

สารเพอร์ฟลูออโรอัลคิลและโพลีฟลูออโรอัลคิล
กับการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย
**Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances and
their Contamination in the Environment of Thailand**

จิรา คงปราณ

สาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อมและเทคโนโลยี
สำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

Jira Kongpran

Department of Environmental Health and Technology,
School of Public Health, Walailak University

บทคัดย่อ

สารเคมีสังเคราะห์ในกลุ่มเพอร์ฟลูออโรอัลคิลและโพลีฟลูออโรอัลคิล (PFASs) ถูกผลิตและนำไปใช้ในอุตสาหกรรมและผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ อย่างแพร่หลายมากกว่าครึ่งศตวรรษ สาร PFASs จัดเป็นสารมลพิษชนิดใหม่ที่ปนเปื้อนและตกค้างยาวนานในสิ่งแวดล้อมหลายพื้นที่ทั่วโลก รวมทั้งสะสมในเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิต และเป็นพิษต่อสุขภาพ ยืนยันด้วยผลการทดลองในสัตว์และผลการศึกษาทางระบาดวิทยาในมนุษย์ของสาร PFASs บางชนิด เช่น ผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของทารกในครรภ์ การเกิดภูมิแพ้ การทำงานของไต โรคหัวใจและหลอดเลือด การเพิ่มขึ้นของระดับไทรอยด์ฮอร์โมนและระดับคอเลสเตอรอล และมีโอกาสก่อมะเร็งในมนุษย์ เป็นต้น ความตระหนักด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพเริ่มต้นอย่างจริงจังตั้งแต่ปี 2000 นำมาซึ่งการศึกษาวิจัยในหลายประเทศ ส่งผลให้มีการกำหนดมาตรการควบคุมการผลิตและใช้งานสาร PFASs เพื่อป้องกันผลกระทบต่อประชาชนในประเทศเหล่านั้น แต่ในประเทศไทยที่ผ่านมาเพียงการตรวจสอบสาร PFASs ในตัวอย่างสิ่งแวดล้อม ซึ่งผลการศึกษายืนยันการปนเปื้อนในตัวอย่างน้ำ ฝุ่นพื้นผิว และอากาศ คนไทยจึงมีโอกาสรับสัมผัสสารกลุ่มนี้เข้าสู่ร่างกาย ดังนั้น การศึกษาแหล่งกำเนิด เส้นทางการปนเปื้อน ปริมาณการสัมผัสในมนุษย์และความเสี่ยงต่อสุขภาพที่เกิดจากสาร PFASs จะเป็นฐานข้อมูลต่อยอดที่สำคัญในการวิเคราะห์สถานการณ์ในประเทศ เพื่อควบคุมผลกระทบจากสารมลพิษกลุ่มนี้

คำสำคัญ : สารเพอร์ฟลูออโรอัลคิล, สารโพลีฟลูออโรอัลคิล, การปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม, ความเสี่ยงต่อสุขภาพ

Abstract

Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) are man-made chemicals which have been produced and used in several industrial and consumer products for more than half a century. PFASs are classified as emerging contaminants due to their ubiquitous contamination in global environment. They are persistent, bioaccumulative and toxic. Animal experiments and epidemiology studies have shown potential effects of some PFASs to health such as birth outcomes, allergic disease, kidney function, cardiovascular disease, increase of thyroid hormone and cholesterol, and possibly carcinogenic to human etc. Environmental and health concerns have arisen since 2000 results in several researches on PFASs. The production and use of PFASs have been regulated in many countries in order to protect their people. In Thailand, few studies have been conducted only for detection of PFASs in environmental samples including water, house dust and air sample. The results confirm their contamination in the environment which possibly linked to exposure to PFASs in Thai population. Therefore, the study on sources and contamination pathways of PFASs, exposure level in human and related health risk are needed to conduct. Based on these results, the adverse effects of PFASs in Thailand can be regulated.

Keywords : Perfluoroalkyl substances, Polyfluoroalkyl substances, Environmental contamination, Health risk

บทนำ

ปัจจุบันหลาย ๆ ประเทศต้องเผชิญกับปัญหาสารมลพิษชนิดใหม่ (Emerging Contaminants) ที่ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อม สารเหล่านี้ถูกคิดค้นและนำมาใช้ในอุตสาหกรรม เพื่อช่วยให้ผู้คนมีคุณภาพชีวิตและความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น แต่ขาดการศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพก่อนนำไปใช้ ความตระหนักต่อสารมลพิษเหล่านั้น

มักเกิดขึ้นหลังจากการผลิตและใช้งานมาสักระยะ ซึ่งนานพอที่สารมลพิษแพร่กระจายและปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อม จนอาจนำไปสู่ความเสี่ยงหรือแม้กระทั่งเกิดผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ สารเคมีกลุ่ม Per และ Polyfluoroalkyl substances โดยรวมใช้ชื่อย่อว่า PFASs ถูกผลิตและนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลายตั้งแต่ช่วงคริสต์ทศวรรษที่ 1950¹ แต่ความตระหนักทางด้าน

สิ่งแวดล้อมที่ทำให้มีการศึกษาอย่างจริงจังเริ่มขึ้น 50 ปีหลังจากนั้น การวิจัยการปนเปื้อนสาร PFASs ในสิ่งแวดล้อมและความเสี่ยงต่อสุขภาพถูกดำเนินการโดยประเทศที่พัฒนาแล้วเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากสารเหล่านี้มีการปนเปื้อนในระดับความเข้มข้นต่ำ ๆ (Micropollutants) จึงต้องอาศัยเทคนิคการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพสูง ผลการวิจัยทำให้ประเทศที่พัฒนาแล้วมีการควบคุมการผลิตและการใช้สาร PFASs ฐานการผลิตจึงถูกเคลื่อนย้ายไปยังประเทศกำลังพัฒนา แต่การศึกษากการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมและความเสี่ยงต่อสุขภาพที่เกิดจากสาร PFASs ในประเทศกำลังพัฒนากลับมีอยู่จำกัด บทความวิชาการฉบับนี้มี 2 วัตถุประสงค์หลักอย่างแรกเพื่อทบทวนผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับสาร PFASs ได้แก่ คุณสมบัติ การนำไปใช้ประโยชน์ แหล่งกำเนิดและเส้นทางการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม การรับสัมผัสในมนุษย์ ผลกระทบต่อสุขภาพ และการดำเนินการควบคุม และส่วนที่สองเพื่อทบทวนสถานการณ์การปนเปื้อนสาร PFASs ในสิ่งแวดล้อมในประเทศไทย เพื่อให้ข้อเสนอแนะต่อประเด็นการศึกษาวิจัยที่ควรดำเนินการต่อไป

ความสำคัญของสาร PFASs

1. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

PFASs เป็นสารเคมีสังเคราะห์ที่มีหมู่ perfluoroalkyl ($-C_nF_{2n+1}$) อย่างน้อยหนึ่งหมู่ เมื่อก่อนสารกลุ่มนี้ถูกอ้างถึงในชื่อของ PFCs (per- and polyfluorinated compounds) แต่คำว่า PFCs อาจหมายถึงสารกลุ่ม Perfluorocarbons ซึ่งเป็นสารที่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนและฟลูออรีนเท่านั้น และมีคุณสมบัติแตกต่างไป

จากสาร PFASs² ดังนั้น เพื่อไม่ให้เกิดความสับสน จึงมีการใช้ชื่อ PFASs ที่มีความเฉพาะเจาะจงมากกว่ารวมถึงในบทความฉบับนี้ด้วย สาร PFASs มีหลายกลุ่มและปัจจุบันถูกนำมาใช้หลายร้อยชนิด³ แต่มีสองกลุ่มที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากความคงตัวในสิ่งแวดล้อม การสะสมในเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิต และความเป็นพิษ นั่นคือกลุ่ม Perfluoroalkyl sulfonic acid (PF-SAs) และกลุ่ม Perfluoroalkyl carboxylic acid (PFCAs) โดยชนิดของสารที่สำคัญในกลุ่มคือ Perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) และ Perfluorooctanoic acid (PFOA) ตามลำดับ โดยโมเลกุลของสาร PFASs แต่ละชนิดประกอบด้วย 2 ส่วน คือ สายฟลูออโรคาร์บอนและหมู่ฟังก์ชัน ตัวอย่างเช่น PFOS และ PFOA มีหมู่ซัลโฟนิค ($-SO_3H$) และหมู่คาร์บอกซิลิก ($-COOH$) เป็นหมู่ฟังก์ชัน ตามลำดับ โดย Perfluoroalkyl substances เป็นสารที่อะตอมไฮโดรเจนที่สร้างพันธะกับคาร์บอนทุกอะตอมถูกแทนที่ด้วยฟลูออรีน ยกเว้นอะตอมคาร์บอนที่เป็นหมู่ฟังก์ชัน ในขณะที่ Polyfluoroalkyl substances อย่างน้อยมีคาร์บอน 1 อะตอม (แต่ไม่ทั้งหมด) ที่ไฮโดรเจนที่สร้างพันธะอยู่ทุกอะตอมถูกแทนที่ด้วยฟลูออรีน⁴ ด้วยความแข็งแรงของพันธะคาร์บอนและฟลูออรีนทำให้ PFASs มีความเสถียรและทนทานต่อความร้อนและสารเคมี จึงถูกนำไปใช้เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความหลากหลายทางคุณสมบัติทั้งความแข็งแรง ยืดหยุ่น และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และด้วยลักษณะเฉพาะตัวของ PFASs^{2, 4} ที่มีคุณสมบัติทั้งมีขี้ (หมู่ฟังก์ชัน) และไม่มีขี้ (สายฟลูออโรคาร์บอน) ในโมเลกุล ส่งผลให้

สาร PFASs มีคุณสมบัติช่วยลดแรงตึงผิว สามารถขับไล่ทั้งน้ำและไขมันไม่ให้ยึดเกาะ จึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเคลือบผิว ส่วนผสม หรือสารตัวกลางในการผลิตสารเคลือบผิว และใช้เคลือบผิวผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมและสินค้าอุปโภคบริโภคในครัวเรือนหลายชนิดเพื่อกันน้ำ ไขมัน และคราบสกปรกต่าง ๆ พันธะที่แข็งแรงระหว่างคาร์บอนและฟลูออรีน ทำให้สาร PFOS PFOA รวมถึงสารชนิดอื่นในกลุ่ม PFASs และ PFCAs เป็นสารเคมีที่เสถียร (persistent) ย่อยสลายได้ยากต้องใช้รังสีพลังงานสูงหรืออุณหภูมิสูงในห้องปฏิบัติการ แต่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงตกค้างในสิ่งแวดล้อมได้ยาวนาน ในขณะที่สารกลุ่ม Polyfluoroalkyl substances เช่น Fluorotelomer alcohols (FTOHs: $CF_3(CF_2)_nCH_2CH_2OH$) สามารถถูกย่อยสลายอย่างช้า ๆ ในสิ่งแวดล้อมทั่วไปและเปลี่ยนเป็นสารชนิดที่มีความเสถียรได้ โดยสาร FTOHs จัดเป็นสารตั้งต้น (Precursor) ชนิดหนึ่งของสารกลุ่ม PFCAs คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของสาร PFASs แต่ละกลุ่มแตกต่างกันไปโดยสารกลุ่ม PFASs และ PFCAs สามารถละลายน้ำได้ โดยความสามารถในการละลายน้ำลดลงเมื่อความยาวของสายฟลูออโรคาร์บอนเพิ่มขึ้น และไม่ระเหยเมื่ออยู่ในรูปของสารละลาย ในขณะที่สารกลุ่ม FTOHs มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำแต่มีค่าความดันไอสูงซึ่งสามารถระเหยได้ จึงทำให้เส้นทางการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมของสารแต่ละกลุ่มแตกต่างกัน โดยกลุ่ม PFASs และ PFCAs มีเส้นทางหลักของการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมน้ำ ในขณะที่กลุ่ม FTOHs ซึ่งระเหยได้ มีเส้นทางการปนเปื้อนหลักในอากาศ สาร PFASs สามารถจำแนกเป็น 2 ประเภท คือ PFASs สายยาว (long-chain PFASs) และ PFASs สายสั้น

(short-chain PFASs) ตามจำนวนคาร์บอนในสายฟลูออโรคาร์บอน โดย PFASs สายยาว ได้แก่ สารในกลุ่ม PFASs ที่มีจำนวนคาร์บอนมากกว่าหรือเท่ากับ 6 อะตอม (ตัวอย่างเช่น PFOS หรือ C_8 PFSA) และสารในกลุ่ม PFCAs ที่มีจำนวนคาร์บอนมากกว่าหรือเท่ากับ 7 อะตอม (ตัวอย่างเช่น PFOA หรือ C_8 PFCA) และรวมถึงสารตั้งต้นของ PFASs และ PFCAs ชนิดสายยาว แต่เนื่องจากสาร PFASs สายยาว มีความสามารถสะสมในเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิต (bioaccumulation) มากกว่าสาร PFASs สายสั้น⁴ จึงมีการนำสาร PFASs สายสั้น⁴ ที่ให้คุณสมบัติทางการผลิตในลักษณะเดียวกับสาร PFASs สายยาวมาใช้ทดแทน

2. การใช้ประโยชน์

จากคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในการผลิตทางอุตสาหกรรมข้างต้น สาร PFASs ถูกนำไปใช้ประโยชน์หลากหลายโดยมี 16 สาขาอุตสาหกรรมหลัก² ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยสาร PFASs สามารถปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ทั้งจากกระบวนการผลิต การใช้งาน และการกำจัดทิ้ง ในระหว่างกระบวนการผลิต สาร PFASs อาจถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของวัสดุตกค้างที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา (residues) หรือผลพลอยได้จากกระบวนการผลิต (impurities) ซึ่งรวมไปกับของเสียทั้งในรูปก๊าซเสีย น้ำเสีย กากตะกอน และมูลฝอยจากโรงงานผลิต หรือถูกปลดปล่อยออกมาระหว่างการนำสาร PFASs ไปใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ รวมถึงการใช้งานผลิตภัณฑ์เหล่านั้นของผู้บริโภค และการนำของเสียที่มีสาร PFASs เป็นส่วนผสมไปกำจัดทิ้งด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การใช้กากตะกอนทำปุ๋ยหมัก การบำบัดน้ำเสีย การบำบัดก๊าซเสียและน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบ เป็นต้น

ตารางที่ 1 สาขาอุตสาหกรรมที่มีการนำสาร PFASs ไปใช้ประโยชน์^๒

สาขาอุตสาหกรรม	ลักษณะการนำไปใช้ประโยชน์
1. อุตสาหกรรมการบินและการป้องกันอากาศยาน	ใช้เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ท่อเคเบิล และเป็นส่วนผสมในสารไฮดรอลิกเพื่อป้องกันการกระเหย การติดไฟและการกัดกร่อน
2. อุตสาหกรรมยานยนต์	ใช้ปรับปรุงระบบขนส่งน้ำมันรถยนต์เพื่อป้องกันการกระเหยของสารไฮโดรคาร์บอนในท่อขนส่งและป้องกันความร้อน รวมทั้งเป็นส่วนผสมในน้ำมันหล่อลื่น
3. อุตสาหกรรมผลิตยาปราบศัตรูพืช	ใช้เป็นส่วนผสมเพื่อควบคุมการเจริญเติบโตและกำจัดวัชพืชและแมลง
4. อุตสาหกรรมผลิตสายเคเบิลและสายไฟ	ใช้ในการผลิตสายเคเบิลและสายไฟที่ใช้ในระบบสื่อสารคมนาคม ระบบคอมพิวเตอร์ รถยนต์ และอากาศยาน เป็นต้น
5. อุตสาหกรรมผลิตวัสดุก่อสร้าง	ใช้เคลือบผิววัสดุ เช่น กระเบื้อง คอนกรีต เหล็ก เพื่อกันไฟและให้ทนทานต่อสภาพอากาศ รวมทั้งเป็นส่วนผสมในสีทาบ้าน
6. อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์	ใช้เคลือบป้องกันแผงวงจร
7. อุตสาหกรรมด้านพลังงาน	ใช้เคลือบป้องกันตัวรับแสงอาทิตย์ และสารอิเล็กทรอนิกส์ในแบตเตอรี่
8. อุตสาหกรรมป้องกันเพลิงและระงับอัคคีภัย	เป็นส่วนผสมในโฟมดับเพลิง และเคลือบอุปกรณ์ที่ใช้ในการดับเพลิง
9. อุตสาหกรรมผลิตสินค้าอุปโภคบริโภคในครัวเรือน	ใช้เป็นส่วนผสมน้ำยาเคลือบเงาพื้น น้ำยาทำความสะอาด รวมทั้งใช้เคลือบผิวเครื่องหนัง พรม และเครื่องครัว เช่น เคลือบกระทะเพื่อป้องกันการอาหารติดกระทะ
10. อุตสาหกรรมชุบโลหะ	ใช้เป็นสารเคลือบผิวเพื่อให้ผิวโลหะมีความแข็งและให้ชั้นผิวเกิดความสวยงาม
11. อุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันและสกัดแร่	ใช้เป็นสารเคลือบผิวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของของเหลวที่ใช้สกัดน้ำมันและก๊าซธรรมชาติด้วยการช่วยยับยั้งการกระเหยของแก๊สโซลีน รวมทั้งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดแร่ทองแดงและทอง
12. อุตสาหกรรมทางการแพทย์	ใช้เป็นส่วนผสมทำวัสดุเทียมต่าง ๆ ที่ฝังในร่างกาย เคลือบฟิล์ม X-rays เสื้อคลุมและผ้าคลุมสำหรับการผ่าตัด
13. อุตสาหกรรมผลิตสารกึ่งตัวนำ	ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอุปกรณ์เพื่อใส่ของเหลวหรือแก๊สที่มีฤทธิ์กัดกร่อนได้

ตารางที่ 1 สาขาอุตสาหกรรมที่มีการนำสาร PFASs ไปใช้ประโยชน์² (ต่อ)

สาขาอุตสาหกรรม	ลักษณะการนำไปใช้ประโยชน์
14. อุตสาหกรรมการผลิตกระดาษและบรรจุภัณฑ์	ใช้เคลือบผิวกระดาษและบรรจุภัณฑ์ที่เป็นกระดาษที่ใช้ห่อหุ้มอาหารเพื่อเพิ่มคุณสมบัติการกันน้ำมันและน้ำ
15. อุตสาหกรรมการผลิตสารโพลีเมอร์	ใช้เป็นสารช่วยในกระบวนการผลิตสารฟลูออโรโพลีเมอร์ เช่น โพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (PTFE) เพอฟลูออโรอัลคอกซิลแคน (PFA) และโพลีไวนิลไอดีนฟลูออไรด์ (PVDF) เป็นต้น
16. อุตสาหกรรมสิ่งทอ เครื่องหนัง และ เครื่องเรือน	ถูกใช้ผลิตเสื้อผ้าในลักษณะเส้นใยที่มีรูพรุน รวมถึงใช้ตกแต่งหรือเคลือบผิววัสดุของหนัง พรหมหรือผ้า เพื่อให้กันน้ำ ไขมัน ฝุ่น และ คราบสกปรก เช่น เสื้อกันน้ำ รองเท้ากันน้ำ เฟอร์นิเจอร์หรือ พรหมป้องกันฝุ่น เป็นต้น

3. การปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม

ความตระหนักต่อการปนเปื้อนสาร PFASs ในสิ่งแวดล้อมเริ่มต้นในช่วงคริสต์ทศวรรษที่ 2000¹ PFASs ถูกตรวจพบในหลากหลายตัวกลางสิ่งแวดล้อม โดยสิ่งแวดล้อมน้ำถือเป็นเส้นทางหลักของการแพร่กระจายและเป็นตัวกลางสุดท้ายในการรองรับ³ สาร PFASs ถูกตรวจพบในตัวอย่างน้ำที่เก็บจากแม่น้ำ ทะเล มหาสมุทร ทะเลสาบ และอ่างเก็บน้ำในหลายพื้นที่ทั่วโลก^{3, 6-8} รวมถึงในแผ่นน้ำแข็ง⁹ ระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ถูกบ่งชี้ว่าเป็นแหล่งกำเนิดสำคัญของสาร PFASs ไปยังแหล่งน้ำต่าง ๆ^{10, 11} อีกทั้งกระบวนการตกแบบเปียก (Wet Deposition) ในรูปของน้ำฝนและหิมะเป็นอีกเส้นทางการแพร่กระจายของสาร PFASs จากชั้นบรรยากาศลงสู่แหล่งน้ำ การศึกษาการปนเปื้อนในระบบนิเวศวิทยาแหล่งน้ำทั้ง 3 ตัวกลาง ได้แก่ น้ำ ตะกอนท้องน้ำ และสัตว์น้ำที่อาศัยในแหล่งน้ำนั้น^{12, 13} แสดงให้เห็นการสะสมและถ่ายทอดสาร PFASs ผ่านระบบห่วงโซ่อาหาร ซึ่งการบริโภคสัตว์น้ำเป็นเส้นทางรับสัมผัสสาร PFASs ที่สำคัญใน

มนุษย์¹ รวมทั้งการรับสัมผัสจากอาหารชนิดต่าง ๆ¹⁴ และน้ำบริโภคอุปโภค ได้แก่ น้ำใต้ดินและน้ำประปา^{6, 15} ซึ่งน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบเป็นอีกแหล่งกำเนิดสำคัญที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนสาร PFASs ในน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน¹⁶ สาร PFASs ถูกตรวจพบในตัวอย่างผลิตภัณฑ์^{17, 18} เช่น เฟอร์นิเจอร์ พรหม เสื้อผ้า ผลิตภัณฑ์บรรจุอาหาร วัสดุก่อสร้าง วัสดุตกแต่งรถยนต์ น้ำยาดูแลหรือเคลือบผิวผลิตภัณฑ์ รวมถึงในของเสียอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งถูกปลดปล่อยออกมาในสิ่งแวดล้อมระหว่างการใช้งานและการกำจัดทิ้ง โดยถ้าวิธีการกำจัดไม่เหมาะสมอาจทำให้สาร PFASs ถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ อาจเกิดจากสารตั้งต้น (precursors) ที่ถูกปลดปล่อยระหว่างการผลิต ใช้งาน และการกำจัดทิ้ง และถูกย่อยสลายในสิ่งแวดล้อม² สาร PFASs ในผลิตภัณฑ์หรือวัสดุเหล่านี้จะปนเปื้อนออกมาในลักษณะฝุ่นผงที่ตรวจพบตามพื้นผิวในอาคารบ้านเรือน¹⁸⁻²⁰ ซึ่งเป็นเส้นทางรับสัมผัสที่สำคัญในเด็กเล็ก และบางชนิดสามารถระเหยออกมาในอากาศภายในอาคารที่ตรวจพบในบ้าน สถานที่ทำงาน โรงเรียน

และในรศ²¹⁻²³ ซึ่งส่งผลต่อการรับสัมผัสทางการหายใจ สาร PFASs ความเข้มข้นสูงถูกตรวจพบในตัวอย่างอากาศที่เก็บจากบริเวณระบบบำบัดน้ำเสีย²⁴ และพื้นที่อุตสาหกรรม²³ ที่เป็นแหล่งกำเนิดสำคัญในบรรยากาศทั่วไป นอกจากนี้ สาร PFASs ถูกตรวจพบในบรรยากาศเหนือมหาสมุทรแอตแลนติกและมหาสมุทรใต้²⁵ แสดงให้เห็นการแพร่กระจายของสาร PFASs ไปในบรรยากาศทั่วโลก

4. ผลกระทบต่อสุขภาพ

มนุษย์มีความเสี่ยงต่อการรับสัมผัสสาร PFASs เข้าสู่ร่างกายได้หลายเส้นทาง สารประกอบฟลูออรีนในเลือดของมนุษย์ถูกรายงานครั้งแรกโดย Taves ในปี 1968 และต่อมานักวิทยาศาสตร์ของบริษัท 3M ซึ่งใช้เครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพขั้นสูงยืนยันการตรวจพบสาร PFOS และ PFOA ในตัวอย่างเลือดของมนุษย์และสัตว์²⁶ ส่งผลให้มีการเฝ้าระวังทางชีวภาพต่อการรับสัมผัสสารกลุ่ม PFASs ในมนุษย์อย่างต่อเนื่อง การทบทวนผลการศึกษที่ผ่านมามีการตรวจพบสาร PFASs ในตัวอย่างเลือดของประชากรหลายประเทศทั่วโลก²⁷⁻²⁹ เช่น สหรัฐอเมริกา แคนาดา สเปน เยอรมนี นอร์เวย์ อิตาลี โปแลนด์ เบลเยียม สวีเดน เดนมาร์ก โคลอมเบีย บราซิล แอฟริกาใต้ ออสเตรเลีย ญี่ปุ่น จีน อินเดีย เกาหลี มาเลเซีย เป็นต้น รวมทั้งในตัวอย่างน้ำนมและปัสสาวะ ยืนยันการรับสัมผัสสาร PFASs ของมนุษย์ ผลการศึกษาในกลุ่มมารดาและเด็กแรกคลอดพบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสาร PFASs ในตัวอย่างเลือดของมารดากับเลือดที่เก็บจากสายสะดือของทารก แสดงถึงการถ่ายทอดสาร PFASs ในระยะก่อนคลอดผ่านรกจากมารดาไปยังทารกในครรภ์^{29, 30} และผลการศึกษาในกลุ่มมารดาและเด็กพบการถ่ายทอดสาร PFASs ในระยะหลังคลอดผ่านการให้นมบุตร³⁰ การศึกษาครึ่งชีวิตของ PFOS และ PFOA ในเลือดมนุษย์มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.5-4.1 ปี และ 3.0-3.6 ปี

ตามลำดับ²⁸ ในขณะที่การกำจัดสาร PFOS และ PFOA ออกจากร่างกายโดยไตเป็นไปได้น้อยมาก³¹ ทำให้สารเหล่านี้สามารถตกค้างสะสมอยู่ในอวัยวะในร่างกาย ได้แก่ ตับ และไต การศึกษาความเป็นพิษของสาร PFASs ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาในสัตว์ทดลองโดยเฉพาะจากสาร PFOA และ PFOS ผลการศึกษายืนยันการเกิดพิษแบบเรื้อรังกับสัตว์ทดลอง ได้แก่ ความเป็นพิษต่อตับ ไต การเจริญเติบโต ภาวะภูมิคุ้มกัน การสืบพันธุ์ ต่อมาไร้ท่อ รวมถึงมะเร็ง^{14, 26, 32} อย่างไรก็ตาม ค่าครึ่งชีวิตของสาร PFASs ในสัตว์ทดลองมีระยะเวลาที่สั้นกว่าในมนุษย์และมีกลไกการเกิดพิษที่แตกต่างกัน³³ จึงมีความจำเป็นต้องศึกษากลไกการเกิดพิษของสาร PFASs ในมนุษย์เพิ่มเติมต่อไป สำหรับผลกระทบต่อมนุษย์มีผลการศึกษาระบาดวิทยาเชิงวิเคราะห์ที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของระดับสาร PFASs บางชนิดในร่างกายกับผลกระทบต่อสุขภาพ ได้แก่ การเจริญเติบโตของทารกในครรภ์³⁴ การเกิดภูมิแพ้³⁵ ความสามารถในการทำงานของไต³⁶ โรคหัวใจและหลอดเลือด³⁷ การเพิ่มขึ้นของระดับไตรอยด์ฮอร์โมน³⁸ และระดับคอเลสเตอรอล³⁹ สำหรับ PFOA ถูกจัดให้เป็นสารที่มีโอกาสก่อมะเร็งในมนุษย์ (กลุ่ม 2B) โดยองค์การวิจัยมะเร็งนานาชาติ (IARC)¹⁴

5. การดำเนินการควบคุม

จากผลการตรวจพบสาร PFOS และ PFOA ในเลือดของมนุษย์ ทำให้บริษัท 3M ประกาศเลิกการผลิตและใช้สารเหล่านี้ในปี 2000 โดยดำเนินการเสร็จสมบูรณ์ในปี 2002²⁶ หลังจากนั้นบริษัทผู้ผลิตทั่วโลกได้พยายามทดแทนสาร PFASs สายยาวในกลุ่ม PFCAs และ PFSAAs รวมถึงสารตั้งต้นของสารเหล่านี้ด้วยสาร PFASs สายสั้นหรือทดแทนด้วยสารกลุ่มอื่นที่ไม่ใช่ PFASs ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากคุณสมบัติที่ไม่พึงประสงค์ที่ส่งผลต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม² ในปี 2006 US EPA ได้ริเริ่มโครงการ

เพื่อควบคุมการผลิตและการปล่อยสาร PFOA ออกสู่สิ่งแวดล้อม¹ และปี 2009 สาร PFOS และอนุพันธ์ของ PFOS ถูกประกาศห้ามผลิตและใช้ภายใต้อนุสัญญาสตอกโฮล์ม⁴⁰ นอกจากนี้ กลุ่มประเทศอเมริกาเหนือและยุโรปกำลังดำเนินการเสนอข้อกฎหมายและจัดการความเสี่ยงเพื่อควบคุมสารกลุ่ม

PFCA's ชนิดที่เป็นสายยาว ทั้งการจำกัดหรือห้ามการผลิตและใช้ รวมทั้งควบคุมการถือครองและการปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม² ประเทศหรือหน่วยงานต่าง ๆ ได้กำหนดค่ามาตรฐานของสาร PFOA และ PFOS ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าแนะนำและค่าระดับที่ยอมรับได้ของสาร PFOA และ PFOS

ค่าแนะนำ/ ค่าระดับที่ยอมรับได้	หน่วยงาน/ ประเทศ	PFOA	PFOS
ค่าแนะนำ (Guideline) ในน้ำดื่ม ⁴¹	รัฐนิวเจอร์ซีย์	0.04 µg/L	-
	รัฐมินนิโซตา	0.3 µg/L	0.2 µg/L
	US EPA	0.4 µg/L	0.2 µg/L
	แคนาดา	0.7 µg/L	0.3 µg/L
	รัฐนอร์ทแคโรไลนา	2 µg/L	-
	UK HPA	10 µg/L	0.3 µg/L
Tolerable Daily Intake (TDI) ^{42, 43}	UK FSA	3 µg/kg bw/day	0.3 µg/kg bw/day
Reference dose (RfD) ^{44, 45}	US EPA	20 ng/kg/day	20 ng/kg/day
Slope factor ⁴⁴	US EPA	0.07 (mg/kg/day) ⁻¹	-

สถานการณ์ การปนเปื้อน PFASs ในสิ่งแวดล้อมประเทศไทย

จากการทบทวนผลการศึกษาในประเทศไทยที่ผ่านมาตรวจพบสาร PFASs ในตัวอย่างสิ่งแวดล้อมจำนวน 5 กลุ่ม รวม 20 ชนิด (ตารางที่ 3) ประกอบด้วย กลุ่ม Perfluoroalkyl carboxylic acid (PF-CAs) จำนวน 9 ชนิด ได้แก่ Perfluorobutanoic acid (PFBA) Perfluoropropanoic acid (PFPA) Perfluorohexanoic acid (PFHxA) Perfluoroheptanoic acid (PFHpA) Perfluorooctanoic acid (PFOA) Perfluorononanoic acid (PFNA)

Perfluorodecanoic acid (PFDA) Perfluoroundecanoic acid (PFUnA) และ Perfluorododecanoic acid (PFDoDA) กลุ่ม Perfluoroalkyl sulfonic acids (PFASs) จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ Perfluorobutane sulfonic acid (PFBS) Perfluorohexane sulfonic acid (PFHxS) และ Perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) กลุ่ม Fluorotelomer alcohols (FTOHs) จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ 6:2 Fluorotelomer alcohol (6:2 FTOH) 8:2 Fluorotelomer alcohol (8:2 FTOH) และ 10:2 Fluorotelomer alcohol (10:2 FTOH) กลุ่ม

Perfluoroalkane sulfonamide (FASAs) จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ Perfluoro-1-octanesulfonamide (FOSA) N-methylperfluoro-1-octanesulfonamide (MeFOSA) และ N-ethylperfluoro-1-octanesulfonamide (EtFOSA) กลุ่ม Perfluoroalkane sulfonamidoethanol (FASEs), จำนวน 2 ชนิด ได้แก่ 2-(N-methylperfluoro-1-octanesulfonamido)-ethanol (MeFOSE) และ 2-(N-ethylperfluoro-1-octanesulfonamido)-ethanol (EtFOSE) การปนเปื้อนสาร PFASs ในน้ำมีการศึกษามากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวกลางสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ โดยในปี พ.ศ. 2552 ได้มีการศึกษาการปนเปื้อนในตัวอย่างน้ำดิบ (2 ตัวอย่าง) ในระบบการปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา ได้แก่ น้ำเข้าระบบ, ในถังทำน้ำใส, ระบบกรองทราย และน้ำผ่านการปรับปรุง (กระบวนการละ 8 ตัวอย่าง รวม 32 ตัวอย่าง) น้ำประปา (28 ตัวอย่าง) และน้ำดื่มบรรจุขวด (20 ตัวอย่าง) ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร⁴⁶ ผลการศึกษาตรวจพบสารกลุ่ม PFCA และ PFSA 5 ชนิด มีความเข้มข้นรวมอยู่ระหว่าง 3.31-25.79 ng/L โดยชนิดที่ตรวจพบมากที่สุดคือ PFOA นอกจากนี้ กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาไม่สามารถกำจัดสาร PFASs ออกจากน้ำได้ และในน้ำดื่มบรรจุขวดมีความเข้มข้นสูงกว่าน้ำประปาในปีเดียวกันมีการศึกษาการปนเปื้อนสาร PFASs ในตัวอย่างน้ำจากระบบบำบัดน้ำเสียส่วนกลางของนิคมอุตสาหกรรมในพื้นที่ภาคกลางและภาคตะวันออกจำนวน 2 แห่ง⁴⁷ โดยเก็บตัวอย่างน้ำที่เข้าระบบน้ำในถังเติมอากาศ น้ำในถังตกตะกอนชั้นที่ 2 และน้ำออกจากระบบบำบัด (อย่างละ 10 ตัวอย่าง รวม 40 ตัวอย่าง) และตัวอย่างกากตะกอน (4 ตัวอย่าง) ผลการศึกษาพบสารกลุ่ม PFCA และ PFSA 10 ชนิด โดยมีค่าความเข้มข้นรวมอยู่ระหว่าง 661.8-1,382.8 ng/L และพบว่าระบบบำบัดน้ำเสียทั้ง 2 แห่ง ไม่สามารถกำจัดสาร PFASs ออกจากน้ำ

เสียได้ ต่อมาในปี พ.ศ.2554 มีการตรวจสอบการปนเปื้อนสาร PFASs ในตัวอย่างน้ำจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนจำนวน 7 แห่ง ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร⁴⁸ โดยทั้งหมดเป็นระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) ผลการศึกษาพบสารกลุ่ม PFCA และ PFSA 11 ชนิด ความเข้มข้นรวมในตัวอย่างน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบบำบัดมีค่าระหว่าง 9.4-18.4 ng/L และ 12.7-63.6 ng/L ตามลำดับ ชนิดที่พบการปนเปื้อนมากที่สุด คือ PFOS และ PFOA และผลการศึกษาสรุปว่ากระบวนการบำบัดน้ำเสียระบบตะกอนเร่งไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะกำจัดสาร PFASs ออกจากน้ำเสียได้ นอกจากนี้ ในระหว่างปี พ.ศ. 2556-2557 มีการตรวจวัดสาร PFASs ในตัวอย่างน้ำผิวดินบริเวณปากแม่น้ำสายหลัก 4 สาย (แม่น้ำเจ้าพระยา แม่น้ำท่าจีน แม่น้ำแม่กลอง และแม่น้ำบางปะกง) และบริเวณรอบนิคมอุตสาหกรรมจังหวัดสมุทรปราการ ลำพูน และระยอง⁴⁹ ผลการศึกษาตรวจพบการปนเปื้อนสาร PFOA ในแม่น้ำสายหลักอยู่ระหว่าง 1.4-16.9 ng/L ส่วนสาร PFOS อยู่ระหว่างตรวจไม่พบจนถึง 53.5 ng/L ส่วนในตัวอย่างน้ำผิวดินบริเวณรอบนิคมอุตสาหกรรมตรวจพบการปนเปื้อนสูงกว่าแม่น้ำสายหลักโดยสาร PFOA และ PFOS มีค่าอยู่ระหว่าง 11.7-118.7 ng/L และ 22.8-434.5 ng/L ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2558 ศึกษาการปนเปื้อนสาร PFASs ในตัวอย่างน้ำประปาในพื้นที่ กทม. โดยตรวจพบสารกลุ่ม PFCA และ PFSA จำนวน 6 ชนิด⁵⁰ ความเข้มข้นรวมมีค่าระหว่าง 0.58-1.15 ng/L ผลการศึกษานี้พบว่ากระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาทั่วไป ได้แก่ การสร้างตะกอน การรวมตะกอน การกรองและการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีนไม่สามารถกำจัดสาร PFASs ออกจากน้ำดิบได้ ในขณะที่กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นสูง ได้แก่ การกรองด้วยถ่านกัมมันต์ (GAC) และรีเวิร์สออสโมสิส (RO) สามารถกำจัด PFASs ได้ประมาณ

ร้อยละ 86 นอกจากผลการศึกษาในสิ่งแวดล้อม น้ำแล้ว มีการวิจัย PFASs ในตัวอย่างฝุ่นพื้นผิว ที่เก็บจากบ้านเรือนในพื้นที่กรุงเทพมหานครและ นครศรีธรรมราช²⁰ โดยตรวจพบสารกลุ่ม PFCA, PFSA, FASA และ FASEs จำนวน 8 ชนิด มีความเข้มข้นรวมระหว่าง 54-1,310 ng/g โดยชนิดที่พบการปนเปื้อนสูงสุดคือ EtFOSA และในปี พ.ศ.2557⁵¹ ศึกษาการปนเปื้อนสาร PFASs ในตัวอย่างอากาศในบรรยากาศทั่วไป (อากาศ ภายนอกอาคาร) จำนวน 8 แห่ง ได้แก่ บริเวณพื้นที่

ชุมชนในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล บริเวณ ระบบบำบัดน้ำเสียรวมของนิคมอุตสาหกรรม รวมทั้ง ตัวอย่างอากาศภายในอาคารจำนวน 6 แห่ง ได้แก่ สำนักงาน บ้านพักอาศัย คอนโดมิเนียม ร้านถ่าย เอกสาร ร้านขายเฟอร์นิเจอร์ และห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษาตรวจพบสารกลุ่ม FTOHs และ PFCA จำนวน 10 ชนิด ความเข้มข้นรวมของ FTOHs มีค่า ตั้งแต่ 1,690- 13,030 pg/m³ ซึ่งสูงกว่าค่าความ เข้มข้นรวมของ PFCA ที่มีค่าระหว่าง 4-10 pg/m³ โดยชนิดที่พบการปนเปื้อนสูงสุด คือ 10:2 FTOH

ตารางที่ 3 การปนเปื้อนสาร PFASs ในสิ่งแวดล้อมในประเทศไทย

ชนิดสาร PFASs	ช่วงความเข้มข้น (ค่าเฉลี่ย)							
	⁴⁶ น้ำดิบ/ ประปา และน้ำดื่ม: ng/L	⁵⁰ น้ำประปา: ng/L	⁴⁸ น้ำเข้า/ ออกระบบ บำบัดน้ำ เสียชุมชน: ng/L	⁴⁷ น้ำในระบบ บำบัดน้ำเสีย อุตสาหกรรม: ng/L	⁴⁹ น้ำผิวดิน: ng/L	²⁰ ฝุ่นพื้นผิว: ng/g	⁵¹ อากาศ ทั่วไป: pg/m ³	⁵¹ อากาศใน อาคาร: pg/m ³
PFBA	-	0.13-0.50	-	-	-	-	-	-
PFPA	0.28-2.88	0.13-0.24	1.4-2.4/ 1.3-5.7	1.1-32.4	-	-	0.56-1.73 (1.01)	0.65-2.03 (1.19)
PFHxA	ND-0.43	ND-0.12	0.6-1.5/ 1.3-5.7	0.1-84.9	-	-	1.14-26.73 (6.14)	0.74-14.86 (4.89)
PFHpA	ND-1.65	ND	0.4-1.8/ 2.5-5.1	0.8-46.8	-	-	0.69-10.44 (2.47)	0.54-3.24 (1.77)
PFOA	1.43-16.54	0.15-0.31	1.5-5.4/ 0.8-6.8	6.6-149.8	1.4-118.7	<0.98-290 (45)	2.74-58.97 (13.15)	1.13-31.08 (10.76)
PFNA	<0.02	ND	0.4-0.9/ 2.2-7.4	15.3-353.2	-	-	<0.06-22.92 (5.04)	0.19-4.46 (2.15)
PFDA	<0.04	ND	0.2-0.8/ 0.8-5.3	1.2-118.8	-	-	0.69-9.04 (3.64)	0.28-1.25 (0.77)
PFUnDA	<0.22	ND-0.16	<0.28/ <0.28-4.7	3.1-338.2	-	-	0.48-11.74 (2.96)	<0.39-1.11 (0.75)
PFDoDA	<0.22	-	<0.28/ <0.28-4.2	<0.07-48.4	-	-	<0.39	<0.39
PFBS	<0.03	ND	0.6-1.4/ 0.4-8.5	-	-	-	-	-

ตารางที่ 3 การปนเปื้อนสาร PFASs ในสิ่งแวดล้อมในประเทศไทย (ต่อ)

ชนิดสาร PFASs	ช่วงความเข้มข้น (ค่าเฉลี่ย)							
	⁴⁶ น้ำดิบ/ ประปา และน้ำดื่ม: ng/L	⁵⁰ น้ำประปา: ng/L	⁴⁸ น้ำเข้า/ ออกระบบ บำบัดน้ำ เสียชุมชน: ng/L	⁴⁷ น้ำในระบบ บำบัดน้ำเสีย อุตสาหกรรม: ng/L	⁴⁹ น้ำผิวดิน: ng/L	²⁰ ฝุ่นพื้นผิว: ng/g	⁵¹ อากาศ ทั่วไป: pg/m ³	⁵¹ อากาศใน อาคาร: pg/m ³
PFHxS	-	ND	0.5-2.2/ 0.1-6.5	8.7-50.4	-	3.0-84 (25)	-	-
PFOS	0.22-6.28	ND-0.12	2.7-5.6/ 2.6-9.3	190.1-672.9	ND-434.5	3.0-130 (32)	-	-
6:2 FTOH	-	-	-	-	-	-	110-660 (360)	340-4,520 (1,540)
8:2 FTOH	-	-	-	-	-	-	280-5,780 (1,490)	520-3,970 (1,980)
10:2 FTOH	-	-	-	-	-	-	510-5,460 (2,120)	1,040- 8,860 (4,050)
FOSA	-	-	-	-	-	<0.02-41 (13)	-	-
Me- FOSA	-	-	-	-	-	<0.1-13 (1.6)	-	-
EtFOSA	-	-	-	-	-	<0.07-940 (140)	-	-
Me- FOSE	-	-	-	-	-	<0.22-140 (14)	-	-
EtFOSE	-	-	-	-	-	<0.12-350 (59)	-	-
ΣPFASs	3.31-25.79	0.58-1.15	9.4-18.4/ 12.7-63.6	661.8- 1,382.8	-	54-1,310 (330)	1,740- 11,960 (4,010)	2,530- 13,040 (7,590)

หมายเหตุ: - หมายถึง ไม่ได้ตรวจวิเคราะห์, ND หมายถึง ตรวจไม่พบ (Not detectable)

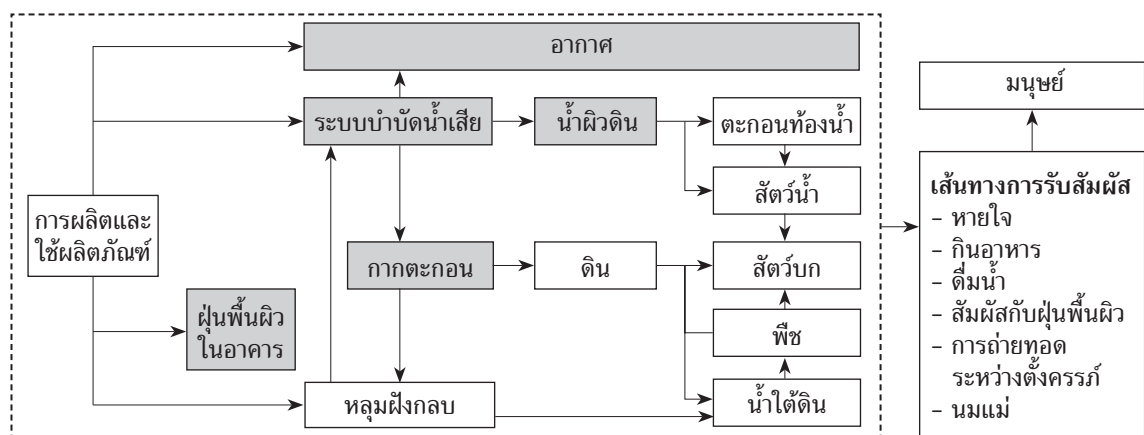
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในประเทศที่พัฒนาแล้วโดยเฉพาะในทวีปยุโรปและอเมริกาเหนือ มีผลการศึกษายืนยันการปนเปื้อนสาร PFASs ในสิ่งแวดล้อม และผลกระทบ

ที่เกิดขึ้นจากการนำสาร PFASs ไปใช้ประโยชน์ ความตระหนักถึงอันตรายและความเสี่ยงต่อสุขภาพของประชาชนจากการสัมผัสสารกลุ่มนี้ ส่งผลให้มีการควบคุมการผลิตและใช้งานสาร PFASs ใน

หลายประเทศ สำหรับผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับสาร PFASs ในประเทศไทย มีเพียงการตรวจสอบการปนเปื้อนในตัวอย่างสิ่งแวดล้อม ได้แก่ น้ำ ฝุ่นพื้นผิว และอากาศ (ภาพที่ 1) โดยผลการศึกษาที่ผ่านมาบ่งชี้ถึงการปนเปื้อนสาร PFASs ในทุกตัวกลางที่ตรวจสอบ ซึ่งอาจทำให้เกิดการสะสมสาร PFASs ในสิ่งแวดล้อมของประเทศในระยะยาวหากปราศจากการควบคุมแหล่งกำเนิด และก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อคนไทยจากการรับสัมผัสสาร PFASs ผ่านตัวกลางสิ่งแวดล้อมที่มีการปนเปื้อน แต่ปัจจุบันยังไม่มีผลการศึกษาที่ยืนยันถึงผลกระทบที่เกิดขึ้น กลายเป็นภัยเงียบที่คนไทยต้องเผชิญ การศึกษาวิจัยสาร PFASs ในประเทศไทยยังมีอยู่จำกัด ไม่ว่าจะเป็นการศึกษาแหล่งกำเนิดทั้งในส่วนของการผลิตและการใช้งานในอุตสาหกรรมและในผลิตภัณฑ์ที่มีสาร PFASs เป็นส่วนประกอบ รวมถึงการตรวจสอบการปนเปื้อนจากแหล่งกำเนิดสำคัญโดยเฉพาะน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบรวมถึงน้ำใต้ดินที่มีการใช้สำหรับบริโภคของประชาชนที่อยู่บริเวณโดยรอบ การศึกษาการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมที่จำกัดพื้นที่ศึกษาเฉพาะในกรุงเทพมหานครและนิคมอุตสาหกรรมบางแห่ง

ทำให้ขาดข้อมูลภาพรวมในระดับประเทศ และไม่ครอบคลุมตัวกลางสิ่งแวดล้อมที่จะนำไปสู่การประเมินการรับสัมผัสโดยเฉพาะการปนเปื้อนสาร PFASs ในตัวอย่างอาหารที่ถือเป็นเส้นทางการรับสัมผัสที่สำคัญ นอกจากนี้ ยังไม่มีการศึกษาการปนเปื้อนสาร PFASs ในตัวอย่างทางชีวภาพ เช่น ในตัวอย่างเลือดโดยเฉพาะของประชาชนในพื้นที่ที่ตรวจพบการปนเปื้อนสาร PFASs ในสิ่งแวดล้อม เป็นต้น แม้ว่าการศึกษาสาร PFASs ในประเทศไทยจะมีข้อจำกัดทั้งในส่วนของบุคลากร เครื่องมือในการตรวจวิเคราะห์ และงบประมาณในการดำเนินการ แต่ด้วยลักษณะอันตรายทั้งการตกค้างยาวนานในสิ่งแวดล้อม การสะสมในเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิต และความเป็นพิษของสาร PFASs ทำให้การศึกษาวิจัยสารกลุ่มนี้ในประเทศไทยยังมีความจำเป็นอย่างมาก เพื่อให้มีฐานข้อมูลความรู้ที่มากพอในการสนับสนุนการออกข้อกำหนดหรือกฎเกณฑ์ต่าง ๆ สำหรับควบคุมการผลิตและใช้สาร PFASs อย่างจริงจัง และป้องกันผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคตเพื่อให้ภัยเงียบที่วุ่นวายขึ้นจากลักษณะความเป็นอันตรายของสาร PFASs เท่านั้น ไม่ใช่เป็นภัยที่เกิดจากการละเลย



ภาพที่ 1 การศึกษาการปนเปื้อนของสาร PFASs ในสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย (ปรับจาก Ahren, 2011³)

เอกสารอ้างอิง

1. US EPA. Contaminants of Emerging Concern (CECs) in Fish: Perfluorinated Compounds (PFCs). In: Office of Water, editor. 2013. p. 3.
2. OECD. OECD/UNEP Global PFC Group, Synthesis paper on per- and polyfluorinated chemicals (PFCs), Environment, Health and Safety: Environment Directorate, OECD; 2013. Available from: <http://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-management/synthesis-paper-on-per-and-poly-fluorinated-chemicals.htm>.
3. Ahrens L. Polyfluoroalkyl compounds in the aquatic environment: a review of their occurrence and fate. *Journal of Environmental Monitoring*. [10.1039/C0EM00373E]. 2011;13(1):20-31.
4. Buck RC, Franklin J, Berger U, Conder JM, Cousins IT, de Voigt P, et al. Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Environment: Terminology, Classification, and Origins. *Integrated Environmental Assessment and Management*. 2011;7(4):513-41.
5. Jensen AA, Poulsen PB, Bossi R. Survey and environmental/health assessment of fluorinated substances in impregnated consumer products and impregnating agents: Danish EPA2008. Report No.: Survey of Chemical Substances in Consumer Products, No.99.
6. Sharma BM, Bharat GK, Tayal S, Larssen T, Bečanová J, Karásková P, et al. Perfluoroalkyl substances (PFAS) in river and ground/drinking water of the Ganges River basin: Emissions and implications for human exposure. *Environmental Pollution*. 2016 2016/01/01/;208(Part B):704-13.
7. Zhao Z, Xie Z, Tang J, Sturm R, Chen Y, Zhang G, et al. Seasonal variations and spatial distributions of perfluoroalkyl substances in the rivers Elbe and lower Weser and the North Sea. *Chemosphere*. 2015 2015/06/01/;129(Supplement C):118-25.
8. Zhao Z, Xie Z, Möller A, Sturm R, Tang J, Zhang G, et al. Distribution and long-range transport of polyfluoroalkyl substances in the Arctic, Atlantic Ocean and Antarctic coast. *Environmental Pollution*. 2012 2012/11/01/;170 (Supplement C):71-7.
9. Kirchgeorg T, Dreyer A, Gabrielli P, Gabrieli J, Thompson LG, Barbante C, et al. Seasonal accumulation of persistent organic pollutants on a high altitude glacier in the Eastern Alps. *Environmental Pollution*. 2016 2016/11/01/;218 (Supplement C):804-12.
10. Ahrens L, Felizeter S, Sturm R, Xie Z, Ebinghaus R. Polyfluorinated compounds in waste water treatment plant effluents and surface waters along the River Elbe, Germany. *Marine Pollution Bulletin*. 2009 2009/09/01/;58(9):1326-33.
11. Dauchy X, Boiteux V, Bach C, Colin A, Hemard J, Rosin C, et al. Mass flows

- and fate of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in the wastewater treatment plant of a fluorochemical manufacturing facility. *Science of The Total Environment*. 2017 2017/01/15/;576(Supplement C):549-58.
12. Ahrens L, Gashaw H, Sjöholm M, Gebrehiwot SG, Getahun A, Derbe E, et al. Poly- and perfluoroalkylated substances (PFASs) in water, sediment and fish muscle tissue from Lake Tana, Ethiopia and implications for human exposure. *Chemosphere*. 2016 2016/12/01/;165(Supplement C):352-7.
 13. Lam NH, Cho C-R, Kannan K, Cho H-S. A nationwide survey of perfluorinated alkyl substances in waters, sediment and biota collected from aquatic environment in Vietnam: Distributions and bioconcentration profiles. *Journal of Hazardous Materials*. 2017 2017/02/05/;323(Part A):116-27.
 14. IARC. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risk to humans. Lyon: International Agency for Research on Cancer; 2017. Available from: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol110/mono110.pdf>.
 15. Yao Y, Zhu H, Li B, Hu H, Zhang T, Yamazaki E, et al. Distribution and primary source analysis of per- and poly-fluoroalkyl substances with different chain lengths in surface and groundwater in two cities, North China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2014 2014/10/01/;108(Supplement C):318-28.
 16. Banzhaf S, Filipovic M, Lewis J, Sparrenbom CJ, Barthel R. A review of contamination of surface-, ground-, and drinking water in Sweden by perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs). *Ambio*. 2017;46(3):335-46.
 17. Bečanová J, Melymuk L, Vojta Š, Komprdová K, Klánová J. Screening for perfluoroalkyl acids in consumer products, building materials and wastes. *Chemosphere*. 2016 2016/12/01/;164(Supplement C):322-9.
 18. Shoeib T, Hassan Y, Rauert C, Harner T. Poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) in indoor dust and food packaging materials in Egypt: Trends in developed and developing countries. *Chemosphere*. 2016 2016/02/01/;144(Supplement C):1573-81.
 19. Tian Z, Kim S-K, Shoeib M, Oh J-E, Park J-E. Human exposure to per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) via house dust in Korea: Implication to exposure pathway. *Science of The Total Environment*. 2016 2016/05/15/;553(Supplement C):266-75.
 20. Goosey E, Harrad S. Perfluoroalkyl compounds in dust from Asian, Australian, European, and North American homes and UK cars, classrooms, and offices. *Environment International*. 2011 2011/01/01/;37(1):86-92.

21. Fromme H, Dreyer A, Dietrich S, Fembacher L, Lahrz T, Völkel W. Neutral polyfluorinated compounds in indoor air in Germany – The LUPE 4 study. *Chemosphere*. 2015 2015/11/01/;139 (Supplement C):572-8.
22. Schlummer M, Gruber L, Fiedler D, Kizlauskas M, Müller J. Detection of fluorotelomer alcohols in indoor environments and their relevance for human exposure. *Environment International*. 2013 2013/07/01/;57-58 (Supplement C):42-9.
23. Kim S-K, Shoeib M, Kim K-S, Park J-E. Indoor and outdoor poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) in Korea determined by passive air sampler. *Environmental Pollution*. 2012 2012/03/01/;162(Supplement C):144-50.
24. Vierke L, Ahrens L, Shoeib M, Reiner EJ, Guo R, Palm W-U, et al. Air concentrations and particle-gas partitioning of polyfluoroalkyl compounds at a wastewater treatment plant. *Environmental Chemistry*. 2011;8(4):363-71.
25. Dreyer A, Weinberg I, Temme C, Ebinghaus R. Polyfluorinated Compounds in the Atmosphere of the Atlantic and Southern Oceans: Evidence for a Global Distribution. *Environmental Science & Technology*. 2009 2009/09/01;43(17):6507-14.
26. Andersen ME, Butenhoff JL, Chang S-C, Farrar DG, Kennedy JGL, Lau C, et al. Perfluoroalkyl Acids and Related Chemistries—Toxicokinetics and Modes of Action. *Toxicological Sciences*. 2008;102(1):3-14.
27. Miralles-Marco A, Harrad S. Perfluorooctane sulfonate: A review of human exposure, biomonitoring and the environmental forensics utility of its chirality and isomer distribution. *Environment International*. 2015 2015/04/01/;77(Supplement C):148-59.
28. Worley RR, Moore SM, Tierney BC, Ye X, Calafat AM, Campbell S, et al. Per- and polyfluoroalkyl substances in human serum and urine samples from a residentially exposed community. *Environment International*. 2017 2017/09/01/;106(Supplement C):135-43.
29. Manzano-Salgado CB, Casas M, Lopez-Espinosa M-J, Ballester F, Basterrechea M, Grimalt JO, et al. Transfer of perfluoroalkyl substances from mother to fetus in a Spanish birth cohort. *Environmental Research*. 2015 2015/10/01/;142(Supplement C):471-8.
30. Cariou R, Veyrand B, Yamada A, Berrebi A, Zalko D, Durand S, et al. Perfluoroalkyl acid (PFAA) levels and profiles in breast milk, maternal and cord serum of French women and their newborns. *Environment International*. 2015 2015/11/01/;84(Supplement C):71-81.
31. Harada K, Inoue K, Morikawa A, Yoshinaga T, Saito N, Koizumi A. Renal clearance of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoate in

- humans and their species-specific excretion. *Environmental Research*. 2005 2005/10/01/;99(2):253-61.
32. Li K, Gao P, Xiang P, Zhang X, Cui X, Ma LQ. Molecular mechanisms of PFOA-induced toxicity in animals and humans: Implications for health risks. *Environment International*. 2017 2017/02/01/;99(Supplement C):43-54.
 33. Ye X, Kato K, Wong L-Y, Jia T, Kalathil A, Latremouille J, et al. Per- and polyfluoroalkyl substances in sera from children 3 to 11 years of age participating in the National Health and Nutrition Examination Survey 2013-2014. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. 2018 2018/01/01/;221(1):9-16.
 34. Callan AC, Rotander A, Thompson K, Heyworth J, Mueller JF, Odland JØ, et al. Maternal exposure to perfluoroalkyl acids measured in whole blood and birth outcomes in offspring. *Science of The Total Environment*. 2016 2016/11/01/;569-570(Supplement C):1107-13.
 35. Goudarzi H, Miyashita C, Okada E, Kashino I, Kobayashi S, Chen C-J, et al. Effects of prenatal exposure to perfluoroalkyl acids on prevalence of allergic diseases among 4-year-old children. *Environment International*. 2016 2016/09/01/;94(Supplement C):124-32.
 36. Kataria A, Trachtman H, Malaga-Dieguez L, Trasande L. Association between perfluoroalkyl acids and kidney function in a cross-sectional study of adolescents. *Environmental Health*. 2015 2015/11/21;14(1):89.
 37. Shankar A, Xiao J, Ducatman A. Perfluorooctanoic acid and cardiovascular disease in us adults. *Archives of Internal Medicine*. 2012;172(18):1397-403.
 38. Jain RB. Association between thyroid profile and perfluoroalkyl acids: Data from NHNAES 2007-2008. *Environmental Research*. 2013 2013/10/01/;126(Supplement C):51-9.
 39. Nelson JW, Hatch EE, Webster TF. Exposure to polyfluoroalkyl chemicals and cholesterol, body weight, and insulin resistance in the general U.S. population. *Environmental Health Perspectives*. [Article]. 2010;118(2):197-202.
 40. UNEP. COP.4 Document. Fourth meeting of the conference of the Parties to the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. Geneva 2009 4-8 May 2009. Report No.: SC-4/17.
 41. Maxxam Analytics International Corporation. Analytical Guidelines for PFCs 2015 [cited 2015 August]: Available from: <http://maxxam.ca/wp-content/uploads/2015/08/tb-PFCs-20150825.pdf>.
 42. UK FSA. COT statement on the Tolerable Daily Intake for Perfluorooctanoic Acid. In: Committee on Toxicity, editor.: UK Food Standards Agency; 2006.
 43. UK FSA. COT Statment on the Tolerable Daily Intake for Perfluorooctane

- Sulfonate. In: Committee on Toxicity, editor.: UK Food Standards Agency; 2006.
44. Donohue JM, Duke TM, Wambaugh J. Health Effects Support Document for Perfluorooctanoic Acid (PFOA). In: Office of Water, editor. Washington, DC: US EPA; 2016.
45. Donohue JM, Mahfouz A, Duke TM, Wambaugh J. Health Effects Support Document for Perfluorooctane Sulfonate (PFOS). In: Office of Water, editor. Washington, DC: US EPA; 2016.
46. Kunacheva C, Fujii S, Tanaka S, Kitpati Boontanon S, Poothong S, Wongwattana T, et al. Perfluorinated compounds contamination in tap water and bottled water in Bangkok, Thailand 2010.
47. Kunacheva C, Tanaka S, Fujii S, Boontanon SK, Musirat C, Wongwattana T, et al. Mass flows of perfluorinated compounds (PFCs) in central wastewater treatment plants of industrial zones in Thailand. *Chemosphere*. 2011 2011/04/01/;83(6):737-44.
48. Chularuengakorn P. Study on Effective Adsorption Conditions for Perfluorinated Compounds (PFCs) Removal in Municipal and Industrial Wastewater in Thailand and Japan [Dissertation]. Kyoto: Kyoto University; 2013.
49. อาวีรัตน์ จากสกุล, สุนิทร ทองเกลี้ยง, รุจยา บุญยทุฆมานนท์. การปนเปื้อนสาร Perfluorinated Compound (PFCs) ในตัวอย่างน้ำผิวดินบริเวณปากแม่น้ำสายหลัก 4 สาย และบริเวณรอบนิคมอุตสาหกรรมจังหวัดสมุทรปราการ ลำพูน และระยอง. *Green Research*. 2557;11(28):12-5.
50. Tabtong W, Boontanon SK, Boontanon N. Fate and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Water Treatment Plants and Tap Water in Bangkok, Thailand. *Procedia Environmental Sciences*. 2015 2015/01/01/;28(Supplement C):750-7.
51. Kongpran J. Study on Contamination on Fluorotelomer Alcohols (FTOHs) and Perfluoroalkyl Carboxylates (PFCAs) in Air in Thailand and Japan, and their Distribution to Water Environment. Kyoto: Kyoto University; 2014.