



การตรวจวัดการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในน้ำดื่มบรรจุขวด

DETECTION OF MICROPLASTIC CONTAMINATION
IN BOTTLE DRINKING WATER

โชคชัย	พงษ์พิทักษ์วิเศษ
ชญานิษฐ์	โกมลวิศิษฐ์
นริศรา	สอนชา
วรวรรณ	บรรจง
อรัชพร	ยะดอนใจ

ภาคนิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคนิคการแพทย์

คณะเทคนิคการแพทย์

มหาวิทยาลัยรังสิต

พ.ศ. 2567



**DETECTION OF MICROPLASTIC CONTAMINATION
IN BOTTLE DRINKING WATER**

CHOKCHAI	PHONGPITAKWISAD
CHAYANIT	KOMOLVISIT
NARISSARA	SONCHA
WORAWAN	BUNJONG
ARATCHAYAPORN	YADONJAI

**A TERM PAPER SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR
OF SCIENCE IN MEDICAL TECHNOLOGY
MEDICAL TECHNOLOGY**

RANGSIT UNIVERSITY

2024

ภาคินพนธ์เรื่อง

การตรวจวัดการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในน้ำดื่มบรรจุขวด

โดย

โชคชัย	พงษ์พิทักษ์วิเศษ
ชญาณิษฐ์	โกมลวิศิษฐ์
นริศรา	สอนชา
วรวรรณ	บรรจง
อรัชพร	ยะคอนใจ

ได้รับพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคนิคการแพทย์
เมื่อวันที่ 18 ตุลาคม 2568

นิตติญา ชวชาญใจ

(ดร.นิตติญา ชวชาญใจ)

กรรมการและที่ปรึกษาร่วมภาคินพนธ์

ณัฐพงศ์ พุทธิพงษ์

(ดร.ณัฐพงศ์ พุทธิพงษ์)

หัวหน้าสาขาวิชาเทคนิคการแพทย์

อินทอร กุลมา

(ดร.อินทอร กุลมา)

ประธานกรรมการภาคินพนธ์

สุจินดาทรงไตรย์

(ดร. สุจินดาทรงไตรย์)

กรรมการและที่ปรึกษาร่วมภาคินพนธ์

ธ.ล

(รองศาสตราจารย์เยาวลักษณ์ พิมานอก)

คณบดีคณะเทคนิคการแพทย์

กิตติกรรมประกาศ

ภาคินพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนเป็นอย่างดีจาก ดร.อินทอร กุลมา ประธานกรรมการและที่ปรึกษาภาคินพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา มอบความรู้ ข้อคิด ข้อเสนอแนะ และให้ความช่วยเหลือปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง ผู้ทำภาคินพนธ์ตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.อินทอร กุลมา ประธานกรรมการและที่ปรึกษาภาคินพนธ์ และกรรมการที่ปรึกษาร่วมภาคินพนธ์ ดร.นิติธญา ขาวชายโงะ และดร.สุจินดา ทรงไธรย์ ที่ให้คำแนะนำต่าง ๆ ตลอดจนช่วยตรวจสอบภาคินพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้องและมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยรังสิตทุกท่านที่ได้มอบความรู้ แก่ผู้ทำภาคินพนธ์จนสามารถนำความรู้มาใช้ในการต่อยอดการทำภาคินพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการประจำอาคารเรียน 4/2 ห้อง 300 ที่กรุณาให้ความความสะดวกด้านอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ในการทำภาคินพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้ทำภาคินพนธ์หวังว่าภาคินพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์เป็นอย่างมากสำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และผู้ที่สนใจศึกษาต่อไป

โชคชัย	พงษ์พิทักษ์วิเศษ
ชญานิษฐ์	โกมลวิศิษฐ์
นริศรา	สอนชา
วรวรรณ	บรรจง
อรัชพร	ยะดอนใจ

บทคัดย่อ

6502484, 6506711, 6506729, 6506773,
6506759

สาขาวิชา: เทคนิคการแพทย์
วท.บ. (เทคนิคการแพทย์)

คำสำคัญ: ไมโครพลาสติก, น้ำดื่ม, พลาสติกปนเปื้อนในน้ำดื่ม

โชคชัย พงษ์พิทักษ์วิเศษ, ชญานิษฐ์ โกมลวิศิษฐ์, นริศรา สอนชา, วรพรรณ บรรจง,
อรัชพร ยะดอนใจ

การตรวจวัดการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในน้ำดื่มบรรจุขวด

(DETECTION OF MICROPLASTIC CONTAMINATION IN BOTTLE DRINKING WATER)

อาจารย์ที่ปรึกษา: ดร.อินทอร กุลมา

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำดื่มที่บรรจุในขวดชนิด PET เปรียบเทียบกับขวดชนิดแก้วที่วางจำหน่ายในร้านสะดวกซื้อ โดยทำการสุ่มทำการสุ่มตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดชนิด PET แบบเป็นระบบ (Systematic Sampling) จากร้านสะดวกซื้อบริเวณรอบมหาวิทยาลัยรังสิตและทำการสุ่มตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดแก้วแบบเจาะจง (purposive sampling) รวมจำนวน 36 ตัวอย่าง น้ำดื่มจะถูกกรองผ่านกระดาษกรองชนิด glass fiber ขนาดรู 1 ไมครอน โดยตรวจสอบการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและตรวจยืนยันชนิดของไมโครพลาสติกด้วยวิธี FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) ผลการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยของปริมาณไมโครพลาสติกในน้ำดื่มบรรจุขวดชนิด PET (1.78 ± 1.22 ชิ้นต่อลิตร) และบรรจุขวดชนิดแก้ว (1.83 ± 1.34 ชิ้นต่อลิตร) แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.863$) โดยอนุภาคไมโครพลาสติกที่พบส่วนใหญ่มีขนาดเล็กในช่วง $1-300 \mu m$ คิดเป็นร้อยละ 56.98 เมื่อจำแนกตามรูปร่างพบว่าไมโครพลาสติกที่พบมากที่สุดคือประเภทเศษชิ้นส่วน (fragment) คิดเป็นร้อยละ 55.81 รองลงมาคือแบบเส้นใย (fiber) ร้อยละ 44.19 นอกจากนี้ยังตรวจพบไมโครพลาสติกทั้งหมด 9 สี โดยพบสีใสมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 26.74 รองลงมาคือสีน้ำตาลและสีแดงตามลำดับ ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าไมโครพลาสติกสามารถตรวจพบได้ในน้ำดื่มทุกยี่ห้อที่ทำการศึกษาทั้งในบรรจุภัณฑ์ชนิดพลาสติกและแก้วดังนั้นจึงควรมีการกำหนดมาตรฐานควบคุมการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกเพื่อป้องกันความเสี่ยงต่อสุขภาพของมนุษย์จากการได้รับความเป็นพิษของไมโครพลาสติกต่อไป

ABSTRACT

**6502484, 6506711, 6506729, 6506773,
6506759**

: MAJOR: MEDICAL TECHNOLOGY

B.Sc. (MEDICAL TECHNOLOGY)

**KEYWORDS: MICROPLASTICS, DRINKING WATER, PLASTIC CONTAMINATION IN
DRINKING WATER**

**CHOKCHAI PHONGPITAKWISAD, CHAYANIT KOMOLVISIT, NARISSARA SONCHA,
WORAWAN BUNJONG, ARATCHAYAPORN YADONJAI**

DETECTION OF MICROPLASTIC CONTAMINATION IN BOTTLE DRINKING WATER

THESIS ADVISOR: PROF. INTHUON KULMA

This study aimed to determine the amount of microplastic contamination in drinking water samples packaged in PET bottles compared to glass bottles sold in convenience stores. A total of 36 samples were collected. PET bottled water samples were collected by systematic sampling technique from convenience stores around Rangsit University, while purposive sampling was used to collect glass bottled water samples. The samples were filtered using 1-micron pore size glass fiber filter paper, and the retained particles were examined under a light microscope. The characteristics of the microplastics were further confirmed using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). The results revealed that microplastic contamination in PET bottled water (1.78 ± 1.22 particles/liter) and glass bottled water (1.83 ± 1.34 particles/liter) were not statistically significant different ($p = 0.863$). The most of the microplastic particles found are 1–300 μm , accounting for 56.98 percent. By shape, it was found that the most common type of microplastic was fragments, accounting for 55.81 percent, followed by fibers, accounting for 44.19 percent. In addition, nine different colors of microplastics were detected, with clear being the most common, accounting for 26.74 percent, followed by brown and red, respectively. In this study, microplastics were detectable in all brands of drinking water studied, in both plastic and glass packaging. Therefore, the regulations should be established to control microplastic contamination to prevent further risks to human health from exposure to microplastic toxicity

สารบัญ

	หน้า
ภาคินิพนธ์เรื่อง	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญรูปภาพ	ช
สารบัญตาราง	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 สมมติฐานการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทบทวนเอกสาร	5
2.1 พลาสติก	5
2.1.1 ประเภทของพลาสติก	5
2.1.2 ความเป็นพิษของพลาสติก	8
2.1.3 ไมโครพลาสติก	9
2.2 ผลกระทบของไมโครพลาสติกต่อสิ่งแวดล้อม	10
2.2.1 ผลกระทบของไมโครพลาสติกต่อระบบนิเวศทางน้ำ	11
2.2.2 ผลกระทบของไมโครพลาสติกต่อระบบนิเวศทางบก	12
2.3 ผลกระทบของไมโครพลาสติกต่อสิ่งมีชีวิต	14
2.3.1 เกษษชลศาสตร์ของไมโครพลาสติกในร่างกายมนุษย์	14
2.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างไมโครพลาสติกและการเกิด	29

	โรคหลอดเลือดหัวใจ	
	2.4 การระบุชนิดของไมโครพลาสติก	37
	2.4.1 คุณลักษณะทางกายภาพ	37
	2.4.1.1 กล้องจุลทรรศน์	37
	2.4.1.2 กล้องสโตริโอ	37
	2.4.1.3 กล้องฟลูออเรสเซน	37
	2.4.1.4 กล้อง SEM	38
	2.4.2. คุณลักษณะทางเคมี	38
	2.4.2.1 FTIR	38
	2.4.2.2 Raman	39
	2.4.2.3 Pyolysis GC-MS	39
	2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	40
บทที่ 3	ระเบียบวิธีวิจัย	45
	3.1 การออกแบบการวิจัย	45
	3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	45
	3.2.1 เครื่องมือ	45
	3.2.2 อุปกรณ์	46
	3.3 สารเคมีและน้ำยาทดสอบ	46
	3.4 วิธีการทดลอง	46
	3.4.1 กลุ่มตัวอย่าง	46
	3.4.2 การทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย	51
	3.4.2.1 วิธีการสกัดไมโครพลาสติก	51
	3.5 การรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูล	52
	3.5.1 การวิเคราะห์ทางสถิติเชิงพรรณนา	52
	3.5.2 การวิเคราะห์ทางสถิติเชิงอนุมาน	52
	3.6 แผนการดำเนินงาน	53
บทที่ 4	ผลการวิจัย	54
	4.1 ปริมาณและขนาดไมโครพลาสติก	54
	4.2 รูปร่างไมโครพลาสติก	59

4.2.1	รูปร่างแบบเศษชิ้นส่วน	60
4.2.2	รูปร่างแบบเส้นใย	61
4.3	สีไมโครพลาสติก	64
4.4	ชนิดไมโครพลาสติก	65
4.5	การวิเคราะห์ระบุแยกชนิดไมโครพลาสติก	66
บทที่ 5	สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	71
	บรรณานุกรม	73
	ภาคผนวก	85
	ประวัติผู้วิจัย	94

มหาวิทยาลัยรังสิต
Rangsit University

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 a) fragments; b) beads; c) films; d) foams; e) fibers	10
2.2 การสะสมทางชีวภาพและผลกระทบ MPs ต่อสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศทางบกและทางน้ำ	12
2.3 การตอบสนองของ MP ในดินต่อความเครียดจากสิ่งแวดล้อมและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และผลกระทบต่อไบโอมในดินและจุลินทรีย์	14
2.4 กลไกการดูดซึมไมโครพลาสติกในลำไส้เล็ก	17
2.5 กลไกการดูดซึมของไมโครพลาสติกในบริเวณถุงลมของปอด	20
2.6 การกระจายตัวและการขับออกของไมโครพลาสติกในร่างกายมนุษย์	23
2.7 กลไกที่อาจเกิดขึ้นในการเผาผลาญและการย่อยสลายทางชีวภาพของไมโครพลาสติกในร่างกายมนุษย์	24
3.1 แผนที่ร้านสะดวกซื้อ	49
4.1 ไมโครพลาสติกในน้ำดื่มบรรจุขวดชนิด PET ยี่ห้อ A,B,C,D,E,F ภายใต้อุปกรณ์จุลทรรศน์ ($\geq 200 \mu\text{m}$ particles.10x eyepieces ,10x objective)	59
4.2 ไมโครพลาสติกในน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดแก้ว ยี่ห้อ G,H ภายใต้อุปกรณ์จุลทรรศน์ ($\geq 200 \mu\text{m}$ particles.10x eyepieces ,10x objective)	60
4.3 รูปร่างไมโครพลาสติกแบบเส้นใยภายใต้อุปกรณ์จุลทรรศน์	60
4.4 รูปร่างไมโครพลาสติกแบบเส้นใยภายใต้อุปกรณ์จุลทรรศน์	61
4.5 แผนภูมิแสดงร้อยละของชนิดไมโครพลาสติกที่พบในน้ำดื่มยี่ห้อ A-H	62
4.6 แผนภูมิแสดงร้อยละของขนาดไมโครพลาสติกที่พบในน้ำดื่มยี่ห้อ A-H	62
4.7 แผนภูมิแสดงร้อยละของสีไมโครพลาสติกที่พบในน้ำดื่มยี่ห้อ A-H	64
4.8 ชนิดของไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำดื่มที่บรรจุในขวดชนิด PET และขวดชนิดแก้วและในตัวอย่างควบคุมที่จำแนกตามพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค FTIR	65
4.9 แผนภาพกล้อง	66
4.10 ฮิสโตแกรม	66
4.11 ตารางTests of Normolity	67

4.12 ตาราง Hypothesis Tests Summary	68
4.13 ตาราง Independent Sample Mann-Whitney U Tests Summary	68
4.14 ตาราง Independent Sample Mann-Whitney U Tests 2 -material of bottle	69
4.15 ตาราง Hypothesis Test Summary	70
4.16 ตาราง Independent Sample Kruskal-Wallis Test	70

มหาวิทยาลัยรังสิต
Rangsit University

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ลักษณะโครงสร้างและสมบัติของพอลิเมอร์ในพลาสติกประเภทต่างๆ	6
2.2 ชนิดและคุณสมบัติของพลาสติกที่นิยมใช้ในปัจจุบัน	7
2.3 สารประกอบที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ	8
2.4 จำแนกประเภทไมโครพลาสติกตามรูปแบบ	9
3.1 กำหนดหมายเลขในแต่ละหน่วยประชากร	48
3.2 ข้อมูลตัวอย่างยี่ห้อน้ำดื่ม	49
3.3 แสดงแผนการดำเนินงาน	53
4.1 ปริมาณการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำปราศจากไอออน(ตัวอย่างควบคุม)	54
4.2 ปริมาณการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกที่ตรวจพบในตัวอย่างน้ำดื่มยี่ห้อ A-H	56
4.3 รูปร่างไมโครพลาสติกที่พบในน้ำดื่มยี่ห้อ A-H	63
4.4 แสดงสีไมโครพลาสติกที่พบในน้ำดื่มยี่ห้อ A-H	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของปัญหา

ปัจจุบันการผลิตพลาสติกทั่วโลกมีปริมาณเกินกว่า 260 ล้านตันต่อปี ด้วยคุณสมบัติของพลาสติกที่มีน้ำหนักเบา,ความแข็งแรงทนทาน และราคาถูก พลาสติกจึงถูกนำมาใช้ผลิตวัสดุต่างๆอย่างแพร่หลาย (Bogusz & Oleszczuk, 2017) อย่างไรก็ตามพลาสติกจำนวนมากเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งานจะกลายเป็นของเสียที่สะสมและคงอยู่ในสิ่งแวดล้อมเป็นระยะเวลานานหลายทศวรรษ (Shahul Hamid et al., 2018) เศษพลาสติกที่พบในสิ่งแวดล้อมมีลักษณะหลากหลายทั้งในด้านขนาดและรูปร่างโดยชิ้นส่วนพลาสติกที่มีขนาดเล็กกว่า 5 มิลลิเมตรจะถูกจำแนกเป็น ไมโครพลาสติก (Microplastics) (US Department of Commerce, n.d.)

การปนเปื้อนของไมโครพลาสติกส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศทั้งทางตรง และทางอ้อมตลอดจนก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสุขภาพ และการดำเนินชีวิตของมนุษย์ (Kankanige & Babel, 2019) ไมโครพลาสติกส่วนใหญ่มีแหล่งกำเนิดจากพลาสติกที่แตกตัวจากขยะขนาดใหญ่ และพลาสติกที่ผลิตขึ้นโดยตรงในรูปของเม็ด หรือ เส้นใยขนาดเล็กสำหรับการใช้งานทางอุตสาหกรรมต่าง ๆ (Akdogan and Guven, 2019) ถูกพัดพาโดยแม่น้ำ และกระแสลมลงสู่มหาสมุทร (Tracking Global Marine Microplastics, 2022) อีกทั้งยังสามารถแพร่กระจายเข้าสู่ชั้นบรรยากาศ และตกกลับสู่พื้นโลกในรูปของฝน และละอองน้ำ (Gan et al., 2023) เนื่องจากไมโครพลาสติกมีขนาดเล็กมากจึงสามารถแพร่กระจายได้อย่างรวดเร็วส่งผลให้มีการตรวจพบไมโครพลาสติกในอากาศ,พื้นดิน,แหล่งน้ำจืด, น้ำแข็งขั้วโลก, ใต้ทะเลลึก และในสิ่งมีชีวิตหลากหลายชนิด (Fackelmann & Sommer, 2019) โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากบรรจุภัณฑ์พลาสติกสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารที่วางจำหน่ายในท้องตลาดเช่น ผลิตภัณฑ์นม

,เนื้อสัตว์ และน้ำดื่ม (Ziani et al., 2023) ปัจจุบันการบริโภคน้ำดื่มจากขวดพลาสติกเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย ส่งผลให้น้ำดื่มจำเป็นต้องผ่านกระบวนการบำบัด และฆ่าเชื้อก่อนถึงมือผู้บริโภค (Kankanig & Babel, 2019) อย่างไรก็ตามไมโครพลาสติกอาจปนเปื้อนตั้งแต่แหล่งน้ำก่อนบรรจุ ทั้งนี้ไมโครพลาสติกยังสามารถถูกปล่อยออกจากขวดน้ำดื่มพลาสติกได้เมื่อสัมผัสกับอุณหภูมิหรือความชื้นที่สูง (Taheri et al. 2023)

ในประเทศไทยมีการศึกษางานวิจัยหลายฉบับตรวจพบการปนเปื้อนไมโครพลาสติกในแหล่งน้ำดื่ม และน้ำประปา โดยทั่วไปแล้วคนไทยส่วนใหญ่นำน้ำจากน้ำดื่มที่บรรจุขวดพลาสติก และน้ำสาธารณะ จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงแหล่งที่มาของการผลิตน้ำดื่มที่เริ่มต้นมาจากน้ำประปา (Kankanig, D., & Babel, 2019) ในน้ำประปากรุงเทพมหานครพบไมโครพลาสติกขนาดเล็กกว่า 300 ไมโครเมตรในระดับเฉลี่ย 0.62–0.68 อนุภาคต่อลิตร แม้ว่าจะมีการบำบัดน้ำอย่างมีระบบก็ตาม (Chanpiwat & Damrongsiri, 2021) จึงจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีที่ช่วยบำบัดน้ำเสียที่มีคุณภาพมากกว่า ปัจจุบัน (J Water Health., 2023) ภายหลังได้มีการรวบรวมตัวอย่างน้ำกรอง และน้ำดื่มที่วางขายตามร้านสะดวกซื้อในประเทศไทยพบว่า ไมโครพลาสติกขนาด 0-50 ไมโครเมตร พบมากที่สุด ตัวอย่างน้ำประปา และน้ำดื่ม ซึ่งรูปร่างส่วนใหญ่เป็นชิ้นส่วนขนาดเล็กและเป็นเส้นใย (Kesirine Jinda et al., 2023)

วิธีการตรวจวัดไมโครพลาสติกที่นิยมใช้ ได้แก่ การกรองด้วยแผ่นกรองละเอียด การย่อยสารอินทรีย์ด้วยสารเคมี เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) หรือเอนไซม์ และการย้อมสีด้วยไนล์เรด (Nile Red) เพื่อตรวจสอบไมโครพลาสติกด้วยกล้องจุลทรรศน์เรืองแสง (Zea Cobos et al., 2024) นอกจากนี้ เทคโนโลยีขั้นสูง เช่น Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) และ Raman spectroscopy ยังถูกนำมาใช้ในการยืนยันชนิดของพอลิเมอร์ในไมโครพลาสติก (Löder et al., 2015; Mintenig et al., 2018) เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์ การสังเกตและนับจำนวนไมโครพลาสติกใช้กล้องจุลทรรศน์ชีวภาพ (Biological system microscope) และกล้องจุลทรรศน์เรืองแสง (fluorescence microscope) สำหรับการระบุชนิดไมโครพลาสติกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมโครเมตรใช้ Fourier transform infra-red spectrometer (FTIR) ในขณะที่อนุภาคขนาด 1–10 ไมโครเมตร จะวิเคราะห์ด้วย micro-Raman spectroscopy

ดังนั้นผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาปริมาณการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำดื่มที่บรรจุในขวดชนิด PET เปรียบเทียบกับขวดชนิดแก้วที่วางจำหน่ายในร้านสะดวกซื้อในประเทศ

ไทย จำนวน 36 ตัวอย่าง โดยการศึกษาครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ เพื่อศึกษาและจำแนกชนิดของไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำดื่มตามสถานวิทยาและพอลิเมอร์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาปริมาณการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำดื่มที่บรรจุในขวดชนิด PETเปรียบเทียบกับขวดชนิดแก้วที่วางจำหน่ายในร้านสะดวกซื้อบริเวณรอบมหาวิทยาลัยรังสิต จังหวัดปทุมธานี

1.2.2 เพื่อศึกษาและจำแนกชนิดของไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำดื่มตามสถานวิทยา และตามพอลิเมอร์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative research) เพื่อศึกษาปริมาณการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำดื่มที่บรรจุในขวดชนิด PET และขวดชนิดแก้ว ชนิดละ 6 ยี่ห้อที่นิยมในร้านสะดวกซื้อบริเวณ ระหว่างเดือน มิถุนายน ถึง ธันวาคม พ.ศ.2568 โดยตรวจวัดการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำดื่มด้วยวิธีกล้องจุลทรรศน์ และตรวจยืนยันพอลิเมอร์ของไมโครพลาสติกด้วยเทคนิค Fourier Transform infrared Spectroscopy (FTIR)

1.4 สมมติฐานการวิจัย

1.4.1 ค่าเฉลี่ยของไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำดื่มที่บรรจุในขวดชนิด PET (m_1) ไม่แตกต่างกับตัวอย่างน้ำดื่มที่บรรจุในขวดชนิดแก้ว (m_2)

1.4.2 ชนิดของไมโครพลาสติกที่ตรวจพบในตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดชนิด PET (m_1) และขวดชนิดแก้ว (m_2) มีความแตกต่างกัน

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 ทราบค่าเฉลี่ยของไมโครพลาสติกที่ปนเปื้อนในตัวอย่างน้ำดื่มที่บรรจุในขวดชนิด PET และขวดชนิดแก้ว

1.5.2 เพื่อให้ผู้บริโภคตระหนักถึงไมโครพลาสติกที่ปนเปื้อนในน้ำดื่มที่บรรจุขวด และเป็นข้อมูลให้ผู้ผลิตพัฒนากระบวนการผลิตน้ำดื่มให้ดียิ่งขึ้น

มหาวิทยาลัยรังสิต
Rangsit University

บทที่ 2

บททวนเอกสาร

2.1 พลาสติก

พลาสติกเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มีโครงสร้างพอลิเมอร์ ซึ่งได้จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของสารอินทรีย์โดยมีคุณสมบัติเด่น เช่น ความเบา ความทนทาน และต้นทุนการผลิตต่ำ ทำให้พลาสติกถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในหลายภาคอุตสาหกรรม เช่น บรรจุภัณฑ์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (อรรถพล สุทธิสาคร, 2562)

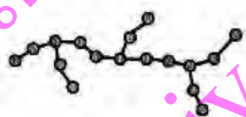
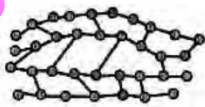
2.1.1 ประเภทของพลาสติก

พลาสติกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท (อัญชลี ศรีสุวรรณ, 2563) ได้แก่

1) เทอร์โมเซตติง (Thermosetting) เป็นพลาสติกที่จะมีโครงสร้างเป็นร่างแหมีสมบัติพิเศษ คือ สามารถที่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและสามารถทนต่อปฏิกิริยาทางเคมีได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังเกิดรอยเปื้อนได้ยาก ทนความร้อนและทนความดัน เปลี่ยนแปลงรูปร่างไม่ได้

2) เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เทอร์โมพลาสติกหรือเรียกว่าเรซิน เป็นพลาสติกที่ได้รับคามนิยมนอย่างมากและใช้กันอย่างแพร่หลาย เทอร์โมพลาสติกถ้าหากได้รับความร้อนจะอ่อนตัว และเมื่อเย็นก็จะเกิดการแข็งตัว สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงรูปได้ โดยพลาสติกรูปแบบนี้โครงสร้างโมเลกุลจะเป็นลักษณะโซ่ตรงการเชื่อมต่อระหว่างโซ่พอลิเมอร์น้อยมาก

ตารางที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างและสมบัติของพอลิเมอร์ในพลาสติกประเภทต่างๆ

ประเภท	รูปโครงสร้าง	ลักษณะโครงสร้าง
เทอร์โมเซตติง (Thermosetting)	 (Linear Shape)	- การเกาะตัวของโมเลกุลเป็นแบบตาข่ายแบบแคบหรือร่างแหจึงทำให้มีความหนาแน่นสูง มีความแข็งแรงและทนความร้อนได้ดีสูง
เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic)	 (Branched Shape)	- การเกาะตัวของโมเลกุลเป็นแบบเส้นยาวตลอด จึงทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงสูงและทนความร้อนได้ดี
	 (Cross-Linked or Network Shape)	- การเกาะตัวของโมเลกุลที่มีลักษณะคล้ายข้อมือกับแขนเรียกการเกาะตัวแบบนี้ว่า“แบบแตก”จึงทำให้พอลิเมอร์มีความหนาแน่นน้อย

ที่มา : เบญจพร พรหมลี (2556)

ตารางที่ 2.2 ชนิดและคุณสมบัติของพลาสติกที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

ประเภทพลาสติก	คุณสมบัติ	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์
โพลีเอทิลีนเทเรพทาเลต (Polyethylene terephthalate , PET)	- โปร่งใส น้ำหนักเบา - แข็งแรง สามารถรีไซเคิลได้ง่าย	- ขวดน้ำดื่ม บรรจุภัณฑ์อาหาร - ใช้ในเส้นใยสำหรับผ้าและพรม
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene)	- ไม่แตกง่าย - ป้องกันการแพร่ของกลิ่นได้ดี	- ขวดนม ขวดแชมพู ขวดน้ำยาปรับผ้านุ่ม - ผลิตภัณฑ์ซักผ้า กระป๋องยา
โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride: PV)	- มีความแข็งแรง - ทนต่อการกัดกร่อน - ทนต่อความร้อนและสารเคมี	- ท่อประปา - ฉนวนไฟฟ้า - วัสดุปูพื้น เช่น ไวนิล หน้าต่างและประตู
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene)	- นิ่ม ยืดตัวได้มาก ใส	- ถุงพลาสติกมีหูหิ้ว หลอดพลาสติก พลาสติกห่ออาหาร
โพลีโพรพิลีน (Polypropylene)	- แข็ง ทนต่อแรงกระแทกได้ดี - ทนต่อสารเคมี ความร้อน	- ถังใส่อาหาร ซามจาน ถึง ตะกร้า - กระบอกใส่น้ำแช่เย็น - ขวดซอส แก้วโยเกิร์ต
พอลิสไตรีน (Polystyrene)	- แข็ง ใส - แตกเปราะ แตกง่าย - ราคาถูก	- เทปเพลง - สำลี - ถาดโฟมบรรจุอาหาร
พลาสติกอื่นๆ		พลาสติกที่หลอมใหม่ได้ อาจเป็นได้ทั้ง Poly Carbonate , Tritan (Copolyester) และอื่นๆ

2.1.2 ความเป็นพิษของพลาสติก

2.1.2.1 สารประกอบในพลาสติกที่เป็นอันตราย

พลาสติกเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในชีวิตประจำวันอาจหลุดรอดเข้าสู่ร่างกายและก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพในระยะยาว โดยสารประกอบของพลาสติกที่สามารถก่อให้เกิดโรคได้ มีดังนี้

ตารางที่ 2.3 สารประกอบที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ

ชนิดของพลาสติก	สารที่เป็นอันตราย	ความเป็นอันตราย
PVC	Phthalate	เป็นก่อพิษแบบสะสมเรื้อรังอาจทำให้ตับขยายตัวและมีเลือดออกในปอด
	Vinyl chloride	1. อาการพิษเฉียบพลัน เวียนหัว อ่อนเพลีย มองเห็นและได้ยินผิดปกติ ทรงตัวไม่ดี 2. พิษเรื้อรังทำให้ตับทำงานผิดปกติเพิ่มความเสี่ยงต่อมะเร็งตับชนิด angiosarcoma
ชนิดของพลาสติก	สารที่เป็นอันตราย	ความเป็นอันตราย
Polystyrene	Styrene	1. พิษเฉียบพลัน เช่น ระคายเคืองผิวหนังหรือทางเดินหายใจ 2. พิษเรื้อรัง ทำให้การทรงตัวไม่ดี ความจำเสื่อม สมาธิสั้น
Polycarbonate	Biophenol A	1. พิษเฉียบพลัน เช่น คลื่นไส้ และปวดศีรษะ 2. พิษเรื้อรัง ส่งผลต่อระบบฮอร์โมนเพศที่ผิดปกติ มีพิษต่อตับเป็นและสารก่อการกลายพันธุ์

Melamine	Formaldehyde	1.พิษเฉียบพลัน เช่น ก่อให้เกิดการระคายเคือง ทำให้เกิดภูมิแพ้ หรือผิวหนังอักเสบ 2.พิษเรื้อรังอาจทำให้เกิดโรคมะเร็ง
----------	--------------	--

ที่มา : ศุภิพร แสงกระจ่างและคณะ,2556

2.1.3 ไมโครพลาสติก (Microplastic)

ไมโครพลาสติก หมายถึง อนุภาคพลาสติกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า < 5 มิลลิเมตร (Alimi et al.,2018) แบ่งเป็น 2 ประเภท ดังนี้

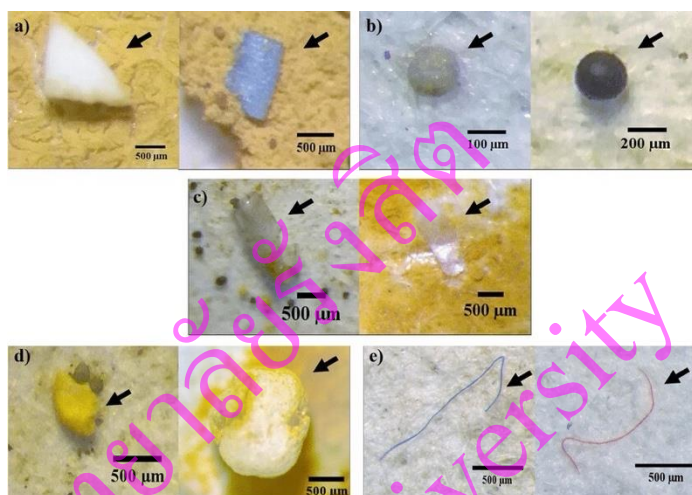
1) Primary microplastic หมายถึง ไมโครพลาสติกที่มีการผลิตเป็นพลาสติกขนาดเล็กมาตั้งแต่ต้นเช่นเม็ดพลาสติกที่นำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นของการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติก เช่น พลาสติกเอทิลีนโพรพิลีน โพลีสไตรีน เป็นต้น หรือไมโครบีคที่ใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางและเวชภัณฑ์โดยมากพบการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกดังกล่าวจากการทิ้งของเสียโดยตรงจากบ้านเรือนลงสู่แหล่งน้ำเสียชุมชน

2) Secondary microplastic หมายถึง ไมโครพลาสติกที่เกิดจากพลาสติกขนาดใหญ่ซึ่งสะสมในสิ่งแวดล้อมเป็นเวลานาน เกิดการย่อยสลาย แตกหักกลายเป็นอนุภาคหรือชิ้นส่วนขนาดเล็กในสิ่งแวดล้อม (สุทธิรัตน์ กิตติพงษ์วิเศษ และ คณะ,2019)

ตารางที่ 2.4 จำแนกประเภทไมโครพลาสติกตามรูปร่าง

ประเภท	ลักษณะและผลิตภัณฑ์
เศษชิ้นส่วน (Fragments)	พลาสติกแข็งผิวหยาบแตกมาจากวัสดุขนาดใหญ่ เช่น ขวดพลาสติก
เส้นหรือเส้นใย (Fibers)	พลาสติกบางเรียวยาวจากอวนประมงเสื้อผ้า หรือสิ่งทอ
ทรงกลม (Beads)	พลาสติกแข็งรูปกลม เช่น เม็ดไมโครบีคส์ในผลิตภัณฑ์ดูแลผิว
ฟิล์ม (Films)	พลาสติกบางแบนจากถุงพลาสติก หรือวัสดุห่อหุ้ม

โฟม (Foams)	พลาสติกน้ำหนักรเบา เช่น เศษโฟมกันกระแทกหรือโฟมบรรจุอาหาร
-------------	--



รูปที่ 2.1 a) fragments; b) beads; c) films; d) foams; e) fibers.

(ที่มา : (Amirhosseini et al., 2023))

2.2 ผลกระทบของไมโครพลาสติกต่อสิ่งแวดล้อม

ในปัจจุบัน ปัญหาขยะพลาสติกเป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ ประเทศไทยถูกจัดว่าเป็นแหล่งสำคัญของปัญหาขยะพลาสติกลำดับต้น ๆ ของโลก เนื่องจากการใช้พลาสติกทดแทนผลิตภัณฑ์อื่นมากขึ้น ซึ่งคุณสมบัติของพลาสติกมีความยืดหยุ่นสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายรูปแบบ เช่น ถังพลาสติกหิ้ว แก้วพลาสติก นอกจากนี้การทิ้งขยะพลาสติกที่ไม่ถูกต้อง ก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันตามท่อระบายน้ำในเมือง ปัญหาขยะลอยบนแม่น้ำ บางส่วนลงสู่ทะเล ก่อให้เกิดปัญหาเศษขยะพลาสติกและเกิดการลดขนาดจนกลายเป็นไมโครพลาสติกที่ปนเปื้อนและสะสมเข้าสู่สิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นทุกปี (ผลกระทบไมโครพลาสติกต่อสิ่งแวดล้อม, n.d.)

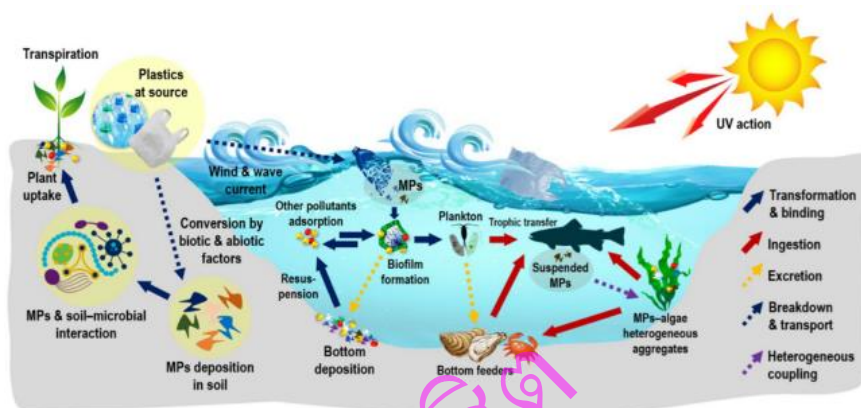
ไมโครพลาสติกถูกตรวจพบในทุกองค์ประกอบของสิ่งแวดล้อม ทั้งในน้ำผิวดินหรือแหล่งน้ำตามธรรมชาติ ชายหาดทะเล มหาสมุทรลึก น้ำแข็งบริเวณขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้ รวมถึงในแหล่งน้ำจืด ดิน อาหาร และน้ำดื่ม (WHO, 2019) การตรวจพบดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าไมโครพลาสติกมีการ

แพร่กระจายอย่างกว้างขวางในระบบนิเวศ เป็นผลมาจากการที่ขยะพลาสติกไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ (Kankanige, n.d.)

2.2.1 ผลกระทบของไมโครพลาสติกต่อระบบนิเวศทางน้ำ

ไมโครพลาสติกก่อให้เกิดผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อระบบนิเวศทางน้ำ ตั้งแต่แพลงก์ตอนซึ่งเป็นฐานสำคัญของห่วงโซ่อาหารไปจนถึงสัตว์น้ำขนาดใหญ่ เนื่องจากอนุภาคไมโครพลาสติกมักถูกสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศทางน้ำเข้าใจผิดว่าเป็นแหล่งอาหาร ส่งผลให้เกิดการบริโภคและการสะสมภายในร่างกาย ผ่านกระบวนการสะสมสารพิษเพิ่มขึ้นตามลำดับห่วงโซ่อาหาร (biomagnification) ไมโครพลาสติกจึงสามารถส่งผลกระทบอย่างรุนแรงต่อการเจริญเติบโต อัตราการรอดชีวิต ความสามารถในการสืบพันธุ์ และพฤติกรรมของสิ่งมีชีวิตในน้ำ ซึ่งอาจทำให้มีผลกระทบต่อความสมดุลของระบบนิเวศในระยะยาว (Hasan Anik et al., 2021; Ziani et al., 2023)

พลาสติกยังเข้าสู่ทะเลผ่านกระบวนการต่าง ๆ เช่น การระบายน้ำเสีย การปล่อยน้ำเสียจากเรือ และกิจกรรมการเดินเรือ โดยเฉพาะกิจกรรมประมง เนื่องจากการใช้วัสดุพลาสติกในอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น เชือก แห อวน และกระชัง อนุภาคพลาสติกจากการเสียดสีของอุปกรณ์เหล่านี้ก่อให้เกิดไมโครไฟเบอร์ในน้ำ ไมโครพลาสติกยังสามารถปกคลุมและกดทับสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่บริเวณพื้นทะเล เช่น ปะการังและหอย ทำให้การเจริญเติบโตและการพัฒนาการของพวกมันหยุดชะงัก นอกจากนี้ไมโครพลาสติกยังสามารถดูดซับสารพิษที่มีอยู่ในน้ำทะเล เช่น โลหะหนักชนิดเป็นพิษ และนำพาสารเหล่านี้เข้าสู่สิ่งมีชีวิต ทำให้เกิดผลกระทบต่อทั้งสัตว์น้ำและมนุษย์ที่บริโภคอาหารทะเลเหล่านั้น (Yarahmadi et al., 2024)



รูปที่ 2.2 การสะสมทางชีวภาพและผลกระทบ MPs ต่อสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศทางบกและทางน้ำ
(ที่มา : Pal et al., Microplastics in Aquatic Systems, 2025)

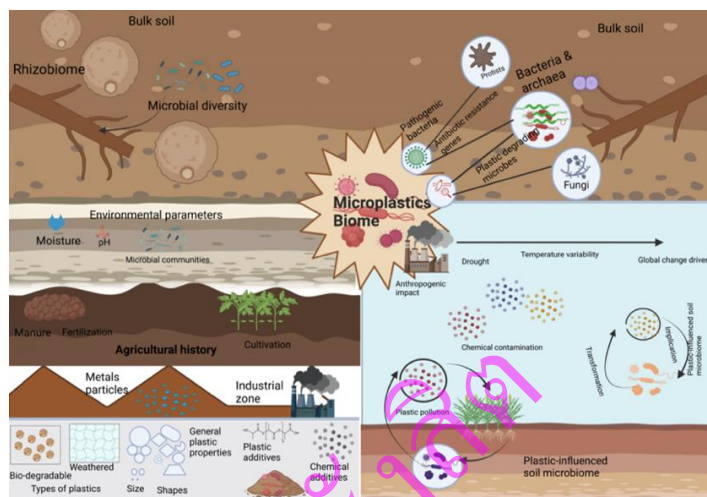
2.2.2 ผลกระทบของไมโครพลาสติกต่อระบบนิเวศทางบก

ไมโครพลาสติกส่งผลกระทบหลากหลายต่อดิน เช่น การลดลงของความอุดมสมบูรณ์ของดิน ดินยังทำหน้าที่เป็นส่วนหนึ่งของสิ่งแวดล้อมโดยรวม สัตว์ของอนุภาคในดินได้รับผลกระทบจากการที่ไมโครพลาสติกผสมเข้าไปในดิน ซึ่งมีผลเสียต่อวงจรไนโตรเจน การถ่ายเทธาตุอาหาร และการบ่อนอินทรีย์ในดิน (Soil Organic Carbon: SOC) มีการพบว่าการสังเคราะห์สารเคมีระเหย เช่น dodecanal หลังจากการย่อยสลายไมโครพลาสติกโดยแบคทีเรียในดิน นอกจากนี้ ไมโครพลาสติกยังทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำในดินน้อยลง ซึ่งส่งผลชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นของไมโครพลาสติกสูงขึ้น ประเภทของ MPs ที่ดูดซับอยู่บนผิวดินยังส่งผลต่อโครงสร้างของ SOC อีกด้วย (Ullah et al., 2025) ไมโครพลาสติกสามารถตกค้างในดินเป็นเวลานาน โดยในสภาพแวดล้อมใต้ดินที่มีการส่องแสงน้อยและมีปริมาณออกซิเจนต่ำ พลาสติกสามารถคงอยู่ได้นานกว่า 100 ปี ทำให้ ไมโครพลาสติกสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินโดยลดความสามารถในการอุ้มน้ำและรบกวนการหมุนเวียนของธาตุอาหาร (Ziani et al., 2023)

การศึกษาหลายฉบับพบว่า ไมโครพลาสติกสามารถเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของชุมชนจุลินทรีย์ในดิน และลดกิจกรรมของเอนไซม์ที่มีบทบาทในวัฏจักรคาร์บอนและไนโตรเจน นอกจากนี้ ไมโครพลาสติกยังสามารถเป็นพื้นผิวสำหรับการก่อตัวของไบโอฟิล์ม ซึ่งอาจเพิ่มความหลากหลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์ได้ในบางกรณี อย่างไรก็ตาม ผลกระทบของไมโครพลาสติกต่อการทำงานของ

จุลินทรีย์ยังขึ้นอยู่กับชนิด ความเข้มข้น และบริบททางสิ่งแวดล้อมการศึกษาพบว่า เมื่อเติม low-density polyethylene (LDPE) ที่ความเข้มข้น 3% เข้าไปในดิน อัตราการหายใจของดินเพิ่มขึ้นถึง 8 เท่า และมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของแบคทีเรียบางกลุ่ม เช่น Burkholderiaceae, Babeliaceae และ Paracaedibacteraceae

การแพร่กระจายและการเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร ไมโครพลาสติกในดินสามารถแพร่กระจายในดิน โดยอาศัยการทำงานของสัตว์ในดิน เช่น ไส้เดือนดิน และแมลงขนาดเล็กในกลุ่ม Collembola (*Proisotoma minuta* และ *Folsomia candida*) ซึ่งมีบทบาทในการพาไมโครพลาสติกไปยังชั้นดินลึกและกระจายไปในบริเวณกว้าง อีกทั้งยังมีการตรวจพบไมโครพลาสติกในสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ เช่น ไส้เดือน หอยทาก และไส้เดือนฝอย (*Caenorhabditis elegans*) ซึ่งสะท้อนถึงการเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารภาคพื้นดิน ผลกระทบต่อวัฏจักรธาตุและการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ไมโครพลาสติกที่สะสมในดินมีผลต่อวัฏจักรคาร์บอน (C) และไนโตรเจน (N) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของก๊าซเรือนกระจก เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂), มีเทน (CH₄) และไนตรัสออกไซด์ (N₂O) เมื่อไมโครพลาสติกเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของชุมชนจุลินทรีย์ในดิน มันส่งผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุและกระบวนการหมุนเวียนธาตุอาหาร เช่น จุลินทรีย์บางชนิดมีบทบาทในการปลดปล่อย CO₂ ผ่านการหายใจของดิน (soil respiration) หรือในกระบวนการเปลี่ยนไนโตรเจนในดิน ไมโครพลาสติกเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดิน ซึ่งมีผลต่อความสมดุลของธาตุอาหารที่จุลินทรีย์ใช้ ความเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลให้กิจกรรมจุลินทรีย์เปลี่ยนไป ซึ่งอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากขึ้นหรือน้อยลง ขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์และสภาพแวดล้อม (Ullah et al., 2025)



รูปที่ 2.3 การตอบสนองของ MP ในดินต่อความเครียดจากสิ่งแวดล้อมและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและผลกระทบต่อไบโอมในดินและจุลินทรีย์
(ที่มา : Ullah et al., Toxicological Complexity of Microplastics in Terrestrial Ecosystems, 2023)

2.3 ผลกระทบของไมโครพลาสติกต่อสิ่งมีชีวิต

2.3.1 เกณฑ์จลนศาสตร์ของไมโครพลาสติกในร่างกายมนุษย์

ไมโครพลาสติก (<5 มม.) เป็นสารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมที่แพร่หลาย พบได้ในน้ำ (Shen et al., 2021), อากาศ (Liao et al., 2021), และอาหาร (EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM), 2016) และด้วยเหตุนี้จึงไม่น่าแปลกใจที่มนุษย์จะสัมผัสกับไมโครพลาสติก ไมโครพลาสติกสามารถถูกผลิตขึ้นโดยตรงเพื่อวัตถุประสงค์ทางเทคนิค (primary) เช่น การใช้เป็นสารขั้วในผลิตภัณฑ์ดูแลส่วนบุคคล หรือเกิดจากการแตกสลายของพลาสติกขนาดใหญ่ (secondary) เช่น พลาสติกที่ถูกทิ้งเป็นขยะ (Andrady, 2017) หลังจากถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ไมโครพลาสติกสามารถเคลื่อนที่ระหว่างสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น จากแผ่นดินสู่ทะเล และจากทะเลสู่อากาศ และสามารถถูกขนส่งไปยังสถานที่ห่างไกลโดยไม่มีแรงกดดันจากกิจกรรมมนุษย์โดยตรง (Horton & Dixon, 2018; Surendran et al., 2023; Wang et al., 2022) วัสดุพลาสติกทุกชนิด รวมถึงสิ่งทอสังเคราะห์ มีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดไมโครพลาสติกทุกชนิดที่แพร่กระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อม (Wang et al., 2021) ตัวอย่างเช่น การสะสมของเส้นใยระหว่างมื้ออาหารอาจนำไปสู่การได้รับไมโครพลาสติกในปริมาณสูงกว่าการบริโภคหอยแมลงภู่

(สูงถึง 68,415 เทียบกับ 4,620 อนุภาคต่อปีต่อคน) (Catarino et al., 2018) การบริโภคน้ำและอาหารทะเล ทำให้มีการประมาณการได้รับทางปากอยู่ที่ 34,254 อนุภาคต่อปีต่อคน (Rubio-Armendáriz et al., 2022) นอกจากนี้ การบริโภคผลิตภัณฑ์จากสัตว์บกอาจส่งผลให้สัมผัสไมโครพลาสติกสูงถึง 15,381 อนุภาคต่อวันต่อคน (~5,614,065 อนุภาคต่อปีต่อคน) (Prata & Dias-Pereira, 2023) การสัมผัสทางอากาศในประเทศจีนได้รับการประมาณการไว้ที่ 3,360 อนุภาคต่อวันต่อคน (~1,226,400 อนุภาคต่อปีต่อคน) (Liao et al., 2021) ดังนั้น ประชากรส่วนใหญ่จึงสัมผัสไมโครพลาสติกจากสิ่งแวดล้อม

การสัมผัสไมโครพลาสติกจากอาชีพพบได้ไม่บ่อยนัก โดยมักพบในคนงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับวัสดุพลาสติกหรือสิ่งทอ ซึ่งนำไปสู่การสัมผัสในระยะยาวกับความเข้มข้นของไมโครพลาสติกในอากาศที่สูง (เนื่องจากขาดมาตรการป้องกันที่มีประสิทธิภาพ) และก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ เช่น โรคทางเดินหายใจและโรคปอด (Prata, 2018) ผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์จากการสัมผัสไมโครพลาสติกในสิ่งแวดล้อมยังไม่เป็นที่เข้าใจอย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ ไมโครพลาสติกเป็นส่วนผสมของอนุภาคที่มีความหลากหลายสูง ซึ่งขัดขวางการประเมินความเป็นพิษ โดยแต่ละอนุภาคมีลักษณะเฉพาะตัว เช่น ประเภทของพอลิเมอร์ องค์ประกอบทางเคมี (เช่น สารเติมแต่ง) รูปแบบการเสื่อมสภาพ สี ขนาด รูปร่าง และสารที่ดูดซับ เช่น การฟาวลิงของจุลินทรีย์และสารปนเปื้อน (Koelmans et al., 2020)

มีการตรวจพบไมโครพลาสติกในเนื้อเยื่อและสิ่งขับถ่ายของมนุษย์ รวมถึงในปอด ทางเดินหายใจ ตับ ม้าม รก ลำไส้ใหญ่ เลือด และอูจจาระ อย่างไรก็ตาม ความเข้าใจของเราว่าด้วยชะตากรรมและผลกระทบของไมโครพลาสติกในร่างกายมนุษย์ยังมีอยู่อย่างจำกัด เพื่อให้เข้าใจผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์จากไมโครพลาสติก จำเป็นต้องทำความเข้าใจก่อนเกี่ยวกับเภสัชจลนศาสตร์ คือ การเคลื่อนที่ของอนุภาคในร่างกาย และจากนั้นจึงศึกษาทางเภสัชพลศาสตร์ คือ ผลกระทบและการตอบสนองในเนื้อเยื่อเป้าหมาย จนถึงขณะนี้ เท่าที่ผู้เขียนทราบ ยังไม่มีการรวบรวมข้อมูลการดูดซึม การกระจายตัว การเผาผลาญ และการขับถ่าย (ADME) ของไมโครพลาสติกในร่างกายมนุษย์อย่างครบถ้วน หลักฐานเกี่ยวกับการกำจัดและการย่อยสลายในร่างกายมนุษย์ยังเป็นช่องว่างที่สำคัญขององค์ความรู้ (Science Advice for Policy by European Academies, 2019) เช่นเดียวกับข้อมูลเกี่ยวกับขนาดอนุภาคที่สามารถเข้าสู่เซลล์ได้

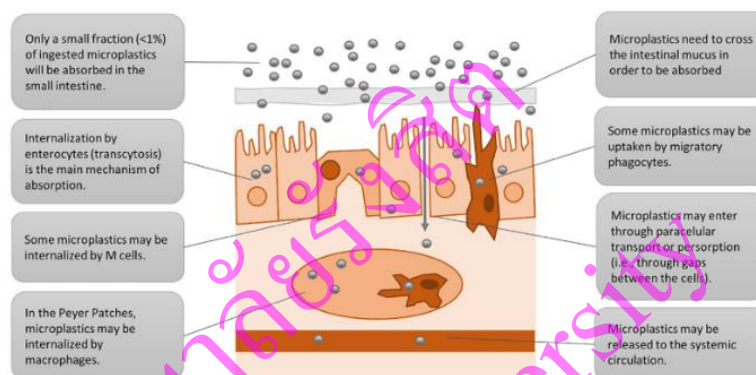
มีเพียงไม่กี่การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับเภสัชจลนศาสตร์ของไมโครพลาสติกในร่างกายมนุษย์ เมื่อทำการสืบค้นด้วยคำว่า microplastics AND human AND pharmacokinetics ในเดือนมกราคม 2023 พบเอกสารเพียง 4 รายการในฐานข้อมูล Web of Science (ซึ่งมีเพียง 3 รายการที่เกี่ยวข้อง) และ 9 รายการใน

Scopus (ซึ่งรวมถึง 3 รายการก่อนหน้านี้) หนึ่งการศึกษาในหนูไม่สามารถระบุเภสัชจลนศาสตร์ของโพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (PTFE) ขนาด 5 ไมโครเมตรและ 10–50 ไมโครเมตรได้ เนื่องจากความเข้มข้นในพลาสมาต่ำกว่าขีดจำกัดการตรวจจับของการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโทรสโกปี และการสัมผัสเรื้อรังไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้มีการประมาณค่าระดับผลกระทบที่ไม่พบ (NOAEL) >2000 มก./กก. (Lee et al., 2022) ในทางตรงกันข้าม การศึกษาอีกฉบับหนึ่งในหนูพบว่า ไมโครพลาสติกพอลิสไตรีน-ดีเฟอโรซามีนที่มีขนาด 20 นาโนเมตร, 220 นาโนเมตร, 1 ไมโครเมตร, และ 6 ไมโครเมตร ตกค้างอยู่ในระบบทางเดินอาหารเป็นหลัก โดยมีการดูดซึมเข้าสู่ร่างกายในระดับต่ำมาก (0.10–0.36%) โดยส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับถุงน้ำดี (Keinänen et al., 2021)

ในทางตรงข้าม การสัมผัสหนูด้วยพอลิสไตรีนขนาด 5 ไมโครเมตรและ 20 ไมโครเมตรเป็นเวลา 4 สัปดาห์ ทำให้พบการสะสมในตับ ไต และลำไส้ (สูงถึง 1.4 มก./กรัม) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอนุภาคขนาดเล็ก และทำให้เกิดการขาดพลังงาน, การรบกวนการเผาผลาญไขมัน, ความเครียดออกซิเดชันที่เพิ่มขึ้น, และการเพิ่มขึ้นของกิจกรรมอะซิติลโคลีนสเตอเรสในตับ (Deng et al., 2017) การสัมผัสทางการหายใจด้วยพอลิสไตรีนขนาด 0.10 ไมโครเมตรเป็นเวลา 14 วันในหนู พบว่าทำให้เกิดการแสดงออกของโปรตีนการอักเสบ (เช่น TNF- α), การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการหายใจ (เช่น เวลาหายใจเข้าเพิ่มขึ้น) และน้ำหนักหัวใจเพิ่มขึ้น แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงในอวัยวะภายในอื่น ๆ (Lim et al., 2021)

บทวิจารณ์เกี่ยวกับพิษต่อระบบประสาทของไมโครพลาสติกสรุปว่าไมโครพลาสติก โดยเฉพาะนาโนพลาสติก สามารถข้ามกำแพงกั้นเลือด-สมอง (blood-brain-barrier) และเข้าสู่สมองได้ ซึ่งสามารถยับยั้งกิจกรรมของอะซิติลโคลีนสเตอเรส, เพิ่มความเครียดออกซิเดชัน, เปลี่ยนระดับสารสื่อประสาท และเปลี่ยนพฤติกรรม (Prüst et al., 2020) ท้ายที่สุดมีการประมาณการบริโภคไมโครพลาสติกในมนุษย์เฉลี่ยที่ 553 อนุภาคต่อคนต่อวัน (184 นาโนกรัมต่อคนต่อวัน) โดยอิงจากแบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์ที่ปรับปรุงแล้ว (Mohamed et al., 2021) อาจมีการศึกษาอื่น ๆ ที่สามารถพบได้โดยการค้นหาด้วยคำหลักที่เกี่ยวข้องและเฉพาะเจาะจงยิ่งขึ้น (เช่น การดูดซึมและการนำเข้า) อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการศึกษาใดที่กล่าวถึงเภสัชจลนศาสตร์ของไมโครพลาสติกในร่างกายมนุษย์อย่างครบถ้วน ตั้งแต่การดูดซึมจนถึงการขับถ่าย การดูดซึมการนำไมโครพลาสติกเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ โดยเส้นทางหลักของการสัมผัสไมโครพลาสติกในมนุษย์ประกอบด้วยการรับประทาน การสูดดม และการสัมผัสทางผิวหนัง ระบบย่อยอาหารมีความสำคัญต่อการย่อยและการดูดซึมสารอาหารและอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในลำไส้เล็ก ลำไส้เล็กอาจมีบทบาทสำคัญในการดูดซึมไมโครพลาสติกด้วยเช่นกัน การสัมผัส

ของไมโครพลาสติกกับเยื่อเมือกในลำไส้ขึ้นอยู่กับความสามารถของอนุภาคในการข้ามเยื่อเมือกในลำไส้ ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้โดยการสร้างโคโรนา (corona) ของสารอินทรีย์หรือเนื้อหาภายในลำไส้ (Powell et al., 2007) หรือเนื่องจากขนาดของอนุภาคที่มีขนาดเล็ก (Szentkuti, 1997) หลังจากข้ามเยื่อเมือกในลำไส้ อนุภาคจะสัมผัสกับเยื่อผิวของลำไส้ และถูกนำเข้าสู่เซลล์โดยผ่านกลไกต่าง ๆ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.4 กลไกการดูดซึมไมโครพลาสติกในลำไส้เล็ก

(ที่มา : Prata, Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2023)

(1) ทรานไซโทซิส คือ การดูดซึมและการลำเลียงอนุภาคนขนาดเล็กโดยเอนเทอโรไซต์ (2) การดูดกลืนโดยเซลล์ M เช่น ไมโครพินไซโทซิส (micropinocytosis), ฟาโกไซโทซิส (phagocytosis) และการเอนโดไซโทซิสแบบมีตัวรับเป็นสื่อกลาง (receptor-mediated endocytosis) หรือโดยเซลล์อื่นๆ ในเยื่อเมือกของลำไส้ที่อยู่ติดกับแผ่นเพเยอร์ (Peyer's patches) (3) การขนส่งผ่านช่องว่างระหว่างเซลล์ (paracellular transport) ผ่านช่องว่างระหว่างเซลล์ โดยขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความเข้มข้นและขนาดของอนุภาค ซึ่งการขนส่งนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อความสมบูรณ์ของ tight junction ถูกทำลาย (4) การแทรกซึมผ่านช่องว่างในวิลไล (persorption) ระหว่างการผลัดเปลี่ยนเซลล์ (desquamation zones) การเปิดของ tight junction ระหว่างการเคลื่อนที่ของแมโครฟาจ หรือความเสียหายของเยื่อผิว (เช่น การกัดเซาะและการเกิดแผล) สำหรับอนุภาคนขนาดใหญ่ (เช่น 7–70 μm) (5) การดูดซึมโดยแมโครฟาจที่เคลื่อนที่ได้ เช่น แมโครฟาจในลำไส้และเดนไดรติกเซลล์โดยตรงจากลูเมนของลำไส้ (Delon et al., 2022).

แผ่นเพเยอร์ (Peyer's patches; PP) ซึ่งเป็นกลุ่มของรุ่มขุมชนลิมโฟอิดในลำไส้ ได้รับการศึกษาในฐานะเส้นทางหลักในการดูดซึมอนุภาค แม้ว่าเซลล์ M ซึ่งเป็นเซลล์เยื่อบุเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับ PP เคยถูกพิจารณาว่าเป็นเส้นทางหลักของการดูดซึม แต่ในปัจจุบันได้มีการมองว่าเซลล์ M มีบทบาทน้อยลง (เช่น สัตว์บางชนิดที่มีเซลล์ M จำนวนมากกลับไม่พบการดูดซึมอนุภาคเพิ่มขึ้น) โดยเฉพาะสำหรับอนุภาคขนาดเล็ก ($<1 \mu\text{m}$) เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซึมโดยเอนเทอโรไซต์ในเยื่อบุลำไส้ที่อยู่ติดกับ PP (Delon et al., 2022) ในความเป็นจริง อนุภาคสังเคราะห์มักพบเฉพาะในวิลไลรอบๆ PP เท่านั้น ซึ่งอาจได้รับการกระตุ้นจากการผลิต IgA (LeFevre et al., 1978) ส่งผลให้เซลล์เยื่อบุดูดซึมอนุภาคผ่านกระบวนการเอนโดโซโทซิส ดังที่สังเกตได้จากการพบอนุภาคภายในถุงเวสิเคิล (Jani et al., 2011)

อนุภาคที่เข้าสู่ PP จะถูกแมคโครฟาจจับไว้ จากนั้นสามารถเคลื่อนย้ายไปยังน้ำเหลืองและต่อมน้ำเหลืองเมเซนเทอริก หรือเข้าสู่การไหลเวียนโลหิตโดยตรงข้ามตับ (LeFevre et al., 1978) หรือถูกนำผ่านเลือดจากหลอดเลือดดำเข้าสู่ตับ แล้วจึงเข้าสู่การไหลเวียนโลหิตทั่วร่างกาย ไปถึงและถูกกักเก็บที่ปอด และท้ายที่สุดถูกขับออกผ่านกระบวนการ mucociliary transport โดยแมคโครฟาจในปอด (LeFevre et al., 1980) เส้นทางเข้าสู่ร่างกายอื่นๆ ได้แก่ การดูดซึมโดยแมคโครฟาจในเยื่อบุผิวของกระเพาะอาหาร (Jani et al., 1992) และการเคลื่อนย้ายผ่านช่องว่างระหว่างเซลล์ของเยื่อบุผิวเข้าสู่ lamina propria แล้วเข้าสู่ระบบน้ำเหลือง (Sanders & Ashworth, 1961)

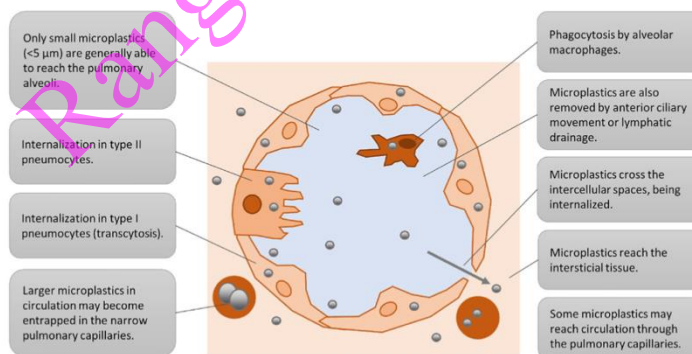
ในทางตรงข้าม ไมโครพลาสต์ิกอาจถูกกำจัดออกจาก PP โดยแมคโครฟาจที่ย้ายไปยังวิลไลใกล้เคียงและปล่อยอนุภาคกลับเข้าสู่ลูเมนของลำไส้ (LeFevre et al., 1978) หรือจากการผลิตเซลล์เยื่อบุลำไส้ได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งช่วยกำจัดอนุภาคที่อยู่ภายในเซลล์ได้ด้วย (Stock et al., 2019) อย่างไรก็ตาม มีการประมาณการว่าการดูดซึมไมโครพลาสต์ิกในลำไส้อยู่ที่ประมาณ 0.1–1% สำหรับพอลิสไตรีนที่มีขนาด $\leq 20 \mu\text{m}$ (Carr et al., 1996) ดังนั้น ไมโครพลาสต์ิกจากสิ่งแวดล้อมที่สัมผัสจริงจะมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่ถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย ลักษณะของอนุภาค เช่น ขนาด, ประจุผิว, และสมบัติการชอบน้ำมัน มีอิทธิพลต่อการดูดซึมและการเคลื่อนย้ายอย่างมีนัยสำคัญ โดยไมโครสเฟียร์ที่มีความชอบน้ำมันจะถูกดูดซึมได้ดีกว่า (Eldridge et al., 1990) และอนุภาคขนาดเล็กจะถูกดูดซึมเร็วกว่า เช่น พอลิสไตรีนขนาด $0.05 \mu\text{m}$ สามารถพบในเมเซนเทอริกของหนูภายในเวลา 6 ชั่วโมง ในขณะที่ขนาด $1 \mu\text{m}$ ใช้เวลา 12 ชั่วโมง (Jani et al., 1992) ในหนู อนุภาคที่พบใน PP (เช่น พอลิเมทิลเมทาคริเลตและพอลิสไตรีน) มักมีขนาด $\leq 10 \mu\text{m}$ ขณะที่อนุภาคที่ถูกกลืนไปยังม้ามหรือต่อมน้ำเหลืองเมเซนเทอริกผ่านทางแมคโครฟาจจะมีขนาด $<5 \mu\text{m}$ (Eldridge et al., 1990) เนื่องจากอนุภาคที่ใหญ่กว่ามักติดอยู่และไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ (Jani et al., 1992) ตัวอย่างเช่น ไมโครพลาสต์ิกขนาด $15.8 \mu\text{m}$ ของสไตรีน-ไดวินิลเบน

จีน (เทียบกับขนาด 5.7 μm) (LeFevre et al., 1980) และพอลิสไตรีนขนาด 10 และ 20 μm (เทียบกับ 2 μm) (Carr et al., 1996) พบได้ยากในเยื่อลำไส้ของหนูและหนูเมาส์ตามลำดับ และไม่พบในต่อมน้ำเหลืองที่เกี่ยวข้องยังคงมีข้อโต้แย้งเกี่ยวกับการดูดซึมไมโครพลาสติกขนาดใหญ่ โดยขนาดจำกัดโดยทั่วไปจะอยู่ที่ 150 μm (EFSA, 2019; FAO, 2017) หรือ 20 μm สำหรับการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เข้าสู่การไหลเวียนเลือดแล้วไปยังเนื้อเยื่อระหว่างหลอดเลือด (FAO, 2017) แม้ว่ากลไกที่เกี่ยวข้องกับ PP อาจจำกัดเฉพาะอนุภาคขนาดเล็กกว่า (เช่น $\leq 10 \mu\text{m}$) แต่การดูดซึมอนุภาคขนาดใหญ่ในลำไส้อาจเกิดได้ผ่านกลไกอื่น เช่น การแทรกซึม (persorption) หรือการดูดซึมโดยแมคโครฟาจที่เคลื่อนที่ได้ไปลิโวนิลคลอไรด์ขนาด 5–110 μm ก็ถูกดูดซึมอย่างรวดเร็วในลำไส้ของสุนัขเช่นกัน โดยมีขนาดที่พบมากที่สุดที่ 30 μm (Volkheimer, 1975)

พารามิเตอร์ทางเรขาคณิต ก็มีความสำคัญต่อการดูดซึมของอนุภาคด้วย โดยมีผลต่อการพันเยื่อหุ้มเซลล์ระหว่างการเอนโดไซโทซิส ซึ่งรูปทรงกลมสามารถถูกดูดซึมได้ง่ายกว่า กล่าวคือ ใช้พลังงานน้อยกว่า (Dasgupta et al., 2014) ปัจจุบันนี้อาจอธิบายได้ว่าเหตุใดอนุภาคทรงกลมจึงเป็นรูปทรงที่พบมากที่สุดภายในเนื้อเยื่อภายในของสุนัขและแมวที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งสงสัยว่าเป็นไมโครพลาสติก นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดจากกล้องจุลทรรศน์แสง (Prata et al., 2022) การดูดซึมอาจได้รับอิทธิพลจากลักษณะของแต่ละบุคคล เช่น อายุหรือสุขภาพ ตัวอย่างเช่น หนูแก่พบว่ามีอนุภาคพอลิสไตรีนขนาด 1.8 μm ในแผ่นเพอร์และต่อมน้ำเหลืองเมเซนเทอริกมากกว่าหนูที่อายุน้อย ซึ่งอาจเกิดจากการเคลื่อนที่ของอาหารในลำไส้ที่ช้าลง ทำให้เพิ่มระยะเวลาสัมผัสหรือการขจัดอนุภาคที่ช้าลง (LeFevre et al., 1989) ขณะที่ความสามารถในการดูดซึม (bioavailability) ของไมโครพลาสติกอาจเพิ่มขึ้นในภาวะเจ็บป่วยที่มีความสามารถในการซึมผ่านของเยื่อบุผิวเพิ่มขึ้น เช่น โรคลำไส้อักเสบ (inflammatory bowel disease, IBM) (Stock et al., 2019) ในความเป็นจริง พบว่าในผู้ป่วย IBM มีความเข้มข้นของไมโครพลาสติกในอุจจาระสูงกว่าผู้ที่มีสุขภาพดี (Yan et al., 2022) อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ระหว่าง IBM กับความเข้มข้นของไมโครพลาสติกที่สูงขึ้นในอุจจาระยังไม่ได้รับการชี้แจงอย่างชัดเจนการป้อนไมโครพลาสติกทางปากส่งผลให้เกิดการดูดซึมจากขนาดเริ่มต้นในอัตรา 0.10–0.36% สำหรับพอลิสไตรีนขนาด 0.2, 1, 6 μm ในหนู (Keinänen et al., 2021) หรือ 0.2–1.7% สำหรับพอลิสไตรีนขนาด 0.05 μm ในหนู (Walczak et al., 2015)

เส้นทางการได้รับไมโครพลาสติกอีกทางหนึ่งคือผ่านการสูดดมอากาศที่ปนเปื้อน ในการสัมผัสทางเดินหายใจ ไมโครพลาสติกจะถูกกำจัดออกจากอากาศในทางเดินหายใจเบื้องต้นด้วยกลไกต่างๆ ได้แก่ การกระแทก (impaction), การสกัดกั้น (interception) และการตกตะกอน (sedimentation) โดย

การสะสมที่ถุงลมจะเกิดขึ้นเป็นหลักสำหรับอนุภาคที่มีขนาด $<5\ \mu\text{m}$ และน้อยลงสำหรับอนุภาคขนาดใหญ่กว่า (เพียง 0.5–5%) (Snipes et al., 1984) ตัวอย่างเช่น พอลิสไตรีนขนาด $2.5\text{--}5.0\ \mu\text{m}$ ที่ถูกสูดเข้าไปมีเพียง 30.6–53.6% เท่านั้นที่ไปถึงบริเวณถุงลมของผู้หญิง โดยค่าต่ำสุดเกิดกับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า (Pritchard et al., 1988) คำนี้อยู่ที่ 34–52% สำหรับพอลิสไตรีนขนาด $3.3\ \mu\text{m}$ ในลูกวัว (Jones & Bull, 1987) ในทางตรงข้าม พบเพียง 1.4% และ 0.6% ของพอลิสไตรีนขนาด $3\ \mu\text{m}$ ที่สูดเข้าไปในถุงลมของหนูและหนูตะเภาตามลำดับ และไม่พบพอลิสไตรีนขนาด 9 และ $15\ \mu\text{m}$ เลย (Snipes et al., 1988) ความแตกต่างดังกล่าวอาจเกิดจากความแตกต่างระหว่างสายพันธุ์ (interspecies variation), คุณลักษณะของอนุภาค เช่น การเติมหมู่ฟังก์ชันที่ผิว, หรือเงื่อนไขของการสัมผัส เช่น อุปกรณ์การสูดดมและระยะเวลาในการสัมผัส ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความแปรปรวนของผลลัพธ์ที่อาจเกิดขึ้นภายใต้การสัมผัสในสภาพแวดล้อมจริง อนุภาคในทางเดินหายใจจะถูกกำจัดโดยกระบวนการ mucociliary transport คือการเคลื่อนไหวของเมือกในระบบทางเดินหายใจไปยังคอหอยเพื่อนำไปกลืน โดยขับเคลื่อนด้วยการตีของซิเลีย (cilia) ตัวอย่างเช่น การหยุดพอลิสไตรีนขนาด $3\ \mu\text{m}$ ทางจมูกในสุนัข พบว่ามีการกำจัดอนุภาคออกไปถึง 90% ภายใน 3 วัน โดยออกทางอุจจาระ และเหลือเพียง 0.1% อยู่ในโพรงจมูกหลังจากผ่านไป 30 วัน (Whaley et al., 1986) ในทางกลับกัน หนูและหนูตะเภาที่สามารถกำจัดพอลิสไตรีนขนาด 3, 9 และ $15\ \mu\text{m}$ ที่สะสมในทางเดินหายใจส่วนหัวได้ภายในเวลาเพียง 1 ชั่วโมง (Snipes et al., 1988) นอกจากนี้ ควรพิจารณาว่า หลอดลมฝอยของมนุษย์ (bronchioles) มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ $\sim 500\ \mu\text{m}$ (Horsfield et al., 1971)



รูปที่ 2.5 กลไกการดูดซึมของไมโครพลาสติกในบริเวณถุงลมของปอด

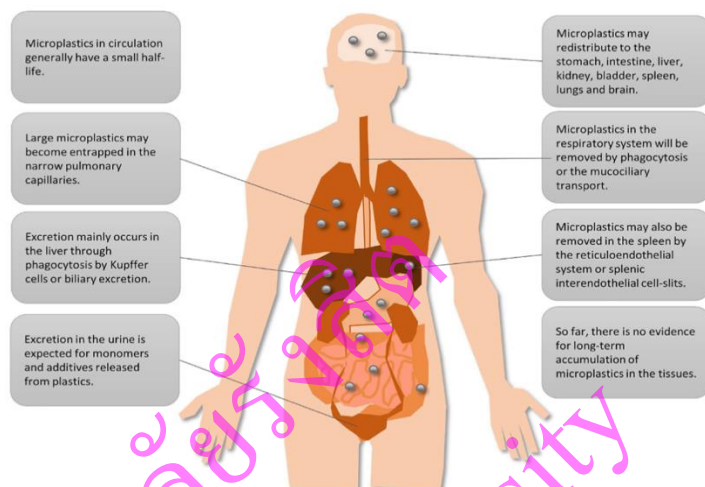
(ที่มา : Prata, Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2023)

อนุภาคขนาดใหญ่ไม่สามารถเข้าสู่ถุงลมได้ง่าย เนื่องจากติดขัดในกระบวนการกรองก่อนถึงถุงลม อย่างไรก็ตาม เส้นใยไมโครพลาสต์สามารถแทรกซึมได้มากกว่า ขึ้นอยู่กับทิศทางการวางตัวของเส้นใย (Donaldson & Tran, 2002) แม้ไมโครพลาสต์ที่มีขนาดใหญ่กว่า 5 μm จะเข้าสู่ถุงลมได้ยากจากการสูดอากาศโดยตรง แต่กลับพบว่าไมโครพลาสต์ขนาดใหญ่สามารถตรวจพบในปอดได้จากการติดตามของอนุภาคในเส้นเลือดฝอยของปอดซึ่งมีขนาดแคบ (Slack et al., 1981) โดยพบว่าไมโครพลาสต์ที่ตรวจพบในชั้นเนื้อปอดมนุษย์มีขนาด $<5.5 \mu\text{m}$ ขณะที่เส้นใยมีขนาด 8.1–16.8 μm (Amato-Lourenço et al., 2021) ในสุนัขพบว่าอนุภาค PS ที่มีขนาด $>8 \mu\text{m}$ ไม่สามารถผ่านเส้นเลือดฝอยของปอดได้และถูกกักไว้ (Ring et al., 1961) การดูดซึมไมโครพลาสต์ในถุงลมอาจเกิดผ่านกลไก ได้แก่ (1) การลำเลียงแบบถุงเยื่อหุ้ม (vesicular migration) ผ่าน pneumocytes ชนิดที่ I และเยื่อหลุดเลือดฝอย (transcytosis), (2) การแทรกผ่านช่องว่างระหว่างเซลล์, (3) การถูกกลืนกินโดยเซลล์ถุงลม โดยเฉพาะ macrophage ในถุงลมที่ทำหน้าที่กำจัดอนุภาค, (4) การกำจัดอนุภาคออกจากถุงลมผ่านการเคลื่อนของ cilia หรือทางระบายของระบบน้ำเหลือง (อนุภาค $\leq 10 \mu\text{m}$) (Morrow, 1973) พบว่าอนุภาค PS ขนาด 0.2 μm สามารถเข้าสู่ pneumocytes ชนิดที่ 1 และ 2 รวมถึง macrophages ได้หลังการฉีดเข้าสู่หลอดเลือดของหนู (Kato et al., 2003) macrophage ในปอดยังสามารถกลืนกินไมโครพลาสต์ได้ โดยเฉพาะขนาด 1 μm (Makino et al., 2003) การมีไมโครพลาสต์ในปอดสามารถเปลี่ยนความสามารถในการซึมผ่านของเส้นเลือดฝอย (Hamoir et al., 2003) และพบการกระจายของ PS ที่สุดเข้าไป (ขนาด 0.02, 0.1, และ 1 μm) ไปยังอวัยวะภายในอื่น ๆ เช่น ตับ ม้าม ลำไส้ ไต และมดลูกของหนู (Sarfo et al., 2009) การกำจัดอนุภาคจากถุงลมเกิดได้ผ่านการเคลื่อนของเมือก (mucociliary transport) การกลืนเมือก การขับผ่านน้ำดี การผลิตเซลล์เยื่อถุงลม และกิจกรรมของ macrophage (Morrow, 1973) ทั้งนี้ มีรายงานว่าผู้ที่สัมผัสฝุ่นมาก มีความเข้มข้นของไมโครพลาสต์ในอวัยวะสูงขึ้น รวมถึงผู้ที่ดื่มน้ำขวดและบริโภคอาหารเดลิเวอรี่มาก (Yan et al., 2022) อัตราการกำจัดอนุภาคจากปอดมีผลต่อเวลาการพำนักและความเข้มข้นของการสัมผัสภายใน (Jones & Bull, 1987) โดยตัวอย่างการทดลองพบว่า PS ขนาด 7.6 μm ในหนูตะเภามีอัตราการขนส่งโดย cilia อยู่ที่ 0.001 mm/min ในหลอดเลือดขนาดเล็ก และสูงสุด 8 mm/min ในหลอดเลือดใหญ่ (Velasquez & Morrow, 1984) อัตราการกำจัดมีลักษณะสองเฟส คือ เร็วในช่วงแรก และช้าลงภายหลัง โดยครึ่งชีวิตของการพำนักในปอดอยู่ที่ 34.3 และ 963 ชั่วโมง สำหรับ PS ขนาด 1.3 และ 2 μm ตามลำดับ (Newton & Pfledderer, 1986)

กลไกการกำจัดหลักดูเหมือนจะเป็น mucociliary transport โดยเฉพาะสำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็ก ($<9 \mu\text{m}$) อาจถูกลำเลียงไปยังต่อมน้ำเหลืองในปอดได้ แต่ในอัตราลดลงเมื่อ

เวลาผ่านไป (Snipes & Clem, 1981) โดยอนุภาค $>10\ \mu\text{m}$ ถูกกำจัดได้น้อยจากระบบน้ำเหลือง (Snipes et al., 1984) และพบเพียง 1% ของภาระอนุภาคในปอดที่ถูกลำเลียงไปต่อมน้ำเหลืองในหนูและหนูตะเภา (Snipes et al., 1988) ยิ่งไปกว่านั้น มีการค้นพบว่าไมโครพลาสติกในปอดส่วนล่าง ($3.1\ \text{MP/g}$) มีความเข้มข้นมากกว่าส่วนบนและกลาง (0.8 และ $0.4\ \text{MP/g}$ ตามลำดับ) ซึ่งอาจบ่งชี้ถึงการกระจายตัวของไมโครพลาสติกที่ไม่สม่ำเสมอในระบบทางเดินหายใจ การกระจายตัวการหมุนเวียนของไมโครพลาสติกผ่านระบบไหลเวียนโลหิตของมนุษย์ การแทรกซึมเข้าสู่ร่างกายมักส่งผลให้มีการนำไมโครพลาสติกเข้าสู่ระบบไหลเวียนโลหิต อย่างไรก็ตาม ไมโครพลาสติกจะถูกกำจัดออกจากกระแสเลือดอย่างรวดเร็ว โดยครึ่งชีวิตของอนุภาคในระบบไหลเวียนถูกประเมินว่าอยู่ที่ประมาณ 1.4–4.9 นาที สำหรับพอลิสไตรีน (PS) ขนาด $0.1\text{--}1\ \mu\text{m}$ ในหนู (อนุภาคนขนาดเล็กมีครึ่งชีวิตยาวกว่า) (Simon et al., 1995), 44–84 นาที สำหรับอะคริลิก $<1.8\ \mu\text{m}$ ในหนู (เร็วขึ้นเมื่อมีโปรตีนเคลือบ เช่น อัลบูมิน) (Arturson et al., 1983), 40 นาที สำหรับพอลิอะคริลิไมด์ขนาด $0.2\text{--}0.3\ \mu\text{m}$ ในหนู (Sjöholm & Edman, 1979), และ 0.9 นาที สำหรับ PS ขนาด $0.05\text{--}0.06\ \mu\text{m}$ ในกระต่าย (Illum et al., 1987) ตัวอย่างเช่น หลังจากให้หนูกิน PS ขนาด $0.2\text{--}0.3\ \mu\text{m}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าไมโครพลาสติกกระจายไปยังระบบต่าง ๆ เช่น ระบบย่อยอาหาร (กระเพาะ ลำไส้ ตับ), ระบบไหลเวียนโลหิต (หัวใจ เลือด เส้นเลือดฝอยในปอด), ระบบขับถ่าย (ไต กระเพาะปัสสาวะ) และสมอง (Im et al., 2022) อวัยวะเป้าหมายของการเคลื่อนย้ายไมโครพลาสติกในระบบไหลเวียนได้แก่ ปอด ตับ และม้าม (Gao et al., 1997; Kanke et al., 1980; Wagner et al., 1969)

อนุภาคนขนาดใหญ่กว่ามักติดอยู่ในเส้นเลือดฝอยของอวัยวะแรกที่เลือดไหลผ่าน โดยเฉพาะในเส้นเลือดฝอยของปอดยกเว้นกรณีที่มีทางลัดของหลอดเลือดระหว่างหลอดเลือดแดงกับหลอดเลือดดำ (arteriovenous anastomoses) (Wagner et al., 1969) อนุภาคนขนาดใหญ่ (เช่น $>7\ \mu\text{m}$) มีแนวโน้มที่จะติดค้างในเส้นเลือดฝอย ขณะที่อนุภาคนขนาดเล็กกว่า (เช่น $<5\ \mu\text{m}$) จะถูกกำจัดโดยแมคโครฟาจในระบบเรติคูโลเอนโดทีเลียล (Illum et al., 1986; Sjöholm & Edman, 1979) อาจมีการทำงานล่าช้าในเลือด (10–30 นาที) จากการที่ไมโครพลาสติกขนาดเล็กถูกกักไว้ชั่วคราวในเส้นเลือดฝอยก่อนปล่อยออกมา (Kanke et al., 1980) ผลดังกล่าว ร่วมกับการกำจัดที่ช้ากว่าโดยระบบเรติคูโลเอนโดทีเลียล อาจอธิบายได้ถึงการไหลเวียนในกระแสเลือดที่นานกว่าสำหรับอนุภาคนขนาดเล็ก (Kanke et al., 1980; Slack et al., 1981) ดังนั้น PS ขนาด 7.4 และ $11.6\ \mu\text{m}$ ถูกกำจัดจากระบบไหลเวียนของสุนัขภายใน 2 นาที โดยการติดในเครือข่ายเส้นเลือดฝอยของปอด ซึ่ง PS ขนาด $7.4\ \mu\text{m}$ ถูกเคลื่อนย้ายไปยังตับและม้ามในภายหลัง ในขณะที่อนุภาคนขนาด $3.4\ \mu\text{m}$ สามารถผ่านปอดได้ และถูกกำจัดอย่างช้า ๆ (10–12 นาที) โดยระบบเรติคูโลเอนโดทีเลียลในตับและม้าม (Slack et al., 1981)



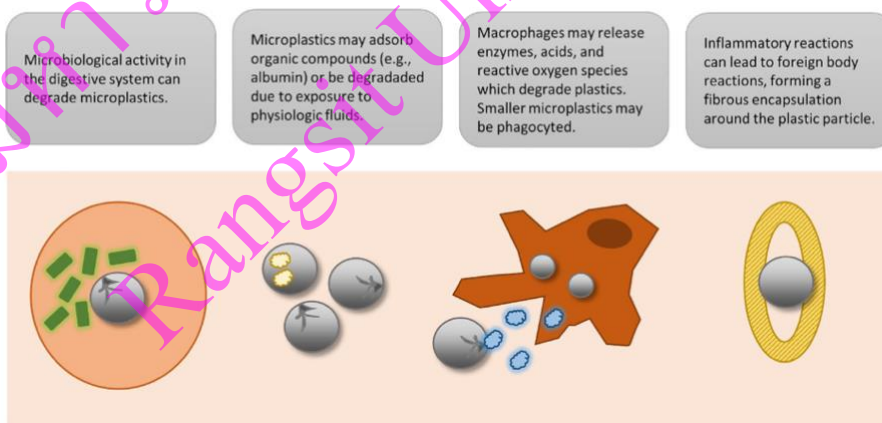
รูปที่ 2.6 การกระจายตัวและการขับออกของไมโครพลาสติกในร่างกายมนุษย์

(ที่มา : Prata, Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2023)

ไมโครพลาสติก PS-divinylbenzene ขนาด 3 และ 5 ไมโครเมตรในสุนัขพบว่าอยู่ในตับและม้ามเป็นหลักภายใน 24 ชั่วโมง ขณะที่ขนาด 7 ไมโครเมตรมีการกระจายซ้ากว่า โดยพบ 43% อยู่ในปอดและ 7% ในตับหลังจาก 24 ชั่วโมง และยังคงพบ 26–37% อยู่ในปอด และ 20–28% ในตับหลังจากผ่านไป 4 สัปดาห์ ซึ่งอาจเป็นผลจากการฟาโกไซโทซิสและการเคลื่อนที่ของแมโครฟาจีที่เกิดขึ้นอย่างซ้า ๆ ส่วนไมโครพลาสติกขนาด 12 ไมโครเมตรพบเฉพาะในปอดทั้งในช่วงเวลา 24 ชั่วโมงและ 4 สัปดาห์ (Kanke et al., 1980) ในหนู แสดงให้เห็นว่า PS ขนาด 0.2 ไมโครเมตรถูกส่งไปที่ม้ามเป็นหลัก ขนาด 1.0 ไมโครเมตรไปที่ตับ และขนาด 4.0 ไมโครเมตรไปที่ปอด (Gao et al., 1997) เช่นเดียวกัน อะคริลิกขนาด <1.8 ไมโครเมตรในหนูเม้าส์พบได้ในปอดหลังการฉีด 6 ชั่วโมง และกระจายตัวไปที่ตับในเวลา 24 ชั่วโมง (Arturson et al., 1983) สำหรับพอลิอะคริลไมด์ขนาด 0.2–0.3 ไมโครเมตรในหนูและหนูเม้าส์พบว่ามีอาการกำจัดออกจากกระแสเลือดไปยังตับและม้ามภายใน 6 ชั่วโมง โดยอนุภาคสะสมในอวัยวะเหล่านี้มีครึ่งชีวิตการคงอยู่ที่ 14 และ 24 สัปดาห์ตามลำดับ โดยสามารถตรวจพบเป็นผลผลิตจากการสลายตัวหลังจาก 16 สัปดาห์ และพบได้ในลำไส้และผนังลำไส้หลังจาก 2 เดือน (Sjöholm & Edman, 1979) อนุภาคไมโครพลาสติกที่รวมตัวกับอัลบูมินอาจส่งเสริมการเกิดลิ่มเลือด และสามารถถูกกำจัดออกจากการไหลเวียนโลหิตด้วยการยึดติดกับผนังหลอดเลือด (Wagner et al., 1969) อย่างไรก็ตาม การ

ใช้ไมโครพลาสติกความเข้มข้นสูงในการทดลองทางหลอดเลือด (เช่น 10^9 อนุภาคต่อสัตว์หนึ่งตัว) ไม่ได้แสดงผลกระทบต่อการไหลเวียนโลหิต อัตราการกำจัด หรือก่อให้เกิดผลกระทบระยะยาวที่มีนัยสำคัญ (Gao et al., 1997; Kanke et al., 1980; Sjöholm & Edman, 1979; Wagner et al., 1969)

กระบวนการเมแทบอลิซึม การย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ในร่างกายมนุษย์ การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) คือการสลายตัวของพอลิเมอร์ภายในร่างกายมนุษย์ (Williams, 1976) หรือกล่าวเฉพาะเจาะจงมากขึ้น คือกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยมีกิจกรรมทางชีวภาพเฉพาะเจาะจงเป็นตัวกลาง (Ali et al., 1994) กลไกที่เป็นไปได้ของการย่อยสลายทางชีวภาพของไมโครพลาสติกในร่างกายมนุษย์ ตรงกันข้ามกับความเชื่อที่แพร่หลาย พลาสติกทุกชนิดสามารถเสื่อมสลายได้ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม (Ali et al., 1994) การสลายตัวของพอลิเมอร์ในสภาพแวดล้อมทางสรีรวิทยาสามารถเกิดขึ้นได้ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis), ออกซิเดชัน (oxidation), และดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) (Bischoff, 1972) เอนไซม์ที่มีอยู่ในร่างกายสามารถออกฤทธิ์ต่อพลาสติกได้โดยมีลักษณะเฉพาะเจาะจงหรือจากการปรับตัว ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีและทางกายภาพของพลาสติกนั้น (Kulkarni, 1965)



รูปที่ 2.7 กลไกที่อาจเกิดขึ้นในการเผาผลาญและการย่อยสลายทางชีวภาพของไมโครพลาสติกในร่างกายมนุษย์

(ที่มา : Prata, Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2023)

การย่อยสลายทางชีวภาพคือการแตกตัวของพอลิเมอร์ในร่างกายมนุษย์ (Williams, 1976) หรือโดยเฉพาะการดำเนินการโดยกิจกรรมทางชีวภาพเฉพาะ (Ali et al., 1994) กลไกที่อาจเกิดขึ้นในการย่อยสลายทางชีวภาพของไมโครพลาสติกในร่างกายมนุษย์ถูกแสดงในรูปที่ 4 ตามที่กล่าวถึงในงานวิจัย (Ali

et al., 1994) พลาสติกทุกชนิดสามารถย่อยสลายได้ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม ซึ่งแตกต่างจากความเชื่อที่นิยม (Ali et al., 1994) การย่อยสลายของพอลิเมอร์ในสภาพแวดล้อมทางสรีรศาสตร์สามารถเกิดขึ้นได้ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส, ออกซิเดชัน และการดีคาร์บอกซิเลชัน (Bischoff, 1972) ระบบเอนไซม์ที่มีอยู่สามารถทำงานกับพลาสติกโดยอาศัยความจำเพาะหรือการปรับตัว ขึ้นอยู่กับโครงสร้างเคมีและกายภาพ (Kulkarni, 1965) ส่วนการย่อยสลายของพอลิเมอร์ในอวัยวะต่างๆ มักจะรายงานว่าเกิดการสูญเสียคุณสมบัติเชิงกล ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงในน้ำหนักโมเลกุลและการตกผลึก เป็นต้น (Ali et al., 1994) ตัวอย่างเช่น การตัดสายโซ่จะทำให้ความแข็งแรงดึง, ความหนืด และการยืดหยุ่นลดลง (Kojima, 1975) ในขณะที่การเสียดสี, การสึกหรอ และการแยกชั้นอาจมีส่วนช่วยในการย่อยสลายพอลิเมอร์ในร่างกาย (Costa et al., 1998) แต่การย่อยสลายทางกลอาจจะมีผลสำคัญจำกัดสำหรับไมโครพลาสติกที่มีขนาดเล็ก อย่างไรก็ตาม ไมโครพลาสติกที่พบในตับที่มีภาวะตับแข็งแสดงการเปลี่ยนแปลงของผิวที่ชี้ให้เห็นถึงการย่อยสลาย (Horvatis et al., 2022)

การย่อยสลายยังสามารถเกิดขึ้นในระบบย่อยอาหารได้ ผ่านการกระทำของเอนไซม์หรือไมโครไบโอตา พลาสติกทั่วไป เช่น โพลีสไตรีน, โพลีเอทิลีน, โพลีโพรพิลีน, โพลีเอทิลีนเทรฟทาเลต และโพลีไวนิลคลอไรด์ ถูกคิดว่าจะไม่สามารถย่อยได้โดยของเหลวในระบบย่อยอาหารของมนุษย์ตามการศึกษาภายในหลอดทดลอง (Stock et al., 2020) อย่างไรก็ตาม ไมโครพลาสติก PS สามารถแทรกแซงกระบวนการย่อยไขมันโดยการดูดซับหรือการรวมตัวกับไขมันหรือไลเปส (Tan et al., 2020) เมื่อมีไมโครไบโอตาของมนุษย์ในลำไส้ใหญ่ ไมโครพลาสติกจากโพลีเอทิลีนเทรฟทาเลตก็มีการเปลี่ยนแปลงผิวที่สำคัญและการย่อยสลายโครงสร้าง รวมถึงการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบในชุมชนไมโครไบโอตาในลำไส้ใหญ่ (Tamargo et al., 2022) ดังนั้น ไมโครพลาสติกที่ตรวจพบในอุจจาระมนุษย์ (Schwabl et al., 2019; Zhang et al., 2021) อาจได้รับการย่อยสลายในทางเดินอาหาร

การย่อยสลายทางชีวภาพของอนุภาคที่ถูกดูดซึมเข้าไปอาจเกิดขึ้นจากสภาพแวดล้อมทางสรีรศาสตร์หรือการกระตุ้นปฏิกิริยาอักเสบ การย่อยสลายของพลาสติกในร่างกายจะดูดซับสารประกอบอินทรีย์จากของเหลวในร่างกาย (เช่น กรดอะมิโน) ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการย่อยสลาย (Kojima, 1975) คุณสมบัติของพอลิเมอร์ (เช่น ความสามารถในการหุบผิว, ประจุผิว, และความเป็นไฮโดรโฟบิก) สามารถมีผลต่อการดูดซับ ซึ่งจะมีการโต้ตอบมากขึ้นกับโปรตีนพลาสมา เช่น อัลบูมิน, IgG, และ von Willebrand factor จากพื้นผิวที่มีคุณสมบัติไฮโดรโฟบิก (Tang et al., 2008) ปฏิกิริยาผลข้างเคียง (เช่น การอักเสบ, การแข็งตัว, และการตอบสนองของร่างกายต่อวัตถุแปลกปลอม) สามารถเริ่มต้นได้จาก: (1) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรตีนที่ยึดติดกับพื้นผิว ซึ่งจะเปิดเผยตำแหน่งที่ตอบสนองซึ่งทำหน้าที่เป็น

ที่รับสำหรับเซลล์อักเสบ และ (2) การกระตุ้นปฏิกิริยาภาคผนวกของคอมพลีเมนต์ผ่านเส้นทางคลาสสิก หรือเส้นทางทางเลือก ซึ่งได้รับอิทธิพลจากเคมีของพื้นผิวของพอลิเมอร์ อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างของโปรตีนพีรี เช่น IgG ที่เปิดเผยจุดที่ทำงานสำหรับโปรตีนของคอมพลีเมนต์ (Tang et al., 2008) โปรตีนที่ดูดซับแล้วจะทำหน้าที่เป็นแมทริกซ์ที่ที่ซึ่งอินดิเกรินสามารถยึด และทำให้เซลล์ยึดติด (Junge et al., 2012)

การกำจัดไมโครพลาสติกและผลผลิตจากการย่อยสลายทางชีวภาพออกจากร่างกายมนุษย์ การขับออกอาจเกิดขึ้นได้หลัก ๆ ที่ตับ ผ่านการฟาโกไซโทซิสหรือการขับออกทางท่อน้ำดีของอนุภาคที่ยังไม่แตกตัวออกทางอุจจาระ และที่ไตในรูปของผลิตภัณฑ์จากการย่อยสลายในปัสสาวะ ตัวอย่างเช่น โพลีเมทาคริเลตที่ติดฉลากเรดิโอ ขนาด 250–300 นาโนเมตร พบส่วนใหญ่ที่ตับ 60% หลังจากหนึ่งชั่วโมง และถูกกำจัดออกจากกระแสเลือดอย่างรวดเร็วเมื่อนี้เข้าสู่ทางหลอดเลือดดำในหนู (Rolland et al., 1989) อนุภาคที่มีความไม่ชอบน้ำและขนาดใหญ่จะถูกระบบร่างกายจดจำและกำจัดออกจากการไหลเวียนของเลือดได้ง่ายกว่า (Vonarbourg et al., 2006) ตัวอย่างเช่น การกระจายตัวของอนุภาคขนาด 3.4 ไมโครเมตร ไปยังตับและม้ามเกิดได้ช้ากว่าอนุภาคเรดิโอแลเบลที่มีขนาด ≥ 7.4 ไมโครเมตร หลังการฉีดเข้าเส้นเลือดในสุนัข (Slack et al., 1981)

การขับออกของไมโครพลาสติกเป็นไปได้ เนื่องจากข้อมูลที่มีอยู่ยังไม่สนับสนุนการสะสมในเนื้อเยื่อในระยะยาว รวมถึงในลำไส้ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในทะเล (Nelms et al., 2019) หรือในเนื้อเยื่อภายในของแมวหรือสุนัขที่มีอายุมาก (Prata et al., 2022) เช่นเดียวกัน ยังไม่มีหลักฐานที่แสดงถึงการสะสมของไมโครพลาสติกในร่างกายมนุษย์ ณ ปัจจุบัน การกำจัดอนุภาคที่ยังไม่ถูกย่อยสลายเกิดขึ้นผ่านเซลล์ฟาโกไซตของระบบเรติคูโลเอนโดทีเลียล (reticuloendothelial system) โดยหลักผ่านเซลล์คัพเฟอร์ (Kupffer cells) ในตับ และรองลงมาคือมาโครฟาจในม้ามและไขกระดูก (Hartenstein & Martinez, 2019; Ogawara et al., 1999) ในเซลล์เยื่อหลอดเลือดในตับและเซลล์ตับตามลำดับ ต่อมาจะถูกขับออกผ่านทางท่อน้ำดี (Handy et al., 2008; Ogawara et al., 1999) หรือถูกดักจับในช่องว่างระหว่างเซลล์เยื่อในม้าม (Moghimi et al., 1991) เซลล์คัพเฟอร์มีบทบาทสำคัญในการกลืนกินอนุภาคสังเคราะห์ รวมถึงอนุภาคขนาดใหญ่ โดยสามารถกำจัดพอลิสไตรีนขนาด 50 และ 500 นาโนเมตร ได้ร้อยละ 60–70 หลังการฉีดเข้าทางหลอดเลือดดำในหนู (Ogawara et al., 1999) ในทำนองเดียวกัน การฉีดพอลิสไตรีนเข้าทางหลอดเลือดในกระต่ายสามารถกำจัดได้รวดเร็วโดยระบบเรติคูโลเอนโดทีเลียลในตับหรือม้าม (90% ภายในเวลาไม่ถึง 1 นาที) โดยพบอนุภาคในเซลล์คัพเฟอร์ และยังสามารถตรวจพบในตับหลังจาก 8 วัน ซึ่งจะกระจายไปยังปอดหรือหัวใจได้มากขึ้นหากมีการยับยั้งระบบเรติคูโลเอนโดทีเลียลด้วยยา (Illum et

al., 1986) นอกจากนี้ ยังพบว่าไมโครพลาสต์มีความเข้มข้นสูงกว่ามากในตับของผู้ป่วยโรคตับแข็งเมื่อเปรียบเทียบกับผู้ที่ไม่มีโรค (มัธยฐาน 8.4 เทียบกับ 0.7 M/g) (Horvatits et al., 2022) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความสามารถที่ลดลงของตับที่เป็นโรคในการขับออกไมโครพลาสต์

การฟาโกไซโทซิสขึ้นอยู่กับการยึดเกาะระหว่างเซลล์กับอนุภาคซึ่งเกิดจากตัวรับบนเซลล์และตามด้วยกระบวนการการกลืนกินที่ประกอบด้วยการกระตุ้นเซลล์ การยื่นเยื่อหุ้มเซลล์ออกไป และการล้อมรอบอนุภาคด้วยโครงร่างแอกติน ตามที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้การดูดซับโปรตีนบนพื้นผิวของอนุภาคสามารถเพิ่มปฏิสัมพันธ์กับเซลล์และเพิ่มอัตราการกลืนกิน (Champion et al., 2008) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการส่งสัญญาณในระยะการยึดเกาะ (Simon & Schmid-Schönbein, 1988)

จากการศึกษาในเซลล์มาโครฟาจดงูลมปอดของหนูการยึดเกาะของอนุภาคพอลิสไตรีนแบบมีออปโซไนซ์ (IgG) เกิดเร็วกว่าแบบไม่มีออปโซไนซ์ แต่การกลืนกินไม่ได้แตกต่างกันระหว่างสองรูปแบบหรือขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค (Champion et al., 2008) อย่างไรก็ตาม การฟาโกไซโทซิสโดยมาโครฟาจในเยื่อช่องท้องของหนูถูกลดลงเมื่ออนุภาคถูกบ่มกับเซรัมที่ไม่มีออปโซนิโนอาจเป็นเพราะลดความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว (Tabata & Ikada, 1988) แสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์อาจแตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของโปรตีนที่ดูดซับ

นอกจากนี้ การฟาโกไซโทซิสจะเกิดขึ้นเฉพาะในอนุภาคที่มีพื้นผิวขรุขระ มีรูพรุน หรือเคลือบด้วยโปรตีนเท่านั้น อนุภาคที่เรียบสนิทจะไม่ถูกกำจัดได้ง่าย (Lemperle et al., 1991) การฟาโกไซโทซิสดูเหมือนจะไม่จำกัดด้วยปริมาณตัวรับบนเยื่อหุ้มเซลล์ (ซึ่งสามารถรีไซเคิลกลับมาใช้ใหม่ได้) หรือการใช้พลังงานระหว่างการกลืนกิน เนื่องจากเซลล์มีแหล่งพลังงานจากไกลโคเจนภายในเซลล์และเมตาบอลิซึมแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Simon & Schmid-Schönbein, 1988) กลับกันการฟาโกไซโทซิสดูเหมือนจะจำกัดด้วยขนาดของอนุภาค ขึ้นอยู่กับปริมาณเยื่อหุ้มเซลล์ที่เหลืออยู่ หรือความสามารถในการสร้างกระบวนการพอด (pseudopod) โดยเซลล์หนึ่งอาจกลืนอนุภาคหลายอัน (เช่น 2 μm) หรืออนุภาคขนาดใหญ่เพียงอันเดียว (เช่น 8 μm ในเซลล์นิวโทรฟิลของมนุษย์) โดยมีความสัมพันธ์ผกผันระหว่างจำนวนอนุภาคกับขนาดอนุภาคต่อเซลล์ (Simon & Schmid-Schönbein, 1988) การดูดซึมอนุภาคในระดับสามารถอ้อมตัวได้ (K. Ogawara et al., 1999) ซึ่งอาจอธิบายได้จากข้อจำกัดของพื้นที่เยื่อหุ้มเซลล์ที่มีอยู่ในพื้นที่สำหรับการกลืนกิน ขนาดของอนุภาคยังถูกกำหนดโดยปฏิสัมพันธ์กับรอยพับของเยื่อหุ้มเซลล์ฟาโกไซต์ โดยอนุภาคขนาด $\sim 2 \mu\text{m}$ สามารถสร้างจุดสัมผัสสามจุดกับส่วนยื่นของเยื่อหุ้ม ซึ่งเอื้อต่อการยึดเกาะ โดยอยู่ในช่วงขนาดเดียวกับเชื้อโรคทั่วไป (1–4 μm) ความชอบในช่วงขนาดนี้ได้รับการสนับสนุนจากงานวิจัยในหลอดทดลองหลายชิ้นที่ใช้อนุภาคพอลิเมอร์ เช่น พอลิสไตรีน (PS) รวมถึงในมาโครฟาจดงูลมหนู

(1–6 μm) (Champion et al., 2008), นิวโตรฟิลของมนุษย์ (2–8 μm) (Simon & Schmid-Schönbein, 1988), ลิวโคไซด์ในเลือด (สูงสุดที่ 2 μm) (Kawaguchi et al., 1986), มาโครฟาจในเยื่อช่องท้องของหนู (1–2 μm , สูงสุดถึง 5 μm) (Tabata & Ikada, 1988) และมาโครฟาจในหนู (10 μm) (Merkley et al., 2022) ไมโครพลาสต์อาจถูกขับออกโดยเซลล์อื่นในระดับน้อย เช่น เฮพาโตไซด์และเซลล์เยื่อในตับที่มีบทบาทน้อยในการกำจัดอนุภาค และสามารถจับอนุภาคนขนาดเล็กได้เท่านั้น (เช่น จำกัดที่รูเปิดขนาด 200 นาโนเมตรในเซลล์เยื่อ) (Ogawara et al., 1999) พอลิสไตรีนขนาด 50 นาโนเมตรสามารถถูกกลืนโดยเซลล์ตับและถูกขับออกทางท่อน้ำดีผ่านการจดจำ apolipoprotein-E ที่ดูดซับจากเลือดโดยตัวรับ asialoglycoprotein ยืนยันโดยการทดลองปรับระดับด้วยยา (Furumoto et al., 2001) อนุภาคสามารถพบในเซลล์ตับหลัง 1 ชั่วโมง และถูกปล่อยออกในท่อน้ำดีโดยไม่ผ่านไลโซโซมหรือผ่านทางนั้น โดยมีประมาณ 4% ถูกขับออกเป็นอนุภาคที่ไม่ถูกย่อยสลายทางน้ำดีภายใน 24 ชั่วโมง (Ogawara et al., 1999)

แม้ว่าการขับออกทางน้ำดีดูเหมือนจะเร็วกว่าในอนุภาคนขนาดเล็ก (ซึ่งอาจถูกจำกัดโดยขนาดของท่อน้ำดี เช่น canaliculi 1–2 μm , ductules 20 μm , lobular ducts 20–100 μm) แต่ก็สามารถข้ามไปได้ด้วยการหลั่งออกโดยตรงของอนุภาคนขนาดใหญ่กว่า (1–3 μm) จากเลือดผ่านทาง paracellular exchange ในเยื่อของท่อน้ำดี (Jani et al., 1996) สิ่งนี้อาจอธิบายว่าทำไมพบอนุภาคในถุงน้ำดีของตัวอ่อนปลาที่สัมผัสพอลิสไตรีนขนาด 5 μm (Zhang et al., 2021) รวมถึงความแตกต่างระหว่างสายพันธุ์และพัฒนาการที่ยังไม่สมบูรณ์ น้ำดีถูกปล่อยเข้าสู่ลำไส้เล็ก ส่งผลให้พบไมโครพลาสต์ในระบบทางเดินอาหาร ซึ่งจากนั้นจะถูกขับออกทางอุจจาระหรือถูกดูดซึมกลับ (การไหลเวียนกลับของน้ำดี) ดังนั้น การขับออกผ่านน้ำดีอาจมีส่วนต่อการรายงานการพบไมโครพลาสต์ในอุจจาระของมนุษย์ (Schwabl et al., 2019; Zhang et al., 2021)

ในทางกลับกันการขับออกทางปัสสาวะจะเป็นไปได้เฉพาะกับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและมีความชอบน้ำ ดังนั้นจึงไม่น่าเป็นไปได้สำหรับไมโครพลาสต์ แต่เป็นไปได้สำหรับผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการย่อยสลาย หลักฐานที่พบมักบ่งชี้ถึงการมีอยู่ของสารเรติโอแอคทีฟหรือสารเรืองแสงที่หลุดออกมาแทนที่จะเป็นอนุภาคในปัสสาวะ (Rolland et al., 1989) ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากการที่ไม่พบพอลิสไตรีนขนาด 0.05, 0.5, 1 และ 3 μm ในปัสสาวะของหนูหลังการให้ทั้งทางหลอดเลือดและทางปาก (Jani et al., 1996) แต่กลับพบกัมมันตรังสีในปัสสาวะหลังจากการฝังแผ่นฟิล์ม C14-tagged polystyrene, polyethylene, และ polymethyl methacrylate ได้ผิวหนังในหนูเป็นเวลา 21, 26 และ 54 สัปดาห์ แต่ไม่พบในลมหายใจ อุจจาระ เนื้อเยื่อ หรือเนื้องอก บ่งชี้ว่าผลิตภัณฑ์จากการย่อยสลายถูกขับออกอย่างรวดเร็ว (Oppenheimer et al., 1955) จริง ๆ แล้ว มอนอเมอร์จะถูกกำจัดอย่างรวดเร็วและส่วนใหญ่ผ่านทาง

ปัสสาวะ ตัวอย่างเช่น styrene- β -C14 ที่ฉีดใต้ผิวหนังในหนู ถูกกำจัดออกเกือบหมดภายใน 35 ชั่วโมง โดยส่วนใหญ่ออกทางปัสสาวะ ตามด้วยอุจจาระและลมหายใจ ทั้งในรูปแบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงหรือเป็น เมตาบอไลต์ (Ohtsui & Ikeda, 1971) วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือการริเริ่มทำความเข้าใจเบื้องต้น เกี่ยวกับเภสัชจลนศาสตร์ (pharmacokinetics) ของไมโครพลาสติกในร่างกายมนุษย์ การดูดซึมของไมโครพลาสติกเกิดขึ้นเป็นหลักผ่านกระบวนการทรานส์ไซโตซิส (transcytosis) ในเอนโดโซมของลำไส้เล็ก ในขณะที่ไมโครพลาสติกที่มีขนาดเล็กกว่า (<5 ไมครอน) อาจเข้าสู่และถูกดูดซึมในบริเวณถุงลมปอดได้เช่นกัน การดูดซึมของอนุภาคขนาดใหญ่ แม้จะพบได้น้อยแต่ก็สามารถอธิบายได้จากกระบวนการภายในเซลล์ผ่านช่องว่างระหว่างเซลล์ (เช่น การดูดซึมผ่านช่องว่างระหว่างเซลล์ หรือ persorption) หรือการถูกกลืนกินโดยเซลล์ฟาโกไซต์ อย่างไรก็ตามการได้รับไมโครพลาสติกอาจส่งผลให้เกิดการดูดซึมที่จำกัด (<1%) การกระจายของไมโครพลาสติกเกิดขึ้นภายในระบบไหลเวียนโลหิต โดยมีอนุภาคขนาดใหญ่บางส่วนที่ติดค้างอยู่ในบริเวณหลอดเลือดฝอย เช่น ในปอด ไมโครพลาสติกอาจผ่านกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) ภายในร่างกายมนุษย์ได้จากผลของเอนไซม์ และอนุมูลออกซิเจน (reactive oxygen species) ที่ผลิตโดยเซลล์แมคโครฟาจ การสัมผัสกับของเหลวในร่างกาย และกิจกรรมของจุลินทรีย์ในลำไส้

สุดท้ายไมโครพลาสติกจะถูกขับออกจากร่างกายเป็นหลักผ่านตับและม้าม โดยพบในอุจจาระ ขณะที่โมโนเมอร์และสารเติมแต่ง (additives) ที่ได้จากการย่อยสลายทางชีวภาพ อาจถูกขับออกทางปัสสาวะ แม้ว่าผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์จะอยู่นอกขอบเขตของการทบทวนนี้ แต่ก็สามารถอธิบายได้บางส่วนจากเภสัชจลนศาสตร์ ตัวอย่างเช่น การเผาผลาญภายในร่างกายอาจนำไปสู่การปลดปล่อยโมโนเมอร์ที่ก่อให้เกิดมะเร็งจากพลาสติก อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันยังไม่มีหลักฐานที่สนับสนุนการสะสมในระยะยาวหรือผลกระทบด้านสุขภาพอย่างมีนัยสำคัญจากไมโครพลาสติกต่อร่างกายมนุษย์

2.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างไมโครพลาสติกและการเกิดโรคหลอดเลือดหัวใจ

ไมโครพลาสติก (Microplastic) เป็นมลพิษที่แพร่กระจายอย่างกว้างขวางในสิ่งแวดล้อมทั่วโลก สามารถตรวจพบได้ในอากาศ น้ำ อาหาร และน้ำดื่ม โดยไมโครพลาสติกได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในด้านผลกระทบต่อสุขภาพ, ความเสี่ยงทางสุขภาพที่เกิดขึ้นจากการสะสม

และสัมผัสไมโครพลาสติก (*Micro-Nanoplastics and Cardiovascular Diseases: Evidence and Perspectives* | *European Heart Journal* | *Oxford Academic*, n.d.; *Microplastics and Nanoplastics in*

Atheromas and Cardiovascular Events | *New England Journal of Medicine*, n.d.) การศึกษาจากสัตว์ทดลองแสดงให้เห็นว่าไมโครพลาสติกสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ผ่านการรับประทาน, การสูดดม หรือ การสัมผัสทางผิวหนัง และอาจก่อให้เกิดผลกระทบทางสุขภาพในหลายลักษณะ โดยหลังจากไมโครพลาสติกเข้าสู่ร่างกายแล้วพบว่าไมโครพลาสติกมีศักยภาพในการแทรกซึมเข้าสู่เซลล์ และสะสมในเนื้อเยื่อต่างๆ ของมนุษย์รวมถึงรก, ปอด, ตับ, น้ำนม, ปัสสาวะ และเลือด อีกทั้งยังมีบทบาทสำคัญในการเหนี่ยวนำให้เกิดภาวะเครียดออกซิเดชัน (oxidative stress) ซึ่งเป็นกลไกที่อาจนำไปสู่ความเสียหาย และการอักเสบของเซลล์ นอกจากนี้ไมโครพลาสติกยังสามารถกระตุ้นการสร้างอนุมูลอิสระได้เอง โดยไม่จำเป็นต้องสัมผัสกับเซลล์สิ่งมีชีวิต กลไกดังกล่าวมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับกระบวนการก่อตัวของโฟมเซลล์ (foam cell) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมกระบวนการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือด (cardiovascular diseases; CVD) ที่ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในปัจจุบันอย่างมีนัยสำคัญ (*Micro-Nanoplastics and Cardiovascular Diseases: Evidence and Perspectives* | *European Heart Journal* | Oxford Academic, n.d.; Zhu et al., 2023)

การศึกษาที่มีอยู่ในปัจจุบันแสดงให้เห็นว่าไมโครพลาสติกมีบทบาทสำคัญในฐานะปัจจัยเสี่ยงที่ส่งเสริมการการพัฒนาโรคหัวใจและหลอดเลือด (cardiovascular diseases; CVD) เนื่องจากไมโครพลาสติกสามารถกระตุ้นกลไกทางพยาธิสรีรวิทยาหลายแขนงที่เกี่ยวข้องกับ CVD ได้แก่ การรบกวนการทำงานของเยื่อผนังหลอดเลือด (endothelial dysfunction), การเหนี่ยวนำให้เกิดการอักเสบ (inflammation) และการทำลายเซลล์ในระบบภูมิคุ้มกัน (immune cell cytotoxicity) ซึ่งก่อให้เกิดภาวะหลอดเลือดแข็งตัว, การก่อตัวของคราบไขมัน และการก่อตัวของเซลล์ฟอง (Foam Cells as Therapeutic Targets in Atherosclerosis with a Focus on the Regulatory Roles of Non-Coding RNAs, n.d.; *Micro-Nanoplastics and Cardiovascular Diseases: Evidence and Perspectives* | *European Heart Journal* | Oxford Academic, n.d.) จากการศึกษาในสัตว์ทดลอง (in vitro) พบว่าไมโครพลาสติกสามารถกระตุ้นการสร้างสารอนุมูลอิสระ (reactive oxygen species ;ROS) ส่งผลให้เกิดภาวะเครียดออกซิเดชัน (Oxidative stress) เกิดการทำลายเยื่อหลอดเลือด และการบาดเจ็บของหลอดเลือด (vascular endothelial injury) ไมโครพลาสติกมีความสามารถในการแทรกซึมเข้าสู่เซลล์จึงสามารถตรวจพบในเซลล์ที่มีคุณสมบัติในการฟาโกไซโตซิส เช่น โมโนไซต์ (monocyte) และแมคโครฟาจ (macrophage) เป็นต้น เนื่องจากไมโครพลาสติกมีคุณสมบัติในการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ และรบกวนกระบวนการเมตาบอลิซึมของไขมัน (lipid metabolism) ส่งผลให้เกิดการสะสมของไขมัน และอนุภาคของไมโครพลาสติกภายในเซลล์ การสะสมเป็นปริมาณมากก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเซลล์ดังกล่าวเป็นเซลล์โฟม

(foam cell) และเกิดการพัฒนามาเป็น fatty streak นอกจากนี้เซลล์โฟม (foam cell) ยังมีบทบาทในการกระตุ้นการหลั่งไซโตไคน์ (Proinflammatory cytokine) ได้แก่ interleukin-1 (IL-1), Interleukin-6 (IL-6), Interleukin-1b และ Tumor necrosis factor-alpha (TNF- α) ส่งผลให้เกิดการกระตุ้นการเพิ่มจำนวนของเซลล์กล้ามเนื้อเรียบ (smooth muscle cells) นำไปสู่การก่อตัวของพังผืด (fibrous plaque) ซึ่งนำไปสู่การเกิดภาวะหลอดเลือดแดงแข็ง (atherosclerosis) และเพิ่มความเสี่ยงต่อการแตกของพลาต (plaque rupture) การแตกของพลาตมีผลกระตุ้นการเกิดลิ่มเลือด (thrombosis) และการอักเสบ (inflammation) ภายในหลอดเลือด ซึ่งเป็นกลไกสำคัญที่นำไปสู่การอุดตันของหลอดเลือดแดง ก่อให้เกิดภาวะกล้ามเนื้อหัวใจตายเฉียบพลัน (myocardial infarction) อย่างมีนัยสำคัญ (Foam Cells as Therapeutic Targets in Atherosclerosis with a Focus on the Regulatory Roles of Non-Coding RNAs, n.d.; Micro-Nanoplastics and Cardiovascular Diseases: Evidence and Perspectives | European Heart Journal | Oxford Academic, n.d.; McLaren et al., 2011)

จากงานวิจัยของ (Yu et al., 2024a) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบระดับของไมโครพลาสติคในเลือดของผู้ป่วยภาวะหลอดเลือดแดงนอกกะโหลกศีรษะตีบแคบ (Extracranial Artery Stenosis; ECAS) และประเมินความสัมพันธ์กับความรุนแรงของโรค โดยกลุ่มตัวอย่างประกอบด้วยผู้ป่วยภาวะหลอดเลือดแดงนอกกะโหลกศีรษะตีบแคบ (Extracranial Artery Stenosis; ECAS) จำนวน 20 ราย และกลุ่มควบคุม (control) จำนวน 10 ราย โดยเก็บตัวอย่างเลือดก่อนการตรวจด้วยเทคนิค digital subtract angiography (DSA) และทำการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Pyrolysis–gas chromatography mass spectrometry (Py-GC/MS), laser direct infrared (LDIR) spectroscopy และ scanning electron microscopy (SEM). พบว่าระดับของไมโครในเลือดของกลุ่มผู้ป่วยภาวะหลอดเลือดแดงนอกกะโหลกศีรษะตีบแคบ (Extracranial Artery Stenosis; ECAS) สูงกว่ากลุ่มควบคุม (control) อย่างมีนัยสำคัญ (174.89 ± 24.95 เทียบกับ 79.82 ± 31.73 ไมโครกรัมต่อกรัม, $p < 0.001$) โดยพบว่าโพลิเมอร์ที่พบมากที่สุดคือ โพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) และโพลิเอไมด์ 66 (PA66) ทั้งนี้ความเข้มข้นของไมโครพลาสติคในเลือดยังมีความสัมพันธ์กับระดับความรุนแรงของการตีบแคบของหลอดเลือดแดง ($p < 0.001$) อีกทั้งพบว่ากลุ่มผู้ป่วยภาวะหลอดเลือดแดงนอกกะโหลกศีรษะตีบแคบ (Extracranial Artery Stenosis; ECAS) มีระดับ D-dimer และค่าเวลา Thrombin Time สูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญซึ่งบ่งชี้กระบวนการเกิดลิ่มเลือดอย่างต่อเนื่อง และภาวะเซลล์บุผนังหลอดเลือดทำงานผิดปกติ ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าไมโครพลาสติคในเลือดอาจมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาของโรคหลอดเลือดแดงตีบแคบ

จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ทำการศึกษา และวิเคราะห์ตัวอย่างปัสสาวะในมนุษย์จากอาสาสมัครจำนวน 6 คน (เพศชาย 3 คน, เพศหญิง 3 คน) อายุระหว่าง 16–35 ปี ที่พำนักอยู่ในพื้นที่ทางตอนใต้ของประเทศอิตาลีไม่น้อยกว่า 5 ปี การตรวจวิเคราะห์ใช้เทคนิค Raman microspectroscopy โดยย่อยสลายปัสสาวะด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 10% และกรองด้วยฟิลเตอร์ขนาดรูพรุน 1.2 ไมครอน ผลการศึกษาพบไมโครพลาสติกในปัสสาวะสี่จากหกตัวอย่าง โดยระบุชนิดของพอลิเมอร์ ได้แก่ polyethylene vinyl acetate (PVA), polyvinyl chloride (PVC), polypropylene (PP) และ polyethylene (PE) ซึ่งเป็นไมโครพลาสติกที่พบมากที่สุดในพื้นที่แวดล้อม อนุภาคที่ตรวจพบมีขนาดตั้งแต่ 4–15 ไมโครเมตร และมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ จากหลักฐานในงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Sun et al., 2022; Yu et al., 2024b)(Sun et al., 2022; Yu et al., 2024b) พบว่าไมโครพลาสติกสามารถเข้าสู่กระแสเลือดได้หลังการฉีดเข้าเส้นเลือดดำ, การรับประทาน และการสูดดม สามารถตรวจพบในเลือด และปัสสาวะภายในเวลา 4 ชั่วโมง โดยอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.2 ไมโครเมตรสามารถเข้าสู่ระบบไหลเวียนโลหิตได้ ขณะที่อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมโครเมตรสามารถอยู่ในกระแสเลือดได้เป็นระยะเวลาหนึ่ง อย่างไรก็ตามไมโครพลาสติกที่ตรวจพบในการศึกษานี้มีขนาดใหญ่เกินกว่าขีดจำกัดของการกรองโดย glomerular filtration barrier ของไต งานวิจัยนี้จึงเสนอสมมติฐานว่าการขับออกของไมโครพลาสติกผ่านทางไตอาศัยกระบวนการทางเซลล์ ได้แก่ endocytosis และ exocytosis ของเซลล์เยื่อบุท่อไต (renal tubular epithelial cells) โดยไมโครพลาสติกจะถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ผ่าน receptor-mediated endocytosis หรือ macropinocytosis หลังจากนั้นจะถูกขนส่งภายในเซลล์โดย vesicular transport และถูกหลั่งออกสู่ท่อไตผ่านกระบวนการ exocytosis ก่อนถูกกำจัดออกนอกร่างกายผ่านทางปัสสาวะ (Pironti et al., 2023)(Pironti et al., 2023) จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ทำการศึกษา และวิเคราะห์ตัวอย่างปัสสาวะในมนุษย์จากอาสาสมัครจำนวน 6 คน (เพศชาย 3 คน, เพศหญิง 3 คน) อายุระหว่าง 16–35 ปี ที่พำนักอยู่ในพื้นที่ทางตอนใต้ของประเทศอิตาลีไม่น้อยกว่า 5 ปี การตรวจวิเคราะห์ใช้เทคนิค Raman microspectroscopy โดยย่อยสลายปัสสาวะด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 10% และกรองด้วยฟิลเตอร์ขนาดรูพรุน 1.2 ไมครอน ผลการศึกษาพบไมโครพลาสติกในปัสสาวะสี่จากหกตัวอย่าง โดยระบุชนิดของพอลิเมอร์ ได้แก่ polyethylene vinyl acetate (PVA), polyvinyl chloride (PVC), polypropylene (PP) และ polyethylene (PE) ซึ่งเป็นไมโครพลาสติกที่พบมากที่สุดในพื้นที่แวดล้อม อนุภาคที่ตรวจพบมีขนาดตั้งแต่ 4–15 ไมโครเมตร และมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ จากหลักฐานในงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Sun et al., 2022; Yu et al., 2024b)(Sun et al., 2022; Yu et al., 2024b) พบว่าไมโครพลาสติกสามารถเข้าสู่กระแสเลือดได้หลังการฉีดเข้าเส้นเลือดดำ, การรับประทาน และการสูดดม สามารถตรวจพบในเลือด และปัสสาวะ

ภายในเวลา 4 ชั่วโมง โดยอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.2 ไมโครเมตรสามารถเข้าสู่ระบบไหลเวียนโลหิตได้ ขณะที่อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมโครเมตรสามารถคงอยู่ในกระแสเลือดได้เป็นระยะเวลาหนึ่ง อย่างไรก็ตาม ไมโครพลาสติกที่ตรวจพบในการศึกษานี้มีขนาดใหญ่เกินกว่าขีดจำกัดของการกรองโดย glomerular filtration barrier ของไต งานวิจัยนี้จึงเสนอสมมติฐานว่าการขับออกของไมโครพลาสติกผ่านทางไตอาศัยกระบวนการทางเซลล์ ได้แก่ endocytosis และ exocytosis ของเซลล์เยื่อบุท่อไต (renal tubular epithelial cells) โดยไมโครพลาสติกจะถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ผ่าน receptor-mediated endocytosis หรือ macropinocytosis หลังจากนั้นจะถูกขนส่งภายในเซลล์โดย vesicular transport และถูกหลั่งออกสู่ท่อไตผ่านกระบวนการ exocytosis ก่อนถูกกำจัดออกจากร่างกายผ่านทางปัสสาวะ (Pironti et al., 2023)(Pironti et al., 2023)

จากผลการศึกษาก่อนหน้านี้ได้ทำการศึกษาระดับของไมโครพลาสติกในหลอดเลือดแดง และประเมินความสัมพันธ์ระหว่างการตรวจพบอนุภาคไมโครพลาสติกกับความเสี่ยงในการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือด โดยเก็บข้อมูลจากผู้ป่วยที่เข้ารับการผ่าตัด carotid endarterectomy เพื่อรักษาโรคหลอดเลือดแดงคาโรติดตีบตัน โดยไม่แสดงอาการ (asymptomatic carotid artery disease) โดยทำการตรวจวิเคราะห์โดยอาศัยเทคนิค pyrolysis–gas chromatography–mass spectrometry (pyrolysis–GC–MS), stable isotope analysis และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (electron microscopy) จากผลการศึกษาพบว่ากลุ่มตัวอย่างผู้ป่วยจำนวน 304 รายที่เข้าร่วมการศึกษามี 257 ราย (84.5%) ได้รับการติดตามอย่างต่อเนื่องด้วยระยะเวลาเฉลี่ย 33.7 ± 6.9 เดือน ผลการวิเคราะห์พบว่า polyethylene ถูกตรวจพบในคราบหลอดเลือดของผู้ป่วย 150 ราย (58.4%) โดยมีปริมาณเฉลี่ย 21.7 ± 24.5 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัมของตัวอย่างคราบหลอดเลือด นอกจากนี้ยังตรวจพบ polyvinyl chloride ในคราบหลอดเลือดของผู้ป่วย 31 ราย (12.1%) ที่ระดับเฉลี่ย 5.2 ± 2.4 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัม การตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบอนุภาคแปลกปลอมลักษณะหยักคมที่อยู่ภายในเซลล์มาโครฟาจ และกระจายอยู่ในเนื้อเยื่อรอบข้าง การวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยรังสีฟลูออเรสเซนซ์ของธาตุคลอรีนในบางอนุภาค การศึกษาพบว่าการตรวจพบไมโครพลาสติก ในคราบหลอดเลือดมีความสัมพันธ์กับความเสี่ยงที่เพิ่มขึ้นของการเกิดกล้ามเนื้อหัวใจตาย (myocardial infarction), โรคหลอดเลือดสมอง (stroke) โดยผู้ป่วยที่มีการตรวจพบไมโครพลาสติกในคราบหลอดเลือดมีความเสี่ยงสูงกว่ากลุ่มที่ไม่พบไมโครพลาสติก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (hazard ratio, 4.53; 95% confidence interval, 2.00–10.27; $P < 0.001$) (Marfella et al., 2024)(Marfella et al., 2024)(Marfella et al., 2024)(Marfella et al., 2024)

อ้างอิงจากงานวิจัยของ (Hartmann et al., 2024) ทำการตรวจสอบไมโครพลาสติกในตัวอย่างอุจจาระของมนุษย์ โดยกลุ่มตัวอย่างจากอาสาสมัครผู้ใหญ่สุขภาพดีจำนวน 15 คนในเขตกรุงเวียนนา ประเทศออสเตรีย เก็บตัวอย่างรวมทั้งหมด 60 ตัวอย่าง ซึ่งทำการวิเคราะห์โดย Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy สำหรับพลาสติก 10 ชนิดขนาด 5–5000 ไมโครเมตร พบว่าทุกตัวอย่างมีการตรวจพบไมโครพลาสติกอย่างน้อยหนึ่งชนิด โดยพลาสติกที่พบมากที่สุด คือ โพลีเอทิลีน (PE) และ โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) วิธีการเก็บตัวอย่างอุจจาระใช้ขวดแก้วปราศจากพลาสติกปนเปื้อน และการวิเคราะห์ไมโครพลาสติกแบ่งเป็นเชิงคุณภาพสำหรับอนุภาคขนาด 5–50 ไมโครเมตร และเชิงปริมาณสำหรับขนาด 50–500 และ 500–5000 ไมโครเมตร ผลการศึกษาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไมโครพลาสติกในอุจจาระกับการใช้พลาสติกในการบรรจุอาหารและการบริโภคอาหารแปรรูปในระดับสูง โดยการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า การบริโภคอาหารแปรรูปมีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญกับจำนวนไมโครพลาสติกที่ตรวจพบในอุจจาระ (Spearman correlation coefficient $\rho = 0.686-0.775$, $p < 0.05$) และการบริโภคอาหารที่ใช้บรรจุภัณฑ์พลาสติกมากมีความสัมพันธ์กับปริมาณไมโครพลาสติกที่พบในอุจจาระอย่างมีนัยสำคัญในหลายช่วงการทดลอง ($p < 0.05$) ผลการศึกษานี้บ่งชี้ถึงบทบาทสำคัญของรูปแบบการบริโภคอาหารและการใช้พลาสติกในชีวิตประจำวันต่อการรับไมโครพลาสติกเข้าสู่ร่างกายทางระบบทางเดินอาหาร

จากการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันอย่างมีนัยสำคัญว่าไมโครพลาสติกสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ผ่านหลากหลายเส้นทางและมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการก่อโรคของระบบหลอดเลือด งานวิจัยของ (Yu et al., 2024b) ที่ศึกษาระดับไมโครพลาสติกในเลือดของผู้ป่วยภาวะหลอดเลือดแดงนอกกะโหลกศีรษะตีบแคบ (ECAS) พบว่ากลุ่มผู้ป่วยมีระดับไมโครพลาสติกในเลือดสูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) และความเข้มข้นของไมโครพลาสติกมีความสัมพันธ์กับความรุนแรงของการตีบแคบของหลอดเลือด ($p < 0.001$) สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Pironti et al., 2023) ซึ่งรายงานการตรวจพบไมโครพลาสติกในปัสสาวะของมนุษย์ และเสนอสมมติฐานว่ากระบวนการขับออกทางไตอาจเกี่ยวข้องกับกระบวนการ endocytosis และ exocytosis ของเซลล์เยื่อบุท่อไต โดยไมโครพลาสติกสามารถเข้าสู่กระแสเลือดและผ่านเข้าสู่ท่อไตได้ งานวิจัยของ (Marfella et al., 2024) สนับสนุนข้อมูลดังกล่าว โดยพบว่า การตรวจพบไมโครพลาสติกในคราบหลอดเลือดแดงคาโรติดมีความสัมพันธ์กับความเสี่ยงที่เพิ่มขึ้นของการเกิดกล้ามเนื้อหัวใจตาย โรคหลอดเลือดสมอง และการเสียชีวิตอย่างมีนัยสำคัญ (hazard ratio, 4.53; 95% CI, 2.00–10.27; $p < 0.001$) นอกจากนี้งานวิจัยของ (Hartmann et al., 2024) พบว่าการบริโภคอาหารแปรรูปและการใช้บรรจุภัณฑ์พลาสติกมีความสัมพันธ์

กับปริมาณไมโครพลาสติกที่ตรวจพบในอุจจาระอย่างมีนัยสำคัญ (Spearman $\rho = 0.686-0.775$, $p < 0.05$) ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงบทบาทของพฤติกรรมบริโภคต่อการสัมผัสไมโครพลาสติก ผลการศึกษาทั้งหมดเหล่านี้ชี้ให้เห็นอย่างสอดคล้องกันว่าไมโครพลาสติกสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ และอาจมีบทบาทสำคัญในการก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพยาธิวิทยาในระบบหลอดเลือดอย่างมีนัยสำคัญ จากการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันอย่างมีนัยสำคัญว่าไมโครพลาสติกสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ผ่านหลากหลายเส้นทางและมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการก่อโรคของระบบหลอดเลือด งานวิจัยของ (Yu et al., 2024b) ที่ศึกษาระดับไมโครพลาสติกในเลือดของผู้ป่วยภาวะหลอดเลือดแดงนอกกะโหลกศีรษะตีบแคบ (ECAS) พบว่ากลุ่มผู้ป่วยมีระดับไมโครพลาสติกในเลือดสูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) และความเข้มข้นของไมโครพลาสติกมีความสัมพันธ์กับความรุนแรงของการตีบแคบของหลอดเลือด ($p < 0.001$) สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Pironti et al., 2023) ซึ่งรายงานการตรวจพบไมโครพลาสติกในปัสสาวะของมนุษย์ และเสนอสมมติฐานว่ากระบวนการขับออกทางไตอาจเกี่ยวข้องกับกระบวนการ endocytosis และ exocytosis ของเซลล์เยื่อบุท่อไต โดยไมโครพลาสติกสามารถเข้าสู่กระแสเลือดและผ่านเข้าสู่ท่อไตได้ งานวิจัยของ (Marfella et al., 2024) สนับสนุนข้อมูลดังกล่าว โดยพบว่าการตรวจพบไมโครพลาสติกในคราบหลอดเลือดแดงคาโรติดมีความสัมพันธ์กับความเสี่ยงที่เพิ่มขึ้นของการเกิดกล้ามเนื้อหัวใจตาย โรคหลอดเลือดสมอง และการเสียชีวิตอย่างมีนัยสำคัญ (hazard ratio, 4.53; 95% CI, 2.00–10.27; $p < 0.001$) นอกจากนี้งานวิจัยของ (Hartmann et al., 2024) พบว่าการบริโภคอาหารแปรรูปและการใช้บรรจุภัณฑ์พลาสติกมีความสัมพันธ์กับปริมาณไมโครพลาสติกที่ตรวจพบในอุจจาระอย่างมีนัยสำคัญ (Spearman $\rho = 0.686-0.775$, $p < 0.05$) ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงบทบาทของพฤติกรรมบริโภคต่อการสัมผัสไมโครพลาสติก ผลการศึกษาทั้งหมดเหล่านี้ชี้ให้เห็นอย่างสอดคล้องกันว่าไมโครพลาสติกสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ และอาจมีบทบาทสำคัญในการก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพยาธิวิทยาในระบบหลอดเลือดอย่างมีนัยสำคัญ

จากการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันอย่างมีนัยสำคัญว่าไมโครพลาสติกสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ผ่านหลากหลายเส้นทางและมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการก่อโรคของระบบหลอดเลือด งานวิจัยของ (Yu et al., 2024b) ที่ศึกษาระดับไมโครพลาสติกในเลือดของผู้ป่วยภาวะหลอดเลือดแดงนอกกะโหลกศีรษะตีบแคบ (ECAS) พบว่ากลุ่มผู้ป่วยมีระดับไมโครพลาสติกในเลือดสูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) และความเข้มข้นของไมโครพลาสติกมีความสัมพันธ์กับความรุนแรงของการตีบแคบของหลอดเลือด ($p < 0.001$) สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Pironti et al., 2023) ซึ่งรายงานการตรวจพบไมโครพลาสติกในปัสสาวะของมนุษย์ และเสนอสมมติฐานว่ากระบวนการขับ

ออกทางไตอาจเกี่ยวข้องกับกระบวนการ endocytosis และ exocytosis ของเซลล์เยื่อบุท่อไต โดยไมโครพลาสติกสามารถเข้าสู่กระแสเลือดและผ่านเข้าสู่ท่อไตได้ งานวิจัยของ (Marfella et al., 2024) สนับสนุนข้อมูลดังกล่าว โดยพบว่าการตรวจพบไมโครพลาสติกในคราบหลอดเลือดแดงคาโรติดมีความสัมพันธ์กับความเสี่ยงที่เพิ่มขึ้นของการเกิดกล้ามเนื้อหัวใจตาย โรคหลอดเลือดสมอง และการเสียชีวิตอย่างมีนัยสำคัญ (hazard ratio, 4.53; 95% CI, 2.00–10.27; $p < 0.001$) นอกจากนี้งานวิจัยของ (Hartmann et al., 2024) พบว่าการบริโภคอาหารแปรรูปและการใช้บรรจุภัณฑ์พลาสติกมีความสัมพันธ์กับปริมาณไมโครพลาสติกที่ตรวจพบในอุจจาระอย่างมีนัยสำคัญ (Spearman $\rho = 0.686-0.775$, $p < 0.05$) ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงบทบาทของพฤติกรรมการบริโภคต่อการสัมผัสไมโครพลาสติก ผลการศึกษาทั้งหมดเหล่านี้ชี้ให้เห็นอย่างสอดคล้องกันว่าไมโครพลาสติกสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์และอาจมีบทบาทสำคัญในการก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพยาธิสรีรวิทยาในระบบหลอดเลือดอย่างมีนัยสำคัญ จากการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันอย่างมีนัยสำคัญว่าไมโครพลาสติกสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ผ่านหลากหลายเส้นทางและมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการก่อโรคของระบบหลอดเลือด งานวิจัยของ (Yu et al., 2024b) ที่ศึกษาระดับไมโครพลาสติกในเลือดของผู้ป่วยภาวะหลอดเลือดแดงนอกกะโหลกศีรษะตีบแคบ (ECAS) พบว่ากลุ่มผู้ป่วยมีระดับไมโครพลาสติกในเลือดสูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) และความเข้มข้นของไมโครพลาสติกมีความสัมพันธ์กับความรุนแรงของการตีบแคบของหลอดเลือด ($p < 0.001$) สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Pironti et al., 2023) ซึ่งรายงานการตรวจพบไมโครพลาสติกในปัสสาวะของมนุษย์ และเสนอสมมติฐานว่ากระบวนการขับออกทางไตอาจเกี่ยวข้องกับกระบวนการ endocytosis และ exocytosis ของเซลล์เยื่อบุท่อไต โดยไมโครพลาสติกสามารถเข้าสู่กระแสเลือดและผ่านเข้าสู่ท่อไตได้ งานวิจัยของ (Marfella et al., 2024) สนับสนุนข้อมูลดังกล่าว โดยพบว่าการตรวจพบไมโครพลาสติกในคราบหลอดเลือดแดงคาโรติดมีความสัมพันธ์กับความเสี่ยงที่เพิ่มขึ้นของการเกิดกล้ามเนื้อหัวใจตาย โรคหลอดเลือดสมอง และการเสียชีวิตอย่างมีนัยสำคัญ (hazard ratio, 4.53; 95% CI, 2.00–10.27; $p < 0.001$) นอกจากนี้งานวิจัยของ (Hartmann et al., 2024) พบว่าการบริโภคอาหารแปรรูปและการใช้บรรจุภัณฑ์พลาสติกมีความสัมพันธ์กับปริมาณไมโครพลาสติกที่ตรวจพบในอุจจาระอย่างมีนัยสำคัญ (Spearman $\rho = 0.686-0.775$, $p < 0.05$) ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงบทบาทของพฤติกรรมการบริโภคต่อการสัมผัสไมโครพลาสติก ผลการศึกษาทั้งหมดเหล่านี้ชี้ให้เห็นอย่างสอดคล้องกันว่าไมโครพลาสติกสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์และอาจมีบทบาทสำคัญในการก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพยาธิสรีรวิทยาในระบบหลอดเลือดอย่างมีนัยสำคัญ

2.4 การระบุชนิดของไมโครพลาสติก

2.4.1 คุณลักษณะทางกายภาพ

2.4.1.1 กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope)

กล้องจุลทรรศน์แสงใช้หลักการ การหักเหและการเลี้ยวเบนของแสง ผ่านระบบเลนส์วัตถุและเลนส์ตา ทำให้สามารถมองเห็นภาพขยายของอนุภาคไมโครพลาสติกที่มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรได้ ความละเอียดของการมองเห็นขึ้นอยู่กับขีดจำกัดการเลี้ยวเบนของแสง (~200 นาโนเมตร) การประยุกต์ใช้กับไมโครพลาสติก ได้แก่ การวัดขนาดเชิงเส้น (linear dimension) การระบุสี และการจำแนกประเภทเชิงมอร์โฟโลยี เช่น เส้นใย (fibers) เศษชิ้น (fragments) หรือฟิล์ม (films) (Maes et al., 2017) กล้องจุลทรรศน์แสงใช้หลักการ การหักเหและการเลี้ยวเบนของแสง ผ่านระบบเลนส์วัตถุและเลนส์ตา ทำให้สามารถมองเห็นภาพขยายของอนุภาคไมโครพลาสติกที่มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรได้ ความละเอียดของการมองเห็นขึ้นอยู่กับขีดจำกัดการเลี้ยวเบนของแสง (~200 นาโนเมตร) การประยุกต์ใช้กับไมโครพลาสติก ได้แก่ การวัดขนาดเชิงเส้น (linear dimension) การระบุสี และการจำแนกประเภทเชิงมอร์โฟโลยี เช่น เส้นใย (fibers) เศษชิ้น (fragments) หรือฟิล์ม (films) (Maes et al., 2017)

2.4.1.2 กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ (Stereomicroscope)

กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอใช้หลักการ การมองเห็นเชิงสามมิติ (stereoscopic vision) โดยใช้ระบบเลนส์คู่ที่สร้างมุมมองต่างกันเล็กน้อยสำหรับตาซ้ายและตาขวา ทำให้เกิดการรับรู้เชิงความลึก (depth perception) ของอนุภาคไมโครพลาสติก จุดเด่นของกล้องชนิดนี้คือ มุมมองกว้าง (wide field of view) และ ระยะทำงานยาว (long working distance) ทำให้เหมาะสำหรับการคัดกรอง (screening) และการจำแนกไมโครพลาสติกจากตัวอย่างสิ่งแวดล้อมที่ยังไม่ผ่านการเตรียมซับซ้อน เช่น การแยกเส้นใยออกจากเศษชิ้นพลาสติก การตรวจสอบร่องรอยการสึกกร่อนหรือการแตกหัก (Eriksen et al., 2013)

2.4.1.3 กล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนส์ (Fluorescence microscope)

กล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนส์ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีพลังงานสูง เช่น แสง UV ส่องผ่านระบบเลนส์ เพื่อรวมแสงให้ส่องผ่านไปยังวัตถุ หรือตัวอย่างซึ่งวัตถุหรือตัวอย่างนั้นต้องผ่านการย้อมสีฟลูออเรสเซนส์ซึ่งจะเกิดการเปล่งแสงได้ เมื่อผ่านรังสี UV วัตถุได้รับพลังงานแสง วัตถุจะดูดกลืนแสงในช่วงคลื่นสั้นซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า จากนั้นจะปลดปล่อยพลังงานออกมาเป็นแสงในช่วงคลื่นยาวซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรือ Visible Light จึงทำให้เห็นส่วนประกอบที่ถูก

ย้อมในฉากที่มีดจึงทำให้สามารถมองเห็นวัตถุได้อย่างชัดเจน ในการตรวจหาไมโครพลาสติกสามารถใช้สีย้อม Nile red ควบคู่กับการใช้กล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนส์ได้เช่นกัน

2.4.1.4 กล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

ใช้หลักการสแกนลำแสงอิเล็กตรอนที่ถูกโฟกัสไปยังพื้นผิวของตัวอย่างเมื่ออิเล็กตรอนพลังงานสูงกระทบกับพื้นผิวจะเกิดปฏิกิริยากับวัตถุทำให้เกิดสัญญาณต่างๆ เช่น อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electrons) และอิเล็กตรอนสะท้อนกลับ (backscattered electrons) โดยการตรวจจับสัญญาณในขณะที่ลำแสงเคลื่อนผ่านตัวอย่าง SEM สามารถสร้างภาพที่แสดงโครงสร้างพื้นผิวและไมโครโครงสร้างได้อย่างละเอียดและเนื่องจากลำแสงอิเล็กตรอนมีพลังงานสูงจึงสามารถกระตุ้นอะตอมและโมเลกุลในบริเวณพื้นผิวของตัวอย่างบางครั้งอาจก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีหรือทางกายภาพซึ่งทำให้ SEM มีทั้งความสามารถในการถ่ายภาพและยังสามารถวิเคราะห์คุณสมบัติของวัตถุอีกทั้งยังมีการเตรียมตัวอย่างที่ง่ายและสะดวกกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นเมื่อเทียบกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดอื่น

2.4.2 คุณลักษณะทางเคมี

2.4.2.1 FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

FTIR เป็นเทคนิค สเปกโทรสโกปีแบบไม่ทำลายตัวอย่าง (nondestructive) ที่ใช้รังสีอินฟราเรด (IR) เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของสาร โดยอาศัยการที่พันธะเคมีในโมเลกุลสามารถดูดกลืนรังสีอินฟราเรด ได้ เมื่อความถี่ของรังสีตรงกับความถี่การสั่น (molecular vibration) ของพันธะนั้น ๆ พลังงานจะถูกดูดกลืน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ โมเมนต์ขั้วไฟฟ้า (dipole moment) ซึ่งแสดงออกมาเป็น สเปกตรัมอินฟราเรด หรือที่เรียกว่า spectral fingerprint ของสารนั้น ช่วงที่ใช้ในการวิเคราะห์ไมโครพลาสติกคือ Mid-infrared (MIR) ประมาณ $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งครอบคลุมย่านการสั่นของพันธะเคมีเกือบทั้งหมดในพอลิเมอร์ เช่น C-H, C=O, N-H, C-O เป็นต้น ลักษณะของกราฟดูดกลืนที่ได้มีความจำเพาะ สามารถนำไปเปรียบเทียบกับ ฐานข้อมูลสเปกตรัม (spectral library/database) หรือใช้วิธีทางสถิติขั้นสูง (chemometric methods) เพื่อระบุชนิดของพอลิเมอร์และสารปนเปื้อนได้อย่างแม่นยำ

2.4.2.2 Raman (Raman Spectroscopy)

Raman Spectroscopy เป็นเทคนิคที่อาศัยการยิงแสงเลเซอร์โมโนโครเมติกไปยัง

ตัวอย่าง เมื่อแสงเลเซอร์กระทบกับโมเลกุล ส่วนใหญ่จะกระเจิงกลับมาในลักษณะ Rayleigh scattering ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่น แต่จะมีเพียงส่วนน้อยที่เกิดการกระเจิงแบบ Raman scattering โดยโฟตอนที่สะท้อนกลับมามีพลังงานเปลี่ยนไปตามโหมดการสั่นของพันธะเคมีในโมเลกุล ความแตกต่างของพลังงานนี้เรียกว่า Raman shift (วัดเป็น cm^{-1}) ซึ่งมีลักษณะเฉพาะเหมือนลายนิ้วมือ ของสารนั้น ๆ สำหรับไมโครพลาสติก พลาสติกแต่ละชนิดจะมีหมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่แตกต่างกัน เช่น พันธะ C-H ใน polyethylene และ polypropylene, วงแหวนเบนซีนใน polystyrene, พันธะ C-Cl ใน polyvinyl chloride, หมู่คาร์บอนิล (C=O) ใน polyethylene terephthalate หรือกลุ่ม nitrile (C≡N) ใน polyacrylonitrile การสั่นของพันธะเหล่านี้ทำให้ได้ Raman spectra ที่จำเพาะ สามารถนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลอ้างอิงเพื่อระบุชนิดของโพลิเมอร์ได้อย่างแม่นยำ

2.4.2.3 Pyrolysis GC-MS

Pyrolysis-GC-MS เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เชิงแยกที่ใช้สำหรับการศึกษาลักษณะเฉพาะของโพลิเมอร์และวัสดุเชิงประกอบ (composite materials) หลากหลายชนิด ที่ช่วยลดความซับซ้อนในการเตรียมตัวอย่างซึ่งพบได้ใน GC-MS แบบดั้งเดิม เช่น การสกัด การเจือจาง การทำให้สารเข้มข้น การทำปฏิกิริยาเคมี ตลอดจนการให้ความร้อนหรือการทำความเย็น ตัวอย่างส่วนใหญ่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้โดยตรงในสภาพที่รับมาหลักการของเทคนิคนี้แม้ไม่ซับซ้อนแต่มีความไวสูง โดยตัวอย่างจะถูกทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนอย่างจับพล้น (thermal degradation) ภายใต้สภาวะเฉื่อย ส่งผลให้ได้สารโมเลกุลขนาดเล็กที่มีความเสถียร (pyrolyzates) เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อสาร pyrolyzates ที่เกิดขึ้นจะถูกแยกด้วยโครมาโทกราฟีแก๊สในลักษณะเดียวกับ GC-MS ทั่วไป โดยขึ้นอยู่กับปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลกับ stationary phase (ตัวรองรับแข็งที่เคลือบด้วยสารเฉพาะ) หลังจากการแยกแล้ว สัญญาณที่ตรวจวัดได้จะถูกประมวลผลและตีความโดยนักวิทยาศาสตร์ผู้เชี่ยวชาญ เพื่อนำไปสรุปเป็นข้อมูลเชิงลึกของวัสดุต้นแบบ การตั้งค่าโปรแกรมอุณหภูมิของหน่วยไฟโรไลซิสมีความสำคัญต่อความถูกต้องและความสามารถในการทำซ้ำของผลการทดลอง เมื่อมีการป้อนตัวอย่างเข้าสู่หน่วยไฟโรไลซิส ตัวอย่างจะถูกทำให้ร้อนจากอุณหภูมิห้องไปยังอุณหภูมิที่ต้องการอย่างรวดเร็วภายใต้บรรยากาศเฉื่อย การให้ความร้อนแบบจับพล้นนี้ช่วยให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเสถียรและทำซ้ำได้ หากต้องการทำการทดสอบเพิ่มเติม ตัวอย่างจะถูกทำให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องภายใต้บรรยากาศเฉื่อย ก่อนที่จะตั้งค่าโปรแกรมใหม่สำหรับการทดลองรอบถัดไป

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาก่อนหน้าการจำแนกไมโครพลาสติกในตะกอนดิน และสัตว์หน้าดินกลุ่มหอยในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงบอระเพ็ดจังหวัดนครสวรรค์ เป็นการศึกษาการปนเปื้อนไมโครพลาสติก โดยศึกษาเกี่ยวกับความแตกต่างทางปริมาณและสัณฐานวิทยาของไมโครพลาสติกในฤดูแล้งและฤดูฝนในด้านปริมาณ สัณฐานวิทยาได้แก่ รูปร่าง, สี และขนาด รวมถึงชนิดของพอลิเมอร์ของไมโครพลาสติก โดยการศึกษาสัณฐานวิทยาของไมโครจะทำการศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอไมโครสโคป และชนิดของพอลิเมอร์ของไมโครพลาสติกจะทำการวิเคราะห์โดย Fourier Transform Infrared Spectrometer หรือ FTIR)จากการศึกษาพบว่าปริมาณไมโครพลาสติกเฉลี่ยรวมในตะกอนดินทั้งหมดจากฤดูแล้งและฤดูฝนคิดเป็น 2.90 ± 2.86 ชิ้นต่อกิโลกรัมน้ำหนักดินแห้งโดยมีปริมาณไมโครพลาสติกเฉลี่ยในฤดูแล้งคิดเป็น 3.00 ± 2.67 ชิ้นต่อกิโลกรัมน้ำหนักดินแห้งและในฤดูฝนคิดเป็น 2.80 ± 3.08 ชิ้นต่อกิโลกรัมน้ำหนักดินแห้ง ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อจำแนกรูปร่างไมโครพลาสติกที่พบในตะกอนดินทั้งหมด 4 รูปร่างได้แก่ เส้นใย, เส้น, แผ่น และเศษชิ้นส่วนพบว่าลักษณะไมโครพลาสติกในฤดูแล้งกับฤดูฝนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (มหาสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาลัยนเรศวร.,2563)

ทำการศึกษากาวิเคราะห์ไมโครพลาสติกที่ปนเปื้อนในขวดน้ำ, น้ำประปา และน้ำที่บำบัดในประเทศไทย เพื่อศึกษาการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในขวดน้ำ โดยเก็บจากยี่ห้อน้ำดื่มที่แตกต่างกัน 10 ยี่ห้อซึ่งแต่ละยี่ห้อใช้ประเภทของขวดพลาสติกที่แตกต่างกันแต่โดยส่วนใหญ่แล้วบริษัทผู้ผลิตจะใช้ขวดพลาสติกประเภท PET จากนั้นนำน้ำดื่มมาทำการสกัด และวิเคราะห์ประเภท, สัณฐานวิทยา และปริมาณของไมโครพลาสติกด้วย FT-IR หรือ Raman spectroscopy โดยวิธีวิเคราะห์จะคำนึงถึงขนาดของไมโครพลาสติกที่ต้องการการศึกษา (Dinuka kankanige.,2019)

งานวิจัยเรื่องปัญหามลภาวะของไมโครพลาสติกที่ปนเปื้อนในน้ำดื่ม น้ำประปาส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชากรในประเทศไทย โดยมีการเก็บตัวอย่างน้ำจากสถานศึกษา 2 แห่ง จากนั้นนำมาวิเคราะห์โดยการสกัดเริ่มจากใช้ แผ่นกรอง cellulose nitrate (CN) ขนาดรู 0.45 ไมโครเมตร กรองน้ำผ่าน vacuum pump จากนั้นใช้เทคนิค Nile red-fluorescence staining กับแผ่นกรอง cellulose nitrate และนำไปส่องใต้กล้อง fluorescence microscope จากการวิเคราะห์พบว่า สถานศึกษาที่ 2 พบไมโครพลาสติกความเข้มข้น 122 ± 60 particles/L หรือมีประสิทธิภาพในการกำจัด 70% ซึ่งเมื่อเทียบกับสถานศึกษาที่ 1 ที่มีความเข้มข้นของไมโครพลาสติก 211 ± 70 particles/L หรือมีประสิทธิภาพในการกำจัดไมโครพ

ลาสติก 20% กล่าวคือประสิทธิภาพในการกำจัดไมโครพลาสติกในสถานศึกษาที่ 1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไมโครพลาสติกที่ดีมากกว่าสถานศึกษาที่ 2 และจากฐานฐานวิทยาพบว่าในน้ำดื่มส่วนใหญ่จะสามารถพบไมโครพลาสติกรูปร่างเป็นชิ้นส่วนถึง 86-99% (ขนาดเล็กกว่า 200 ไมโครเมตร) และพบรูปร่างเส้นใยเล็กน้อย (ขนาดใหญ่กว่า 200 ไมโครเมตร) ซึ่งไมโครพลาสติกที่พบนั้นอาจปนเปื้อนมาจากแหล่งน้ำที่นำมาใช้ผลิตน้ำดื่มอยู่ก่อนหน้านี้แล้ว และบางส่วนอาจมาจากการย่อยสลายจากไมโครพลาสติกขนาดใหญ่ในระหว่างการบำบัดน้ำ รวมถึงอาจเกิดจากวิธีการกำจัดไมโครพลาสติกที่ไม่มีประสิทธิภาพได้เช่นกัน ดังนั้นจากผลการศึกษพบว่า พบไมโครพลาสติกขนาด 0-50 ไมโครเมตรเป็นส่วนใหญ่ในน้ำประปาและน้ำดื่ม เมื่อนำผลการวิเคราะห์จากสถานศึกษาที่ 1 และสถานศึกษาที่ 2 นำมาคำนวณค่า Estimated Daily Intake of Microplastics (EDIMPs) หรือค่าไมโครพลาสติกที่ร่างกายได้รับต่อวัน เมื่อคำนวณออกมาได้แล้วจะได้ค่า 228 และ 183 particles/(person-d) หมายความว่าค่าที่คำนวณได้นั้นมีความเสี่ยงต่อร่างกายมนุษย์โดยไมโครพลาสติกขนาดเล็กกว่า 2 ไมโครเมตร สามารถสะสมอยู่ในกระแสเลือดและอวัยวะต่างๆ และไมโครพลาสติกขนาด 50 ไมโครเมตร สามารถส่งต่อไปที่ทางเดินอาหารและระบบน้ำเหลืองได้ จึงสรุปได้ว่าการบำบัดน้ำอย่างมีประสิทธิภาพจึงมีความจำเป็นอย่างมากก่อนจะนำมาใช้อุปโภคบริโภคเพื่อป้องกันปัญหาสุขภาพที่อาจส่งผลกระทบต่อชีวิตในภายหลัง (Kesirine Jinda et al., 2023)

งานวิจัยการวิเคราะห์ไมโครพลาสติกในตัวอย่างเครื่องดื่มด้วยเทคนิค TD-GC/MS โดยใช้เทคนิค Thermal Desorption (TD) ร่วมกับ Gas chromatography ในการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณพลาสติกประเภท PET ในเครื่องดื่มบรรจุขวด โดยสามารถวิเคราะห์สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds, VOCs) ที่เป็นส่วนประกอบของไมโครพลาสติกแต่ละชนิดซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะทำให้สามารถวิเคราะห์ไมโครพลาสติกได้ทั้งการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative) โดยการวิเคราะห์ด้วยระบบ TD-GS จะช่วยเพิ่มความไวในการวิเคราะห์ เนื่องจากเทคนิค TD ใช้ตัวดูดซับเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารก่อนจะชะล้างสาร VOCs เข้าสู่ระบบ GC ได้อย่างรวดเร็ว โดยการเตรียมตัวอย่างจะใช้กระดาษกรองชนิด Quartz Microfiber ขนาด 0.3 มิลลิเมตร ล้างด้วย Hydrogen peroxide, Acetone และน้ำบริสุทธิ์เพื่อช่วยกำจัดสารอื่นที่ไม่ต้องการวิเคราะห์ จากผลการวิเคราะห์พบว่า พบสาร 2,4-di-tert-butylphenol (2,4-DTBP) และ Tetrahydrofuran (THF) ซึ่งสาร 2,4-DTBP นั้นสามารถนำมาใช้ในการหาปริมาณของ PET ในน้ำดื่มได้เนื่องจากสาร 2,4-DTBP เป็นสารที่แปรผันตรงกับปริมาณพลาสติก PET และเมื่อนำน้ำตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TD-GS/MS พบว่าได้ค่า 220 ไมโครกรัมต่อลิตรซึ่งหมายถึงมีค่าร้อยละการกลับคืน (% Recovery) ที่ >90% ดังนั้นจึงสรุป

ได้ว่า การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TD-GC/MS มีข้อดีคือไม่ต้องมีการเคลื่อนย้ายตัวอย่างออกจากกระดากกรองในขั้นตอนสุดท้าย ทำให้ลดการสูญเสียตัวอย่างระหว่างขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างลงได้ และเป็นเทคนิคที่ใช้อุณหภูมิไม่สูงจนเป็นการทำลายตัวอย่าง นอกจากนั้นเทคนิค TD-GS/MS ไม่มีข้อจำกัดเรื่องขนาดของอนุภาคพลาสติก ทำให้สามารถรองรับงานวิเคราะห์ในระดับนาโนพลาสติกในอนาคตได้เช่นกัน (รติมาศ บุญล้อม.,2023)

งานวิจัยการตรวจวิเคราะห์ไมโครพลาสติกโดยวิธี FT-IR ในน้ำดื่ม โดยใช้น้ำดื่มบรรจุขวดยี่ห้อเดียวกันอย่างน้อย 3 ลิตร ใช้แผ่นกรอง membrane nitrate filter ขนาดรู 0.45 ไมโครเมตร หรือ PTFE filter ขนาดรู 5 ไมโครเมตร โดยใช้เครื่องกรองสุญญากาศ จากนั้นนำไปวิเคราะห์ต่อโดยใช้เทคนิค Nile red solution และนำไปส่องใต้กล้อง fluorescence microscope โดยใช้เครื่องกรองสุญญากาศ จากการศึกษาพบว่า น้ำดื่มที่ผ่านการกรองโดย PTFE filter มีประสิทธิภาพมากที่สุด แต่ membrane nitrate filter ก็สามารถใช้ในการกรองและมีประสิทธิภาพเช่นกันอีกทั้งยังเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์มากกว่า (Angelica Geovanna Zea Cobos et al.,2024)

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ในปัจจุบันสามารถพบปัญหาการปนเปื้อนไมโครพลาสติกในสิ่งแวดล้อมปริมาณสูงซึ่งปัญหาดังกล่าวนี้จะรวมไปถึงปัญหาการปนเปื้อนไมโครพลาสติกในน้ำที่ใช้อุปโภคบริโภคในชีวิตประจำวัน ทั้งในแหล่งน้ำธรรมชาติ น้ำประปา และโดยเฉพาะน้ำดื่มที่บรรจุขวดด้วยเช่นกัน ซึ่งการปนเปื้อนไมโครพลาสติกในน้ำดื่มบรรจุขวดอาจส่งผลกระทบต่อร่างกายของมนุษย์ได้โดยตรง เพราะถ้าหากร่างกายได้รับไมโครพลาสติกต่อวันในปริมาณมากเกินไป อาจเกิดการสะสมไมโครพลาสติกตามบริเวณเยื่อหุ้มหรืออวัยวะต่างๆ ภายในร่างกายโดยความรุนแรงจะขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของไมโครพลาสติก กล่าวคือหากมีการสะสมไมโครพลาสติกในร่างกายเป็นระยะเวลานานอาจนำไปสู่การเกิดโรคที่รุนแรงตามมาด้วยเช่นกัน ดังนั้น การตรวจวัดปริมาณและชนิดไมโครพลาสติกในน้ำดื่มบรรจุขวดที่วางขายในร้านสะดวกซื้อในประเทศไทยจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากเพราะนอกจากจะสามารถสร้างความตระหนักรู้ต่อผู้บริโภคและเป็นข้อมูลให้ผู้ผลิตและพัฒนากระบวนการผลิตน้ำดื่มแล้ว ยังช่วยสามารถทำให้ทราบถึงวิธีการสกัดและตรวจวัดไมโครพลาสติกในน้ำดื่มบรรจุขวดที่เหมาะสมและมีคุณภาพด้วยเช่นกัน

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 การออกแบบการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative research) เพื่อศึกษาการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในขวดน้ำดื่มชนิด PET เปรียบเทียบกับชนิดขวดแก้วที่วางจำหน่ายในร้านสะดวกซื้อในประเทศไทย โดยตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติก 6 ยี่ห้อและตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดแก้ว 2 ยี่ห้อ จะถูกกรองผ่านกระดาษกรองชนิด Glass fiber filter และเครื่องกรองสุญญากาศ จากนั้นทำการตรวจวัดการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกภายใต้กล้องจุลทรรศน์ และตรวจยืนยันชนิดของไมโครพลาสติกด้วยเทคนิค Fourier Transform infrared Spectroscopy (FTIR)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องมือ

- 1) เครื่องปั๊มสุญญากาศ (Rocker 400 Oil Free Vacuum)
- 2) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง
- 3) ตู้อบความร้อน

3.2.2 อุปกรณ์

- 1) ชุดกรองเครื่องแก้วสุญญากาศ (Glass vacuum filtration apparatus) ได้แก่
 - ฝาปิดกันฝุ่น
 - Filter cup 1000 ml
 - Glass base & Cap 47mm
 - Securing clip
 - Sand core filter
 - Conical collection flask 5000 ml
 - PTFE connector
- 2) บีกเกอร์ขนาด 2000 mL
- 3) จานเพาะเชื้อชนิดแก้ว (Glass petri dish)
- 4) กระดาษกรองชนิด glass fiber ขนาดรู 1 ไมครอน
- 5) คีมคีบชนิดแสดนเลส

3.3 สารเคมีและน้ำยาทดสอบ

- 1) Deionized Water (DI)

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 กลุ่มตัวอย่าง

- 1) การคำนวณกลุ่มตัวอย่าง

การประมาณการขนาดตัวอย่างเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยปริมาณการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำดื่มระหว่างน้ำดื่มบรรจุขวดชนิด PET กับขวดชนิดแก้ว ที่วางจำหน่ายในร้านสะดวกซื้อทุกยี่ห้อในประเทศไทย ระหว่างเดือน มิถุนายน ถึง ธันวาคม พ.ศ.2568 โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ (Kankanige & Babel, 2019)

จากสูตร

$$n/\text{group} = \frac{2(Z_\alpha + Z_\beta)^2 \sigma^2}{(\mu_1 - \mu_2)}$$

กำหนดให้

μ_1 แทน ค่าเฉลี่ยของไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดชนิด PET

μ_2 แทน ค่าเฉลี่ยของไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดแก้ว

กำหนดค่าความเชื่อมั่นที่ 95% หรือ $\alpha = 0.05$

$$Z_\alpha = 1.645$$

และใช้อำนาจการทดสอบที่ 80% หรือ $\beta = 0.2$

$$Z_\beta = 0.84$$

แทนค่า

$$n/\text{group} = \frac{2(1.645 + 0.84)^2 15.91^2}{(140 - 52)}$$

$n/\text{group} = 35.52$ หรือ 36 ตัวอย่าง

จากสูตรคำนวณความแปรปรวนรวม

$$S_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

กำหนดให้

n_1 แทน จำนวนตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดชนิด PET

n_2 แทน จำนวนตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดแก้ว

s_1 แทน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดชนิด PET

s_2 แทน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดแก้ว

แทนค่า

$$S_p = \sqrt{\frac{(65 - 1)19^2 + (30 - 1)4^2}{65 + 30 - 2}}$$

$$S_p = 15.91$$

2) การเก็บตัวอย่าง

ทำการสุ่มตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดชนิด PET และชนิดแก้วที่นิยมในประเทศไทยอย่างละ 6 ยี่ห้อ ยี่ห้อละ 6 ตัวอย่างตามลำดับความนิยมรวมทั้งหมดอย่างละ 36 ตัวอย่าง โดยทำการสุ่มตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดชนิด PET แบบเป็นระบบ (Systematic Sampling) จากร้านสะดวกซื้อบริเวณรอบมหาวิทยาลัยรังสิต และทำการสุ่มตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดแก้วแบบเจาะจง (purposive sampling)

ตารางที่ 3.1 กำหนดหมายเลขในแต่ละหน่วยประชากร

ลำดับ	ชื่อร้านสะดวกซื้อ
1	ร้าน CJ MORE ถนน ร.พ.ช.
2	ร้าน Lotus Go Fresh (ข้างอาคารสอง มหาวิทยาลัยรังสิต)
3	ร้าน 7-Eleven ซอยหอแว่นดำ (จุดที่ 1)
4	ร้าน 7-Eleven ซอยหอแว่นดำ (จุดที่ 2)
5	ร้าน 7-Eleven หอพักใน อาคาร 9 มหาวิทยาลัยรังสิต
6	ร้าน 7-Eleven ซอยหอพักวิศจารย์
7	ร้าน 7-Eleven อาคาร 6 มหาวิทยาลัยรังสิต
8	ร้าน 7-Eleven ถนนทางไปหน้าเมืองเอก (จุดที่ 1)
9	ร้าน 7-Eleven ถนนทางไปหน้าเมืองเอก (จุดที่ 2)
10	ร้าน 7-Eleven ตลาดส้มมาร
11	ร้าน 7-Eleven ลีแยกขุนวาย
12	ร้าน 7-Eleven ด้านหลังมหาวิทยาลัย (จุดที่ 1)
13	ร้าน 7-Eleven ด้านหลังมหาวิทยาลัย (จุดที่ 2)
14	ร้าน 7-Eleven ด้านหลังมหาวิทยาลัย (จุดที่ 3)
15	ร้าน 7-Eleven ถนน ร.พ.ช. (จุดที่ 1)
16	ร้าน 7-Eleven ถนน ร.พ.ช. (จุดที่ 2)
17	ร้าน 7-Eleven ข้างอาคาร 4 มหาวิทยาลัยรังสิต
18	Tops Daily ข้างร้านอาหารฤดูกาล
19	Tops Daily ตรงข้ามทางออกมหาวิทยาลัยรังสิต

จากสูตรคำนวณหาช่วงของการสุ่ม (Sampling interval แทนด้วย I)

$$I = \frac{N}{n}$$

กำหนดให้

N แทน จำนวนร้านสะดวกซื้อ 19 ร้าน

n แทน ตัวอย่างขนาดน้ำจำนวน 6 ขนาด

I แทน ช่วงของการสุ่ม

แทนค่า

$$I = \frac{19}{6}$$

$$I = 3.17 \approx 3$$

เมื่อ I ไม่เป็นจำนวนเต็มจึงเลือกหน่วยตัวอย่างเริ่มต้น 1 & r & 3 สมมติได้ r=2 ดังนั้นเริ่มหลังที่ 2 นับเว้นไปทุกๆ 3 หลัง จะได้หน่วยตัวอย่างคือหลังที่ 2,5,8,11,14,17,3,6,...



รูปที่ 3.1 แผนที่ร้านสะดวกซื้อ

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลตัวอย่างยี่ห่อน้ำดื่ม

ยี่ห่อน้ำดื่ม	Lot number	ปริมาตร (มิลลิลิตร)	ชนิดขวดบรรจุ	ชนิดฝา
ตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดพลาสติก				
A1	03:37 L2	1,000	PET	PE
A2	01:14 L2	1,000		

A3	13:38 L2	1,000		
A4	09:11 L2	1,000		
A5	11.01 L2	1,000		
A6	19:03 L2	1,000		
B1	250626CB1414	1,000	PET	PE
B2	130826PG1748	1,000		
B3	140826PG1604	1,000		
B4	130826PG0449	1,000		
B5	140826PG0749	1,000		
B6	100826PG1804	1,000		
C1	52050521AA	1,000	PET	PE
C2	52260521BA	1,000		
C3	52290521BA	1,000		
C4	5220521BA 17:44	1,000		
C5	52050521AA	1,000		
C6	52220521BA	1,000		
D1	51990521AB 19:50	1,000	PET	PE
D2	51250521CA 19:50	1,000		
D3	51990521AB 02:27	1,000		
D4	52190521AA 14:11	1,000		
D5	52190521AA 16:40	1,000		
D6	52010521AB 06:16	1,000		
E1	5227C3060501	1,000	PET	PE
E2	5226C3061741	1,000		
E3	5218C3062254	1,000		
E4	5228C3061135	1,000		
E5	5225C3061339	1,000		

E6	5241F3041531	1,000		
F1	BF0307272A0355	1,000	PET	PE
F2	BF2608272A1818	1,000		
F3	BF2308272A1345	1,000		
F4	BF1707272A1322	1,000		
F5	BF1106272A0110	1,000		
F6	BF1670272A0413	1,000		
ตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดแก้ว				
G1	09:46 L2	1,000	แก้ว	PE และ
G2	09:46 L2	1,000		อลูมิเนียม
G3	09:46 L2	1,000		
G4	09:46 L2	1,000		
G5	09:46 L2	1,000		
G6	09:46 L2	1,000		
ตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดแก้ว				
H1	250826PH1025	1,000	แก้ว	PE และ
H2	250826PH1025	1,000		อลูมิเนียม
H3	250826PH1025	1,000		
H4	250826PH1025	1,000		
H5	250826PH1025	1,000		
H6	250826PH1025	1,000		

3.4.2 การทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

3.4.2.1 วิธีการสกัดไมโครพลาสติก

1) ทำการกรองน้ำกลั่นชนิด Deionized Water (DI) เป็นตัวควบคุมคุณภาพ โดยใช้เครื่องกรองสุญญากาศ (vacuum filtration) ผ่านแผ่นกรองชนิด Glass fiber filter ขนาดรูพรุน 1 μm และใช้เครื่องปั๊มสุญญากาศ Rocker 400 Oil Free Vacuum ที่ความดัน 34 (L/min)

2) ทำการกรองน้ำตัวอย่าง 15 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 1000 mL โดยใช้เครื่องกรองสุญญากาศ (vacuum filtration) ผ่านแผ่นกรองชนิด Glass fiber filter ขนาดรู 1 μm โดยใช้เครื่องปั๊มสุญญากาศ Rocker 400 Oil Free Vacuum ที่ความดัน 34 (L/min)

3) นำแผ่นกรองออกจากเครื่องกรองสุญญากาศ (vacuum filtration) โดยใช้ Forceps และนำไปวางบน Petri dish

4) นำไปอบแห้งในตู้อบ (Drying oven) ที่ 60°C เป็นเวลา 15 นาที

5) นำแผ่นกรองไปตรวจหาไมโครพลาสติกตามสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์

แบบใช้แสง

6) นำแผ่นกรองไปตรวจหาไมโครพลาสติกตามสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์

แบบใช้แสง

7) นำไมโครพลาสติกที่เจอบนแผ่นกรองไปตรวจยืนยันและแยกชนิดด้วย

เทคนิค Fourier Transform infrared Spectroscopy (FT-IR)

3.5 การรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูล

3.5.1 การวิเคราะห์ทางสถิติเชิงพรรณนา

ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณไมโครพลาสติกที่บรรจุในขวดน้ำดื่มชนิด PET และขวดชนิดแก้ว

3.5.2 การวิเคราะห์ทางสถิติเชิงอนุมาน

การทดสอบค่าเฉลี่ย 2 ประชากรที่เป็นอิสระกัน กำหนดระดับนัยสำคัญเป็น 0.05

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

เมื่อ μ_1 คือ ค่าเฉลี่ยของการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำดื่มที่บรรจุในขวดชนิด PET

μ_2 คือ ค่าเฉลี่ยของการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำดื่มที่บรรจุในขวดชนิดแก้ว

จากสมมติฐานดังกล่าวเป็นการทดสอบทางเดียวทางขวา ในกรณีที่ข้อมูลมีการแจกแจงปกติจะใช้สถิติทดสอบ Independent t test และใช้สถิติทดสอบ Mann-Whitney U-Test ในกรณีที่ข้อมูลไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

เกณฑ์ในการแปลผล เป็นการทดสอบ 2 ทาง ดังนั้นเกณฑ์ในการแปลผลคือจะปฏิเสธ H_0 เมื่อ

- 1) Sig (2-tailed) ≤ 0.05 และ
- 2) ค่าสถิติทดสอบ t เป็นลบ

3.6 แผนการดำเนินงาน

ระยะเวลาทำการวิจัย ตั้งแต่เริ่มต้นถึงสิ้นสุดการวิจัย ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.3 แสดงแผนการดำเนินงาน

การดำเนินงานวิจัย	เดือน / ปี				
	ธ.ค.67	พ.ค.68	ส.ค.68	ต.ค.68	ธ.ค.68
	-	-	-	-	-
	เม.ย.68	ก.ค.68	ก.ย.68	พ.ย.68	ม.ค.69
1.วางแผนงานวิจัย รวบรวมข้อมูล สืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้อง					
2.จัดเตรียมอุปกรณ์ น้ำยา ที่ใช้ในการ สกัด และตัวอย่างน้ำดื่ม					
3.ดำเนินการทดลองการสกัดไมโครพ ลาสติกจากขวดน้ำดื่มตัวอย่าง					
4.เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล					
5.จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์					

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ปริมาณและขนาดไมโครพลาสติก

การตรวจวิเคราะห์ปริมาณการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำดื่มยี่ห้อ A ถึง H ได้ดำเนินการเพื่อประเมินระดับการปนเปื้อนในตัวอย่างน้ำดื่มแต่ละยี่ห้อ โดยเพื่อป้องกันการปนเปื้อนระหว่างตัวอย่างน้ำดื่ม จึงได้ดำเนินการควบคุมคุณภาพการทดสอบโดยใช้น้ำปราศจากไอออน (deionized water) เป็นตัวอย่างควบคุม ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณไมโครพลาสติกที่ตรวจวัดได้จากตัวอย่างทั้งหมด 8 ครั้ง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.75 ± 1.67 อนุภาคต่อลิตร (p/L) ทั้งนี้พบการปนเปื้อนสูงสุดในตัวอย่างน้ำดื่มยี่ห้อ E และ H จำนวน 4 อนุภาคต่อลิตร รองลงมาคือตัวอย่างน้ำดื่มยี่ห้อ G จำนวน 3 อนุภาคต่อลิตร ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำปราศจากไอออน (ตัวอย่างควบคุม)

ยี่ห้อน้ำดื่มที่ นำมาวิเคราะห์	Background contamination (de-ionized water) (p/L)				total
	1-100 μm	101-300 μm	301-500 μm	>500 μm	
A	-	-	-	-	-
B	1	-	-	-	1
C	-	-	-	1	1
D	1	-	-	-	1
E	4	-	-	0	4
F	-	-	-	-	-

G	1	-	-	2	3
H	3	1	-	-	4
total	10	1	0	3	14
Mean±SD	1.75±1.67				

จากผลการศึกษาปริมาณไมโครพลาสติกที่ตรวจพบในตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดยี่ห้อ A–H ดังตารางที่ 4.2 พบว่าปริมาณไมโครพลาสติกที่ตรวจพบมีความแตกต่างกันในแต่ละยี่ห้อ โดยมีการปนเปื้อนเฉลี่ย (Mean ± SD) อยู่ในช่วง 0.83 ± 0.75 ถึง 3.33 ± 1.21 p/L ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่างของระดับการปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์น้ำดื่มที่มีลักษณะบรรจุภัณฑ์และกระบวนการผลิตที่ต่างกัน ตัวอย่างน้ำดื่มยี่ห้อ A–F เป็นตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดพลาสติก ยี่ห้อ G และ H คือตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดน้ำชนิดแก้ว โดยพบว่ายี่ห้อ A มีปริมาณการปนเปื้อนไมโครพลาสติกต่ำที่สุดคือ 0.83 ± 0.75 p/L ในขณะที่ยี่ห้อ E มีค่าปริมาณสูงที่สุดคือ 3.33 ± 1.21 p/L ส่วนยี่ห้ออื่น ๆ ได้แก่ B (1.67 ± 0.52 p/L), C (1.17 ± 0.75 p/L), D (1.67 ± 0.82 p/L), F (2.00 ± 1.55 p/L), G (2.67 ± 1.21 p/L) และ H (1.00 ± 0.89 p/L) ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ตามประเภทของบรรจุภัณฑ์ พบว่าตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติก A–F มีค่าเฉลี่ยรวมของปริมาณไมโครพลาสติกเท่ากับ 1.78 ± 1.22 p/L ขณะที่ตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดแก้ว G–H มีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 1.83 ± 1.34 p/L แสดงให้เห็นว่าทั้งสองประเภทของบรรจุภัณฑ์มีการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกไม่แตกต่างกัน โดยขวดแก้วมีแนวโน้มการปนเปื้อนเฉลี่ยสูงกว่า

อนุภาคไมโครพลาสติกที่ตรวจพบส่วนใหญ่มีขนาดอยู่ในช่วง $1\text{--}100\text{ }\mu\text{m}$ และ $101\text{--}300\text{ }\mu\text{m}$ ซึ่งเป็นช่วงขนาดที่มีสัดส่วนของไมโครพลาสติกมากที่สุด โดยมีสัดส่วนของอนุภาคขนาดใหญ่กว่า $500\text{ }\mu\text{m}$ ในระดับน้อยที่สุดหรือตรวจไม่พบในบางตัวอย่าง ผลดังกล่าวบ่งชี้ว่าไมโครพลาสติกที่ปนเปื้อนในน้ำดื่มส่วนใหญ่เป็นอนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งอาจมีแหล่งกำเนิดมาจากการบวนการผลิต การกรองที่ไม่สมบูรณ์ การเสื่อมสภาพของวัสดุบรรจุภัณฑ์พลาสติก รวมถึงการปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อมในระหว่างกระบวนการบรรจุและการขนส่ง สำหรับตัวอย่างน้ำดื่มที่บรรจุขวดชนิดแก้ว แม้ว่าบรรจุภัณฑ์แก้วจะไม่ใช้วัสดุที่เป็นแหล่งกำเนิดไมโครพลาสติกโดยตรง แต่มีแนวโน้มว่าการปนเปื้อนอาจเกิดจากแหล่งอื่น เช่น ฝาขวดที่ทำจากพลาสติก หรือการปนเปื้อนจากการกระบวนการผลิตและการบรรจุที่ใช้วัสดุอุปกรณ์ซึ่งมีส่วนประกอบของพลาสติกในระบบ โดยสรุปผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าไมโครพลาสติกสามารถตรวจพบได้ในน้ำดื่มทุกยี่ห้อที่ทำการศึกษา ทั้งในบรรจุภัณฑ์ชนิดพลาสติกและแก้ว ซึ่งสะท้อน

ให้เห็นถึงการแพร่กระจายของไมโครพลาสติกในสิ่งแวดล้อมและข้อจำกัดของกระบวนการผลิตน้ำดื่มในเชิงอุตสาหกรรมที่ยังไม่สามารถกำจัดไมโครพลาสติกได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นจึงควรมีการกำหนดมาตรการควบคุมคุณภาพของน้ำดื่มบรรจุขวด รวมถึงการตรวจสอบและติดตามปริมาณไมโครพลาสติกในผลิตภัณฑ์น้ำดื่มอย่างต่อเนื่อง เพื่อประเมินความปลอดภัยของผู้บริโภคและลดความเสี่ยงจากการบริโภคไมโครพลาสติกในระยะยาว

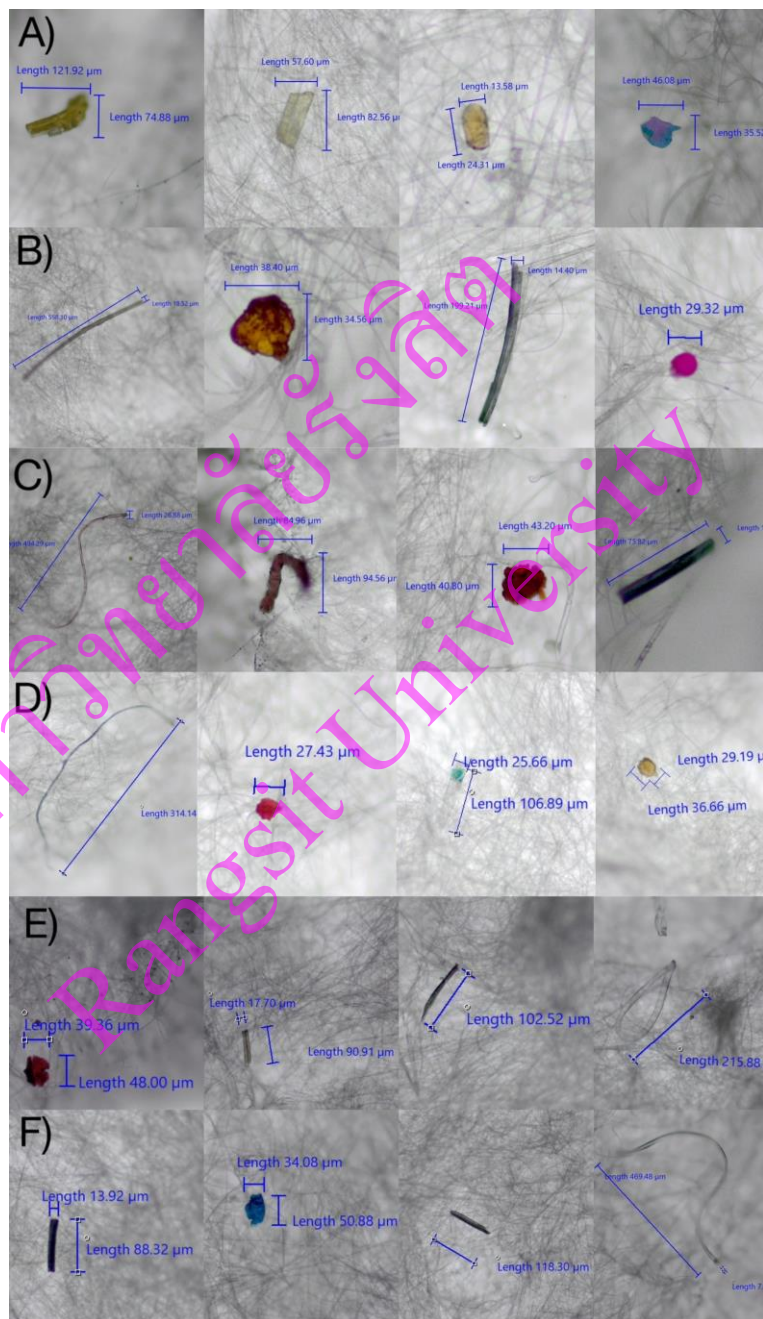
ตารางที่ 4.2 ปริมาณไมโครพลาสติกที่ตรวจพบในตัวอย่างน้ำดื่มยี่ห้อ A-H

น้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติก					
ยี่ห้อน้ำดื่มที่	Microplastic in sample (p/L)				total
นำมาวิเคราะห์	1-100 μm	101-300 μm	301-500 μm	>500 μm	
A1	-	1	-	-	1
A2	1	-	-	-	1
A3	1	1	-	-	2
A4	-	-	-	-	-
A5	1	-	-	-	1
A6	-	-	-	-	-
total	3	2	0	0	5
Mean±SD					0.83±0.75
B1	-	1	-	1	2
B2	1	-	-	1	2
B3	1	-	-	-	1
B4	-	1	1	-	2
B5	1	1	-	-	2
B6	-	1	-	-	1
total	3	4	1	2	10
Mean±SD					1.67±0.52
C1	-	-	-	-	-

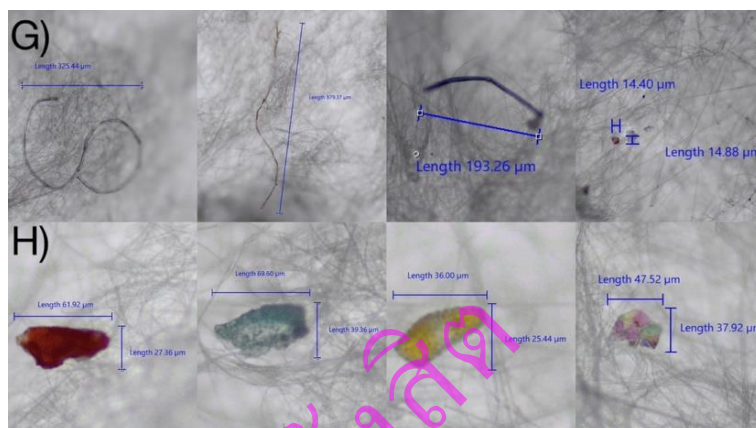
C2	1	-	-	-	1
C3	1	-	1	-	2
C4	2	-	-	-	2
C5	-	-	1	-	1
C6	-	1	-	-	1
total	4	1	2	-	7
Mean±SD	1.17±0.75				
D1	1	-	-	-	1
D2	-	-	1	1	2
D3	-	-	-	1	1
D4	1	1	-	-	2
D5	-	1	-	-	1
D6	3	-	-	-	3
total	5	2	1	2	10
Mean±SD	1.67±0.82				
E1	3	-	1	-	4
E2	2	1	-	-	3
E3	3	1	-	-	4
E4	-	1	-	-	1
E5	4	-	-	-	4
E6	4	-	-	-	4
total	16	3	1	0	20
Mean±SD	3.33±1.21				
F1	2	1	-	-	3
F2	2	1	-	1	4
F3	-	-	1	-	1
F4	-	2	-	1	3

F5	-	-	-	-	-
F6	1	-	-	-	1
total	5	4	1	2	12
Mean±SD	2.00±1.55				
Total mean ± SD					1.78±1.22
ตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดแก้ว					
ยี่ห้อน้ำดื่มที่	Microplastic in sample (p/L)				total
นำมาวิเคราะห์	1-100 µm	101-300 µm	301-500 µm	>500 µm	
G1	2	-	0-	-	2
G2	3	1	-	-	4
G3	1	-	-	-	1
G4	1	-	-	1	2
G5	1	-	2	1	4
G6	2	1	-	-	3
total	10	2	2	2	16
Mean±SD	2.67±1.21				
H1	-	-	-	-	-
H2	1	-	-	-	1
H3	-	2	-	-	2
H4	1	-	-	-	1
H5	1	1	-	-	2
H6	-	-	-	-	-
total	3	3	0	0	6
Mean±SD	1.00±0.89				
Total mean ± SD					1.83±1.34

4.2 รูปร่างไมโครพลาสติก

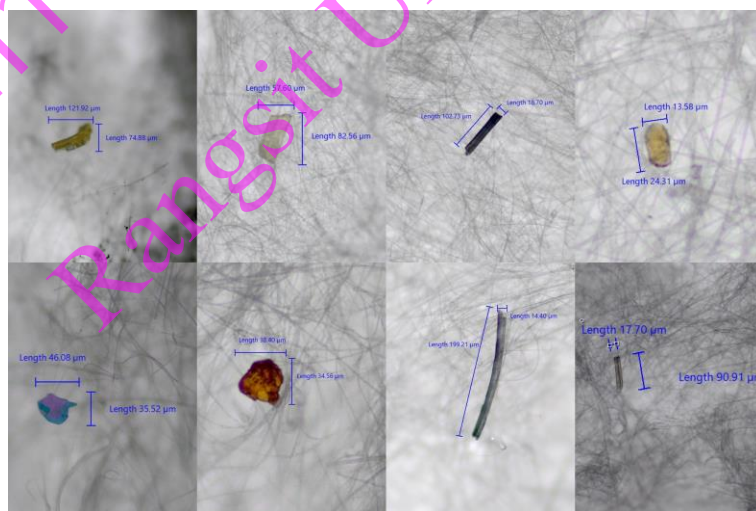


รูปที่ 4.1 รูปร่างของไมโครพลาสติกที่ตรวจพบในน้ำดื่มบรรจุขวดชนิด PET ยี่ห้อ A B C D E และ F
ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ($\geq 200 \mu\text{m}$ particles 10x eyepieces, 10x objective)



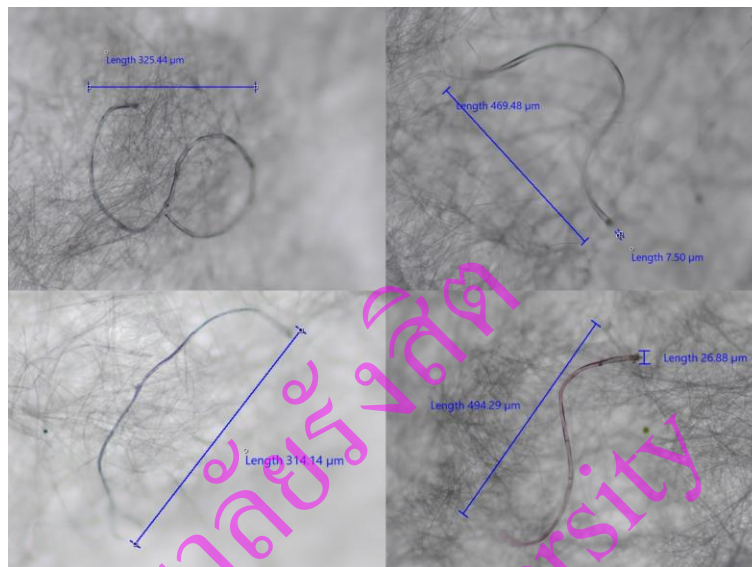
รูปที่ 4.2 รูปร่างของไมโครพลาสติกที่ตรวจพบในน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดแก้ว ยี่ห้อ G และ H ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ($\geq 200 \mu\text{m}$ particles 10x eyepieces, 10x objective)

4.2.1 รูปร่างแบบเศษชิ้นส่วน



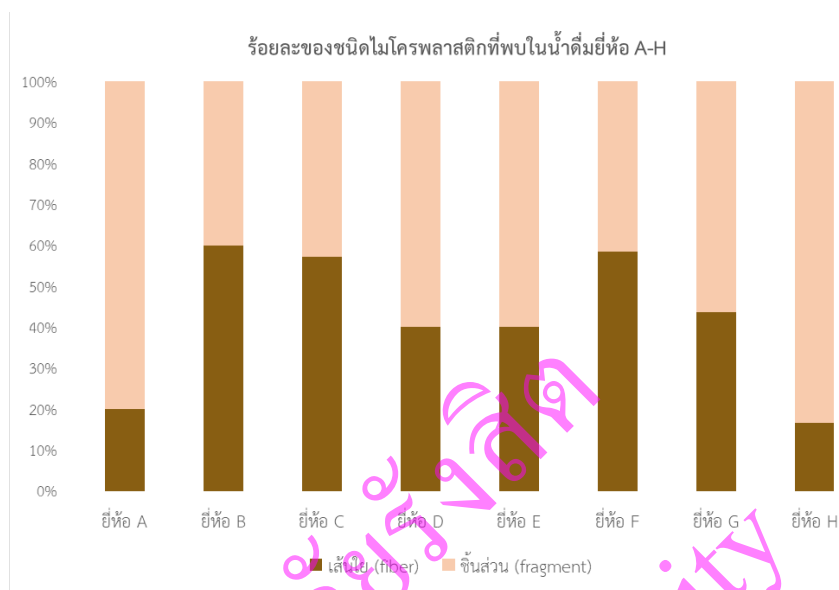
รูปที่ 4.3 รูปร่างไมโครพลาสติกแบบเส้นใยภายใต้กล้องจุลทรรศน์

4.2.2 รูปร่างแบบเส้นใย

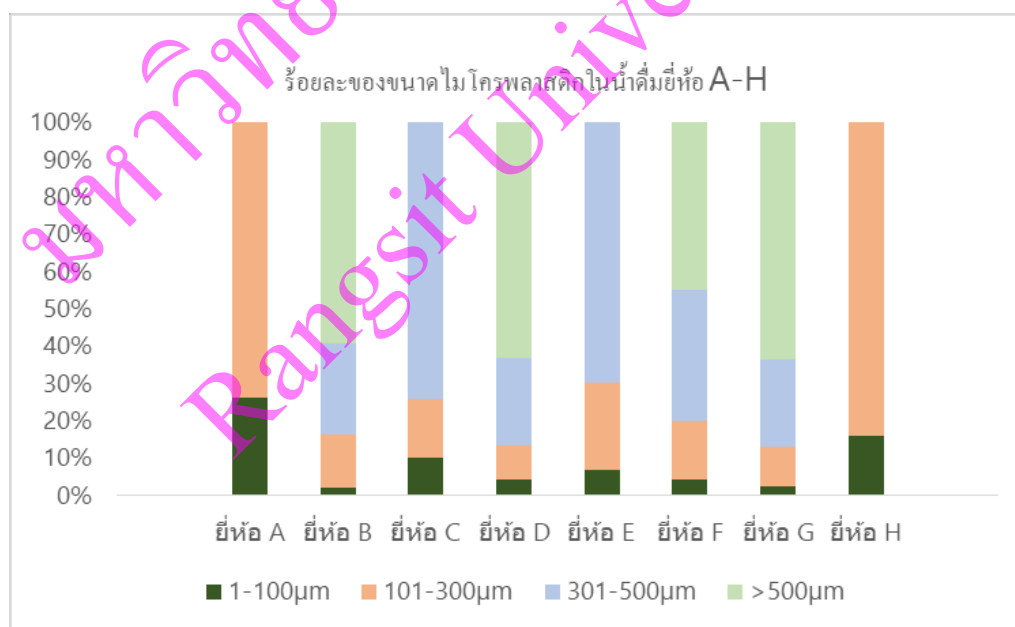


รูปที่ 4.4 รูปร่างไมโครพลาสติกแบบเส้นใยภายใต้กล้องจุลทรรศน์

การแบ่งประเภทของไมโครพลาสติกตามรูปร่างออกเป็น 5 ประเภท โดยอ้างอิงจากรายงานการศึกษาของ Lusher และคณะ (2017) ได้แก่ เศษชิ้นส่วน (fragment) เส้นใย (fiber) ฟิล์ม (film) โฟม (foam) และเม็ด (pellet) จากผลการศึกษาที่รูปร่างไมโครพลาสติกที่พบในน้ำดื่มยี่ห้อ A-H พบว่าไมโครพลาสติกที่พบมีทั้งหมด 2 ประเภท โดยส่วนมากเป็นเศษชิ้นส่วน (fragment) ส่วนพบมากถึง 48 ชิ้น หรือคิดเป็นร้อยละ 55.81 รองลงมาได้แก่รูปร่างแบบเส้นใย (fiber) พบ 38 ชิ้น หรือคิดเป็นร้อยละ 44.19 และไม่พบลักษณะฟิล์ม (film) โฟม (foam) และเม็ด (pellet) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับรายงานของ Sherri Mason และคณะ (2018) ที่ระบุว่าพบไมโครพลาสติกรูปแบบเศษชิ้นส่วน (fragment) เป็นรูปแบบไมโครพลาสติกที่พบมากที่สุดในน้ำดื่มบรรจุขวดเนื่องมาจากการสึกกร่อนของบรรจุภัณฑ์พลาสติกและฝาขวดระหว่างกระบวนการผลิต บรรจุและการขนส่ง



รูปที่ 4.5 แผนภูมิแสดงร้อยละของชนิดไมโครพลาสติกที่พบในน้ำดื่มยี่ห้อ A-H



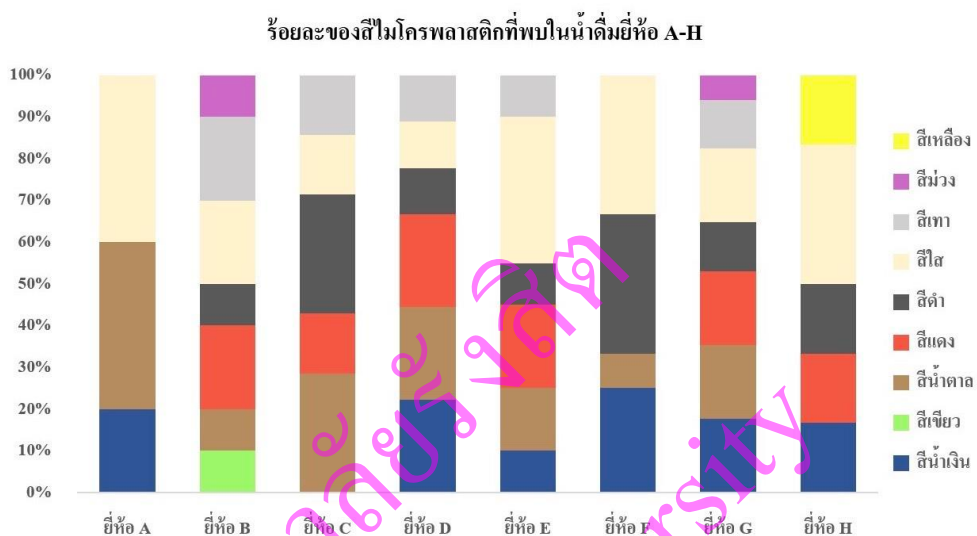
รูปที่ 4.6 แผนภูมิแสดงร้อยละของขนาดไมโครพลาสติกที่พบในน้ำดื่มยี่ห้อ A-H

ตารางที่ 4.3 รูปร่างไมโครพลาสติกที่พบในน้ำดื่มยี่ห้อ A-H

รูปร่าง	ยี่ห้อ							
	A	B	C	D	E	F	G	H
ชิ้นส่วน	4	4	3	6	12	5	9	5
เส้นใย	1	6	4	4	8	7	7	1
รวม	5	10	7	10	20	12	16	6

จากผลการตรวจวิเคราะห์ไมโครพลาสติกในน้ำดื่มบรรจุขวดจำนวน 8 ยี่ห้อ (A-H) พบไมโครพลาสติกทั้งหมด 86 ชิ้น โดยยี่ห้อ E พบมากที่สุด จำนวน 20 ชิ้น (ร้อยละ 23.3) รองลงมาคือยี่ห้อ F จำนวน 16 ชิ้น (ร้อยละ 18.6) ยี่ห้อ G จำนวน 12 ชิ้น (ร้อยละ 14.0) ยี่ห้อ B และ D อย่างละ 10 ชิ้น (ร้อยละ 11.6) ยี่ห้อ C จำนวน 7 ชิ้น (ร้อยละ 8.1) ยี่ห้อ H จำนวน 6 ชิ้น (ร้อยละ 7.0) และยี่ห้อ A จำนวน 5 ชิ้น (ร้อยละ 5.8) ตามลำดับ ทั้งนี้ เมื่อนำมาจำแนกตามลักษณะ พบว่าในภาพรวมประกอบด้วย เส้นใย (fiber) จำนวน 52 ชิ้น และ ชิ้นส่วน (fragment) จำนวน 34 ชิ้น โดยยี่ห้อ A พบเส้นใย 1 ชิ้นและชิ้นส่วน 4 ชิ้น ยี่ห้อ B พบเส้นใย 6 ชิ้นและชิ้นส่วน 4 ชิ้น ยี่ห้อ C พบเส้นใย 4 ชิ้นและชิ้นส่วน 3 ชิ้น ยี่ห้อ D พบเส้นใย 7 ชิ้นและชิ้นส่วน 3 ชิ้น ยี่ห้อ E พบเส้นใย 13 ชิ้นและชิ้นส่วน 7 ชิ้น ยี่ห้อ F พบเส้นใย 10 ชิ้นและชิ้นส่วน 6 ชิ้น ยี่ห้อ G พบเส้นใย 8 ชิ้นและชิ้นส่วน 4 ชิ้น และยี่ห้อ H พบเส้นใย 3 ชิ้นและชิ้นส่วน 3 ชิ้น ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่ามีการตรวจพบไมโครพลาสติกในน้ำดื่มทุกยี่ห้อ โดยมีแนวโน้มพบในรูปของเส้นใยมากกว่าชิ้นส่วน ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการผลิต การกรอง วัสดุบรรจุภัณฑ์ หรือสภาพแวดล้อมระหว่างการขนส่งและจัดเก็บ ทั้งนี้แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของ Lusher et al. (2017) ที่ระบุว่าไมโครพลาสติกในน้ำดื่มบรรจุขวดส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นชิ้นส่วน

4.3 สีไมโครพลาสติก



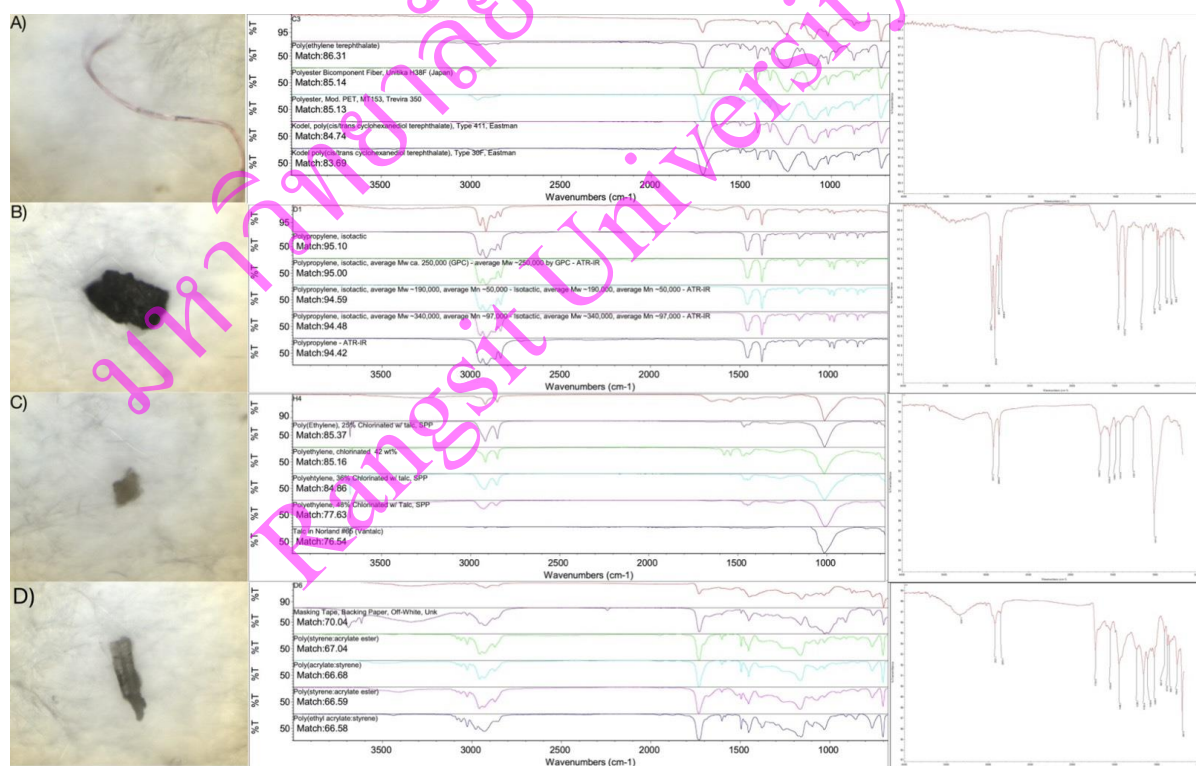
รูปที่ 4.7 แผนภูมิแสดงร้อยละของสีไมโครพลาสติกที่พบในน้ำดื่มยี่ห้อ A-H

ตารางที่ 4.4 แสดงสีไมโครพลาสติกที่พบในน้ำดื่มยี่ห้อ A-H

ยี่ห้อ	สี								
	น้ำเงิน	เขียว	น้ำตาล	แดง	ดำ	ใส	เทา	ม่วง	เหลือง
A	1	-	2	-	-	2	-	-	-
B	-	1	1	2	1	2	2	1	-
C	-	-	2	1	2	1	1	-	-
D	2	-	2	2	1	2	1	-	-
E	2	-	3	4	2	7	2	-	-
F	3	-	1	-	4	4	-	-	-
G	3	-	3	3	2	3	2	-	-
H	1	-	-	1	1	2	-	-	1
รวม	12	1	14	13	12	23	9	1	1

ผลการศึกษาสีของไมโครพลาสติกที่พบในน้ำดื่มยี่ห้อ A-H พบไมโครพลาสติกทั้งหมด 9 สี ได้แก่สีน้ำเงิน สีเขียว สีน้ำตาล สีแดง สีดำ สีใส สีเทา สีม่วง และสีเหลือง โดยไมโครพลาสติกที่พบปริมาณสูงสุด ได้แก่ไมโครพลาสติกสีใสจำนวน 23 ชิ้น คิดเป็น 26.74%, สีน้ำตาลจำนวน 14 ชิ้น คิดเป็น 16.28% และสีแดงจำนวน 13 ชิ้น คิดเป็น 15.12% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องคือ สีของไมโครพลาสติกที่ตรวจพบในน้ำดื่มบรรจุขวดส่วนมากพบเป็นลักษณะสีใส สีขาว และสีทึบแสงอย่างสีน้ำเงิน สีแดง สีน้ำตาล และสีดำ โดยสีที่ต่างกันอาจเกิดจากชนิดของพลาสติกที่แตกต่างกัน รวมถึงอาจเกิดขึ้นจากอนุภาคเม็ดสีจากสารที่มีการเติมแต่งในระหว่างกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์ขวด

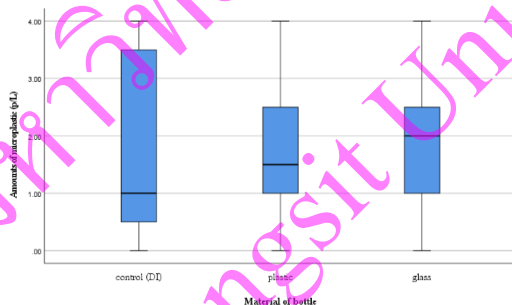
4.4 ชนิดไมโครพลาสติก



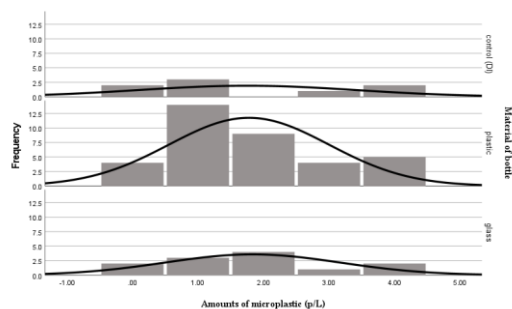
รูปที่ 4.8 ภาพแสดงชนิดของไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำดื่มที่บรรจุในขวดชนิด PET (รูป A และ B) และขวดชนิดแก้ว (รูป C) และในตัวอย่างควมคุม (รูป D) ที่จำแนกตามพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค FTIR

ผลการศึกษาจำแนกชนิดของไมโครพลาสติกตามพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค FTIR แสดงให้เห็นว่าพบการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในน้ำดื่มบรรจุขวดชนิด PET ยี่ห้อ C (รูป 4.8A) และยี่ห้อ D (รูป 4.8B) พบการปนเปื้อนไมโครพลาสติกชนิด PET ซึ่งเป็นชนิดเดียวกันกับชนิดของบรรจุภัณฑ์ของตัวอย่างน้ำดื่ม นอกจากนี้ยังพบการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกชนิด PP ซึ่งอาจเกิดจากการปนเปื้อนในระหว่างกระบวนการการผลิต และมีการปนเปื้อนของพลาสติกชนิด PE ในตัวอย่างน้ำดื่มที่บรรจุขวดชนิดแก้ว ยี่ห้อ H (รูปที่ 4.8C) ซึ่งเกิดจากการปนเปื้อนจากฟางขวดที่ผลิตมาจากพลาสติกชนิด PE เช่นเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามในตัวอย่างควบคุมหรือ Deionized water พบการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกชนิด PS ซึ่งอาจเกิดจากการปนเปื้อนในระหว่างการแลกเปลี่ยนไอออนจากตัวกรองชนิดเรซินที่มี Polystyrene Sulphonate เป็นสารประกอบหลัก

4.5 การวิเคราะห์สถิติ



รูปที่ 4.9 แผนภาพกล่อง



รูปที่ 4.10 ฮิสโตแกรม

Tests of Normality

	Material of bottle	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Amounts of microplastic	DI	.298	8	.035	.835	8	.067
	plastic	.238	36	<.001	.879	36	<.001
	glass	.200	12	.198	.914	12	.242

a. Lilliefors Significance Correction

รูปที่ 4.11 ตาราง Tests of Normality

ตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลปริมาณไมโครพลาสติกโดยแยกตามชนิดของบรรจุภัณฑ์จากรูปที่ 4.10 พบว่าสมมติฐานของ Tests of normality คือ

H_0 : ปริมาณของไมโครพลาสติก (particles/L) ในตัวอย่างน้ำดื่มที่บรรจุในขวดชนิด PET มีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 : ปริมาณของไมโครพลาสติก (particles/L) ในตัวอย่างน้ำดื่มที่บรรจุในขวดชนิด PET มีการแจกแจงแบบไม่ปกติ

H_0 : ปริมาณของไมโครพลาสติก (particles/L) ในตัวอย่างน้ำดื่มที่บรรจุในขวดชนิดแก้ว มีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 : ปริมาณของไมโครพลาสติก (particles/L) ในตัวอย่างน้ำดื่มที่บรรจุในขวดชนิดแก้ว มีการแจกแจงแบบไม่ปกติ

เกณฑ์ในการสรุปผล คือ จะปฏิเสธ H_0 เมื่อ $Sig < 0.05$ การแปลผลจะได้สถิติทดสอบชื่อว่า Shapiro – Wilk เนื่องจาก n แต่ละกลุ่ม < 50 (n ขวดพลาสติก= 36 และ n ขวดแก้ว= 12) โดยมี p -value < 0.001 และ 0.242 ตามลำดับ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงยอมรับ H_1 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำดื่มที่บรรจุในขวดชนิด PET มีการแจกแจงแบบไม่ปกติ ในทางตรงกันข้ามเมื่อค่า $Sig > 0.05$ จะยอมรับ H_0 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำดื่มที่บรรจุในขวดชนิดแก้ว กรณีข้อมูลมีการแจกแจงปกติจึงใช้ Independent T test หากข้อมูลมีการแจกแจงไม่ปกติจะใช้ Mann-Whitney U test ในการทดสอบค่าเฉลี่ยของ 2 กลุ่มประชากรที่เป็นอิสระต่อกัน

Hypothesis Test Summary			
	Null Hypothesis	Test	Sig. ^{a,b}
1	The distribution of Particles per liter ² is the same across categories of 2Material of bottle.	Independent-Samples Mann-Whitney U Test	.863
	Decision		
	Retain the null hypothesis.		

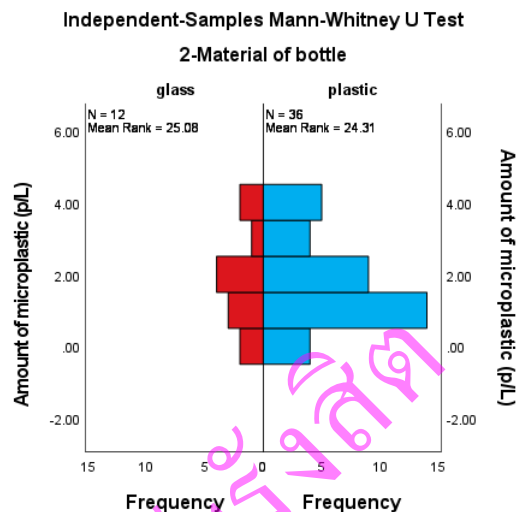
a. The significance level is .050.

b. Asymptotic significance is displayed.

รูปที่ 4.12 ตาราง Hypothesis Test Summary

Independent-Samples Mann-Whitney U Test Summary	
Total N	48
Mann-Whitney U	223.000
Wilcoxon W	301.000
Test Statistic	223.000
Standard Error	40.502
Standardized Test Statistic	.173
Asymptotic Sig.(2-sided test)	.863

รูปที่ 4.13 ตาราง Independent-Samples Mann-Whitney U Test Summary



รูปที่ 4.14 ตาราง Independent-Samples Mann-Whitney U Test 2-Material of bottle

การทดสอบค่ามัธยฐานของสองกลุ่มประชากรที่เป็นอิสระต่อกัน สมมติฐาน คือ

H_0 : ค่ามัธยฐานของค่าการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำดื่มที่บรรจุในขวดชนิด PET และขวดชนิดแก้วไม่แตกต่างกัน

H_1 : ค่ามัธยฐานของค่าการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำดื่มที่บรรจุในขวดชนิด PET และขวดชนิดแก้วแตกต่างกัน

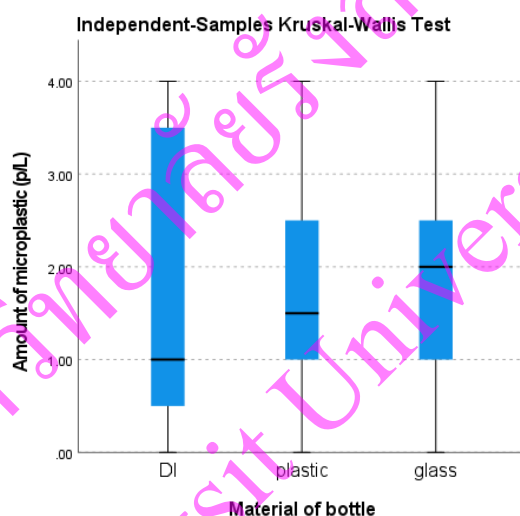
เกณฑ์ในการแปลผล คือ จะปฏิเสธ H_0 เมื่อ $\text{Sig} \leq 0.05$ โดยสถิติที่ใช้ทดสอบ คือ Mann-Whitney U test มี p-value เท่ากับ 0.863 ดังนั้นจึงยอมรับ H_0 แสดงว่าค่ามัธยฐานของค่าการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำดื่มที่บรรจุในขวดชนิด PET และขวดชนิดแก้วไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.0

Hypothesis Test Summary			
	Null Hypothesis	Test	Sig. ^{a,b}
1	The distribution of Amounts of microplastic is the same across categories of Material of bottle.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.925
	Decision		
	Retain the null hypothesis.		

a. The significance level is .050.

b. Asymptotic significance is displayed.

รูปที่ 4.15 ตาราง Hypothesis Test Summary



รูปที่ 4.16 ตาราง Independent-Samples Kruskal-Wallis Test

ทดสอบความแตกต่างของหลายประชากรที่เป็นอิสระกันสมมติฐาน คือ

H_0 : ค่ามัธยฐานของค่าการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกใน DI และตัวอย่างน้ำดื่มที่บรรจุในขวดชนิด PET และขวดชนิดแก้วไม่แตกต่างกัน

H_1 : ค่ามัธยฐานของค่าการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกใน DI และตัวอย่างน้ำดื่มที่บรรจุในขวดชนิด PET และขวดชนิดแก้วแตกต่างกัน

เกณฑ์ในการสรุปผล คือ จะปฏิเสธ H_0 เมื่อ Sig ≤ 0.05 การแปลผลจะได้สถิติทดสอบชื่อว่า Kruskal-wallis มี p-value เท่ากับ 0.925 ดังนั้นจึงยอมรับ H_0 แสดงว่าค่ามัธยฐานของค่าการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกใน DI และตัวอย่างน้ำดื่มที่บรรจุในขวดชนิด PET และขวดแก้ว ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปริมาณ ขนาด ลักษณะ และสีของไมโครพลาสติกที่ปนเปื้อนในน้ำดื่มบรรจุขวดจากยี่ห้อ A ถึง H โดยใช้วิธีการควบคุมคุณภาพการวิเคราะห์ด้วยน้ำปราศจากไอออนเป็นตัวอย่างควบคุม พบว่าไมโครพลาสติกสามารถตรวจพบได้ในตัวอย่างน้ำดื่มทุกยี่ห้อ โดยมีปริมาณเฉลี่ยรวม 1.75 ± 1.67 อนุภาคต่อลิตร (p/L) โดยยี่ห้อ E ตรวจพบในปริมาณสูงสุด (3.33 ± 1.21 p/L) และยี่ห้อ A ต่ำสุด (0.83 ± 0.75 p/L) เมื่อพิจารณาตามประเภทบรรจุภัณฑ์พบว่า น้ำดื่มในขวดพลาสติก (ยี่ห้อ A–F) และขวดแก้ว (ยี่ห้อ G–H) มีค่าเฉลี่ยการปนเปื้อนใกล้เคียงกันที่ 1.78 ± 1.22 p/L และ 1.83 ± 1.34 p/L ตามลำดับ การตรวจพบไมโครพลาสติกในน้ำดื่มอาจมีแหล่งที่มาได้จากหลายปัจจัย ไม่ว่าจะเป็นการเสื่อมสภาพหรือสึกกร่อนของบรรจุภัณฑ์พลาสติก การกรองที่ไม่สมบูรณ์ในกระบวนการผลิต รวมถึงการปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อมหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการบรรจุ แม้ขวดแก้วจะไม่ใช้แหล่งกำเนิดไมโครพลาสติกโดยตรง แต่อุปกรณ์ประกอบ เช่น ฝาขวดหรือเครื่องจักรที่มีส่วนประกอบของพลาสติก อาจเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนได้เช่นกัน โดยอนุภาคไมโครพลาสติกที่พบส่วนใหญ่มีขนาดเล็กในช่วง 1–300 μm โดยเฉพาะในช่วง 1–100 μm ซึ่งเป็นขนาดที่กรองได้ยากและหลุดรอดจากกระบวนการผลิตได้ง่าย เมื่อนำอนุภาคมาจำแนกตามรูปร่าง พบว่าไมโครพลาสติกที่พบมากที่สุดคือประเภทเศษชิ้นส่วน (fragment) คิดเป็นร้อยละ 55.81 รองลงมาคือแบบเส้นใย (fiber) ร้อยละ 44.19 โดยลักษณะ fragment มีแนวโน้มเกิดจากการสึกกร่อน แตกหัก หรือเสื่อมสภาพของพลาสติกจากแรงกด อุณหภูมิ หรือการเสียดสีระหว่างการผลิต บรรจุ และการขนส่ง ขณะที่เส้นใยอาจมีแหล่งที่มาจากเสื้อผ้าของพนักงาน ฝุ่นในโรงงาน หรือระบบท่อพลาสติก นอกจากนี้เมื่อพิจารณาด้านสี พบไมโครพลาสติกทั้งหมด 9 สี โดยสีใส พบมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 26.74 รองลงมาคือสีน้ำตาลและสีแดง ซึ่งสีใสมักเป็นลักษณะของพลาสติกที่ใช้ผลิตขวดหรือฝาขวด เช่น โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ซึ่งไม่มีการเติมเม็ดสี จึงมีแนวโน้มหลุดปนออกมาในลักษณะใสมากกว่าสีอื่น ผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lusher et al. (2017) และ Mason et al. (2018) ที่รายงานว่า fragment และไมโครพลาสติก

ใสเป็นลักษณะที่พบบ่อยในน้ำดื่มบรรจุขวด สะท้อนให้เห็นถึงข้อจำกัดของกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมที่ยังไม่สามารถกำจัดไมโครพลาสติกได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นควรมีการกำหนดมาตรการควบคุมคุณภาพอย่างเข้มงวด ตรวจสอบวัตถุดิบ อุปกรณ์ และขั้นตอนการผลิต รวมถึงการเฝ้าระวังการปนเปื้อนไมโครพลาสติกในผลิตภัณฑ์น้ำดื่มอย่างต่อเนื่อง เพื่อประเมินความปลอดภัยของผู้บริโภค และลดความเสี่ยงในระยะยาวอย่างเป็นระบบ

ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้คือหนึ่งในข้อจำกัดของการศึกษานี้คือ การใช้จำนวนกลุ่มตัวอย่างของน้ำดื่มบรรจุขวดพลาสติกและขวดแก้วที่ไม่เท่ากัน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการเปรียบเทียบระดับการปนเปื้อนไมโครพลาสติกระหว่างบรรจุภัณฑ์ทั้งสองประเภท การที่ขวดพลาสติกมีจำนวนตัวอย่างมากกว่าขวดแก้ว อาจทำให้ข้อมูลของขวดพลาสติกมีความหลากหลายและความน่าเชื่อถือมากกว่า ขณะที่ข้อมูลจากกลุ่มขวดแก้วซึ่งมีเพียงสองยี่ห้อ อาจไม่เพียงพอในการสะท้อนภาพรวมของผลิตภัณฑ์ได้อย่างครอบคลุม ซึ่งอาจนำไปสู่ความคลาดเคลื่อนทางสถิติ และทำให้ผลการเปรียบเทียบมีโอกาสผิดพลาดได้มากขึ้น ดังนั้นเพื่อให้ผลการวิเคราะห์ในอนาคตมีความถูกต้อง เทียบตรง และเป็นกลางมากยิ่งขึ้น จึงควรใช้จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่เท่ากัน รวมถึงวิธีการตรวจหาไมโครพลาสติกโดยอาศัยการสังเกตพื้นฐานวิทยาคือกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงมีข้อจำกัดสำคัญ คือ ไม่สามารถระบุองค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคที่ตรวจพบได้อย่างแน่ชัด ทำให้ไม่สามารถแยกแยะระหว่างไมโครพลาสติกกับวัสดุที่มีลักษณะคล้ายกัน เช่น เส้นใยจากธรรมชาติหรืออนุภาคอินทรีย์วัตถุ นอกจากนี้ความแม่นยำของการวิเคราะห์ยังขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ตรวจสอบ รวมถึงคุณสมบัติของกล้อง เช่น ความละเอียดและกำลังขยาย ซึ่งอาจไม่เพียงพอในการตรวจจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก อีกทั้งยังมีความเสี่ยงในการเกิดอคติจากการประเมินด้วยสายตาของผู้วิจัย แม้ว่าวิธีการนี้จะเหมาะสำหรับการคัดกรองเบื้องต้น แต่ควรใช้ควบคู่กับเทคนิควิเคราะห์ขั้นสูงที่สามารถระบุชนิดของพอลิเมอร์ได้อย่างแม่นยำ เช่น Fourier Transform Infrared spectroscopy (FTIR) หรือ Raman Spectroscopy

บรรณานุกรม

- กิตติพงษ์วิเศษ, ส., เพ็ชรรัักษ์, อ., โล่ห์วัชรินทร์, จ., และ ผลประเสริฐ, จ. (2562). มวลสารไมโครพลาสติกในแหล่งน้ำเสียดิบและระบบบำบัดน้ำเสีย. *Thai Environment*, 23(1), Article 4. ค้นจาก <https://digital.car.chula.ac.th/cuej/vol23/iss1/4/>
- พรมลี, บ. (2556). การศึกษาอุกซิปพลาสติกที่ใช้บรรจุยาเสพติดด้วยเทคนิค ATR-FTIR และ TGA. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศิลปากร). ค้นจาก <https://sure.su.ac.th/xmlui/handle/123456789/11925>
- พลอยวงศ์, ส. (2563). การจำแนกไมโครพลาสติกในตะกอนดินและสัตว์หน้าดินกลุ่มหอยในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงบอระเพ็ดจังหวัดนครสวรรค์. ค้นจาก <https://nuir.lib.nu.ac.th/dspace/handle/123456789/1736>
- องค์การอนามัยโลก. (2562). Microplastics in drinking-water. ค้นจาก <https://www.who.int/publications/i/item/9789241516198>
- Alonso, M. J., Gupta, R. K., Min, C., Siber, G. R., & Langer, R. (1994). Biodegradable microspheres as controlled-release tetanus toxoid delivery systems. *Vaccine*, 12(4), 299–306.
- Anik, A. H., Hossain, S., Alam, M., Binte Sultan, M., Hasnine, M. T., & Rahman, M. M. (2564). Microplastics pollution: A comprehensive review on the sources, fates, effects
- Andrady, A. L. (2017). The plastic in microplastics: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 119(1), 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.082>
- Arturson, G., Jonsson, M., & Laas, H. (1983). Microspheres of biodegradable polymers as a drug-delivery system in the vitreous. *Current Eye Research*, 2(11), 773–779.
- Bischoff, K. B. (1973). Pharmacokinetics and cancer chemotherapy. *Journal of Pharmacokinetics and Biopharmaceutics*, 1(5), 465–480.

- Catarino, A. I., Macchia, V., Sanderson, W. G., Thompson, R. C., & Henry, T. B. (2018). Low levels of microplastics (MP) in wild mussels indicate that MP ingestion by humans is minimal compared to exposure via household fibres fallout during a meal. *Environmental Pollution*, 237, 675–684. from <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.069>
- Champion, J. A., H. A., & Mitragotri, S. (2008). Role of particle size and shape in phagocytosis of polymeric nanoparticles. *Pharmaceutical Research*, 25(11), 2462–2469. from <https://doi.org/10.1007/s11095-008-9599-9>
- Costa, M. F., Ivar do Sul, J. A., Silva, M. C. G., & Spilki, F. R. (1998). Preliminary results on the quantification of plastic debris on beaches of northeastern Brazil. In *Proceedings of the 8th Conference on Marine Debris*, La Jolla, CA.
- Deng, Y., Zhang, Y., Lemos, B., & Ren, H. (2017). Tissue accumulation of microplastics in mice and biomarker responses suggest widespread health risks of exposure. *Scientific Reports*, 7(1), Article 46687. from <https://doi.org/10.1038/srep46687>
- Donaldson, A. J., & Tran, A. (2002). The role of school transition in adolescent maladjustment. *Journal of Educational Psychology*, 94(1), 10–23. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.94.1.10>
- Eldridge, F. L., Gillis, R. A., & Millhorn, D. E. (1990). Role of central chemoreceptors in the regulation of breathing. *Physiological Reviews*, 70(3), 853–908. From <https://doi.org/10.1152/physrev.1990.70.3.853>
- Eriksen, M., Mason, S., Wilson, S., Box, C., Zellers, A., Edwards, W., Farley, H., Amato, S. (2013). Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes. *Marine Pollution Bulletin*, 77(1–2), 177–182.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2017). *The future of food and agriculture – Trends and challenges*. Rome: Author. <https://www.fao.org/3/i6583e/i6583e.pdf>
- Furumoto, K., Ogawara, K., Maejima, O., Fukuoka, M., & Higaki, K. (2001). Biliary excretion of polystyrene microspheres depends on the type of receptor-mediated uptake in rat liver. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 283(3), 579–584.

- Gao, S., Feng, L. S., Guo, Z. H., Zhao, X. F., & Yu, S. R. (1997). In vitro release and in vivo absorption of a water-soluble drug from poly(DL-lactide-co-glycolide) microspheres. *International Journal of Pharmaceutics*, 154(2), 191–197.
- Gao, S., Munjal, S., & Shobha, V. (1997). The use of biodegradable polymers in controlled drug delivery. *Critical Reviews in Therapeutic Drug Carrier Systems*, 14(4), 313–352.
- Handy, R. D., J. K. W. J. H., G. K. S., & G. P. M. T. R. W. T. (2008). Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L.). *Environmental Science & Technology*, 42(13), 5026–5031. <https://doi.org/10.1021/es703041x>
- Hartenstein, V., & Martinez, P. (2019). The digestive system of xenacoelomorphs. *Cell and Tissue Research*, 377(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s00441-019-03011-8>
- Hartmann, M., Romer, M., Tuch, L., Meiler, L., Campen, M. J., & Riemenschneider, M. J. (2024). Quantification of microplastics in human brain, liver and kidney tissues. *Nature Medicine*, 30(3), 1–7.
- Horton, A. A., & Dixon, S. J. (2018). Microplastics: An introduction to environmental transport processes. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 5(2), e1268. from <https://doi.org/10.1002/wat2.1268>
- Horvatits, T., Tamminga, M., Liu, B., Sebode, M., Carambia, A., Fischer, L., Püschel, K., Huber, S., & Fischer, E. K. (2022). Microplastics detected in cirrhotic liver tissue. *EBioMedicine*, 82, 104147.
- Hossain, M. B., Pingki, F. H., Azad, M. A. S., Nur, A. A. U., Banik, P., & Sarker, P. K. (2023). Microplastics in Different Tissues of a Commonly Consumed Fish, *Scomberomorus guttatus*, from a Large Subtropical Estuary: Accumulation, Characterization, and Contamination Assessment. *Biology*, 12(11), 1422.
- Illum, L., J. P. T. H., T. N. R., G. R., & S. H. W. S. (1986). A novel nasal delivery system for peptide drugs. *International Journal of Pharmaceutics*, 34(3), 261–264. [https://doi.org/10.1016/0378-5173\(86\)90105-0](https://doi.org/10.1016/0378-5173(86)90105-0)

- Illum, L., Jørgensen, H., Bisgaard, H., Krogsgaard, O., & Rossing, N. (1986). A new microparticle delivery system for the nasal administration of peptides. *International Journal of Pharmaceutics*, 33(1-3), 115–122.
- Jani, P., Halbert, G. W., Langridge, J., & Florence, A. T. (1996). Nanoparticle uptake by the rat gastrointestinal mucosa: quantitation and particle size dependency. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 48(9), 898–903.
- Jones, M. M., & Bull, D. (1987). Accumulation of the polychaete *Branchiostoma* sp. on beaches in southeast Queensland, Australia. *Marine Pollution Bulletin*, 18(9), 452–455. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(87\)90045-8](https://doi.org/10.1016/0025-326X(87)90045-8)
- Kankanige, D. (2019). Analysis of Micro-plastics (MPs) in Bottled Water, Tap Water, and a Conventional Water Treatment Plant in Thailand. Master's Thesis, Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University.
- Kanke, S., Kawai, T., & Ueno, H. (1980). Drug release from biodegradable poly(lactide) microcapsules. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 32(12), 856–857.
- Kato, H., Sugimura, T., Akagi, T., Sato, N., Hashino, K., Maeno, Y., Kazue, T., Inuzuka, R., & Takagi, J. (2003). Long-term prognosis of coronary aneurysms in patients with Kawasaki
- Kawaguchi, H., Koiwai, N., Ohtsuka, Y., Miyamoto, M., & Sasakawa, S. (1986). Phagocytosis of latex particles by leucocytes. I. Dependence of phagocytosis on the size and surface potential of particles. *Biomaterials*, 7(1), 61–66.
- Keinänen, M., Vähä, M., Lehtinen, K., Karjalainen, M., Vlasova, A., Kämäräinen, J., & Koivulehto, H. (2021). Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review. *Environmental Pollution*, 274, 116554. From <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116554>
- Koelmans, A. A., Mohamed Nor, N. H., Kooi, M., Mintenig, S. M., De France, J., Redondo Hasselerharm, P. E., N. Vethaak, A. D. V. R. J. R., & van Wezel, A. P. (2020). Microplastic risk assessment for European surface waters (μ -RAS). *Water Research*, 174, 115621. From <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115621>

- Kojima, T., & Ishizaka, M. (1975). Toxicological studies on polybrominated biphenyls (PBBs) in rats. Acute and subacute toxicity. *Toxicology*, 3(2), 173–182.
- Krishnakumar, S., Arumugam, L., Kulkarni, S., & Shaiju, B. (2021). Characterization and distribution of microplastics in estuarine surface sediments, Kayamkulam estuary, southwest coast of India. *Marine Pollution Bulletin*, 168, 112389.
- Krishnakumar, S., Anbalagan, S., Hussain, S. M., Bharani, R., Godson, P. S., & Srinivasalu, S. (2021). Coral annual growth band impregnated microplastics (*Porites* sp.): a first investigation report. From <https://www.researchgate.net/publication/349492961>
- Kulkarni, R. K., Moore, E. G., Hegyeli, A. F., & Leonard, F. (1966). Biodegradable poly(lactic acid) polymers. *Journal of Biomedical Materials Research*, 5(3), 169–181
- Lee, Y. K., Hong, H. K., Kim, Y. H., & Yang, J. H. (2022). Health effects of microplastic exposures: Current issues and perspectives in South Korea. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19), 11956. From <https://doi.org/10.3390/ijerph191911956>
- LeFevre, J., Van Renterghem, P., & Van Liew, H. D. (1978). Mathematical model for the rate of O₂ unloading from red cells. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology*, 44(1), 16–22. <https://doi.org/10.1152/jappl.1978.44.1.16>
- Liao, Y., Wu, H., Xu, D., Liu, Y., Zhao, W., Yu, C., & Shang, X. (2021). Airborne microplastics in indoor and outdoor environments of a coastal city in Eastern China. *Journal of Hazardous Materials*, 418, 126007. From <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126007>
- Lim, X. Z. (2021). Microplastics are everywhere—but are they harmful? *Nature*, 593(7857), 22–25. From <https://doi.org/10.1038/d41586-021-01143-3>
- Li, Z., Xu, Q., Yang, K., Hou, Z., Zhang, S., Chen, D., ... & Yin, G. (2024). Global distribution, human health risks, and mitigation strategies of microplastic pollution in global freshwaters: A critical review. *Science of The Total Environment*. From <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724073832>
- Liu, K., Wang, X., Song, Z., & Tan, Z. (2020). Global inventory of atmospheric fibrous microplastics input into the ocean: An implication from the indoor origin. *Journal of Hazardous Materials*, 400, 123223.

- Makino, H., Matsumoto, M., Yamada, S., Hori, N., Koide, Y., & Hori, H. (2003). Characterization of AIN thin film by scanning capacitance microscopy. *Applied Physics Letters*, 83(14), 2824–2826. <https://doi.org/10.1063/1.1616191>
- Marfella, R., Paolisso, G., Sardu, C., D'Amico, M., Simone, E., Iannaccone, A., ... & Ceriello, A. (2024). Microplastics and Nanoplastics in Atheromas and Cardiovascular Events. *The New England Journal of Medicine*, 390(10), 900–910.
- Mohamed Nor, N. H., Kooi, M., Diepens, N. J., & Koelmans, A. A. (2021). Lifetime accumulation of microplastic in children and adults. *Environmental Science & Technology*, 55(8), 5084–5096. From <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07384>
- Morrow, J. A. (1973). Plastic and other non-living foreign materials in the stomachs of pelagic fishes from the northeast Pacific. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Marine Fisheries Service, *Marine Fisheries Review*, 35(10), 20–25.
- Morrow, P. E. (1973). The effects of sulfur dioxide on the clearance of carbon particles from the human ~~the~~human trachea and sub-bronchial space. *Inhaled Particles*, 3, 311–322.
- Nelms, S. E., Barnett, J., Brownlow, A., Davison, N. J., Deaville, R., Galloway, T. S., Lindeque, P. K., Santillo, D., & Godley, B. J. (2019). Microplastics in marine mammals stranded around the British coast: ubiquitous but transitory? *Scientific Reports*, 9(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37428-3>
- Newton, G. J., & Pfledderer, C. A. (1986). Measurement of the deposition and clearance of inhaled radiolabeled particles from rat lungs. *Journal of Applied Toxicology*, 6(2), 99–103. <https://doi.org/10.1002/jat.2550060209>
- Niu, H., Li, S., Zhang, Y., Wang, C., Li, C., Du, J., ... & Yu, M. (2024). Differential Impacts of Environmentally Relevant Microplastics on Gut Barrier Integrity in Mice Fed High-Fat Diet Versus Normal Chow Diet. *Metabolites*, 15(8), 557.
- Ogawara, K., Maejima, O., Fukuoka, M., & Higaki, K. (1999). Effects of particle size and surface characteristics on the clearance of polystyrene microspheres in rats. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 51(10), 1159–1165.

- Ogawara, K., Kuwabara, S., Koga, M., Mori, M., Hattori, T., & Yuki, N. (1999). Acute motor axonal neuropathy and acute motor and sensory axonal neuropathy—serum levels of antibodies to GM1 and GD1a and their clinical correlation. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 66(5), 650–653. <https://doi.org/10.1136/jnnp.66.5.650>
- Ohtsui, H., & Ikeda, M. (1971). Increased body burden of toxic substances and its health effect: Excretion of phenol in the urine of men working with phenol- or benzene-derivatives. *Internationales Archiv für Arbeitsmedizin*, 27(2), 163–178.
- Oppenheimer, B. S., Oppenheimer, E. T., Danishefsky, I., Stout, A. P., & Eirich, F. R. (1955). Further studies of polymers as carcinogenic agents in animals. *Cancer Research*, 15(5), 333–340.
- Pequeno, V., Marques, L., Bessa, F., Silva, J., Silva, J., Otero, V., & P. Eira, M. J. (2021). Microplastic contamination in marine mussels from the Atlantic coast of North Portugal and human risk of microplastic intake through mussel consumption. *Marine Pollution Bulletin*, 173, 112967. 111.
- Ren, Z., Yuan, J., Su, X., Sun, H., Pequeno, V., Marques, L., Bessa, F., Silva, J., Silva, J., Otero, V., & P. Eira, M. J. (2021). Microplastics in Marine and Estuarine Species From the Coast of Portugal. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 579127.
- Pironti, C., Ricciardi, M., Notarstefano, V., Giorgini, E., & Montano, L. (2023). Microplastics and additives in patients with preterm birth: The first evidence of their presence in both human amniotic fluid and Placenta. *Chemosphere*, 343, 140301.
- potential remediation. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 16, Article 100530. From <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100530>
- Prata, J. C. (2018a). Airborne microplastics: Consequences to human health? *Environmental Pollution*, 234, 115–126. From <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.043>
- Prata, J. C., & Dias-Pereira, P. (2023). Microplastics in terrestrial domestic animals and human health: Implications for food security and food safety and their role as sentinels. *Animals*, 13(4), 661. From <https://doi.org/10.3390/ani13040661>
- Prata, J. C. (2018b). Microplastics in wastewater: State of the knowledge on sources, fate and solutions. *Marine Pollution Bulletin*, 129(1), 262–265. From <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.02.046>

- Prata, J. C., Sequeira, I. F., Monteiro, S. S., Silva, A. L. P., da Costa, J. P., Dias-Pereira, P., Fernandes, A. J. S., da Costa, F. M., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. (2022). Microplastics in internal tissues of companion animals from urban environments. *Animals*, 12(15), 1979.
- Pritchard, R. D., Jones, S. D., Roth, P. L., Stuebing, K. K., & Ekeberg, S. E. (1988). Effects of group feedback, goal setting, and incentives on organizational productivity. *Journal of Applied Psychology*, 73(2), 337–358. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.73.2.337>
- Ren, Z., Yuan, J., Su, X., Sun, H., Galos, R., & Shi, Y. (2020b). Electro-thermal modeling and experimental validation for multilayered metallic microstructures. *Microsystem Technologies*, 1–8.
- Rolland, C., Cugy, F., & Vacher, J. (1989). Parental care and mating behaviour of polyandrous dunnocks *Prunella modularis* related to paternity by DNA fingerprinting. *Nature*, 338(6212), 249–251.
- Rubio-Armendáriz, C., Alejandro-Vega, S., Paz-Montelongo, S., Gutiérrez-Fernández, Á. J., Carrascosa-Iruzubieta, C. J., & Hardisson-de la Torre, A. (2022). Microplastics as emerging food contaminants: A challenge for food safety. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), 1174. From <https://doi.org/10.3390/ijerph19031174>
- Sarlo, M., Daum, I., Palomba, D., Cantagallo, S., & Leuthold, H. (2009). The effect of emotion and response selection on moral judgment: An ERP study. *BMC Neuroscience*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/1471-2202-10-85>
- Shen, M., Song, B., Zhou, C., Wang, Y., Ye, S., Zhu, Y.,... Zeng, G. (2021). Presence of microplastics in drinking water from freshwater sources: the investigation in Changsha, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(31), 42129–42138. From <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13725-6>
- Simon, S. I., & Schmid-Schönbein, G. W. (1988). Biophysical aspects of microsphere engulfment by human neutrophils. *Biophysical Journal*, 53(2), 163–173. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(88\)83078-9](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(88)83078-9)
- Sjöholm, I., & Edman, P. (1979). Acrylic microspheres in vivo. II. The effect in rat of L asparaginase given in microparticles of polyacrylamide. *The Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics*, 211(3), 663–667.

- Sjöholm, I., & Edman, P. (1979). Controlled release of macromolecules from poly (lactic acid) microspheres. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 68(1), 1–5.
- Slack, J. D., Kanke, M., Simmons, G. H., & DeLuca, P. P. (1981). Controlled release of a polypeptide from polylactic acid microspheres. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 70(6), 660–664.
- Snipes, M. B., Chavez, G. T., & Muggenburg, B. A. (1984). Disposition of 3-, 7-, and 13- μm microspheres instilled into lungs of dogs. *Environmental Research*, 33(2), 333–342. [https://doi.org/10.1016/0013-9351\(84\)90031-8](https://doi.org/10.1016/0013-9351(84)90031-8)
- Snipes, M. B., & Clem, M. F. (1981). Retention of microspheres in the rat lung after intratracheal instillation. *Environmental Research*, 24(1), 33–39. [https://doi.org/10.1016/0013-9351\(81\)90129-8](https://doi.org/10.1016/0013-9351(81)90129-8)
- Snipes, M. B., McClellan, R. O., & Mauderly, J. L. (1988). Deposition and clearance of inhaled particles. In R. O. McClellan & R. F. Henderson (Eds.), *Concepts in inhalation toxicology* (pp. 163–192). Hemisphere Publishing Corporation.
- Stock, S. P., Vadasz, G., Schmitto, J. D., & Vadasz, I. (2019). Targeting the TGF β signaling pathway to reduce cardiac fibrosis in hypertension and myocardial infarction. *Biomedicines*, 7(3), 54. <https://doi.org/10.3390/biomedicines7030054>
- Stock, V., Böhm, J., Ressel, A., & Stöfen, H. (2020). Microplastic contamination of drinking water: A systematic review. *Science of the Total Environment*, 743, 140683.
- Sun, J., Zhang, X., Wang, X., Wang, T., Zhang, S., Li, Y., ... & Li, Y. (2022). Effects induced by polyethylene microplastics oral exposure on colon mucin release, inflammation, gut microflora composition and metabolism in mice. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 240, 113702.
- Surendran, R., Singh, A., Kumar, R., Varjani, S., & Vivekanand, V. (2023). Microplastics in terrestrial ecosystem: Sources and migration in soil environment. *Chemosphere*, 318, 137946. From <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137946>
- Szentkuti, L. (1997). The volume of the fluid layer covering the luminal surface of the colon in anesthetized rats: An estimation using polyethylene glycol. *Histochemistry and Cell Biology*, 108(4–5), 351–357. <https://doi.org/10.1007/s004180050186>

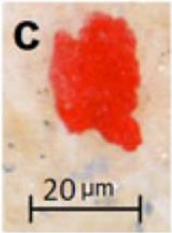
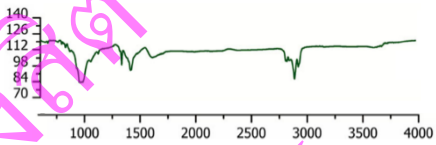
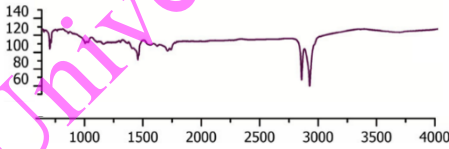
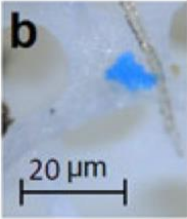
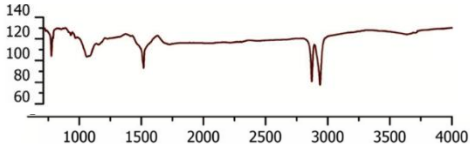
- Tabata, Y., & Ikada, Y. (1988). Effect of the size and surface charge of polymer microspheres on their phagocytosis by macrophage. *Biomaterials*, 9(4), 356–362.
- Tabata, Y., & Ikada, Y. (1988). Macrophage phagocytosis of biodegradable microspheres composed of L-lactic acid/glycolic acid homo- and copolymers. *Journal of Biomedical Materials Research*, 22(9), 837–858. <https://doi.org/10.1002/jbm.820220908>
- Tamargo, M., Hernández-García, E., & Martín-Arbelo, J. (2022). Review: interactions between microplastics and the gastrointestinal microbiome. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(26), 7247–7261.
- Tang, J., Peikert, A. H., & Yamashita, Y. (2008). Fluorescent dissolved organic matter as a tracer for environmental processes: Development of a new approach for spectral characterization. *Environmental Science & Technology*, 42(18), 6965-6972.
- Ullah, F., Wang, P. Y., Saqib, S., Ali, N., Almasoud, N., Alharbi, M. G., ... & Chen, X. (2568). Toxicological complexity of microplastics in terrestrial ecosystems. *iScience*, 28(2), Article 108785. From <https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.108785>
- Ullah, Z., Maqbool, A., Tahir, F., Mehmood, S., Mahmood, T., Azam, A., ... & Alharbi, S. A. (2568). Microplastic and nanoplastic pollution: Assessing translocation, impact, and mitigation strategies in marine ecosystems. *Water Environment Research*, 97(2), Article e70032. From <https://doi.org/10.1002/wer.24053>
- Walczak, A. M., & Tkačik, G. (2015). Information transmission in genetic regulatory networks: a review. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 27(47), 473001. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/27/47/473001>
- Wagner, J. G. (1969). Interpretation of plasma concentration-time curves for poorly absorbed drugs and drugs for which the rate of absorption is the rate-limiting step in elimination. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 58(10), 1253–1257.
- Wang, M., Li, Y., Lin, X., Zhou, Y., Guo, Y., Du, M.,... & Ma, J. (2021). A review on the occurrence, distribution, characteristics, and analysis methods of microplastic pollution in ecosystems. *Emerging Contaminants*, 7(1), 164–179 from <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2021.08.001>

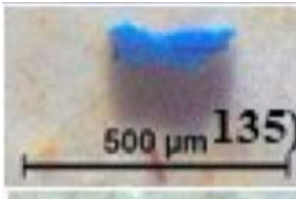
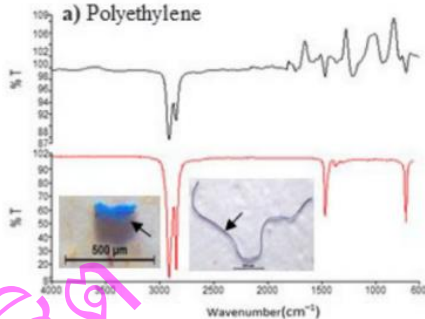
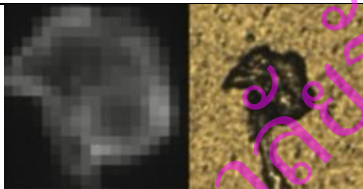
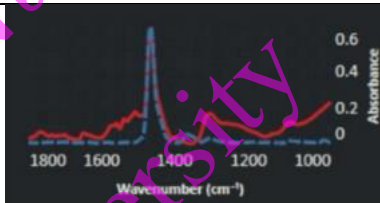
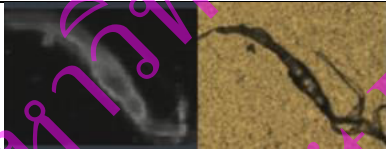
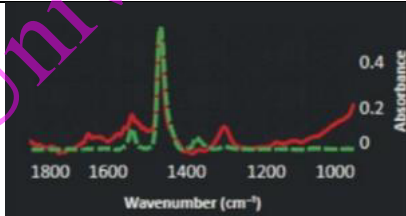
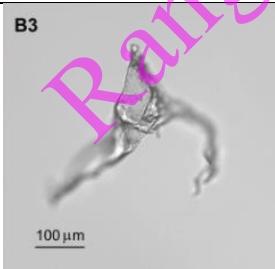
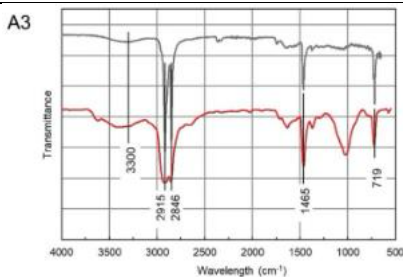
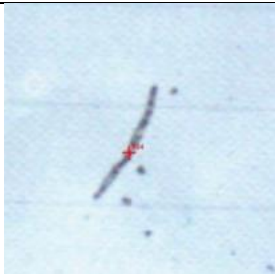
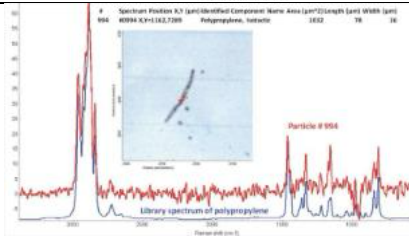
- Wang, S., Zhang, W., Wang, P., & Feng, J. (2022). Microplastic pollution focused on sources, distribution, contaminant interactions, analytical methods, and wastewater removal strategies: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(9), 5610. From <https://doi.org/10.3390/ijerph19095610>
- Yan, W., Liu, Z., Wang, S., Li, H., & Liu, Q. (2022). High-performance Li-ion storage enabled by N,S-co-doped carbon nanofibers derived from electrospun polyacrylonitrile. *Chemical Engineering Journal*, 427, 130756. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130756>
- Yan, Z., Lu, H., Huang, C., Wu, Y., Zhou, Y., Cao, Y., Sun, W., Zhu, B., Liu, H., Li, G., Zhai, X., Zhang, F., Cui, X., & Liu, G. (2022). Analysis of Microplastics in Human Feces Reveals a Correlation between Fecal Microplastics and Inflammatory Bowel Disease Status. *Environmental Science & Technology*, 56(1), 414–421. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03924>
- Yarahmadi, A., Heidari, S., Sepahvand, P., Afkhami, H., & Kheradjoo, H. (2567). Microplastics and environmental effects: investigating the effects of microplastics on aquatic habitats and their impact on human health. *Frontiers in Public Health*, 12, Article 1411389. From <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1411389>
- Zea Cobos, A. G., Amón, J., León, E., & Caballero, P. (2024). Standardization of FTIR- Based Methodologies for Microplastics Detection in Drinking Water: A Meta-Analysis Indeed and Practical Approach. *Water*, 16(22), 3170.
- Zhang, J., Zhang, Y., Dong, C., Cai, Z., & Chen, J. (2021). The existence of microplastics in human placenta and meconium: A mini-review. *Science of The Total Environment*, 762, 144574.
- Zhang, Y., Li, Q., Zong, S., Guo, Y., Du, C., & Zhang, Y. (2021). Occurrence and human exposure to microplastics in indoor air: a review. *Environmental Pollution*, 289, 117967.
- Ziani, K., Ioniță-Mîndrican, C. B., Mititelu, M., Neacșu, S. M., Negrei, C., Moroșan, E.,... & Vlăsceanu, G. (2023). Microplastics: A Real Global Threat for Environment and Food Safety: A State of the Art Review. *Nutrients*, 15(3), 617. from <https://doi.org/10.3390/nu15030617>

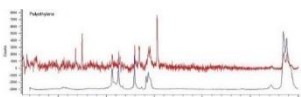
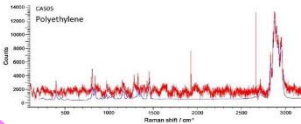
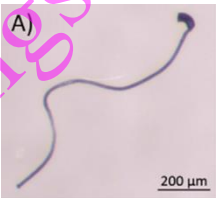
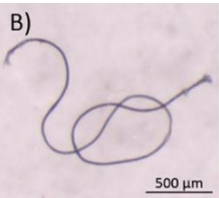
Ziani, K., Mititelu, M., Neacșu, S. M., Negrei, C. และ Preda, O. T. (2016). Microplastics: A Real Global Threat for Environment and Food Safety: A State of the Art Review. *Nutrients*, 15(3), Article 617. From . <https://doi.org/10.3390/nu15030617>

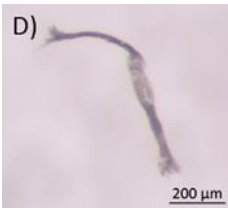
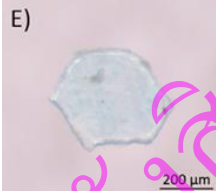
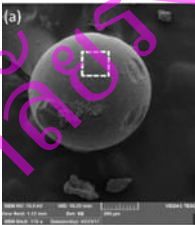
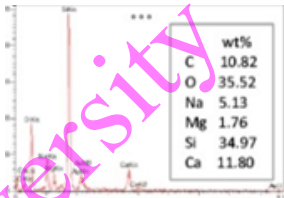
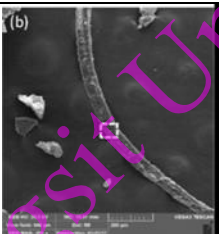
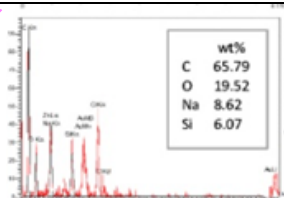
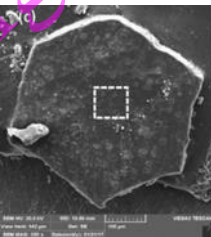
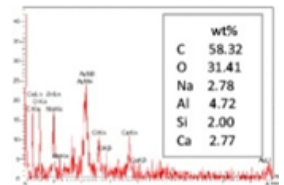
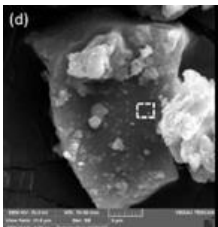
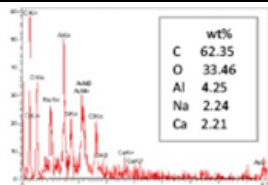
มหาวิทยาลัยรังสิต
Rangsit University

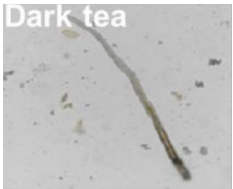
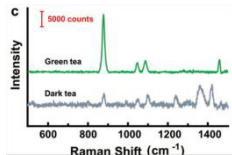
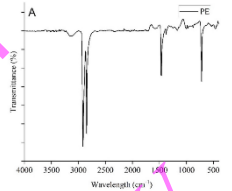
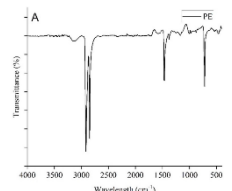
ภาคผนวก

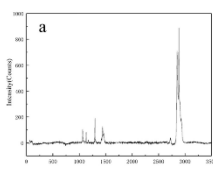
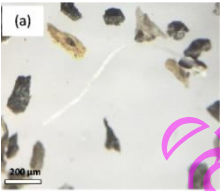
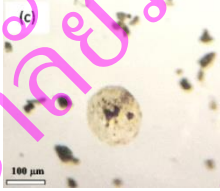
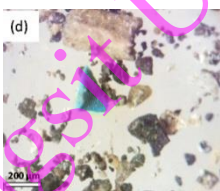
ชนิด	ลักษณะ	รูป	ผลอ้างอิง	อ้างอิง
Nylon	Fragment			(Krishnakumar et al., 2021)
Polyester	Fiber			(Krishnakumar et al., 2021)
Polyester	Fiber			(Pequeno et al., 2021a)
PP	Fragment			(Krishnakumar et al., 2021)

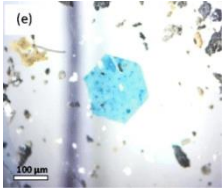
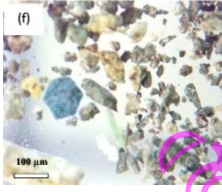
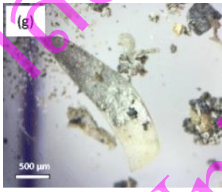
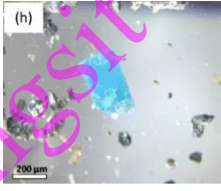
ชนิด	ลักษณะ	รูป	ผลอ้างอิง	อ้างอิง
PP	fragment			(Krishnakumar et al., 2021)
PE	fragment			(An-Microplastic-Analysis-Drinking-Water-5994-5616en-Agilent.Pdf, n.d.)
PE	fragment			(An-Microplastic-Analysis-Drinking-Water-5994-5616en-Agilent.Pdf, n.d.)
PE	fragment			(Gálvez-Blanca et al., 2024b)
PE	fiber			(Scientific, n.d.)

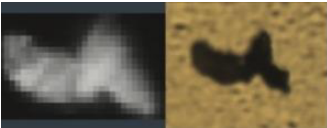
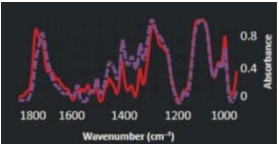
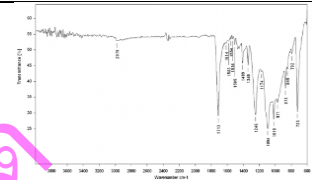
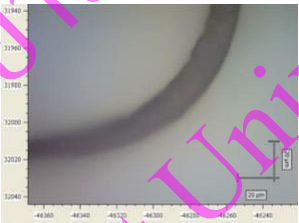
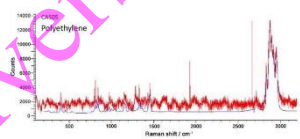
ชนิด	ลักษณะ	รูป	ผลยืนยัน	อ้างอิง
PE	Fragment			(Yaranal et al., 2021a)
PE	Fragment			(Yaranal et al., 2021a)
PE	Fragment			(Stereomicroscope Photographs and FTIR Spectrums of Microplastics in The..., n.d.-a)
PE	Fiber		Confirmed by micro- FTIR/or micro-Raman	(Lares et al., 2018a)
PE	Fiber		Confirmed by micro- FTIR/or micro-Raman	(Lares et al., 2018a)

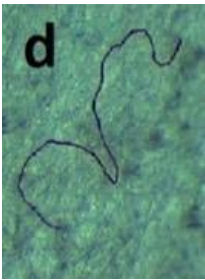
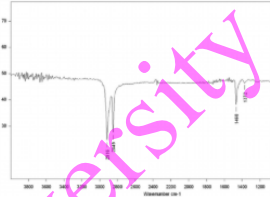
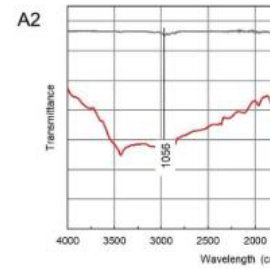
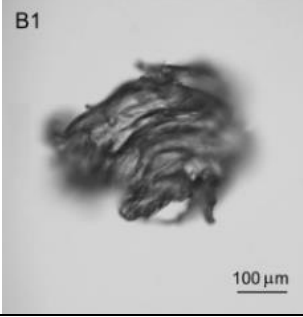
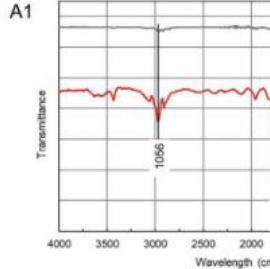
ชนิด	ลักษณะ	รูป	ผลอ้างอิง	อ้างอิง
PE	Fiber	D) 	Confirmed by micro-FTIR/or micro-Raman	(Lares et al., 2018a)
PE	Fragment	E) 	Confirmed by micro-FTIR/or micro-Raman	(Lares et al., 2018a)
PE	Fragment	(a) 	 wt% C 10.82 O 35.52 Na 5.13 Mg 1.76 Si 34.97 Ca 11.80	(SEM Images and EDAX Analyses Result of a the Smooth Silicate Glass..., n.d.-a)
PE	Fiber	(b) 	 wt% C 65.79 O 19.52 Na 8.62 Si 6.07	(SEM Images and EDAX Analyses Result of a the Smooth Silicate Glass..., n.d.-a)
PE	Fragment	(c) 	 wt% C 58.32 O 31.41 Na 2.78 Al 4.72 Si 2.00 Ca 2.77	(SEM Images and EDAX Analyses Result of a the Smooth Silicate Glass..., n.d.-a)
PE	Fragment	(d) 	 wt% C 62.35 O 33.46 Na 2.24 Al 4.25 Si 2.21	(SEM Images and EDAX Analyses Result of a the Smooth Silicate Glass..., n.d.-a)

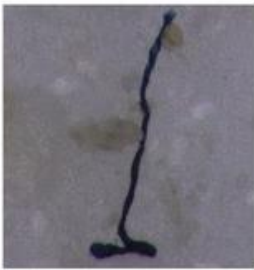
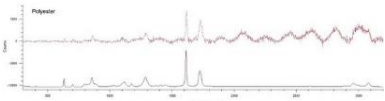
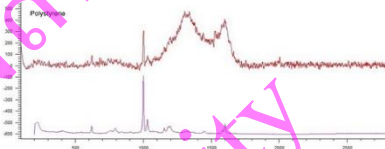
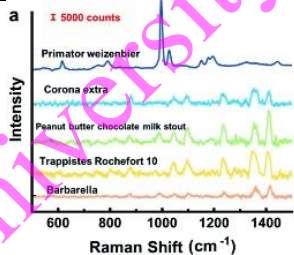
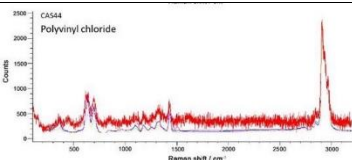
ชนิด	ลักษณะ	รูป	ผลอ้างอิง	อ้างอิง
PE	Fiber			(Li et al., 2022a)
PE	Fragment			(Microplastics in Different Tissues of a Commonly Consumed Fish, <i>Scomberomorus Guttatus</i> , from a Large Subtropical Estuary: Accumulation, Characterization, and Contamination Assessment, n.d.-a)
PE	Fiber			(Lares et al., 2018a)

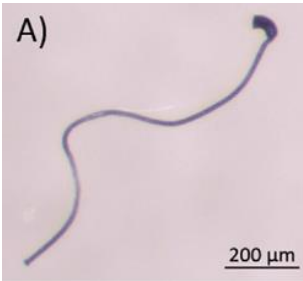
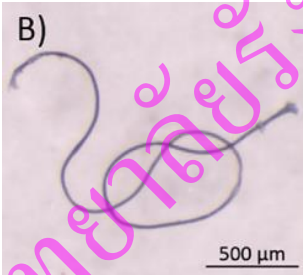
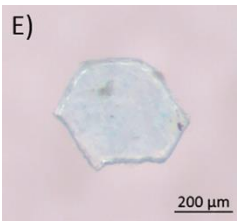
ชนิด	ลักษณะ	รูป	ผลอ้างอิง	อ้างอิง
PE	Fragment			(Hasan Anik et al., 2021)
PE	Fragment		Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)	(The Optical Microscope Image of Microplastics. a Transparent Fiber, b..., n.d.-a)
PE	Fragment		Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)	(The Optical Microscope Image of Microplastics. a Transparent Fiber, b..., n.d.-a)
PE	fragment		Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)	(The Optical Microscope Image of Microplastics. a Transparent Fiber, b..., n.d.-a)

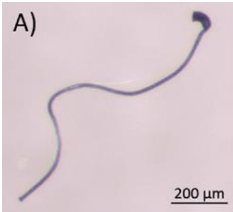
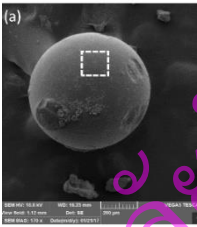
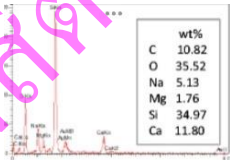
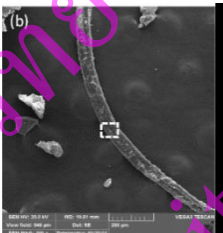
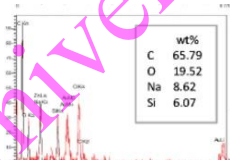
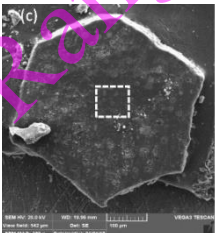
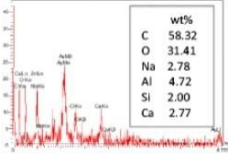
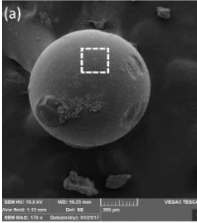
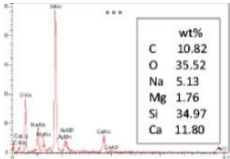
ชนิด	ลักษณะ	รูป	ผลอ้างอิง	อ้างอิง
PE	Fragment		Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)	(The Optical Microscope Image of Microplastics. a Transparent Fiber, b..., n.d.-a)
PE	Fragment		Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)	(The Optical Microscope Image of Microplastics. a Transparent Fiber, b..., n.d.-a)
PE	Fragment		Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)	(The Optical Microscope Image of Microplastics. a Transparent Fiber, b..., n.d.-a)
PE	Fragment		Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)	(The Optical Microscope Image of Microplastics. a Transparent Fiber, b..., n.d.-a)

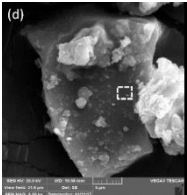
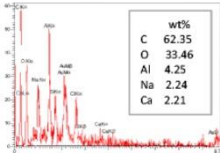
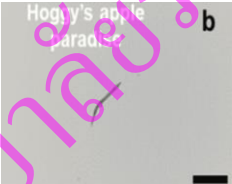
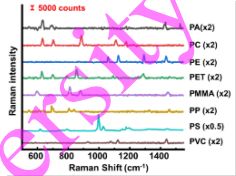
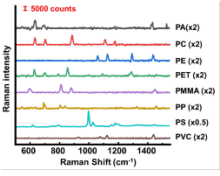
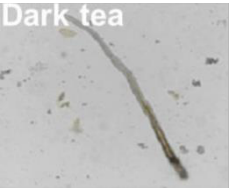
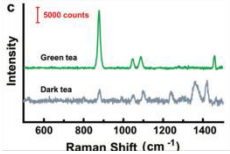
ชนิด	ลักษณะ	รูป	ผลอ้างอิง	อ้างอิง
PET	fragment			(An-Microplastic-Analysis-Drinking-Water-5994-5616en-Agilent.Pdf, n.d.)
PET	fiber			((PDF) Study of Analysis Method on Microplastic Identification in Bottled Drinking Water, n.d.)
PET	Fiber			(Yaranal et al., 2021a)

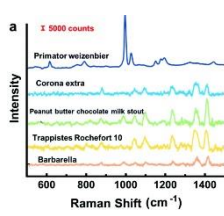
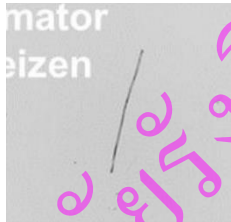
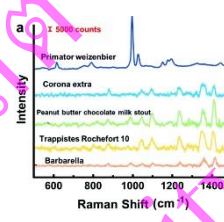
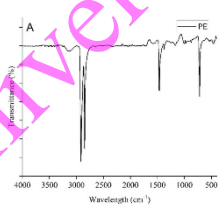
ชนิด	ลักษณะ	รูป	ผลอ้างอิง	อ้างอิง
PET	Fiber			(<i>Stereomicroscope Photographs and FTIR Spectrums of Microplastics in The...</i> , n.d.-b)
HDPE	fragment			(‘(PDF) Study of Analysis Method on Microplastic Identification in Bottled Drinking Water’, 2025)
PES	fiber			(Gálvez-Blanca et al., 2024c)
PES	fragment			(Gálvez-Blanca et al., 2024a)

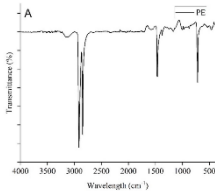
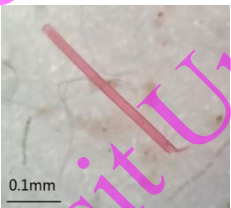
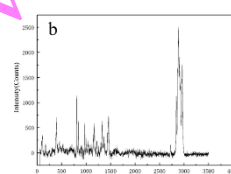
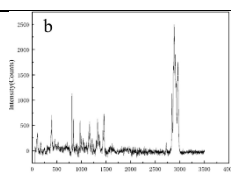
ชนิด	ลักษณะ	รูป	ผลอ้างอิง	อ้างอิง
PES	Fiber			(Yaranal et al., 2021c)
PS	Fragments			(Yaranal et al., 2021c)
PS	fiber			(Li et al., 2022b)
PVC	Fragment			(Yaranal et al., 2021d)

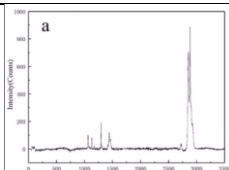
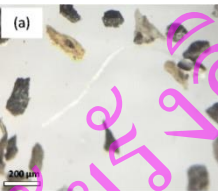
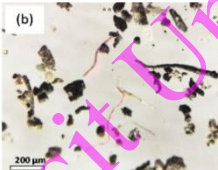
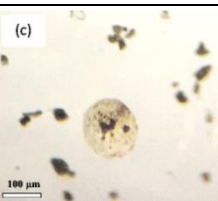
ชนิด	ลักษณะ	รูป	ผลอ้างอิง	อ้างอิง
PE	Fiber		Confirmed by micro-FTIR/or micro-Raman	(Lares et al., 2018b)
PE	Fiber		Confirmed by micro-FTIR/or micro-Raman	(Lares et al., 2018b)
PE	Fiber		Confirmed by micro-FTIR/or micro-Raman	(Lares et al., 2018b)
PE	Fragment		Confirmed by micro-FTIR/or micro-Raman	(Lares et al., 2018b)

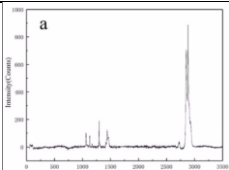
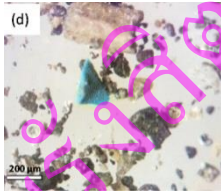
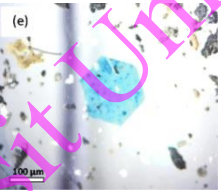
ชนิด	ลักษณะ	รูป	ผลอ้างอิง	อ้างอิง
PE	Fiber	A) 	Confirmed by micro-FTIR/or micro-Raman	(Lares et al., 2018b)
PE	Fragment	(a)  		(SEM Images and EDAX Analyses Result of a the Smooth Silicate Glass..., n.d.-b)
PE	Fiber	(b)  		(SEM Images and EDAX Analyses Result of a the Smooth Silicate Glass..., n.d.-b)
PE	Fragment	(c)  		(SEM Images and EDAX Analyses Result of a the Smooth Silicate Glass..., n.d.-b)
PE	Fragment	(a)  		(SEM Images and EDAX Analyses Result of a the Smooth Silicate Glass..., n.d.-b)

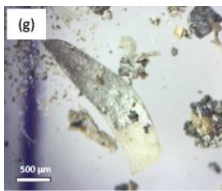
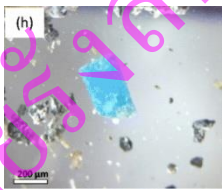
ชนิด	ลักษณะ	รูป	ผลอ้างอิง	อ้างอิง
PE	Fragment			(SEM Images and EDAX Analyses Result of a the Smooth Silicate Glass... Download Scientific Diagram, n.d.)
PP	Fiber			(Li et al., 2022c)
PP	Fiber			(Li et al., 2022c)
PE	Fiber			(Li et al., 2022c)

ชนิด	ลักษณะ	รูป	ผลอ้างอิง	อ้างอิง
PP	Fragment			(Li et al., 2022c)
PS	fragment			(Li et al., 2022c)
PE	Fragment			(Microplastics in Different Tissues of a Commonly Consumed Fish, <i>Scomberomorus Guttatus</i> , from a Large Subtropical Estuary: Accumulation, Characterization, and Contamination Assessment, n.d.-b)

ชนิด	ลักษณะ	รูป	ผลอ้างอิง	อ้างอิง
PE	Fiber			(Microplastics in Different Tissues of a Commonly Consumed Fish, <i>Scomberomorus Guttatus</i> , from a Large Subtropical Estuary: Accumulation, Characterization, and Contamination Assessment, n.d.-b)
PP	Fiber			(Ren et al., 2020b)
PP	Fiber			(Ren et al., 2020c)

ชนิด	ลักษณะ	รูป	ผลอ้างอิง	อ้างอิง
PE	Fragment			(Ren et al., 2020b)
PE	Fragment		Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)	(The Optical Microscope Image of Microplastics. a Transparent Fiber, b..., n.d.-b)
PE	Fiber		Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)	(The Optical Microscope Image of Microplastics. a Transparent Fiber, b..., n.d.-b)
PE	Fragment		Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)	(The Optical Microscope Image of Microplastics. a Transparent Fiber, b..., n.d.-b)

ชนิด	ลักษณะ	รูป	ผลอ้างอิง	อ้างอิง
PE	Fragment			(Ren et al., 2020b)
PE	Fragment		Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)	(The Optical Microscope Image of Microplastics. a Transparent Fiber, b..., n.d.-b)
PE	Fragment		Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)	(The Optical Microscope Image of Microplastics. a Transparent Fiber, b..., n.d.-b)
PE	Fragment		Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)	(The Optical Microscope Image of Microplastics. a Transparent Fiber, b..., n.d.-b)

ชนิด	ลักษณะ	รูป	ผลอ้างอิง	อ้างอิง
PE	Fragment		Fourier- transform infrared spectroscopy (FTIR)	(The Optical Microscope Image of Microplastics. a Transparent Fiber, b..., n.d.-b)
PE	Fragment		Fourier- transform infrared spectroscopy (FTIR)	(The Optical Microscope Image of Microplastics. a Transparent Fiber, b..., n.d.-c)

ประวัติผู้ทำวิจัย

ชื่อ-สกุล	โชคชัย พงษ์พิทักษ์วิเศษ
วัน เดือน ปีเกิด	1 ตุลาคม 2546
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่ปัจจุบัน	429/50 อิศรภาพ47 ถนน อิศรภาพ แขวง บ้านช่างหล่อ เขตบางกอกน้อย จังหวัด กรุงเทพมหานคร 10700
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น พ.ศ.2562 จากโรงเรียนชินโนรส วิทยาลัย จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย พ.ศ.2565 จากโรงเรียนนิโนรส วิทยาลัย จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ปัจจุบัน	นักศึกษาคณะเทคนิคการแพทย์ ชั้นปีที่ 4 มหาวิทยาลัยรังสิต

ประวัติผู้ทำวิจัย

ชื่อ-สกุล	ชญานิษฐ์ โกมลวิศิษฐ์
วัน เดือน ปีเกิด	10 ตุลาคม 2546
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่ปัจจุบัน	672 ซอยท่าดินแดง16 ถนนท่าดินแดง แขวง/เขตคลองสาน จังหวัด กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น พ.ศ.2562 จากโรงเรียนศึกษานารี จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายพ.ศ.2565 จากโรงเรียนศึกษานารี จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ปัจจุบัน	นักศึกษาคณะเทคนิคการแพทย์ ชั้นปีที่ 4 มหาวิทยาลัยรังสิต

ประวัติผู้ทำวิจัย

ชื่อ-สกุล	นริศรา สอนชา
วัน เดือน ปีเกิด	2 ตุลาคม 2545
สถานที่เกิด	นครสวรรค์
ที่อยู่ปัจจุบัน	52/207 ซอยเอกประจิม 2/2 หมู่ 7 ถนนเอกประจิม ตำบล หลักหก อำเภอเมือง ปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นพ.ศ.2561 จากโรงเรียนผดุงนารี จังหวัดมหาสารคาม สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายพ.ศ.2564 จากโรงเรียนสารคาม พิทยาคม จังหวัดมหาสารคาม
ปัจจุบัน	นักศึกษาคณะเทคนิคการแพทย์ ชั้นปีที่ 4 มหาวิทยาลัยรังสิต

ประวัติผู้ทำวิจัย

ชื่อ-สกุล	วรวรรณ บรรจง
วัน เดือน ปีเกิด	21 เมษายน 2546
สถานที่เกิด	ชัยภูมิ
ที่อยู่ปัจจุบัน	52/173 ซอยเอกประจิม 2 หมู่ 7 ตำบลหลักหก อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี 12000
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น พ.ศ.2561 โรงเรียนภูเขียว จังหวัด ชัยภูมิ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย พ.ศ.2564 โรงเรียนภูเขียว จังหวัด ชัยภูมิ
ปัจจุบัน	นักศึกษาคณะเทคนิคการแพทย์ ชั้นปีที่ 4 มหาวิทยาลัยรังสิต

ประวัติผู้ทำวิจัย

ชื่อ-สกุล	อรัชพร ชะคอนใจ
วัน เดือน ปีเกิด	17 เมษายน 2546
สถานที่เกิด	ตาก
ที่อยู่ปัจจุบัน	106/4 ซอย รังสิต-นครนายก8 ตำบลประชาธิปัตย์ อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น พ.ศ.2561 โรงเรียนมงฟอร์ตวิทยาลัย จังหวัดเชียงใหม่ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย พ.ศ.2564 โรงเรียนมงฟอร์ตวิทยาลัย จังหวัดเชียงใหม่
ปัจจุบัน	นักศึกษาคณะเทคนิคการแพทย์ ชั้นปีที่ 4 มหาวิทยาลัยรังสิต