติกจากอนุภาคขนาดใหญ่เป็นชิ้นส่วนขนาดเล็ก ทำให้เกิดการสูญเสียมวล การเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวด้านนอกซึ่งเกิดในพลาสติกที่กระจายตัวในสิ่งแวดล้อมของแม่น้ำ ทะเล และมหาสมุทร เมื่อพลาสติกขนาดใหญ่แตกเป็นชิ้นส่วนไมโครพลาสติกในสิ่งแวดล้อมแบบเปิด เช่น ทะเล ชายฝั่ง บนพื้นดิน มีการเสื่อมสลายได้ผ่านหลายกระบวนการ เช่น การได้รับพลังงานแสงแดด (solar exposure) พลังงานความร้อนเป็นเวลานาน (thermal aging) การเกิดไบโอฟิล์ม (biofilm) ที่เกิดจากกลุ่มของแบคทีเรียที่เกาะบนพื้นผิวพลาสติก และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้พอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยปฏิกิริยาเคมีที่นำไปสู่การแตกสลายของโครงสร้างพลาสติกที่มีฐานพอลิเมอร์เป็นหลัก

กลไกสำคัญของการเสื่อมสลายจำแนกได้หลายประเภท เช่น การเสื่อมสลายด้วยพลังงานแสง (photo degradation) เป็นการแตกสลายของโมเลกุลที่เกิดจากการดูดกลืนโฟตอนที่มาจากพลังงานของดวงอาทิตย์ เช่น รังสีอินฟราเรด แสงสีขาวที่ตามองเห็นและแสงที่ตามนุษย์มองไม่เห็น เช่น รังสีอัลตราไวโอเลต การเสื่อมสลายด้วยความร้อน (thermal degradation) การย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) การเสื่อมสลายด้วยออกซิเดชันภายใต้ความร้อน ทั้งนี้ ยังขึ้นกับปัจจัยภายนอกที่มาเกี่ยวข้องด้วย การเสื่อมสลายของพลาสติก

นำไปสู่การลดขนาดของพลาสติกกลายเป็นเศษชิ้นส่วนขนาดเล็ก ๆ นั่นคือ เกิดการตัดสายโซ่ของพอลิเมอร์ ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติหลายประการทั้งทางกายภาพและทางเคมี เช่น น้ำหนักโมเลกุลของฐานวัสดุนั้นลดลง สัณฐานวิทยาด้านความเป็นผลึกหรืออสัณฐาน ขนาดอนุภาค ความหนาแน่น อาจรวมถึงการเปลี่ยนแปลงด้านสีของแผ่นพลาสติกด้วย ดัง Figure 2

Table 1 Degradation pathways of plastics in the environment

ปัจจัยภายนอก	วิถีและกลไกการแตกสลาย	ตัวแปรที่สัมพันธ์กับภาวะโลกร้อน
ลม กระแสน้ำใน แม่น้ำมหาสมุทร หิมะละลาย	เชิงกลและแรงภายนอก เช่น แรงกด แรงเฉือน	พลาสติกตามชายฝั่งที่ถูกคลื่น ชัดกระแทกโขดหินและเม็ดทราย พลาสติกที่ถูกทับถมโดยหิมะ
อุณหภูมิ	ความร้อน เช่น พลาสติกดูดกลืนพลังงานความร้อนทำให้สายโซ่โมเลกุลแตกสลาย เกิดอนุมูลอิสระที่ทำให้ปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ สายโซ่โมเลกุลแตกสลายต่อเนื่องได้ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ที่แตกสลายต่อเป็นอนุมูลอิสระของหมู่ไฮดรอกซิลและแอลคอกซี ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์มีขนาดเล็กลง	พลาสติกตามชายฝั่งแตกสลาย โดยแสงแดดและออกซิเจน แปรผันตามเวลา และโซนด้านภูมิศาสตร์
ฝนกรด โอโซน สารเคมีระเหยง่าย	สารเคมี สารเคมีทำให้โมเลกุลของพลาสติกแตกสลายพันธะหลักให้อนุมูลอิสระและลดสายโซ่โมเลกุลให้เล็กลง	ความเป็นกรด-เบส และภาวะฝนกรด
แสงและรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ยูวี)	พลังงานแสงและรังสีความเข้มสูง พลาสติกแตกสลายเมื่อได้รับรังสียูวี ความยาวคลื่นของ UVB 290 - 315 นาโนเมตร และแสงแดดในช่วง 315 -400 นาโนเมตร	พลาสติกตามชายฝั่งและพื้นดินที่ได้รับแสงแดด หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลานานมาก

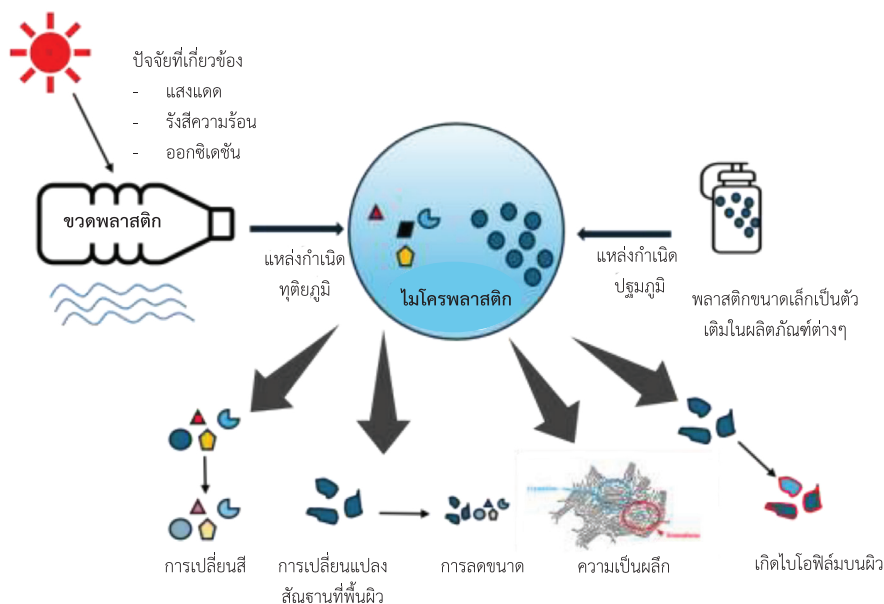


Figure 2 The origins of marine microplastics and various physical, mechanical, chemical, and biological processes influencing microplastics in the ocean.

วิธีที่ 2 การแตกสลายด้วยกิจกรรมทางชีวภาพของพอลิเมอร์จากสิ่งแวดล้อม (Biotic degradation of polymers from environment)

กระบวนการแตกสลายด้วยกิจกรรมทางชีวภาพ (biotic degradation) โดยการย่อยสลายด้วยวิธีที่เกิดจากชีวภาพ (biotic pathways) จากเอนไซม์ในสิ่งมีชีวิต เช่น แอคติโนมัยซิส สาหร่าย แบคทีเรียและรา เอนไซม์ของจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายพอลิเมอร์ให้เป็นสายโซ่ขนาดสั้นลง ซึ่งชิ้นส่วนขนาดเล็กของพลาสติกจำเพาะกับสิ่งมีชีวิตต่างชนิดกัน (ขึ้นอยู่กับแบคทีเรีย) กลไกของการย่อยสลายทางชีวภาพ เริ่มจากการที่ผิวภายนอกเกิดการเสื่อมสลายทางชีวภาพ (biodegradation) การแตกหักเป็นชิ้นส่วนเล็กทางชีวภาพ (biofragmentation) จุลินทรีย์สร้างเอนไซม์ซึ่งจะปล่อยเอนไซม์ออกสู่ภายนอกเซลล์ (extracellular enzyme) เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ต่าง ๆ การนำเข้าสู่เซลล์ (assimilation) และการย่อยสลายขั้นสุด (mineralization) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ กรดแอซิดิก และกรดไขมัน ปัจจัยที่กระตุ้นให้พลาสติกแตกสลายเร็ว เช่น การเติมธาตุอาหารของแบคทีเรีย ปริมาณแสง กรดพาล์มิก ในขณะที่ยาสารเติมแต่งพลาสติก เช่น พลาสติกไฮดรอกซี หรือสารหน่วงไฟ (flame retardant) สามารถชะลอการสลายตัวของพลาสติกได้ [16]

วิธีที่ 3 การชะและการปลดปล่อยสารเคมีที่เติมจากไมโครพลาสติก (Leaching and releasing of additive chemicals from microplastics)

กระบวนการผลิตพลาสติกมีการใส่สารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของพลาสติก จึงมีโอกาพบสารเติมแต่งในชิ้นส่วนไมโครพลาสติกหรือแยกออกมาจากไมโครพลาสติก การตรวจพบสารเติมแต่งเหล่านี้ในไมโครพลาสติก ณ สภาพแวดล้อมที่ห่างไกลจากแหล่งกำเนิดของพลาสติก เช่น ระบบนิเวศทางทะเลและ

มหาสมุทร ทำให้การตรวจสอบเพื่อย้อนกลับไปหาต้นตอแหล่งกำเนิดของพลาสติกเป็นเรื่องยากมาก สารเติมแต่งบางชนิดก็มีการใช้งานในหลายวัตถุประสงค์ เช่น บิสฟีนอลเอ (BPA) ใช้ในการผลิตขวดน้ำพลาสติก แต่ก็ยังใช้ในโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ กระป๋องอาหาร การพบ BPA ร่วมกับไมโครพลาสติก ทำให้สารนี้หมุนเวียนในสิ่งแวดล้อมซึ่งตรวจพบได้ตามชายหาด น้ำผิวดิน ตะกอน เป็นต้น โดยไมโครพลาสติกทำหน้าที่เป็นตัวพา สารเคมีที่เติมลงในพลาสติกมีศักยภาพในการเคลื่อนย้ายและแพร่กระจาย (migration) จากพลาสติกไปยังสิ่งแวดล้อมโดยรอบ เช่น อาหาร น้ำ ดิน รวมทั้งระหว่างพลาสติกด้วยกันซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติพื้นผิว ในบางกรณี การเคลื่อนย้ายของสารเคมีสามารถกำหนดรูปแบบได้ ขึ้นกับการใช้งานของวัสดุพลาสติก เช่น น้ำยาถอดแบบแม่พิมพ์ ใช้เป็นชั้นกั้นระหว่างผิวของชิ้นงานที่ต้องการกับผิวของแม่พิมพ์หรือแบบพิมพ์ โดยทั่วไป การปล่อยสารเติมแต่งออกจากไมโครพลาสติกเป็นกระบวนการที่ไม่สามารถควบคุมได้ แต่มีผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมด้วย

กลไกการแพร่กระจายของสารเติมแต่งในพอลิเมอร์แบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การแพร่ผ่านพอลิเมอร์ (diffusion through polymer) 2) การคายซับ (desorption) จากผิวพอลิเมอร์ 3) การดูดซับ (adsorption) ระหว่างวัฏภาคของสารกับพลาสติก และ 4) การดูดซึม/การกระจาย (absorption)/(dispersion) ของสารบนวัฏภาคของพลาสติก

โดยสรุป การแพร่กระจายของสารเติมแต่งในเนื้อพลาสติกเป็นไปตามกฎข้อที่หนึ่งของฟิก (Fick's first law) เมื่อการแพร่เป็นแบบสถานะคงตัว (steady state) คือ ความเข้มข้นไม่ขึ้นกับเวลา อัตราการแพร่ของสารผ่านหน่วยพื้นที่หรือพื้นผิว แต่การแพร่ของสารนั้นขึ้นกับความชันของความเข้มข้น (concentration gradient) ซึ่งก็คือ $\frac{d\varphi}{dx}$ เป็นสัดส่วนต่อความเข้มข้นของสารที่ลดหลั่นจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปหาที่มีความเข้มข้นต่ำ แต่ขึ้นกับปริมาณของสาร สามารถคำนวณหาอัตราการแพร่ของสารได้จากค่าฟลักซ์ (Flux, J) คือ ค่าที่แสดงจำนวนสารที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดหนึ่ง ๆ ต่อเวลา ดังสมการที่ 1

$$J = -D \frac{d\varphi}{dx} \quad (1)$$

โดย J คือ ฟลักซ์ของการแพร่ เป็นปริมาณสารต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา ตัวแปรนี้วัดปริมาณสารที่ไหลผ่านพื้นที่ในหน่วยของช่วงเวลา

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (พื้นที่ต่อเวลา)

φ คือ ความเข้มข้น เป็นปริมาณสารต่อหน่วยปริมาตร

x คือ ตำแหน่งแสดงระยะทางหรือความยาว

อัตราการแพร่ของสารอินทรีย์ เช่น สารเติมแต่งในพลาสติกขึ้นกับขนาดโมเลกุล ถ้าสารโมเลกุลเล็ก เช่น มอนอเมอร์ จุดเดือดต่ำ มีแนวโน้มแพร่ได้เร็ว ตัวอย่างมอนอเมอร์ เช่น ฟอร์มาลดีไฮด์ (formaldehyde) เอทิลีน (ethylene) บิวทาไดอีน (butadiene) หรือไวนิลคลอไรด์ (vinyl chloride) แพร่ได้เร็ว ณ อุณหภูมิห้อง [1]

การดูด-คายซับ (sorption) เป็นกระบวนการถ่ายโอนสารเคมีระหว่างวัฏภาค (phase) ได้แก่ วัฏภาคของของไหล (fluid phase) เช่น อากาศ น้ำ วัฏภาคของของแข็ง (solid phase) ในที่นี้คือ พลาสติก มีได้ทั้งการดูดซับและการคายซับ ในกระบวนการดูดซับโมเลกุลของสารเคมีติดอยู่ที่บริเวณระหว่างวัฏภาค ทั้งสอง คือของไหลกับของแข็ง ด้วยแรงกระทำต่าง ๆ เช่น อันตรกิริยาแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals interaction) แรงดึงดูดระหว่างไอออน แรงยึดเหนี่ยวระหว่างหมู่เกาะภายในโมเลกุล ในขณะที่การดูดซึม (absorption) เกิดโดยโมเลกุลของสารที่ถูกดูดจะแทรกเข้าไปภายในเนื้อของวัสดุดูดซึม และโมเลกุลของสาร นั้นถูกยึดเหนี่ยวด้วยอันตรกิริยาทางกายภาพอย่างอ่อน ๆ เช่น อันตรกิริยาแวนเดอร์วาลส์ [17] กระบวนการนี้ ขึ้นกับสมบัติความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ของสารเคมีที่เป็นตัวถูกดูดซับ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการดูดซึม คือ สมบัติทางเคมีที่พื้นผิวของวัฏภาคของแข็งและอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตร การดูดซับจะเกิดได้อย่างรวดเร็วเมื่อของแข็งมีขนาดเล็ก เช่น ไมโครพลาสติก รวมทั้งสภาพความมีขั้ว (polarity) ซึ่งสัมพันธ์กับการเกิดอันตรกิริยาของของแข็งกับสารอินทรีย์ เช่น สารอินทรีย์ที่ไม่ชอบน้ำชอบเกาะติดบนผิวของแข็งที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น อันตรกิริยาของสารเติมแต่งในพลาสติกมีหลายชนิด เช่น สาร PAHs เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนตระกูลใหญ่ที่มีความแตกต่างของโมเลกุลหลายชนิดที่มีโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยวงเบนซีนตั้งแต่ 2 วง ขึ้นไป จัดเรียงเป็นเส้นตรง เป็นมุม หรือเป็นกลุ่ม ที่มีเฉพาะอะตอมของไฮโดรเจนและคาร์บอน ส่วนใหญ่ไม่ละลายน้ำ ค่าลอการิทึมของค่าคงตัวการละลายในน้ำ - ออกทานอลอยู่ระหว่าง 3 – 7 [18] ส่วน PAHs เป็นโมเลกุลที่มีโครงสร้างแบนราบ (planar) ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดซับสูงกว่าโมเลกุลที่มีโครงสร้างไม่อยู่แนวระนาบเดียวกัน (non-planar) เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับมีค่าน้อย จะมีระดับการเข้าสู่วัฏภาคของทั้งของไหลและของแข็งได้มากกว่า ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรง ณ บริเวณระหว่างผิวของทั้งสองวัฏภาค หรืออีกนัยหนึ่ง คือ สารเติมแต่งที่มีความเข้มข้นน้อยถูกดูดซับได้ดีกว่าสารเติมแต่งที่มีความเข้มข้นมากกระบวนการดูดซับยังจำแนกย่อยออกเป็นลักษณะต่าง ๆ เช่น การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption) เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ (ของแข็ง/ไมโครพลาสติก) ด้วยอันตรกิริยาดึงดูดระหว่างโมเลกุล คือ อันตรกิริยาแวนเดอร์วาลส์ หรืออันตรกิริยาทางไฟฟ้าสถิตซึ่งเป็นแรงกระทำแบบอ่อนและการดูดซับนี้เกิดการย้อนกลับได้ ในขณะที่การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption) เกิดจากพันธะโควาเลนต์ซึ่งการดูดซับในลักษณะนี้ไม่สามารถเกิดการย้อนกลับได้ ยกเว้นมีการทำลายพันธะโควาเลนต์ซึ่งพันธะในลักษณะนี้ทำให้การคายสารที่ดูดซับเกิดขึ้นได้ยากด้วย

ปัจจัยที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับของสารเคมีบนไมโครพลาสติกมีหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น รูป ร่างและสัณฐานของไมโครพลาสติก ขนาดของไมโครพลาสติก จำนวนรูพรุน สัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (surface area-to-volume ratio) รวมทั้งปริมาณของความเป็นผลึก (crystallinity) อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature) สมบัติทางเคมีที่ผิว หมู่ฟังก์ชันบนสายโซ่พอลิเมอร์ ระดับการผุพัง-การกร่อนจากกระทำของสภาพอากาศ (degree of weathering) ต่อไมโครพลาสติกมีค่าคงตัว สมบัติของตัวถูกดูดซับมีปัจจัยแวดล้อมสำคัญที่เกี่ยวข้อง เช่น ความเค็ม ค่าความแรงของไอออน ค่าความเป็นกรด-เบส อุณหภูมิ และสารอินทรีย์ที่มีอยู่รอบ ๆ ขึ้นไมโครพลาสติก

การเกิดออกซิเดชันด้วยแสง (photooxidation) กระบวนการนี้เกิดขึ้นตามธรรมชาติและได้ใช้จำลองรูปแบบการปล่อยสารเติมแต่งออกมาจากไมโครพลาสติกในห้องปฏิบัติการ สารเติมแต่งในไมโครพลาสติกเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนรังสีได้ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและมีสารที่ทำให้มองเห็นได้เป็นสีที่เรียกว่าโครโมฟอร์ (chromophore) ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (free radicals) หรืออนุมูลอิสระที่มีออกซิเจนที่ว่องไวในโมเลกุล (Reactive Oxygen Species, ROS) ซึ่งเป็นส่วนที่ประกอบด้วยอิเล็กตรอนโดดเดี่ยวที่ไม่ครบคู่อยู่ 1 อิเล็กตรอน ทำให้เป็นโมเลกุลที่ไม่เสถียร เช่น ไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot\text{OH}$) ซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (O_2^-) และซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนเรดิคัล ($\text{O}_2^{\cdot-}$) ที่พร้อมจะทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ นำไปสู่การตัดสายโซ่ของพอลิเมอร์ในชั้นไมโครพลาสติก ทำให้เกิดกิ่งและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน [19] สารเติมแต่งที่ปล่อยออกมาจากทั้งไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติกที่ถูกเหนี่ยวนำโดยอนุมูลอิสระทั้งนี้ขึ้นกับโครงสร้างของพอลิเมอร์ เช่น ไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot\text{OH}$) มีบทบาทสำคัญต่อการปล่อยสารเติมแต่งออกจากแอลิแฟติกพอลิเมอร์ (aliphatic polymer) ผ่านการกำจัดอะตอมไฮโดรเจน การตัดพันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับคาร์บอน (C-C) สำหรับพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแอรโม่ติกนั้น $\cdot\text{OH}$ นี้จะทำปฏิกิริยากับวงแหวนเบนซีนเกิดเป็นสารประกอบมोनไฮดรอกซีเบนซีน ทำให้เกิดกระบวนการดีไฮโดรจีเนชันและการตัดพันธะ C-C ในสายโซ่พอลิเมอร์ กลุ่มพอลิพรพิลีนและพอลิเอทิลีนที่มีหมู่คอนจูเกตที่เปลี่ยนสีได้จำนวนน้อย เมื่อผสมสารเติมแต่งที่มีสีเข้าไปแล้วจะช่วยเร่งความว่องไวในการเกิดออกซิเดชันด้วยแสง แสงจะช่วยเร่งการปล่อยสารเติมแต่งออกจากเนื้อพลาสติก

การเกิดออกซิเดชันด้วยสารเคมี (chemical oxidation) กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (advanced oxidation process) นี้เป็นการออกซิไดซ์ไมโครพลาสติกโดยอนุมูลอิสระจำนวนหนึ่งที่มีความไว เช่น $\cdot\text{OH}$, $\text{O}_2^{\cdot-}$ (แก๊สออกซิเจนแอนไอออนเรดิคัล และ $\text{SO}_4^{\cdot-}$ (ซัลเฟตแอนไอออนเรดิคัล) กระตุ้นให้สารเติมแต่งถูกปลดปล่อยออกมาจากไมโครพลาสติก นอกจากนี้ อนุมูลอิสระเหล่านี้ยังสามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์หรือเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ที่ปล่อยออกมาจากไมโครพลาสติกได้ต่อไป

กระบวนการทางชีวเคมี (biochemical process) กระบวนการนี้เป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดไบโอฟิล์ม ซึ่งเป็นกลุ่มของจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ร่วมกัน การเกิดไบโอฟิล์ม (biofilm formation) ในขั้นแรก จุลินทรีย์จะเข้าไปเกาะติด (adhere) บนผิวไมโครพลาสติก มีการสร้างสารพอลิเมอร์และปล่อยออกมานอกเซลล์และมีการยึดเกาะที่ผิวเพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นปกป้องแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ภายใน สร้างโคโลนีบนพื้นผิวนอกของไมโครพลาสติกนั้นซึ่งขึ้นกับสมบัติพื้นผิวของพอลิเมอร์นั้น โครงสร้างและความพรุน การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และการกระตุ้นการย่อยสลายพอลิเมอร์จากพื้นผิวด้วยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพทางชีวภาพของพลาสติกเป็นชิ้นส่วนขนาดเล็ก และลดขนาดของสายโซ่พอลิเมอร์ผ่านกระบวนการ ไฮโดรไลซิส การเติมโปรตอน (protonation) หรือ การแตกตัวเป็นไอออน (ionization) [20]

ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติก (Environmental impacts of microplastics and nanoplastics)

การกระจายตัว การสะสม และวิธีการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในสิ่งแวดล้อม ขึ้นกับลักษณะทางกายภาพ อันตรกิริยาระหว่างพลาสติกกับปัจจัยในสิ่งแวดล้อม รวมทั้งการเคลื่อนย้ายและถ่ายเทเข้า-ออกตามวิธีต่าง ๆ เช่น ปัจจัยที่ควบคุมในบรรยากาศ ขนาด ความหนาแน่น และสัณฐานของไมโครพลาสติก มีผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคไมโครพลาสติกในรูปแบบของการแขวนลอยในวัฏภาคต่าง ๆ ปัจจัยด้านพลวัตของน้ำมีผลต่ออัตราการจมตัวของไมโครพลาสติกในน้ำลงสู่ชั้นน้ำและตะกอนท้องน้ำ ซึ่งพฤติกรรมนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นของพลาสติกแต่ละชนิด ไมโครพลาสติกสามารถลอยได้เป็นระยะทางไกลผ่านชั้นน้ำในความลึกต่าง ๆ และไปสิ้นสุดที่ชั้นตะกอน ผลกระทบของไมโครพลาสติกในสิ่งแวดล้อมจำแนกออกได้ใน 4 ด้านหลัก ๆ ได้แก่ การปนเปื้อนในบรรยากาศ ผลกระทบต่อระบบนิเวศ การปนเปื้อนในพื้นดินและแหล่งน้ำ และ ไมโครพลาสติกเป็นตัวพาสารเคมี

ผลกระทบของสภาวะบรรยากาศต่อไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติก (Impacts of atmospheric conditions on microplastics and nanoplastics)

ไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติกเข้าสู่ชั้นบรรยากาศผ่านกระบวนการทางกลหลายรูปแบบ เช่น ในรูปแบบอนุภาคขนาดเล็กและละอองลอยผ่านคลื่นลม ละอองคลื่นและแม้แต่คลื่นทะเล [21] นอกจากนี้ ยังสามารถเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนผ่านฟองแก๊สได้อีกด้วย แหล่งกำเนิดของพลาสติกภายนอกเหล่านี้เกิดจากส่วนประกอบที่มีอยู่ในยางรถยนต์ ผ้าเบรกและยางที่หลุดออกมาเมื่อมีการเสียดสีกับพื้นผิวถนน หลังจากส่วนประกอบพลาสติกเสื่อมสภาพแล้ว ทำให้เกิดไมโครพลาสติกหรือนาโนพลาสติกในบรรยากาศแล้วแต่แหล่งกำเนิดของพลาสติก สำหรับอุตสาหกรรมหนัก กระบวนการผลิตที่ก่อให้เกิดแก๊ส คาร์บอน และเขม่าออกมาประกอบด้วยไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติก ยังได้มาจากฝุ่นที่เกิดจากพื้นที่เกษตรกรรมระหว่างการไถพรวนกับการเผา [22]

ผลของไมโครพลาสติกต่อความแปรปรวนจากสภาพภูมิอากาศของโลก ได้มีรายงานว่า ไมโครพลาสติกที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 5 มิลลิเมตร สามารถทำลายสิ่งแวดล้อมบนบกและในน้ำ อนุภาคเหล่านี้มีอิทธิพลต่อการก่อตัวของเมฆและการเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศ กลไกการเกิดปรากฏการณ์เหล่านี้ยังไม่ทราบชัดเจน [23] นักวิจัยได้วิเคราะห์ไมโครพลาสติกในแง่ของความชื้นหรือน้ำในก้อนเมฆ โดยพบการกักเก็บน้ำในก้อนเมฆที่ยอดของภูเขาในระดับความสูงในช่วง 1300-3770 เมตร ของประเทศญี่ปุ่น ได้แก่ ภูเขาไฟฟูจิ ภูเขาโอยามา และภูเขาโตโรโบ โดยจำแนกชนิดของหมู่ฟังก์ชันที่พบด้วยภาพถ่าย attenuated total reflection (ATR) โดยพิสูจน์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีชนิดไมโครฟูเรียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (micro-Fourier infrared ATR spectroscopy) ซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพซึ่งใช้ตรวจสอบโมเลกุลของวัสดุโดยผสมผสานหลักการของสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดกับวิธีการสุ่มตัวอย่าง ATR เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับพันธะเคมี รวมถึงกลุ่มฟังก์ชันที่มีอยู่ในตัวอย่าง ผลการวิเคราะห์ นักวิจัยได้พบพอลิเมอร์ 9 ชนิด ได้แก่

พอลิเอทิลีน, พอลิโพรพิลีน, พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต, พอลิเมทิลเมทาคริเลต, พอลิยูรีเทน, พอลิเอไมด์ 6, พอลิคาร์บอนเนต, เรซินอีพอกซี และพอลิเมอร์ร่วมระหว่างพอลิเอทิลีนกับพอลิโพรพิลีน ได้พบหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ จำนวนมาก เช่น หมู่คาร์บอนิล (carbonyl, $-C=O$), หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl, $-OH$) รวมอยู่เป็นจำนวนมาก ไมโครพลาสติกได้แตกตัวออกในช่วงความเข้มข้น 6.7-13.9 ขึ้นต่อลิตร ช่วงเส้นผ่าศูนย์กลางของ Feret ประมาณ 7.1 - 94.6 ไมโครเมตร สรุปได้ว่า ไมโครพลาสติกได้ลอยไปในอากาศได้สูงตามยอดเขาและอยู่ในสภาพที่อากาศหนาวมาก พบว่า ไมโครพลาสติกมีหมู่ที่ชอบน้ำเหลืออยู่จำนวนมากกระจายตัวอยู่ในระดับสูง เทียมยอดภูเขา ภายใต้สภาพที่มีละอองน้ำจำนวนมาก ไมโครพลาสติกจึงทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสในการควบแน่นของน้ำไปเป็นก้อนน้ำแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำของไมโครพลาสติกนั้น ปรากฏการณ์นี้น่าจะมีผลต่อการเกิดเป็นก้อนเมฆและคาดว่าส่งผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศในชั้นบรรยากาศของบริเวณนั้น

ผลกระทบทางนิเวศวิทยาจากมลพิษของไมโครพลาสติก (Ecological effects of microplastic pollution)

ไมโครพลาสติกสามารถปนเปื้อนในระบบนิเวศทางน้ำได้หลากหลายระดับความลึกและหลายระบบทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ด้วยความสามารถในการดูดซับที่แข็งแกร่งของพื้นผิวไมโครพลาสติก จึงมีบทบาทสำคัญมากในการเคลื่อนย้ายถิ่นของไมโครพลาสติกไปทั่วสิ่งแวดล้อม ผลการเสริมฤทธิ์กันระหว่างไมโครพลาสติกกับมลพิษอินทรีย์ที่อยู่คงกระพันจะเพิ่มความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้น ได้นานและทวีความรุนแรงมากขึ้น ได้แก่ น้ำผิวดิน มหาสมุทร บริเวณปากแม่น้ำ ทำให้เกิดการทำลายระบบนิเวศได้หลายระดับและมีความรุนแรงต่างกัน นอกจากนี้ ไมโครพลาสติกยังสามารถเข้าสู่ร่างกายของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในทะเลและชายฝั่ง สัตว์ที่หากินบนพื้นดิน เมื่อสิ่งมีชีวิตเหล่านี้สัมผัสกับไมโครพลาสติกทั้งทางตรงและทางอ้อม นำไปสู่การบาดเจ็บทางร่างกายของสิ่งมีชีวิตจากผลกระทบโดยตรงจากความเป็นพิษของไมโครพลาสติก รวมทั้งมีผลกระทบต่อห่วงโซ่อาหารและความหลากหลายทางชีวภาพ ห่วงโซ่อาหารได้รับผลกระทบโดยตรงจากพิษของสารเคมีที่มากับไมโครพลาสติกมาจากท้องทะเลมากที่สุด โดยเฉพาะวิธีการปลดปล่อยสารอินทรีย์ที่มีความไม่ชอบน้ำ มีความเป็นไปได้มากที่เกิดขึ้นใน 2 เส้นทาง คือ เส้นทางแรกจากการหลุดรอดของสารเคมีตัวเติมในพลาสติกระหว่างกระบวนการผลิต ส่วนเส้นทางที่สองน่าจะมาจากการถ่ายโอนสารปนเปื้อนทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เข้าสู่สิ่งมีชีวิตจากการกลืนอาหารที่ปนเปื้อนไมโครพลาสติกของสัตว์น้ำหรือสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในบริเวณที่มีสารพิษ [24-28] นอกจากนี้ ยังพบว่า ไมโครพลาสติกส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่หน้าดินและสัตว์น้ำในรูปแบบต่าง ๆ กัน [29] จากรูปแบบการได้รับอาหาร การเติบโต และระบบสืบพันธุ์ของสัตว์น้ำหลายชนิด ดังนั้น มนุษย์จึงมีโอกาสมากที่ได้สัมผัสหรือรับสารมลพิษผ่านการบริโภคอาหารทะเล เช่น ปลาและสัตว์มีกระดูกสันหลังจำพวกกุ้ง กุ้ง หอย ปู แม้กระทั่งบนยอดเขาเอเวอเรสต์ที่มีความสูงสุดของโลก ยังมีรายงานการพบชิ้นส่วนไมโครพลาสติกรูปแบบเส้นใยขนาดระดับไมโครเมตรกระจายตัวทั่วไปบนหิมะที่ปกคลุมยอดเขา สันนิษฐานได้ว่า เส้นใยเหล่านี้มาจากเสื้อผ้าและอุปกรณ์ที่ผลิตด้วยเส้นใยพอลิเมอร์ที่นักท่องเที่ยวใช้ระหว่างเดินขึ้นสู่ยอดเขา [30] นอกจากนี้ ภายใต้

มหาสมุทรลึก [31] ยังพบไมโครพลาสติกปริมาณร้อยละ 80 มาจากพื้นดิน และร้อยละ 20 พบในน้ำ การบาดเจ็บและการล้มตายของนกน้ำ ปลา สัตว์เลี้ยงลูกด้วยน้ำนมและสัตว์เลื้อยคลานหลายชนิด เกิดจากสาเหตุการสะสมของไมโครพลาสติกในทางเดินอาหาร ถือว่าเป็นผลกระทบที่น่าห่วงใยมากจากพิษของไมโครพลาสติกที่มีต่อสิ่งแวดล้อม จึงมีการกินอาหารประเภทสัตว์น้ำที่มีไมโครพลาสติกปนเปื้อนอยู่อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้เนื่องจากไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติกแพร่หลายในสิ่งแวดล้อมมากขึ้นตลอดเวลา ดังนั้น ความเสี่ยงจากการสะสมไมโครพลาสติกในระบบนิเวศจึงเพิ่มขึ้น ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา นักวิทยาศาสตร์ได้ตระหนักเบื้องต้นเกี่ยวกับด้านสิ่งแวดล้อมของไมโครพลาสติกทั้งบนดิน ในน้ำและในอากาศ ในด้านสาธารณสุข ผลของไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติกที่กระจายตัวทั่วไปในแหล่งอาหารในน้ำ บนบก และการหายใจเอาอนุพลาสติกเข้าสู่ร่างกาย ย่อมก่อให้เกิดปัญหาหนักด้านสุขภาพอย่างแน่นอน Figure 3 แสดงวัฏจักรของพลาสติกและวิธีที่ไมโครพลาสติกมาจากแหล่งต่าง ๆ และมีการหมุนเวียนไปในมิติต่าง ๆ ของสภาพแวดล้อม

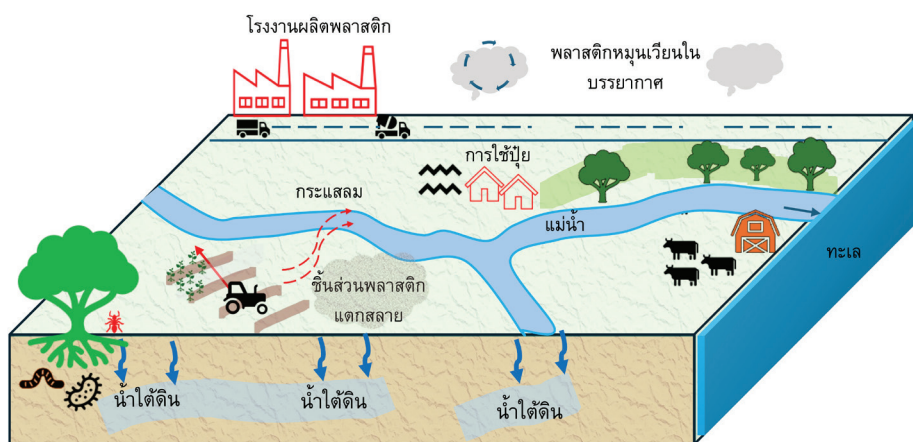


Figure 3 Microplastic origins from their transport pathways and distributions across air, water, soil, and ecosystems (modified from [32]).

ผลของไมโครพลาสติกต่อสิ่งแวดล้อมบนบกและในน้ำ (Effects of microplastics in the terrestrial and aquatic environments)

ผลของไมโครพลาสติกในสิ่งแวดล้อมทางบก (Effects of microplastics on the terrestrial environments)

ไมโครพลาสติกที่ปนเปื้อนและสะสมในพื้นดินและแหล่งน้ำได้สร้างผลกระทบต่อคุณภาพของแหล่งน้ำและความอุดมสมบูรณ์ของพื้นดิน ไมโครพลาสติกหมุนเวียนเข้าสู่สิ่งแวดล้อมบนพื้นดินผ่านการสะสมในชั้นบรรยากาศ การใช้พลาสติกจำนวนมากจากแหล่งที่มาบนบก การใช้ปุ๋ย สนามหญ้าเทียม ถนน หลุมฝังกลบ สิ่งทอ กิจกรรมการท่องเที่ยว การขนส่งทางอากาศ เรือเดินสมุทร และกิจกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ [33] นอกจากนี้ การย่อยสลายจากปัจจัยภายนอก เช่น กระบวนการทางเคมี-กายภาพ อิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเลตและแบคทีเรีย ทำให้พลาสติกเหล่านี้ที่ผ่านการใช้งานและมักเสื่อมสภาพโดยการแตกสลาย

เข้าสู่สิ่งแวดล้อมในรูปแบบของชิ้นส่วนพลาสติกขนาดเล็กระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตร [34] ทั้งนี้ อัตราการแตกตัวของพลาสติกขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม ดังนั้น จึงทำให้ระบบนิเวศบนบกเป็นหนึ่งในสิ่งแวดล้อมที่พบไมโครพลาสติกจำนวนมากอยู่อย่างแพร่กระจาย เนื่องจากดินเป็นแหล่งรองรับของเสียมากที่สุด จากกิจกรรมของมนุษย์ในรูปแบบต่าง ๆ ตะกอนน้ำเสีย การทิ้งขยะ ฯลฯ หากการจัดการของเสียที่มีองค์ประกอบพลาสติกรวมทั้งขยะมูลฝอยที่ไม่เหมาะสม สามารถทำให้คุณภาพของดินเสื่อมโทรมลงอย่างมาก [35] และจะส่งผลกระทบต่อมนุษย์โดยผ่านการได้รับสัมผัส การดูดซึมของไมโครพลาสติกหรือนาโนพลาสติกเข้าสู่ร่างกาย

ไมโครพลาสติกเข้าสู่สภาพแวดล้อมของดินได้หลายวิธีและหลากหลายรูปแบบโดยเฉพาะการปนเปื้อนในดินจากการทำเกษตรกรรม การแตกสลายของฟิล์มพลาสติกคลุมดิน [35-37] จากการสะสมของไมโครพลาสติกในชั้นบรรยากาศสู่ดินในที่สุด [38] การเคลื่อนที่ในแนวตั้งและแนวนอนของไมโครพลาสติกภายในดินถูกควบคุมโดยปัจจัยต่าง ๆ เช่น การชลประทาน น้ำชะ น้ำหลาก รวมถึงสิ่งมีชีวิตในดินและลักษณะของดิน เมื่อไมโครพลาสติกรวมเข้ากับมวลรวมของดิน ชิ้นส่วนพลาสติกขนาดเล็กเหล่านี้อาจเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดิน [38] การกระจายตัวของไมโครพลาสติกในเนื้อดินมีผลต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ค่าความเป็นกรด-เบส เนื่องจากสภาพแสงและออกซิเจนในดินมีปริมาณน้อย อาจทำให้ไมโครพลาสติกอยู่รอดได้นานหลายทศวรรษ นอกจากนี้ ยังพบว่า การปนเปื้อนของไมโครพลาสติกมีผลต่อกิจกรรมการดำรงชีพของจุลินทรีย์ในดิน โดยสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ทำให้ความหลากหลายและโครงสร้างของชุมชนจุลินทรีย์ในดินเปลี่ยนแปลงไป ด้วยผลการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมทางชีวภาพและกายภาพ ไมโครพลาสติกสามารถส่งผลกระทบต่อด้านคุณภาพของสิ่งมีชีวิตในดินและการทำงานของระบบนิเวศของดิน นอกจากนี้ ไมโครพลาสติกที่มีขนาดเล็กมากอาจถูกพืชกินโดยการดูดซึมหากินและนำพาให้เคลื่อนที่ไปตามห่วงโซ่อาหารได้ หากดินในแหล่งนั้นมีไมโครพลาสติกสะสมอยู่ในปริมาณมากงานวิจัยได้พบว่า ผลกระทบของไมโครพลาสติกชนิดพอลิแลคติกแอซิด [poly(lactic acid), PLA] ที่เป็นพลาสติกชนิดย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high-density polyethylene, HDPE) และเส้นใยเสื้อผ้าทั้งหมดมีผลต่อการงอกของเมล็ดพืชที่สัมผัสกับเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดพร้อมกับขนาดและความสูงของรากลดลง พืชมีการเจริญเติบโตลดลง เช่นเดียวกับการตายของไส้เดือนดินกลุ่ม *Lumbricus terrestris* ที่ได้สัมผัสกับไมโครพลาสติกพอลิเอทิลีนที่มีขนาดเล็กกว่า 150 ไมโครเมตรในความเข้มข้นที่แตกต่างกัน [39-40] ไมโครพลาสติกส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นรวม ความสามารถในการกักเก็บน้ำ ความสัมพันธ์เชิงหน้าที่ระหว่างกิจกรรมของจุลินทรีย์กับมวลรวมมีผลต่อความเสถียรของน้ำ [35] ไมโครพลาสติกส่งผลกระทบต่อคุณภาพของดินและมีผลโดยตรงต่อต้นหอม การเปลี่ยนแปลงมวลชีวภาพของพืช องค์ประกอบของเนื้อเยื่อ ลักษณะของราก และกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินที่มีผลต่อพืชหลายชนิด [35] นอกจากนี้ ไส้เดือนดินยังสามารถกลืนกินไมโครพลาสติกเข้าไปได้ง่ายและสะสมผ่านทางลำไส้ และทำให้เกิดผลกระทบระยะยาวต่อระบบนิเวศไม่เพียงแต่ต่อสายพันธุ์ของไส้เดือนดินโดยตรง แต่ยังรวมถึงผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นในดินด้วย เพราะไส้เดือนดินนั้นมีบทบาทสำคัญมากต่อห่วงโซ่อาหารในระบบนิเวศ [39-41] โดยทำหน้าที่ช่วยการย่อยสลายอินทรีย์สารในดิน รวมทั้งการเคลื่อนที่ของไส้เดือนดินถือได้ว่า เป็นการช่วย

พรวนดินชั้นดี ทำให้มีช่องว่างในดินที่จะเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้แก่ดินซึ่งมีความสำคัญมากต่อการปลูกพืช ผลกระทบของไมโครพลาสติกต่อระบบนิเวศภาคพื้นดินได้แสดงไว้ใน Figure 4

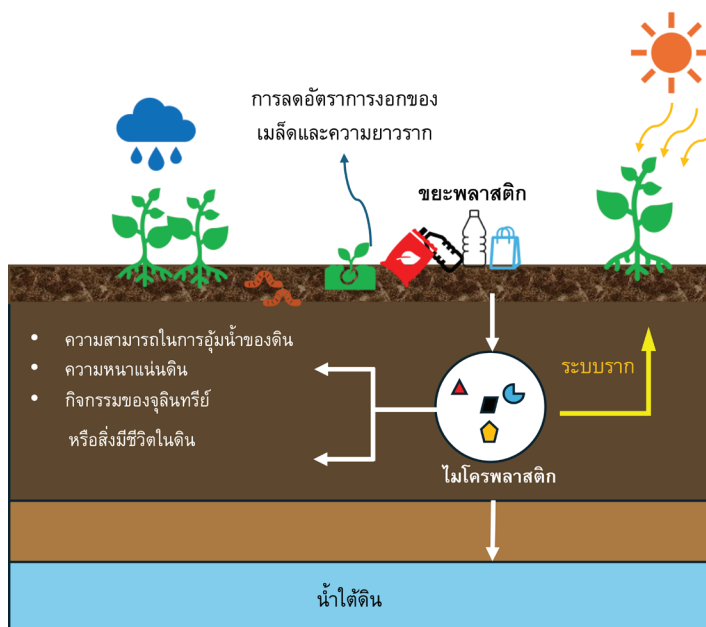


Figure 4 Illustration of microplastic pollution in terrestrial ecosystems

ผลของไมโครพลาสติกในสิ่งแวดล้อมทางน้ำ (Effects of microplastics on the aquatic environment)

ไมโครพลาสติกได้แพร่กระจายในสภาพแวดล้อมทางทะเล เนื่องจากกระบวนการอุทกพลศาสตร์ กระแสลมและกระแสน้ำในมหาสมุทร พลวัตเหล่านี้ได้มีส่วนทำให้เกิดข้อกังวลทางวิทยาศาสตร์เพิ่มแบบทวีคูณกล่าวคือ ในทศวรรษที่ผ่านมา ประเมินการว่า มีปริมาณเศษพลาสติกในท้องทะเลประมาณร้อยละ 70 พบการสะสมอยู่ในตะกอนร้อยละ 15 ลอยอยู่ในพื้นที่ชายฝั่งและส่วนที่เหลือนลอยอยู่บนผิวน้ำทะเล ด้วยไมโครพลาสติกมีขนาดเล็ก จึงอาจถูกสิ่งมีชีวิตทางทะเลกลืนกินเข้าไปโดยธรรมชาติที่คิดว่าเป็นอาหารที่เคยกินเป็นประจำ เช่น ปลา หอยแมลงภู่ แพลงก์ตอน นกทะเล สัตว์ และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ [42] จากการศึกษาพบว่าไมโครพลาสติกและชิ้นส่วนเล็กระดับนาโนเมตรของพลาสติกนั้น ถูกกินเข้าไปอย่างง่ายดายโดยสัตว์น้ำบางชนิด มีแนวโน้มที่จะทำให้สัตว์น้ำเหล่านี้ได้รับพิษต่อระบบทางเดินอาหาร ตับ ระบบประสาทและระบบสืบพันธุ์ [43] เมื่อสัมผัสกับอนุภาคพอลิเอไมด์ พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิไวนิลคลอไรด์ และพอลิสไตรีนที่มีขนาดอนุภาคในระดับ 70 ไมโครเมตร สัตว์น้ำสายพันธุ์ต่าง ๆ เช่น ปลาม้าลาย (zebrafish) ที่โตเต็มวัยที่ได้สัมผัส ไมโครพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและพอลิสไตรีนปริมาณมาก เป็นเวลานาน 20 วัน [44] อาจตายได้ นอกจากนี้ ยังพบว่าไมโครพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน ขนาด 0.5 ไมโครเมตร ทำให้เกิดการอักเสบในลำไส้ของปลาม้าลายที่โตเต็มวัย และยังกระตุ้นให้เกิดความเครียดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในปลาม้าลาย ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงในเส้นทางการเผาผลาญไขมันและพลังงานหยุดชะงัก [45] นอกจากนี้

ในหอยแมลงภู่น้ำเงิน (*Mytilus edulis* L.) พบมีการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อเยื่อมีการอักเสบที่รุนแรงต่อการกินไมโครพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน [24] สำหรับระบบนิเวศอื่น ๆ เช่น มหาสมุทรลึก บริเวณขั้วโลกและแผ่นน้ำแข็งในที่แสนห่างไกล ชิ้นส่วนพลาสติกขนาดเล็กเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารผ่านการกินเป็นทอด ๆ ตามลำดับของสิ่งมีชีวิต ส่งผลกระทบต่อการใช้ชีวิต การย่อยสลายและการขับถ่าย และการถ่ายทอดในกระบวนการสืบพันธุ์ [46] อย่างไรก็ตาม ยังจำเป็นต้องมีงานวิจัยมากกว่าที่มีเพื่อหาหลักฐานหลายด้านที่ต้องพิจารณาอีกกว่านี้

ไมโครพลาสติกในฐานะพาหะของสารปนเปื้อนทางเคมี (Microplastics as vectors of other chemical contaminants)

การเคลื่อนย้ายไมโครพลาสติกจากพื้นที่การเกษตรสู่สิ่งแวดล้อมโดยรอบ เกิดจากอันตรกิริยาและกระบวนการที่แตกต่างกันระหว่างไมโครพลาสติกและสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะไมโครพลาสติกที่แตกหักสามารถเคลื่อนย้ายสู่ดินได้ในหลายวิธี ได้แก่ ทางตรงและทางอ้อมจากแหล่งกำเนิด การเคลื่อนย้ายด้วยตัวแปรทางชีวภาพและตัวแปรที่ไม่ใช่ชีวภาพของไมโครพลาสติกประเภทต่าง ๆ ไปสู่ดิน ยังนำพาสารเคมีและเชื้อโรคไปกับชิ้นส่วนพลาสติกขนาดเล็กได้ด้วย ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าการเคลื่อนย้ายไมโครพลาสติกเกิดเป็นระบบนิเวศพลาสติกในดิน (soil plastisphere) จากแหล่งกำเนิดทางการเกษตรไปสู่สิ่งแวดล้อมโดยรอบ [47] ระบบนิเวศนี้แสดงถึงลักษณะเฉพาะของปฏิสัมพันธ์ระหว่างผิวหน้าพลาสติก ซึ่งทำหน้าที่เป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ (niche) ภายใต้เงื่อนไขที่เจาะจง เช่น อุณหภูมิ ธาตุอาหาร ค่าความเป็นกรด-เบสและความหลากหลายของชุมชนจุลินทรีย์ จนนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของชิ้นส่วนพลาสติกขนาดเล็ก ชุมชนของจุลินทรีย์ดินและระบบนิเวศดิน

การดูดซับสารเคมีที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมโดยไมโครพลาสติกจากลักษณะที่ผิวหน้าและขนาดพื้นที่ผิวทำให้สารเคมีเหล่านี้มีโอกาสจะถูกปล่อยเข้าสู่สิ่งมีชีวิตเมื่อได้รับสัมผัสโดยตรงกับไมโครพลาสติกในสิ่งแวดล้อมนั้น เช่น สิ่งมีชีวิตในทะเลกินพลาสติกทั้งชิ้นส่วนขนาดใหญ่และขนาดเล็กโดยตรงจากน้ำทะเลส่งผลต่อการได้รับสารอาหารของสัตว์ทะเลโดยตรง เนื่องจากชิ้นพลาสติกผ่านระบบทางเดินอาหารเข้าไปแทนที่อาหารและไม่สามารถย่อยสลายได้ และได้รับไมโครพลาสติกเข้าไปในร่างกาย เมื่อมนุษย์นำสัตว์ทะเล เช่น ปลา กุ้ง หอย มาบริโภคเป็นอาหาร ไมโครพลาสติกและสารปนเปื้อนจึงมีวิถีเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์โดยตรงผ่านอาหารและน้ำดื่ม ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพได้ มีการตรวจพบไมโครพลาสติกในสิ่งมีชีวิตหลายชนิดตั้งแต่สัตว์ขนาดใหญ่เลี้ยงลูกด้วยนมไปจนถึงสัตว์หน้าดินขนาดเล็ก โดยพลาสติกพอลิสไตรีน (polystyrene, PS) ขนาดช่วง 5 ไมโครเมตรถึงขนาดเล็กระดับ 70 นาโนเมตร พบว่าสะสมในไขมันของตับของปลาม้าลาย [45] ซึ่งการดูดซับสารพิษนี้ขึ้นกับขนาดและพื้นที่ผิวของไมโครพลาสติก นอกจากนี้ ไมโครพลาสติกยังเป็นตัวพาสารเคมีกลุ่มยาฆ่าแมลง เช่น ไดคลอโรไดฟีนิลไทรคลอโรอีเทน (dichloro diphenyltrichloroethane) และเฮกซะคลอโรเบนซีน (hexachlorobenzene) สารเคมีอันตรายเหล่านี้ สุดท้ายจะสิ้นสุดโดยการสะสมในร่างกายของสิ่งมีชีวิตที่ได้รับสารนี้เข้าไป ดัง Figure 5 ปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมของสารฆ่าแมลง ได้แก่ ผู้ผลิตชั้นปฐมภูมิและผู้บริโภคชั้นสูงในสิ่งมีชีวิตที่อาศัยทะเลเป็นแหล่งที่อยู่ [42] จากการศึกษาเชิงเปรียบเทียบระหว่างขนาดของชิ้นส่วนพลาสติกขนาดเล็ก พบว่า นาโนพลาสติกสามารถถูกดูดกลืนโดยสิ่งมีชีวิตในท้องทะเล

ได้ง่ายกว่าไมโครพลาสติก โดยมีแนวโน้มเกิดพิษต่อระบบย่อยอาหาร ตับ ระบบประสาทและระบบสืบพันธุ์ [43] กลไกที่สำคัญในการถ่ายโอนมวล (mass transfer) ของสารพิษในสิ่งแวดล้อมจากน้ำหรืออากาศไปยังวัสดุของแข็ง (พลาสติก) คือ การดูดซับและการดูดซึม สารเคมีจะถูกตรึงไว้ภายในของวัสดุของแข็ง อนุภาคพลาสติกหรือเกาะติดที่ผิวนอกในรูปแบบการดูดซับซึ่งมีอันตรกิริยาที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อันตรกิริยาไฟฟ้าสถิต อันตรกิริยาดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic interaction) อันตรกิริยาแวนเดอร์วาลส์และพันธะไฮโดรเจน ดัง Figure 6 สารพิษในสิ่งแวดล้อมที่สามารถจับบนไมโครพลาสติก/นาโนพลาสติกที่พบมาก จำแนกเป็นโลหะหนักและโลหะที่มีน้ำหนักอะตอมสูง เช่น ตะกั่วปรอท แคดเมียม ทองแดง โคโรเนียม และสารอินทรีย์ เช่น พอลิไซคลิกแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอนหลายวงแหวน (PAHs) พอลิคลอรีเนตเทตไบฟีนิล (PCBs) ยาฆ่าแมลง สารตกค้างคงทน (xenobiotic chemicals)

ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับสาร ขึ้นกับสมบัติทางกายภาพ-เคมีของไมโครพลาสติก โดยชนิดของไมโครพลาสติกที่พบมากในสิ่งแวดล้อมเป็นกลุ่มพอลิเมอร์สังเคราะห์ ได้แก่ พอลิสไตรีน พอลิโพรพิลีน พอลิเอทิลีน พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และกลุ่มพอลิเมอร์ชีวภาพ เช่น พอลิแลกติกแอซิด (PLA) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต [poly(butylene succinate), PBS] นอกจากนี้ การจับยังขึ้นกับตัวถูกดูดซับและสิ่งแวดล้อม ตัวกลางทั้งไมโครพลาสติกและสารเคมีปนเปื้อนในไมโครพลาสติก

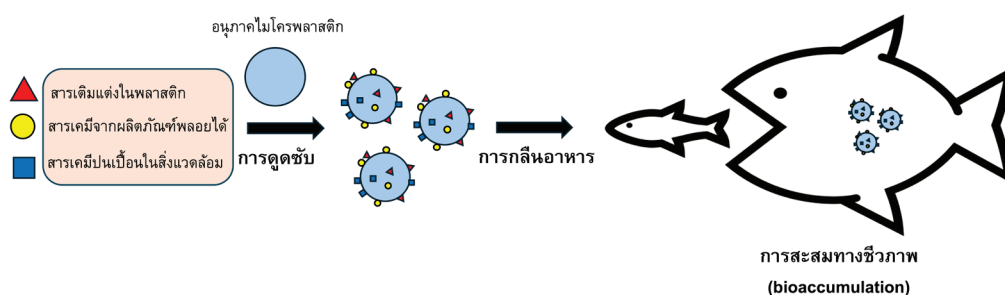


Figure 5 Microplastics as vectors for emerging chemicals in aquatic environment

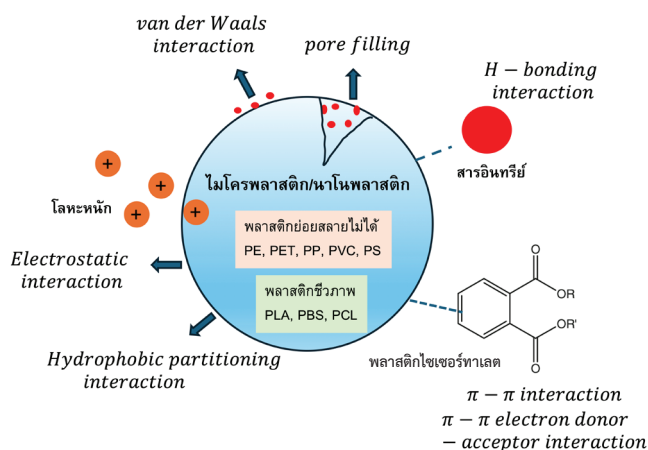


Figure 6 Microplastics/nanoplastics as vectors of other chemical contaminants

ผลกระทบต่อสุขภาพที่เป็นไปได้จากการได้รับไมโครพลาสติก (Potential health effects of microplastics exposure)

มนุษย์ได้รับสัมผัสไมโครพลาสติกเข้าสู่ร่างกายได้โดยผ่านทางเดินอาหาร การหายใจและการสัมผัสผ่านผิวหนัง ดังแสดงใน Figure 7 โดยมีวิธีการเข้าสู่ร่างกายได้ ดังนี้

ไมโครพลาสติกในอาหาร (Microplastics in foods)

ไมโครพลาสติกเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้จากการบริโภค ซึ่งยืนยันจากหลักฐานการตรวจพบไมโครพลาสติกในอุจจาระของมนุษย์ [48] ไมโครพลาสติกส่วนใหญ่พบในอาหาร น้ำดื่ม และบรรจุภัณฑ์อาหารพลาสติก [49] โดยมีระดับการสัมผัสที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับอายุ เพศ ลักษณะอาหารที่บริโภคและรูปแบบการใช้ชีวิต นอกจากนี้ สัตว์ป่าสายพันธุ์ต่าง ๆ ยังได้รับไมโครพลาสติกผ่านห่วงโซ่อาหาร [50-51] ผลกระทบนี้ก่อให้เกิดภัยคุกคามสำคัญต่อความปลอดภัยของอาหาร เนื่องจากการมีอยู่ของไมโครพลาสติกในสิ่งแวดล้อมทางน้ำนั้น ตรวจพบได้ในอาหารทะเลหลายประเภท [52-55] การบริโภคเนื้อเยื่ออ่อนของหอยสองฝาเป็นแหล่งที่มาของการสัมผัสกับไมโครพลาสติกในมนุษย์ แม้ว่าได้พบระดับต่ำก็ตาม [56-57] ข้อมูลจากงานวิจัยมีรายงานปริมาณของไมโครพลาสติกในหอยสองฝาที่เลี้ยงในฟาร์มจากประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี 0.36 อนุภาคต่อกรัม ในฟาร์มจากประเทศสาธารณรัฐฝรั่งเศส ราชอาณาจักรเบลเยียม และราชอาณาจักรเนเธอร์แลนด์มี 0.2 อนุภาคต่อกรัม [56, 58] นอกจากนี้ ในเกลือสมุทรพบจำนวน 1-10 ชิ้นไมโครพลาสติกต่อกิโลกรัมของเกลือ [59] การพบไมโครพลาสติกในแพลงก์ตอนสัตว์ยังพบว่า ไมโครพลาสติกสามารถเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารได้อย่างง่ายดาย ชนิดของไมโครพลาสติกที่พบปนเปื้อนในอาหารและสิ่งแวดล้อม เช่น พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต พอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีน พอลิเอสเตอร์ เอลลิลยูรีเทน พอลิเอไมด์ สไตรีน อะครีเลต และพอลิเมทิลเมทาครีเลต [50, 60]

การหายใจเอาไมโครพลาสติกเข้าสู่ร่างกาย (Inhalation of microplastics)

พลาสติกที่เข้าสู่ทางเดินหายใจของมนุษย์ มาจากเส้นใยสังเคราะห์ วัสดุก่อสร้าง อนุภาคฝุ่นละอองที่เกิดจากการเสียดสีของยางรถยนต์ในท้องถนน กากตะกอนน้ำเสีย น้ำชะขยะและการเผาไหม้ขยะ [61-63] ไมโครพลาสติกที่พบในอาคารเป็นส่วนประกอบของอนุภาคฝุ่นละออง ซึ่งการเข้าสู่ทางเดินหายใจของมนุษย์อาจเป็นสาเหตุให้ส่งผลต่อสุขภาพได้ ขึ้นกับขนาดและการกระจายตัวของไมโครพลาสติกในอากาศ มีรายงานการตรวจพบไมโครพลาสติกในรูปแบบเส้นใยในช่วงระหว่าง 1.2-18.2 เส้นใยต่อลูกบาศก์เมตรในออฟฟิศและปริมาณระหว่าง 4.0-59.4 เส้นใยต่อลูกบาศก์เมตร [64] แม้ว่าอนุภาคไมโครพลาสติกสามารถถูกกรองและกำจัดออกโดยขนจมูก เมื่อกลืนของเหลวในโพรงจมูก กลไกการกำจัดสิ่งแปลกปลอมด้วยการไอหรือจาม อย่างไรก็ตามอนุภาคที่มีขนาดเล็กยังสามารถหลุดรอดเข้าไปยังส่วนลึกในปอด โดยเฉพาะอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร มีโอกาสเข้าไปได้ในถุงลมปอดและมีผลต่อการแลกเปลี่ยนแก๊ส [65] มีรายงานการศึกษาความเป็นพิษของไมโครพลาสติก เช่น ขนาด รูปร่าง ประจุบนพื้นผิว การแตกสลายและการขับ พบว่าอนุภาคขนาดใหญ่เข้าไปสู่เซลล์ได้น้อย จึงไม่ค่อยส่งผลกระทบต่อภาวะความเครียดออกซิเดชัน (oxidative stress) ซึ่งเป็น

ภาวะและกระบวนการที่กระตุ้นให้ดีเอ็นเอ (DNA) โปรตีน และเยื่อหุ้มเซลล์ในร่างกายอักเสบและเสียหาย เมื่อเกิดการอักเสบเรื้อรัง เซลล์ก็จะเริ่มเสื่อมและไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มที่ [66] มีความเสี่ยงต่อการเกิดโรคพังผืดในปอด (pulmonary fibrosis) ซึ่งเนื้อเยื่อปอดที่อยู่ระหว่างถุงลมปอดเกิดเป็นแผล จนเนื้อเยื่อดังกล่าวหนาและแข็งตัว ทำให้ปอดทำงานได้ไม่เต็มที่ และการทดสอบในหนูทดลองพบว่าไมโครพลาสติกกระตุ้นให้เกิดอาการหอบหืดได้ [67]

การสัมผัสของผิวหนังจากไมโครพลาสติก (Dermal exposure to microplastics)

การได้รับสัมผัสไมโครพลาสติกผ่านชั้นผิวหนัง ถือว่ามีโอกาสน้อยเมื่อเทียบกับการได้รับผ่านทางเดินอาหารและการหายใจ มีรายงานว่าพลาสติกขนาดเล็กในระดับนาโนพลาสติกที่เกิดจากแหล่งทุติยภูมิ จากการหลุดร่วงของเส้นใยสังเคราะห์ เม็ดพลาสติกขนาดเล็กจิ๋วที่เติมในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง เป็นแหล่งที่มีโอกาสเข้าสู่มนุษย์ได้ เมื่อกลืนหรือหายใจเอาพลาสติกขนาดเล็กเหล่านี้เข้าไปในร่างกาย พลาสติกขนาดเล็กที่มีขนาดเหมาะสมในชีวปริมาณออกฤทธิ์ หรือสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ (bioavailability) ที่ร่างกายจะดูดซึมขึ้นกับสมบัติทางเคมี-กายภาพของพลาสติก เช่น ชนิดของพอลิเมอร์ มวล ขนาดและจำนวนที่ปนเปื้อนในน้ำอาหารและอากาศ อาจก่อให้เกิดผลกระทบในระดับเซลล์ถ้ามีปริมาณมากเกินระดับ ซึ่งยังมีปัจจัยอื่นที่ต้องพิจารณาเพิ่มเติม เช่น ขนาดของอนุภาคพลาสติก สมบัติที่พื้นผิว องค์ประกอบโมเลกุลในสิ่งมีชีวิตที่ได้รับสัมผัส ตัวอย่างเช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ฟอสโฟไลปิด เมื่ออนุภาคขนาดนาโนเมตรของพลาสติกสัมผัสกับของเหลวในร่างกาย เนื้อเยื่อ หรืออวัยวะ เกิดการสัมผัสกับโมเลกุลของโปรตีน ทำให้เกิดรูปแบบที่เรียกว่าโคโรนาโปรตีน (protein corona) ซึ่งเป็นสภาพที่โครงสร้างของโปรตีนเกิดการเรียงชั้นบนผิวของนาโนพลาสติก ด้วยกลไกการดูดซับและสะสมบนผิวพลาสติกโดยโปรตีนหลายชนิด [68] ความเสี่ยงของการได้รับสัมผัสไมโครพลาสติกต่อมนุษย์ทั้งทางการหายใจ การกลืนและทางผิวหนัง ไมโครพลาสติกสามารถเข้าสู่ผิวหนังผ่านการใช้เครื่องสำอาง ยาชนิดทา ครีมกันแดด ผลิตภัณฑ์ระงับกลิ่นและผลิตภัณฑ์อื่น [69] ซึ่งทางผิวหนังมีความเสี่ยงน้อยกว่าสองวิธีแรก นักวิจัยได้ทดสอบผลกระทบทางพิษวิทยาโดยวิเคราะห์จากตัวอย่างชีวภาพ เนื้อเยื่อและสารคัดหลั่ง โดยทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้านพิษวิทยาในหนูทดลอง เพื่อศึกษาผลของไมโครพลาสติกต่อระบบสืบพันธุ์ ภูมิคุ้มกัน ระบบประสาทรวมทั้งในระดับเซลล์จากไลโซโซม ไมโทคอนเดรีย ร่างแหเอนโดพลาสมิก (endoplasmic reticulum) และนิวเคลียส พบว่าไมโครพลาสติกเป็นตัวพาและมีศักยภาพในการนำสารปนเปื้อนจากสารเติมแต่งพลาสติกไฮดรอกซี สารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม แอนติไบโอติกส์และจุลินทรีย์ได้ [70]

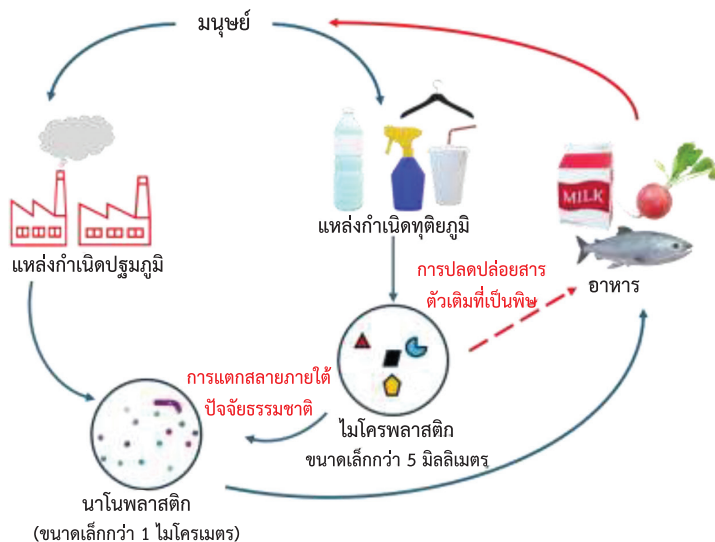


Figure 7 Origins and pathways of microplastics and nanoplastics from primary and secondary sources. Microplastics break down from products and are further broken down by natural factors. It undergoes biological or physical degradation in aquatic and soil environments, introducing microplastics into the food chain and their subsequent bioaccumulation on the tissues of aquatic organisms and plants. This accumulation can result in significant adverse effects on the aquatic and soil ecosystem, and these effects can be directly transmitted to human body

การบำบัดไมโครพลาสติกและกลยุทธ์การจัดการ (Microplastics treatment and management strategies)

การบำบัดไมโครพลาสติกที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ มีความสำคัญในการลดปริมาณการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในระบบสิ่งแวดล้อม ดังตัวอย่างดังนี้

การกำจัดไมโครพลาสติกในโรงงานบำบัดน้ำเสีย (Microplastics removal in wastewater treatment plants)

ไมโครพลาสติกที่เกิดจากแหล่งกำเนิดโดยกิจกรรมของมนุษย์ น้ำเสียจากชุมชน น้ำเสียจากอุตสาหกรรม และจากกระบวนการผลิตต่าง ๆ ที่ไม่ได้มาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ไมโครพลาสติกในน้ำเสียที่พบมีความหลากหลายทั้งชนิด ขนาด ปริมาณและรูปร่างลักษณะของพลาสติกที่พบ พลาสติกที่พบมากในลักษณะนี้ เช่น โพลีเอสเตอร์ ไนลอน ซึ่งเป็นเส้นใยสังเคราะห์ในสิ่งทอ พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนจากผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด บรรจุภัณฑ์อาหาร พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตจากขวดน้ำดื่ม ทั้งในรูปเส้นใยและชิ้นส่วนพลาสติกขนาดเล็ก แม้กระทั่งน้ำเสียที่รวบรวมจากน้ำชะจากบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่น มักมีไมโครพลาสติกจากยางรถยนต์และผ้าเบรกเข้าสู่ระบบบำบัด ดังนั้น การจัดการน้ำเสียชุมชนต้องมีระบบการบำบัดน้ำเสียที่มี

ประสิทธิภาพที่ช่วยลดปริมาณไมโครพลาสติกเข้าสู่สิ่งแวดล้อม ส่วนน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติต้องมีปริมาณไมโครพลาสติกน้อยลง ดัง Figure 8 แสดงไมโครพลาสติกสามารถตกตะกอนออกมาจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียก่อนในเบื้องต้น [71] ปริมาณไมโครพลาสติกต้องลดลงเมื่อผ่านการตกตะกอนในการบำบัดขั้นที่สอง รวมทั้งพบว่า ปริมาณความเข้มข้นของไมโครพลาสติกต่อปริมาตรน้ำทิ้งลดลงเมื่อน้ำเสียได้ผ่านการบำบัดขั้นสูงแล้ว [72]

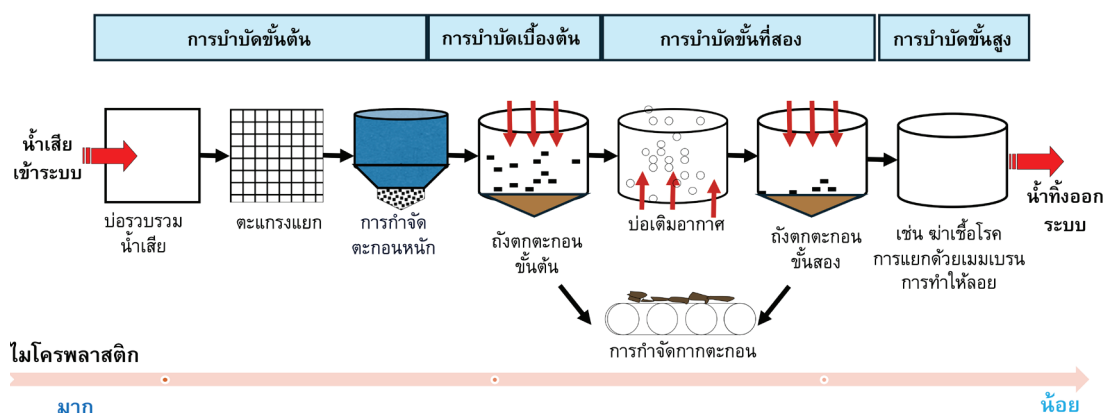


Figure 8 Flow diagram of microplastics reduction from wastewater treatment process

การฟื้นฟูทางชีวภาพเพื่อจัดการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในสิ่งแวดล้อมภาคพื้นดิน

(Bioremediation to overcome microplastics contamination in the terrestrial environment)

การฟื้นฟูทางชีวภาพ (bioremediation) คือ การใช้จุลินทรีย์ในการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมที่เกิดการปนเปื้อนของสิ่งเจือปนและสารเคมี เป็นการใช้กระบวนการทางเคมีที่จุลินทรีย์ทำให้เกิดขึ้น โดยเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้สับสเตรต (substrate) หรืออาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอย่างต่อเนื่องไปหลายขั้นตอน ได้พลังงานไปสร้างโมเลกุลใหม่และกำจัดของเสียต่าง ๆ จากเทคโนโลยีการบำบัดด้วยกระบวนการฟื้นฟูทางชีวภาพมี 2 รูปแบบ ได้แก่ *in situ* เป็นรูปแบบหนึ่งของการบำบัดสารมลพิษจากสิ่งแวดล้อมภายในบริเวณที่มีการปนเปื้อน และ *ex situ* เป็นอีกรูปแบบหนึ่งของการบำบัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมนอกบริเวณที่มีการปนเปื้อน การฟื้นฟูทางชีวภาพเป็นกระบวนการที่เป็นมิตร การบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพสามารถเกิดขึ้นได้เอง หรือสามารถกระตุ้นการย่อยสลายให้เพิ่มมากขึ้นโดยการกระตุ้นทางชีวภาพ การฟื้นฟูทางชีวภาพยังมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในการกำจัดไมโครพลาสติกจากน้ำ เช่น การใช้จุลินทรีย์ที่เหมาะสมในกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ หรือการกำจัดไมโครพลาสติกจากการปนเปื้อนในดิน สำหรับการเติมจุลินทรีย์เพื่อบำบัดสารมลพิษมีขั้นตอนทั้งหมด 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. การสร้างไบโอฟิล์มของจุลินทรีย์

2. กระบวนการที่ทำให้แตกสลายทางชีวภาพ หมายถึง กระบวนการที่สิ่งมีชีวิต เช่น เชื้อรา แบคทีเรีย หรือแมลง ทำให้อินทรีย์หรือสิ่งของต่าง ๆ เสื่อมสภาพหรือถูกทำลายลง

3. การแตกหักเป็นชิ้นส่วนขนาดเล็กทางชีวภาพและการนำไปใช้ในเซลล์ของแบคทีเรีย และ

4. การเปลี่ยนเป็นแร่ธาตุ ซึ่งเป็นกระบวนการที่องค์ประกอบธาตุในอินทรีย์สารที่ยังมีชีวิตอยู่หรือตายแล้ว เปลี่ยนไปเป็นสารอนินทรีย์ซึ่งสามารถนำไปใช้ในวัฏจักรของสิ่งมีชีวิต [73] ชิ้นส่วนพลาสติกขนาดเล็กมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยลง เมื่อปนเปื้อนในน้ำและในดิน สามารถเป็นแหล่งยึดเกาะให้แบคทีเรียก่อโคโลนีที่ผิวตามรอยแตกหักซึ่งจะนำไปสู่การย่อยสลายทางชีวภาพได้จากเอนไซม์ของแบคทีเรีย ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ลดขนาดลงเป็นโอลิโกเมอร์ (oligomer) ไดเมอร์ (dimer) และมอนอเมอร์ ในขั้นตอนสุดท้ายสารอินทรีย์จะแปรเป็นสารอนินทรีย์และแร่ธาตุ เช่น น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน) ทั้งนี้ ขึ้นกับเวลา ชนิด และสายพันธุ์จุลินทรีย์ ประเภทของพอลิเมอร์และมอนอเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ Figure 9 แสดงตัวอย่างกระบวนการที่ชิ้นส่วนไมโครพลาสติกพอลิโอเลฟินส์สามารถนำไปสู่การย่อยสลายทางชีวภาพได้ อย่างไรก็ตาม กระบวนการนี้ใช้เวลานานมาก เนื่องจากความคงทนของพันธะเคมีในสายโซ่ของพอลิเมอร์ซึ่งจุลินทรีย์ในธรรมชาติมีเอนไซม์ที่จำเพาะน้อยมาก เพื่อตัดสายโซ่ของพอลิเมอร์ที่เกิดจากพันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอมคาร์บอน-คาร์บอน รวมทั้งตัวแปรในสิ่งแวดล้อมทั้งมีและไม่มีชีวิตซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์

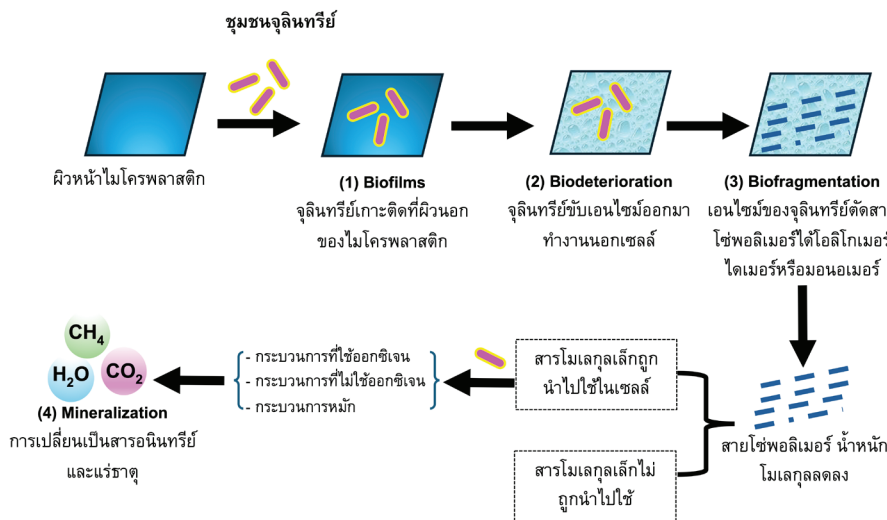


Figure 9 Schematic representation of the different steps involved in biodegradation of microplastics

การจัดการของเสียพลาสติกในโรงงานรีไซเคิล (Plastic waste management in recycling facilities)

ทางเลือกในการฟื้นฟูทรัพยากรจากการฝังกลบ เช่น การนำของเสียกลับมาใช้ใหม่เพื่อทดแทนวัตถุดิบตั้งต้นจากกระบวนการผลิตใหม่จากสารบริสุทธิ์ (virgin materials) การหมุนเวียนกลับคืนในรูปแบบพลังงาน (waste-to-energy) อย่างไรก็ตาม กระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ให้มีประสิทธิภาพก็มีอุปสรรคไม่น้อยทีเดียว ได้แก่ สารเจือปนในขยะพลาสติกทั้งในรูปที่ถาวร (permanent contaminant) เช่น สี สารเติมแต่งต่าง ๆ

และสารเจือปนที่ตกค้างในขยะพลาสติกในรูปที่ไม่ถาวร (non-permanent contaminant) เช่น เศษอาหาร กรวด ทินทรี สำหรับเศษขยะพลาสติกส่วนใหญ่ เช่น บรรจุภัณฑ์ พลาสติกจากอิเล็กทรอนิกส์ พลาสติกและพอลิเมอร์จากภาคการขนส่งและการก่อสร้าง จำเป็นต้องใช้แรงงานหรือเทคโนโลยีในการคัดแยกวัสดุอย่างเข้มข้นหลายด้าน เช่น สารเติมแต่งที่ใช้ที่มีหลากหลายด้านโครงสร้าง เพื่อให้ได้พลาสติกสำหรับนำกลับสู่กระบวนการรีไซเคิลที่มีคุณภาพสูง สามารถนำไปใช้ทดแทนสารตั้งต้นบริสุทธิ์ได้ ส่วนใหญ่เศษพลาสติก มักนำไปใช้ในการรีไซเคิลครั้งที่สอง ซึ่งพลาสติกที่ใช้แล้วจะถูกจัดลำดับการใช้งานในแง่ของวัสดุที่แตกต่างไปจากผลิตภัณฑ์เดิม และมักมีข้อกำหนดเฉพาะของวัสดุที่ต้องการความจำเพาะน้อยกว่า เช่น ขวดพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตนำไปรีไซเคิลเป็นสิ่งทอ เส้นใย ผ้าพอลิเอสเตอร์ฟลีซ (polyester fleece) ขยะพลาสติกเพื่อการรีไซเคิลสามารถขนส่งได้ในระยะทางไกล เช่น ส่งออกจากซีกโลกเหนือไปยังประเทศกำลังพัฒนา โดยเฉพาะไปยังประเทศในทวีปเอเชีย มีรายงานว่า ร้อยละ 46 โดยน้ำหนักของพลาสติกที่รวบรวมจากยุโรปเพื่อรีไซเคิล มักถูกส่งออกไปรีไซเคิลนอกภาคพื้นยุโรป มีน้ำหนักของขยะพลาสติกมากถึงร้อยละ 90 กระบวนการรีไซเคิลทั้งทางตรงหรือทางอ้อมมักไปสิ้นสุดที่สาธารณรัฐประชาชนจีน [74]

การนำกลับมาทำใหม่ทางเคมีนั้น เป็นอีกวิธีการหนึ่งในเปลี่ยนขยะพลาสติก โดยการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีและหมุนเวียนสารเคมีที่นำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ผ่านการรีไซเคิลทางเคมี (chemical recycling) เช่น การนำสารตั้งต้นมอนอเมอร์กลับคืนมาจากขยะพลาสติกเป็นกระบวนการย้อนกลับของการสังเคราะห์พลาสติกจากสารตั้งต้นมอนอเมอร์ เรียกว่า กระบวนการดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) ด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) หรือการใช้ความร้อนในการตัดสายโซ่พอลิเมอร์ รวมทั้งกระบวนการไพโรไลซิสซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดทางเคมีในการนำกลับสารไฮโดรคาร์บอนให้ได้เป็นสารเคมีตั้งต้นใหม่ใช้ประโยชน์ในด้านพลังงานเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นกระบวนการที่ยั่งยืน มีการสูญเสียทรัพยากรน้อยและลดการใช้เชื้อเพลิงใหม่จากแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิล รวมทั้งลดปัญหาปริมาณขยะนำเข้าสู่หลุมฝังกลบจำนวนมากทำให้หลุมฝังกลบเต็มเร็วแม้ว่าพลาสติกถูกผลิตขึ้นและใช้งานจำนวนมากในประเทศพัฒนาแล้ว ประเทศกำลังพัฒนาหลายประเทศก็เผชิญปัญหาการจัดการขยะพลาสติกที่ไม่มีประสิทธิภาพ เกิดจากการควบคุมปริมาณพลาสติกทั้งเชิงนโยบายและการใช้งานอย่างไม่ได้ผล รวมทั้งความพยายามเพื่อปกป้องสิ่งแวดล้อมไม่เพียงพอ จึงเกิดปัญหาขยะพลาสติกสะสมและปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมโดยรอบ หลายประเทศได้จัดการพลาสติกโดยใช้กระบวนการรีไซเคิลพลาสติกมาช่วยให้พลาสติกถูกนำกลับไปผลิตใหม่ได้ และลดปัญหาปริมาณขยะพลาสติก เช่น ในประเทศสาธารณรัฐแอฟริกาใต้ มีการนำเอาพลาสติกจำพวกเส้นใยพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมารีไซเคิลโดยผสมกับยางมะตอย เพื่อใช้เป็นวัสดุเทผิวถนน [75] แต่ก็มีข้อจำกัด คือ ถ้าควบคุมระบบการรีไซเคิลพลาสติกไม่ดีอาจก่อให้เกิดสารเคมีที่ไม่มีศักยภาพใช้งาน จะเกิดพิษของไมโครพลาสติกหลุดรอดออกมา หรืออาจก่อผลกระทบด้านสุขภาพเมื่อนำผลิตภัณฑ์จากพลาสติกรีไซเคิลกลับไปใช้งานในกลุ่มที่มีความเสี่ยงสูง เช่น ของเล่นเด็ก ผลิตภัณฑ์ใช้สำหรับอาหาร ก็มักนำไปสู่ผลกระทบต่อสุขภาพระยะยาวได้

ไมโครพลาสติก: กรรมวิธีการบำบัด กฎระเบียบ และการคาดคะเนผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม (Microplastics: Treatment methods, regulations, and foreseen environmental impacts)

การศึกษาผลกระทบของไมโครพลาสติกในสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย ทำให้มนุษย์ตระหนักปริมาณและความอันตรายของไมโครพลาสติกมากขึ้น แนวทางการควบคุมการเข้าสู่สิ่งแวดล้อมของไมโครพลาสติกทำได้หลายรูปแบบ ดังแสดงใน Figure 10 ซึ่งมาตรการจัดการ การควบคุม การแยก การจำแนก และการตรวจสอบชนิดไมโครพลาสติกมีความสำคัญมาก เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงปริมาณ เชิงคุณภาพ และวิธีการรับมือกับไมโครพลาสติกขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไมโครพลาสติกมีความหลากหลายและมีความเป็นพิษต่อระบบนิเวศ เนื่องจากผลิตภัณฑ์พลาสติกหรือภาชนะพลาสติกมักถูกใช้ร่วมกับอาหารหรือผลิตภัณฑ์หลายอย่าง ทำให้มีองค์ประกอบทางเคมีหลากหลายและมีการปนเปื้อนในตัวอย่างที่วิเคราะห์ทั้งบรรจุภัณฑ์พลาสติกและสิ่งบรรจุในบรรจุภัณฑ์พลาสติกนั้น จำเป็นต้องหาเทคนิคการวิเคราะห์ที่น่าเชื่อถือในการจำแนกสมบัติของไมโครพลาสติกที่มีความซับซ้อน ด้านการป้องกันประกอบด้วยมาตรการด้านต่าง ๆ ได้แก่ ด้านสังคม เช่น ความรับรู้ ความเข้าใจ ทศนคติและพฤติกรรมของผู้บริโภค เป็นความท้าทายในการจัดการไมโครพลาสติก นโยบายทางกฎหมายด้านการระงับใช้ผลิตภัณฑ์ที่จะก่อให้เกิดมลพิษ รมรณรงค์กระบวนการนำพลาสติกไปหมุนเวียนใหม่ แต่วิธีการนี้ยังมีข้อจำกัดจากองค์ประกอบของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานมา รวมทั้งสารเจือปนถาวรในพลาสติก เช่น สารเติมแต่งเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้พลาสติก สารให้สี เป็นอุปสรรคมากต่อการเวียนทำใหม่ให้ได้พลาสติกที่มีคุณภาพตามมาตรฐาน

การแพร่กระจายของไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติกในสิ่งแวดล้อม ซึ่งเกิดเนื่องจากไมโครพลาสติกส่วนใหญ่เกิดจากพลาสติกสังเคราะห์ ซึ่งมีสมบัติย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากและสะสมในวิญญากาศต่าง ๆ ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม ความหลากหลายทางชีวภาพและสุขภาพของมนุษย์ ใน ค.ศ. 2023 สหภาพยุโรปได้พัฒนานโยบายที่เข้มงวดขึ้นในด้านการใช้ไมโครพลาสติกในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ รวมถึงการติดตามเพื่อป้องกันการหลุดรอดของไมโครพลาสติกออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยมีเป้าหมายลดปริมาณไมโครพลาสติกให้ได้ [76] ในทวีปเอเชีย ประเทศสาธารณรัฐอินโดนีเซียซึ่งมีจำนวนประชากรมากเป็นอันดับที่ 4 ของโลกและมีปัญหามลพิษเป็นอันดับ 2 รองจากประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน ปริมาณขยะพลาสติกมากกว่าล้านตันที่มีการจัดการไม่เหมาะสมได้ถูกทิ้งลงทะเล รัฐบาลของประเทศสาธารณรัฐอินโดนีเซียจึงได้มีคำสั่งประธานาธิบดี สั่งการให้มีการจัดการเศษขยะพลาสติกในทะเล โดยเน้นการจัดการขยะพลาสติกจากบ้านเรือน [77] สำหรับราชอาณาจักรไทยได้บรรลุข้อตกลงและข้อมติ End Plastic Pollution : Towards an international legally binding instrument ในการประชุมสมัชชาสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ (UN Environment Assembly: UNEA) สมัยที่ 5 ช่วง 2 (UNEA 5.2) จัดขึ้นเมื่อเดือนมีนาคม ค.ศ. 2022 ณ กรุงไนโรบี สาธารณรัฐเคนยา ซึ่งประกอบด้วยขอบเขตของมาตรการทางกฎหมายได้ครอบคลุมมลพิษจากพลาสติกและไมโครพลาสติกในสิ่งแวดล้อม รวมถึงในสิ่งแวดล้อมทางทะเล โดยส่งเสริมเศรษฐกิจหมุนเวียนและจัดการตลอดวัฏจักรชีวิตของพลาสติกตั้งแต่การผลิตการใช้ และการออกแบบเพื่อให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ ผลิตซ้ำหรือรีไซเคิล รวมถึงการป้องกันและการบำบัดของเสีย ส่งเสริมแผนปฏิบัติการระดับชาติ เพื่อป้องกัน ลดและแก้ไขมลพิษพลาสติก เป็นต้น [78]

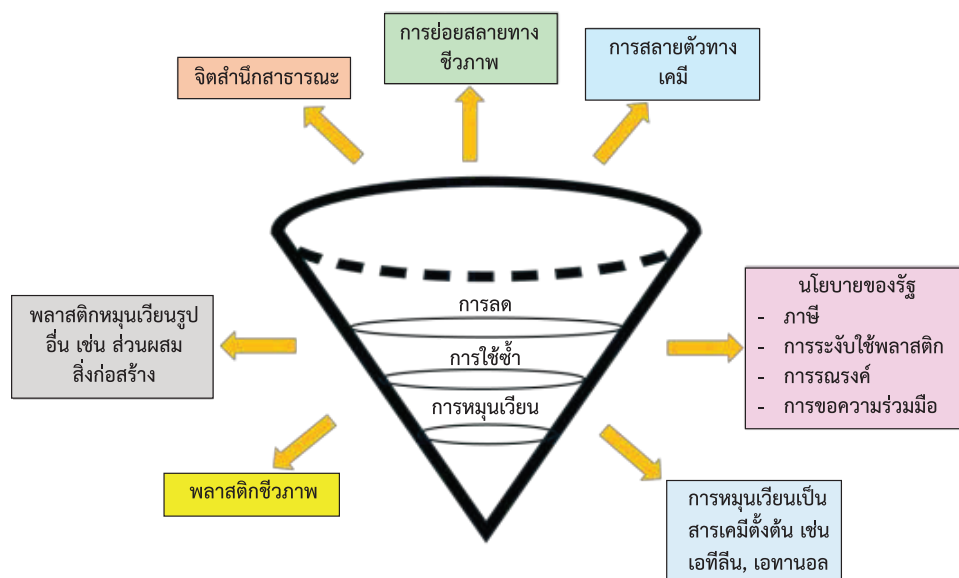


Figure 10 Pathways of entry of microplastics into the environment and strategies for their regulation

Conclusions

วิธีการจัดการพลาสติกที่ไม่เหมาะสมด้านคุณภาพในสิ่งแวดล้อม สร้างผลกระทบเกี่ยวกับมลพิษพลาสติกที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ในห่วงโซ่ชีวิตทั้งหมด ก่อให้เกิดการกระจายตัวของไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติกได้ในทุกหนทุกแห่ง ทั้งบรรยากาศ ระบบนิเวศทางทะเล พื้นดินและชีวภาพ ชิ้นส่วนพลาสติกที่มีขนาดเล็กสามารถเกิดการสะสมทางชีวภาพ ถ่ายทอดผ่านการบริโภค และอาจเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ในท้ายที่สุด อย่างไรก็ตาม ความเข้าใจถึงขอบเขตของไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติกที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมยังมีน้อย เนื่องจากยังไม่มี การแสดงผลกระทบทางพิษวิทยาของไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติกต่อมนุษย์อย่างชัดเจน ซึ่งการประเมินความเสี่ยงและการบริหารความเสี่ยงจากไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติกขึ้นอยู่กับข้อมูลการได้รับสัมผัสที่เชื่อถือได้ แม้วานักวิจัยจะมีข้อมูลการตรวจพบอนุภาคไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติกในตัวอย่างสิ่งมีชีวิตหลายชนิดในห่วงโซ่อาหาร แต่การประเมินการสัมผัสไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติกของมนุษย์ผ่านการบริโภคอาหาร จำเป็นต้องใช้วิธีการตรวจสอบที่น่าเชื่อถือและการอ้างอิงที่แม่นยำ เนื่องจากปัจจัยสำคัญ คือ อนุภาคไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติกมีขนาด รูปร่างและองค์ประกอบที่หลากหลายมาก รวมทั้งชนิดสารเติมแต่งในสารประกอบพลาสติก การดูดซับของสารมลพิษอื่น ๆ และการเปลี่ยนแปลงของการกระจายตัวแบบพลวัตในสิ่งแวดล้อม รวมถึงกิจกรรมของมนุษย์ที่นำไปสู่วิธีการได้รับสัมผัสที่หลากหลาย รวมทั้งในการวิจัยยังมีช่องว่างด้านการออกแบบวิธีมาตรฐานสำหรับการสอบเทียบ ซึ่งจำเป็นต้องใช้วัสดุอ้างอิงที่มีข้อมูลชัดเจนทั้งชนิดของพอลิเมอร์ในสภาพเมตริกซ์ต่าง ๆ และความเข้มข้น การจำลองการดูดซับของสารเคมีและจุลินทรีย์บนผิววัสดุ หรือการเปลี่ยนแปลงของพอลิเมอร์ในสภาพแวดล้อม

ธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ได้รับจากงานวิจัยมีประโยชน์ให้มนุษย์ควรตระหนักถึงอันตรายของไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติกในสิ่งแวดล้อม การปนเปื้อนของสารเหล่านี้ตามห่วงโซ่อาหาร ปริมาณการสะสมในระบบชีวภาพและอันตรายต่อสุขภาพ ซึ่งทำให้เกิดความระมัดระวังในการใช้งานอย่างรอบคอบในส่วนพลาสติก การจัดการขยะพลาสติก รวมทั้งการบำบัดมลพิษของไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติกที่ปนเปื้อนในภูมิภาคต่าง ๆ อย่างเหมาะสมมากขึ้นเพื่อความปลอดภัยของมวลชนและสิ่งแวดล้อมใกล้ ๆ ที่มวลชนอาศัยอยู่

References

1. Hahladakis, J.N., Velis, C.A., Weber, R., Iacovidou, E. and Purnell, P. 2018. An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 179–199.
2. Teuten, E.L., Rowland, S.J., Galloway, T.S. and Thompson, R.C. 2007. Potential for plastics to transport hydrophobic contaminants. *Environmental Science and Technology*, 41, 7759–7764.
3. Fikarová, F., Cocovi-Solberg, D.J., Rosende, M., Horstkotte, B., Sklenářová, H. and Miró, M. 2019. A flow-based platform hyphenated to on-line liquid chromatography for automatic leaching tests of chemical additives from microplastics into seawater. *Journal of Chromatography A*, 1602, 160–167.
4. Rowdhwal, S.S.S. and Chen, J. 2018. Toxic effects of Di-2-ethylhexyl phthalate: An overview. *Biomedical Research International*, 1750368.
5. Zhang, H., Zhou, Q., Xie, Z., Zhou, Y., Tu, C., Fu, C., Mi, W., Ebinghaus, R., Christie, P. and Luo, Y. 2018. Occurrences of organophosphorus esters and phthalates in the microplastics from the coastal beaches in North China. *Science of the Total Environment*, 616–617, 1505–1512.
6. Ohore, E.O. and Zhang, S. 2019. Endocrine disrupting effects of bisphenol A exposure and recent advances on its removal by water treatment systems. A review. *Scientific African*, 5, e00135.
7. Wu, P., Cai, Z., Jin, H. and Tang, Y. 2019. Adsorption mechanisms of five bisphenol analogues on PVC microplastics. *Science of The Total Environment*, 650, 671–678.
8. Sun, B., Hu, Y., Cheng, H. and Tao, S. 2019. Releases of brominated flame retardants (BFRS) from microplastics in aqueous medium: Kinetics and molecular-size dependence of diffusion. *Water Research*, 151, 215–225.

9. Liebezeit, G. and Liebezeit, E. 2014. Synthetic particles as contaminants in German beers. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 3, 1574–1578.
10. The Lancet Planetary Health. 2017. Microplastics and human health—An urgent problem. *The Lancet Planetary Health*, 1, e254.
11. Rodrigues, J.P., Duarte, A.C., Santos-Echeandía, J. and Rocha-Santos, T. 2019. Significance of interactions between microplastics and POPs in the marine environment: A critical overview. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 111, 252–260.
12. Jiang, B., Kauffman, A.E., Li, L., McFee, W., Cai B., Weinstein, J., Lead, J.R., Chatterjee, S., Scott, G. and Xiao, S. 2020. Health impacts of environmental contamination of micro- and nanoplastics: A review. *Environmental Health and Preventive Medicine*, 25, 29.
13. Lambert, S., Sinclair, C. and Boxall, A. 2014. Occurrence, degradation, and effect of polymer-based materials in the environment (pp. 1–53), in D.M. Whitacre (Ed.) *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, Springer, Cham.
14. Crawford, C.B. and Quinn, B. 2017. Microplastic identification techniques (pp. 219–267), in C.B. Crawford and B. Quinn (Eds.) *Microplastic Pollution*, Elsevier, Amsterdam.
15. Dobaradaran, S., Schmidt T.C., Nabipour, I., Khajeahmadi, N., Tajbakhsh, S., Saeedi, R., Mohammadi, M.J., Keshtkar, M., Khorsand, M. and Ghasemi F.F. 2018. Characterization of plastic debris and association of metals with microplastics in coastline sediment along the Persian Gulf. *Waste Management*, 78, 649–658.
16. Amobonye, A., Bhagwat, P., Singh, S. and Pillai, S. 2021. Plastic biodegradation: Frontline microbes and their enzymes. *Science of the Total Environment*, 759, 143536.
17. Fred-Ahmadu, O.H., Bhagwat, G., Oluyoye, I., Benson, N.U., Ayejuyo, O.O. and Palanisami, T. 2020. Interaction of chemical contaminants with microplastics: Principles and perspectives. *Science of the Total Environment*, 706, 135978.
18. Sahu, S.K. and Pandit, G.G. 2003. Estimation of octanol-water partition coefficients for polycyclic aromatic hydrocarbons using reverse-phase HPLC. *Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies*, 26, 135-146.
19. Erythropel, H.C., Maric, M., Nicell, J.A., Leask, R.L. and Yargeau, V. 2014. Leaching of the plasticizer di(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) from plastic containers and the question of human exposure. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98, 9967-9981.
20. Luo, H., Liu, C., He, D., Xu, J., Sun, J., Li, J. and Pan, X. 2022. Environmental behaviors of microplastics in aquatic systems: A systematic review on degradation, adsorption,

- toxicity and biofilm under aging conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 423, 126915.
21. Allen, S., Allen, D., Pheonix, Moss, K., le Roux, G., Phoenix, V.R. and Sonke, J.E. 2023. Examination of the ocean as a source for atmospheric microplastics. *PLuS One*, 15, e0232746.
 22. Brahney, J., Mahowald, N., Prank, M., Cornwell, G., Klimont, Z., Matsui, H. and Prather, K.A. 2021. Constraining the atmospheric limb of the plastic cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 118, 1-10.
 23. Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y., Hayami, H., Minami, Y., Katsumi, N., Takeuchi, M., Sorimachi, A., Fujii, Y., Kajino, M., Adachi, K., Ishihara, Y., Iwamoto, Y. and Niida, Y. 2023. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitude and their role in cloud formation. *Environmental Chemistry Letters*, 21, 3055-3062.
 24. Von Moos, N., Burkhardt-Holm, P. and Köhler, A. 2012. Uptake and effects of microplastics on cells and tissue of the blue mussel *Mytilus edulis* L. after an experimental exposure. *Environmental Science & Technology*, 46, 11327-11335.
 25. Bakir, A., O'Connor, I.A., Rowland, S.J., Hendriks, A.J. and Thompson, R.C. 2016. Relative importance of microplastics as a pathway for the transfer of hydrophobic organic chemicals to marine life. *Environmental Pollution*, 219, 56-65.
 26. Ma, Y., Huang, A., Cao, S., Sun, F., Wang, L., Guo, H. and Ji, R. 2016. Effects of nanoplastics and microplastics on toxicity, bioaccumulation, and environmental fate of phenanthrene in fresh water. *Environmental Pollution*, 219, 166–173.
 27. Wardrop, P., Shimeta J., Nugegoda D., Morrison P.D., Miranda A., Tang M. and Clarke B.O. 2016. Chemical pollutants sorbed to ingested microbeads from personal care products accumulate in fish. *Environmental Science & Technology*, 50, 4037–4044.
 28. Wang, J., Peng, J., Tan, Z., Gao, Y., Zhan, Z., Chen, Q. and Cai, L. 2017. Microplastics in the surface sediments from the Beijiang River littoral zone: Composition, abundance, surface textures and interaction with heavy metals. *Chemosphere*, 171, 248–258.
 29. Besseling, E., Wegner, A., Foekema E.M., van den Heuvel-Greve, M.J. and Koelmans A.A. 2012. Effects of microplastic on fitness and PCB bioaccumulation by the lugworm *Arenicola marina* (L.). *Environmental Science & Technology*, 47, 593–600.
 30. Napper, I.E., Davies, B.F.R., Clifford, H., Elvin, S., Koldewey, H.J., Mayewski, P.A., Miner, K.R., Potocki, M., Elmore, A.C., Gajurel, A.P. and Thompson, R.C. 2020. Reaching new heights in plastic pollution-preliminary findings of microplastics on Mount Everest.

One Earth, 3, 621-630.

31. Bergman, M., Wirzberger, V., Krumpen, T., Lorenz, C., Primpke, S., Tekan, M.B. and Gerdts, G. 2017. High quantities of microplastic in Arctic deep-sea sediments from the HAUSGARTEN observatory. *Environmental Science & Technology*, 51, 11000-11010.
32. Lwanga, E.H., Beriot, N., Corradini, F., Silva, V., Yang, X., Baartman, J., Rezaei, M., Schaik, L., Riksen, M. and Gelssen, V. 2022. Review of microplastic sources, transport pathways and correlations with other soil stressors: A Journey from agricultural sites into the environment. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9, 20.
33. Lambert, S., Scherer, C. and Wagner, M. 2017. Ecotoxicity testing of microplastics: Considering the heterogeneity of physicochemical properties. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 13, 470-475.
34. Lee, H., Shim, W.J. and Kwon, J.H. 2014. Sorption capacity of plastic debris for hydrophobic organic chemicals. *Science of the Total Environment*, 470-471, 1545-1552.
35. de Souza Machado, A.A., Kloas, W., Zarff, C., Hempel, S. and Rillig, M.C. 2018. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 24, 1405-1416.
36. Li, S., Ding, F., Flury, M., Wang, Z., Xu, L., Li, S., Jones, D.L., Wang, J. 2022. Macro- and microplastic accumulation in soil after 32 years of plastic film mulching. *Environmental Pollution*, 300, 118945.
37. Long, B., Li, F., Wang, K., Huang, U., Yang, Y. and Xie, D. 2023. Impact of plastic film mulching on microplastic in farmland soils in Guangdong province, China. *Heliyon*, 9, e16587.
38. Yu, H., Zhang, Y., Tan, W. and Zhang, Z. 2022. Microplastics as an emerging environmental pollutant in agricultural soils: Effects on ecosystems and human health. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 855292.
39. Lwanga, H.L., Gertsen, H., Gooren, H., Peters, P., Salánki, T., van der Ploeg, M., Besseling, E., Koelmans, A.A. and Geissen, V. 2017. Incorporation of microplastics from litter into burrows of *Lumbricus terrestris*. *Environmental Pollution*, 220 (Part A), 523-531.
40. Boots, B., Russell, C.W. and Green, D.S. 2019. Effects of microplastics in soil ecosystems: Above and below ground. *Environmental Science & Technology*, 53, 11496-11506.
41. Guo, S., Wang, Q., Li, Z., Chen, Y., Li, H., Zhang, J., Wang, X., Liu, J., Cao, B., Zou, G., Zhang, B. and Zhao, M. 2023. Ecological risk of microplastic toxicity to earthworms in soil: A bibliometric analysis. *Frontiers in Environmental Science: Sec Toxicology*,

Pollution and the Environment, 11, 1-13.

42. Cole, M., Lindeque, P., Fileman, E., Halsband, C., Goodhead, R., Moger, J. and Galloway, T.S. 2013. Microplastic ingestion by zooplankton. *Environmental Science & Technology*, 47, 6646–6655.
43. Chang, X., Xue, Y., Li, J., Zou, L. and Tang, M. 2020. Potential health impact of environmental micro-and nanoplastics pollution. *Journal of Applied Toxicology*, 40, 4–15.
44. Limonta, G., Mancina, A., Benkhalqui, A., Bertolucci, C., Abelli, L., Fossi, C.M. and Panti, C. 2019. Microplastics induce transcriptional changes, immune response and behavioral alterations in adult zebrafish. *Scientific Reports*, 9, 15775.
45. Lu, Y., Zhang, Y., Deng, Y., Jiang, W., Zhao, Y., Geng, J., Ding, L. and Ren, H. 2016. Uptake and accumulation of polystyrene microplastics in zebrafish (*Danio rerio*) and toxic effects in liver. *Environmental Science & Technology*, 50, 4054–4060.
46. Amelia, T.S.M., Khalik, W.M.A.W.M., Ong, M.C., Shao, Y.T., Pan, H-J. and Bhubalan, K. 2021. Marine microplastics as vectors of major ocean pollutants and its hazards to the marine ecosystem and humans. *Progress in Earth and Planetary Sciences*, 8, 12.
47. Rillig, M.C., Kim, S.W. and Zhu, Y.G. 2024. The soil plastisphere. *Nature Reviews Microbiology*, 22, 64–74.
48. Schwabl, P., Köppel, S., Königshofer, P., Bucsics, T., Trauner, M., Reiberger, T. and Liebmann, B. 2019. Detection of various microplastics in human stool: A prospective case series. *Annals of Internal Medicine*, 171, 453–457.
49. Cox K.D., Covernton, G.A., Davies, H.L., Dower, J.F., Juanes, F. and Dudas, S.E. 2019. Human consumption of microplastics. *Environmental Science & Technology*, 53, 7068–7074.
50. Karbalaei, S., Hanachi, P., Walker, T.R. and Cole, M. 2018. Occurrence, sources, human health impacts and mitigation of microplastic pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 36046–36063.
51. Lehner, R., Weder, C., Petri-Fink, A. and Rothen-Rutishauser, B. 2019. Emergence of nanoplastic in the environment and possible impact on human health. *Environmental Science & Technology*, 53, 1748–1765.
52. Sundbæk, K.B., Koch, I.D.W., Villaro, C.G., Rasmussen, N.S., Holdt, S.L. and Hartmann, N.B. 2018. Sorption of fluorescent polystyrene microplastic particles to edible seaweed *Fucus vesiculosus*. *Journal of Applied Phycology*, 30, 2923–2927.

53. Danopoulos, E., Jenner, L.C., Twiddy, M. and Rotchell, J.M. 2020. Microplastic contamination of seafood intended for human consumption: A systematic review and meta-analysis. *Environmental Health Perspectives*, 128, 126002.
54. Gouin, T. 2020. Toward an improved understanding of the ingestion and trophic transfer of microplastic particles: Critical review and implications for future research. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 39, 1119–1137.
55. Wang, W., Ge, J. and Yu, X. 2020. Bioavailability and toxicity of microplastics to fish species: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 189, 109913.
56. Van Cauwenberghe, L. and Janssen, C.R. 2014. Microplastics in bivalves cultured for human consumption. *Environmental Pollution*, 193, 65–70.
57. Zhu, J., Zhang, Q., Li, Y., Tan, S., Kang, Z., Yu, X., Lan, W., Cl, L., Wang, J. and Shi, H. 2019. Microplastic pollution in the Maowei sea, A typical mariculture bay of China. *Science of the Total Environment*, 658, 62–68.
58. Van Cauwenberghe, L., Claessens, M., Vandegehuchte, M.B. and Janssen, C.R. 2015. Microplastics are taken up by mussels (*Mytilus edulis*) and lugworms (*Arenicola marina*) living in natural habitats. *Environmental Pollution*, 199, 10–17.
59. Karami, A., Golieskardi, A., Keong Choo, C., Larat, V., Galloway, T.S. and Salamatinia, B. 2017. The presence of microplastics in commercial salts from different countries. *Scientific Reports*, 7, 46173.
60. Toussaint, B., Raffael, B., Angers-Loustau, A., Gilliand, D., Kestens, V., Petrillo, M., Rio-Echevarria, I.M. and Van den Eede, G. 2019. Review of micro- and nanoplastic contamination in the food chain. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 36, 639–673.
61. Dris, R., Gasperi, J., Rocher, V., Saad, M., Renault, N. and Tassin, B. 2015. Microplastic contamination in an urban area: A case study in Greater Paris. *Environmental Chemistry*, 12, 592–599.
62. Dris, R., Gasperi, J., Saad, M., Mirande, C. and Tassin, B. 2016. Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment. *Marine Pollution Bulletin*, 104, 290–293.
63. Kole, P.J., Löhr, A.J., Van Belleghem, F.G. and Ragas, A.M. 2017. Wear and tear of tyres: A stealthy source of microplastics in the environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14, 1265.

64. Dris, R., Gasperi, J., Mirande, C., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V. and Tassin, B. 2017. A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environmental Pollution*, 221, 453-458.
65. Xing, Y.F., Xu, Y.H., Shi, M.H. and Lian, Y.X. 2016. The impact of PM_{2.5} on the human respiratory system. *Journal of Thoracic Disease*, 8, E69–E74.
66. Xu, J.L., Lin, X., Wang, J.J. and Gowen, A.A. 2022. A review of potential human health impacts of micro- and nanoplastics exposure. *Science of the Total Environment*, 51, 158111.
67. Vasse G.F. and Melgert, B.N. 2024. Microplastic and plastic pollution: Impact on respiratory disease and health. *European Respiratory Review*, 33, 230226.
68. Corbo C., Molinaro, R., Parodi, A., Toledano Furman, N.E., Salvatore, F. and Tasciotti, E. 2016. The impact of nanoparticle protein corona on cytotoxicity, immunotoxicity and target drug delivery. *Nanomedicine*, 11, 81–100.
69. Marelis, P.L., Montserrat, C.P. and Enrique, N.A. 2024. Human skin and micro-and nanoplastics: a mini review. *Ecology & Environmental Sciences*, 9, 122-125.
70. Sun, A. and Wang, W.X. 2023. Human exposure to microplastics and its associated health risks. *Environmental & Health*, 1, 139-149.
71. Ihsanullah, I., Khan, M.T., Hossain, M.F., Bilal, M. and Shah, I.A. 2024. Eco-friendly solutions to emerging contaminants: Unveiling the potential of bioremediation in tackling microplastic pollution in water. *Advanced Sustainable Systems*, 8, 2400172.
72. Sun, J., Dai, X., Wang, Q., van Loosdrecht, M.C.M. and Ni, B.J. 2019. Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal. *Water Research*, 152, 21-37.
73. Sridhar, S., Murugesan, N., Gopalakrishnan, M., Janjoren, D. and Ganesan, S. 2024. Removal of microplastic for a sustainable strategy by microbial biodegradation. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 6, 100088.
74. Velis, C.A. 2015. Circular economy and global secondary material supply chains. *Waste Management & Research*, 33, 389–391.
75. Asteray, D.B. and Elsaigh, W.A. 2024. Waste plastic to roads – HDPE-modified bitumen and PET plastic fibres for road maintenance in South Africa: A review. *Waste Management & Research*, 42, 932-946.

76. European Commission, Commission Regulation (EU) 2023/2055-Restriction of Microplastics Intentionally Added to Products [Online]. Available: https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics/microplastics_en. [23 May 2025]
77. Ministry of Environment and Forestry. 2020. National Plastic Waste Reduction Strategic Actions for Indonesia, Republic of Indonesia [Online]. Available: https://ccet.jp/sites/default/files/2020-10/Indonesia_plastics_web_200626.pdf. [18 June 2025]
78. United Nations, Proceedings of the United Nations Environment at its Fifth Session, Nairobi, 28 February-2 March 2022 [Online]. Available: <https://www.unep.org/environmentassembly/outcomes-online-session-unea-5>. [18 June 2025]