

ข้อมูลสถานการณ์เกี่ยวกับ

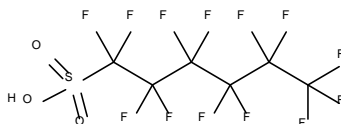
สาร Perfluorohexane sulfonic acid (PFHxS), its salts and PFHxS related compounds

สาร Perfluorohexane sulfonic acid (PFHxS), its salts and PFHxS related compounds มีลักษณะเป็นผงสีขาว เป็นสารกลุ่มเพอร์ฟลูออโรอัลคิล และโพลีฟลูออโรอัลคิล (Per- and Polyfluoroalkyl substances: PFAS) ประกอบด้วยสายโซ่คาร์บอน และฟลูออรีน ทำให้สารกลุ่ม PFASs มีความเสถียรและทนทานต่อความร้อนและสารเคมี จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตโฟมดับเพลิง เป็นสารลดแรงตึงผิวในการชุบโลหะ สารทำความสะอาด เคลือบและขัดผิว และสารเคลือบพรม กระจาข ผนังและสิ่งทอ เพื่อป้องกันน้ำและคราบสกปรก และถูกนำมาใช้เป็นสารทดแทนสาร PFOS ปัจจุบันประเทศไทยยังไม่ได้ควบคุมสารดังกล่าวเป็นวัตถุอันตราย ภายใต้พระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 ทั้งนี้ ในการประชุมคณะกรรมการพิจารณาทบทวนสารมลพิษที่ตกค้างยาวนาน (Persistent Organic Pollutants Review Committee: POPRC) สมัยที่ 15 ปี 2562 มีมติเสนอแนะให้ที่ประชุมรัฐภาคีอนุสัญญาสตอกโฮล์มฯ สมัยที่ 10 พิจารณารรจุสารดังกล่าว ไว้ในภาคผนวก เอ ของอนุสัญญาฯ โดยไม่มีข้อยกเว้นพิเศษ ซึ่งมีผลให้ภาคีฯ ต้องปฏิบัติตามพันธกรณีที่ 3 ดำเนินการเพื่อเลิกใช้และกำจัดสารดังกล่าวให้หมดไป

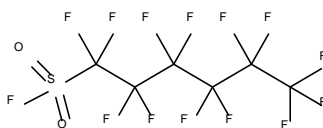
1. การบ่งลักษณะและคุณสมบัติ (Identification and properties)

1.1 การบ่งลักษณะ (Identification)

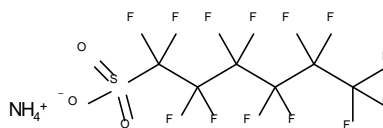
ชื่อตามระบบ IUPAC	1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,6-tridecafluorohexane-1-sulfonic acid
CAS number	355-46-4
EC number	206-587-1
สูตรโมเลกุล	$C_6F_{13}SO_2H$
สูตรโครงสร้าง	a) Perfluorohexane sulfonic acid (CAS No: 355-46-4)



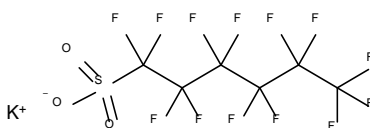
b) Perfluorohexanesulfonyl fluoride (CAS No: 423-50-7) Precursor/start material



c) Perfluorohexanesulfonate ammonium salt (CAS No: 68259-08-5)



d) Perfluorohexanesulfonate potassium salt (CAS No: 3871-99-6)



น้ำหนักโมเลกุล	400.11 g/mol
ชื่อสามัญ	PFHxS PFHS Perfluorohexanesulfonic acid; 1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,6-Tridecafluorohexane-1-sulfonic acid; Tridecafluorohexane-1-sulfonic acid; 1-Hexanesulfonic acid, 1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,6-tridecafluoro-; 1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,6-Tridecafluoro-1-hexanesulfonic acid; Tridecafluorohexanesulfonic acid

1.2 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ (Chemical and physical properties)

ลักษณะ = เป็นผงสีขาว (Solid white powder)

จุดหลอมเหลว = 41 °C

จุดเดือด = 238 - 239 °C

pK_A = -3.45

-3.3±0.5

-5.8±1.3

ความดันไอ = 58.9 Pa (0.0046 mmHg)

การละลายน้ำ = 1.4 g/l ที่อุณหภูมิ 20 - 25 °C

ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่ง

ส่วนของอากาศ/น้ำ

K_{aw} (ค่า log)

n-Octanol / ค่า = 5.17

สัมประสิทธิ์การแบ่ง

ส่วนน้ำ, K_{ow} (ค่า log)

ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่ง = 7.55

ส่วนของ Octanol-air

K_{oa} (ค่า log)

ค่าสัมประสิทธิ์การ = 2.05

แบ่งตัวของสารอินทรีย์ 2.40

ในคาร์บอน/น้ำ K_{oc} 2.31 (range 1.8–2.76)

(ค่า log) (ความคล่องตัว)

2. ผลิตภัณฑ์และการค้า

สาร PFOS, its salts and PFOS-related compounds และ สาร PFHxS, its salts and PFHxS-related compounds เป็นผลิตภัณฑ์จากสารประกอบหลักทั่วไป คือ สาร Perfluorohexane sulfonyl fluoride (PFHxSF) ซึ่งอาจถูกเกิดขึ้นจากการ ECF ของ hexanesulfonyl chloride ($C_6H_{13}SO_2Cl + 14 HF \rightarrow C_6F_{13}SO_2F + HCl + \text{byproducts}$) โดยให้ผลผลิตประมาณ 36% และอาจถูกผลิตขึ้นโดยไม่ตั้งใจจากการ ECF ของ octanesulfonyl fluoride หรือ chloride ซึ่งเป็นกระบวนการผลิต Perfluorooctane sulfonyl fluoride: POSF เว้นแต่จะถูกกลบออกจาก POSF แต่จะยังคงอยู่ใน POSF และทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นเพื่อสร้าง PFHxS, its salts and PFHxS-related compounds ซึ่งเป็นผลพลอยได้จาก POSF

สาร PFHxS and its salts อาจเกิดจากหลังกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของการผลิต PFHxSF ที่อาจทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมกับเมทิล (methyl-) หรือเอทิลามีน (ethylamine) เพื่อสร้าง N-methyl หรือ N-ethyl perfluorohexane sulfonamide (N-MeFHxSA หรือ N-EtFHxSA) ซึ่งต่อมาจะทำปฏิกิริยากับเอทิลีนคาร์บอเนต (ethylene carbonate) เพื่อให้ได้ N-methyl หรือ N-ethyl perfluorohexane sulfonamido ethanols (N-MeFHxSE หรือ N-EtFHxSE) อาจใช้ N-MeFHxSA, N-EtFHxSA, N-MeFHxSE และ N-EtFHxSE เป็นส่วนประกอบของสารประกอบที่เกี่ยวข้องกับ PFHxS

ข้อมูลการผลิตของสาร PFHxS, its salts and PFHxS-related compounds ส่วนใหญ่เป็นข้อมูลเชิงคุณภาพมากกว่าเชิงปริมาณ อย่างไรก็ตามสารดังกล่าวมีการผลิตและมีจำหน่ายในตลาดโลก และสารบางชนิด (CAS No.: 423-50-7; 355-46-4; 3871-99-6; 68259-08-5; 41997-13-1; 68259-15-4; 34455-03-3) ได้ถูกรายงานไปยังระบบแจ้งการจัดหมวดหมู่และการติดฉลากสินค้าคงคลังของสหภาพยุโรป ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการผลิตใช้ และการนำเข้าสู่ตลาดในยุโรป ทั้งนี้ หลังจากการกำหนดการขึ้นทะเบียนสารที่มีน้ำหนักเกิน 1,000 กิโลกรัม ภายใต้กฎหมายของ REACH แต่ไม่มีการขึ้นทะเบียนของสารที่เกี่ยวข้อง PFHxS คือ ไม่มีการผลิตหรือใช้ในสหภาพยุโรปที่สูงกว่า 1 ตัน นอกจากนี้ ยังมีข้อสังเกตว่า PFHxS, its salts และสารประกอบที่เกี่ยวข้องกับ PFHxS จำนวนมาก ได้รับการระบุไว้ในรายการทะเบียนสารเคมีระดับประเทศหลายรายการ โดยระบุถึงการผลิต การนำเข้า และการใช้งานในอดีต ของผลิตภัณฑ์ที่มีสารเหล่านี้ในอดีต หรืออย่างต่อเนื่อง

ในอดีต บริษัท 3M น่าจะเป็นผู้ผลิต PFHxS, its salts and PFHxS-related compounds ที่ใหญ่ที่สุดในโลก โดยมีข้อมูลของการผลิตสาร PFHxSF ประมาณ 227 ตัน ในสหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ. 1997 และในปี ค.ศ. 2000 – 2002 ก็ได้หยุดการผลิตสารดังกล่าวไป

ในปี ค.ศ. 2016 มีรายงานการผลิตสาร PFOS และ PFHxS ในประเทศจีน แต่การผลิตสาร PFOS ได้ถูกผลิตลดลงอย่างมาก ในปี ค.ศ. 2009 สาร PFOS ถูกบรรจุในอนุสัญญาสตอกโฮล์มฯ และสาร PFHxS ก็กลายเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ เนื่องจากความต้องการของตลาดที่เปลี่ยนแปลงไป

รายงานการวิจัยตลาดการใช้งานสำหรับสาร PFHxS (CAS No: 355-46-4) และสาร PFHxSF (CAS No:423-50-7) เพื่อความชัดเจนเกี่ยวกับแหล่งที่ของสาร PFHxS ในสิ่งแวดล้อม เกี่ยวกับข้อมูลผลิต และการใช้สาร PFHxS, its salts and related compounds และเนื้อหาในผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภคได้รับการรวบรวม จากแหล่งข้อมูลที่ได้รับการประเมินทั้งหมดรวมทั้งจากการหารือของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย เช่น ผู้ผลิตและผู้ผลิตสินค้าอุปโภคบริโภค พบว่า ขาดข้อมูลที่เปิดเผยต่อสาธารณะเกี่ยวกับระดับการผลิตเชิงปริมาณและคำอธิบายของการใช้ผลิตภัณฑ์เฉพาะของสารประกอบที่เกี่ยวข้องกับ PFHxS นอกจากนี้ยังขาดความเต็มใจจากผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในการเปิดเผยข้อมูลดังกล่าว นอกจากนี้คุณภาพของรายงานการวิจัยตลาดยังเป็นที่น่าสงสัย และไม่ครอบคลุมถึงผู้ผลิตทั่วโลก

ที่มา: UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1 Report of the Persistent Organic Pollutants Review Committee on the work of its fourteenth meeting

3. การใช้ (Use)

สาร PFHxS, its salts and PFHxS related compounds มีคุณสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิว สามารถป้องกันพื้นผิวของวัสดุจากน้ำ น้ำมัน และสิ่งสกปรก มีความเสถียรทางความร้อน เคมี และความสามารถในการ hydro- and oleophobicity of the perfluoroalkyl moiety (CnF_{2n+1}-) ซึ่งนิยมนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตสารเคลือบผิว และใช้เคลือบผิวผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม และสินค้าอุปโภคบริโภคในครัวเรือนหลายชนิด รวมทั้งถูกใช้เป็นสารทดแทนการใช้สาร PFOS จึงถูกนำมาใช้งานในหลายประเภท ดังนี้

3.1 โฟมดับเพลิง ประเภทโฟมสร้างฟิล์มน้ำ (Aqueous Film-Forming Foams: AFFFs)

ในอดีต บริษัท 3M ใช้สาร PFHxS ในการผลิตสูตรโฟมสร้างฟิล์มน้ำ (Aqueous Film-Forming Foams: AFFFs) โดยใช้ สาร PFHxS หรือสาร PFHS เป็นส่วนประกอบสำหรับสารประกอบรวมในโฟมดับเพลิง (ข้อมูลจากสิทธิบัตรของบริษัท 3M และผู้ผลิตอื่น) โดยจะระบุถึงสารประกอบที่เกี่ยวข้องกับ PFHxS และ PFOS ในสูตร AFFF ว่า “ PFOS-based AFFFs” และมีการตรวจสอบสูตร AFFFs ซึ่งบางส่วนพบสารประกอบที่เกี่ยวข้องกับ PFHxS และตรวจพบสาร PFHxS ที่ 820 ± 140 mg/kg 370 mg/L 500 - 1400 mg/L 20.0 - 1330 mg/L 760 - 1700 mg/L และ 0.2-1025.5 mg/kg นอกจากนี้ยังได้รับการสนับสนุนในการวัดระดับซีรัมของนักผจญเพลิง พบว่า ระดับของสาร PFHxS มีค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่าสาร PFOS ที่ถูกตรวจพบ และในบางกรณีมีการระบุระดับของสารประกอบที่เกี่ยวข้องกับ PFHxS ในระดับสูงซึ่งมีความเป็นไปได้ว่า AFFFs ที่ใช้สาร PFOS ที่มี PFHxS เป็นสารประกอบ ได้ถูกยกเลิกการใช้ หลังจากบริษัท 3M หยุดการผลิตทั่วโลก ในปี ค.ศ. 2000 - 2002 แต่อาจยังมีการกักตุนสูตร AFFF ดังกล่าวไว้ทั่วโลก ทั้งนี้ บริษัท Shanghai Vatten ได้พัฒนาและทำการค้าเกี่ยวกับสารลดแรงตึงผิว PFHxS-related amphoteric สำหรับถังดับเพลิงแบบโฟม (foam fire-extinguishers)

(ที่มา: UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1 Report of the Persistent Organic Pollutants Review Committee on the work of its fourteenth meeting)

3.1.2 การชุบโลหะ (Metal plating)

มีการใช้สาร PFHxS, its salts และสารประกอบที่เกี่ยวข้องกับ PFHxS ในการชุบโลหะเพื่อไม่ทำให้เกิดฝ้า (metal plating as mist suppressants) และพบการใช้ Potassium salt of PFHxS สำหรับการชุบโลหะ นอกจากนี้ยังมีการผลิต (รวมถึงการนำเข้า) หรือการแปรรูปเกลือของ PFHxS (tridecafluorohexanesulfonic acid, สารประกอบ 2,2'-iminodiethanol (1:1); CAS No: 70225-16-0) เพื่อใช้เป็นส่วนประกอบของ Enchant รวมถึงเป็นสารลดแรงตึงผิวหรือสารระงับการเกิดควันในกระบวนการชุบเพื่อผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

(ที่มา: UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1 Report of the Persistent Organic Pollutants Review Committee on the work of its fourteenth meeting)

3.1.3 สิ่งทอ หนัง และเบาะ (Textile, leather and upholstery)

สาร PFHxS, its salts and PFHxS related compounds ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในสิ่งทอ เพื่อใช้ป้องกัน น้ำ น้ำมัน และสิ่งสกปรกของวัสดุ ในขณะที่เดียวกันก็มีความสามารถในการระบายอากาศได้ สาร PFHxS-related compound [N-methyl-perfluorohexane-1-sulfonamide] ethyl acrylate (CAS No. 67584-57-0) ถูกใช้เป็นผลิตภัณฑ์กันน้ำและน้ำ สำหรับหนัง และสิ่งทอ การใช้สาร PFAS ในการผลิตสิ่งทอคิดเป็นประมาณ 50% ของการใช้สาร PFAS ทั่วโลก

(ที่มา: UNEP/POPS/PORC.15/7Add.1 Report of the Persistent Organic Pollutants Review Committee on the work of its fifteenth meeting)

3.1.4 สารขัดเงา และสารทำความสะอาด/ซักล้าง (Polishing agents and cleaning/washing agents)

สารประกอบที่เกี่ยวข้องกับ PFHxS (CAS No: 67584-53-6, [N-Ethyl-N-(tridecafluorohexyl)sulfonyl] glycine, potassium salt) ถูกใช้เป็นสารขัดเงา สารทำความสะอาด/ซักล้าง อย่างน้อยระหว่าง ปี ค.ศ. 2000 - 2015 ในประเทศเดนมาร์ก นอร์เวย์ และแคนาดา โดยปริมาณการใช้ถูกระบุว่าเป็นความลับทางการค้า

(ที่มา: UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1 Report of the Persistent Organic Pollutants Review Committee on the work of its fourteenth meeting)

3.1.5 สารเคลือบผิววัสดุ (Coating and impregnation/proofing)

สารประกอบ PFHxS-related compound (CAS No: 67584-61-6, 2-[Methyl[(Tridecafluorohexyl) Sulfonyl]Amino]Ethyl Methacrylate) ถูกใช้เป็นสารในการย้อม/เคลือบ (impregnation/proofing) เพื่อป้องกันความชื้น เชื้อรา ฯลฯ

(ที่มา: UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1 Report of the Persistent Organic Pollutants Review Committee on the work of its fourteenth meeting)

3.1.6 การผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และเคมีคอนดักเตอร์

สาร PFHxS ถูกใช้แทนสาร PFOS และ PFOA และสารประกอบที่เกี่ยวข้อง ในอุตสาหกรรมเคมีคอนดักเตอร์ ในสาธารณรัฐจีน (ไต้หวัน) มีการใช้สาร PFHxS (133 - 330 ng/L) ร่วมกับสาร PFOS (128 - 670 ng/L) แต่ไม่มีข้อมูลอื่น ๆ เกี่ยวกับกระบวนการเฉพาะในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเคมีคอนดักเตอร์ที่ใช้สาร PFHxS โดยตรง

(ที่มา: UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1 Report of the Persistent Organic Pollutants Review Committee on the work of its fourteenth meeting - Risk profile on perfluorohexane sulfonic acid (PFHxS), its salts and PFHxS-related compounds)

3.2 การใช้งานอื่น ๆ (Other uses)

สาร PFHxS, its salts and PFHxS related compounds ถูกนำมาใช้งานประเภทอื่น อาทิ สารกำจัดศัตรูพืช และสัตว์ สารหน่วงไฟ กระจก และบรรจุภัณฑ์ในอุตสาหกรรมน้ำมัน และน้ำมันไฮดรอลิก ยังมีการตรวจพบสาร PFHxS ในวัสดุที่สัมผัสอาหาร วัสดุอุดกันรั่ว กาว โฟมที่ใช้ในงานสถาปัตยกรรม และสารเคลือบในการใช้งานบางชนิดในอาคารและการก่อสร้าง

(ที่มา: UNEP/POPS/PORC.15/7/Add.1 Report of the Persistent Organic Pollutants Review Committee on the work of its fifteenth meeting)

4. การเกิดและการสัมผัสสาร PFHxS ในสิ่งแวดล้อม (Occurrence and exposure)

4.1 แนวโน้มและระดับในสิ่งแวดล้อม (Environmental levels and trends)

การตรวจสอบด้านสิ่งแวดล้อมแสดงให้เห็นว่า PFHxS พบได้ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม การศึกษาจำนวนมากได้รายงานการตรวจพบ PFHxS ในแหล่งต่าง ๆ เช่น น้ำผิวดิน น้ำทะเลลึก น้ำดื่ม น้ำทิ้งจากโรงบำบัดน้ำเสีย ตะกอนน้ำใต้ดิน ดิน ชั้นบรรยากาศ ฝุ่นละออง รวมทั้ง สิ่งมีชีวิต (Biota) และมนุษย์ทั่วโลก การย่อยสลายของสารที่เกี่ยวข้องกับ PFHxS อาจเพิ่มการสัมผัสทั้งหมด การย่อยสลายของสารที่เกี่ยวข้องกับ PFHxS ในการหาปริมาณของสารเหล่านี้จึงมีความท้าทาย เนื่องจากมาตรฐานการในการควบคุมยังมีไม่เพียงพอ

ปริมาณที่เกี่ยวข้องกับ PFHxS ในสิ่งแวดล้อมที่วัดได้นั้น พบได้ในเขตเมืองและเขตอุตสาหกรรม ทั้งในแหล่งกำเนิดทางชีวภาพและทางชีวภาพ ในประเทศจีนพบ PFHxS (ตั้งแต่ 45.9–351 ng/L) ในสารกลุ่ม PFAS ที่พบมากในทะเลสาบไทหู (Taihu Lake) และในแม่น้ำที่ไหลผ่าน ซึ่งแม่น้ำถือเป็นเส้นทางหลักที่ PFHxS ไหลสู่ทะเลสาบ เนื่องจากแม่น้ำบางสายส่วนใหญ่เก็บน้ำที่ถูกปล่อยจากเมืองใหญ่ และโรงงานที่เกี่ยวข้องกับสาร PFHxS ในท้องถิ่น มีการตรวจพบระดับ PFHxS ในทะเลสาบเพิ่มขึ้นในช่วงปี 2009 - 2014 ในขณะที่ระดับของ PFOA และ PFOS ยังคงเท่าเดิม ซึ่งอาจเป็นข้อบ่งชี้ถึงการใส่สารประกอบที่เกี่ยวข้องกับ PFHxS หรือ PFHxS โดยตรงเพิ่มขึ้น

การศึกษาจำนวนมากได้รายงานการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการใช้ โฟมดับเพลิงประเภทโฟมสร้างฟิล์มน้ำ (Aqueous Film-Forming Foams: AFFFs) โดยใช้ fluorosurfactants PFHxS และสารประกอบที่เกี่ยวข้องกับ PFHxS ที่อาจพบได้ในโฟมเหล่านี้ ไม่ว่าจะเป็นการปนเปื้อนโดยไม่ได้ตั้งใจ เนื่องจากการใช้ PFOS หรือเป็นส่วนผสมที่เพิ่มโดยเจตนา ซึ่งมักอยู่ในรูปของอนุพันธ์ของ perfluorohexane sulfonamide (FHxSA) ในแคนาดา พบ PFHxS ในแหล่งกำเนิดที่หลากหลาย รวมถึงน้ำผิวดินในเมืองและในชนบท อากาศ น้ำในมหาสมุทรอาร์กติก และตะกอน (ความถี่ต่ำ) ในบริเวณที่ได้รับผลกระทบและไม่ได้รับผลกระทบจากการปนเปื้อนจาก AFFF ตรวจพบสาร PFHxS ในน้ำใต้ดิน และผิวน้ำใกล้กับสนามบิน และโรงงานซูโหละ ในน้ำผิวดินในบริเวณใกล้เคียงกับโรงบำบัดน้ำเสียและ

ในภาคตะกอนและน้ำทิ้ง จากโรงงานจัดการของเสียในสวีเดน และในประเทศเนเธอร์แลนด์มีการตรวจพบ PFHxS (0.3–25 pg/L) ในน้ำฝนที่ผ่านการกรอง ซึ่งน่าจะเกิดจากการเคลื่อนย้ายของสารตั้งต้นในชั้นบรรยากาศ

จากการศึกษาการรับสัมผัสในพื้นที่จำกัด (เช่น กองหิมะ น้ำที่ละลายจากน้ำแข็ง) พบว่า อาจเป็นผลมาจากการเคลื่อนย้ายในสิ่งแวดล้อมในระยะไกล ตัวอย่างเช่น มีการตรวจพบ PFHxS ในกองหิมะในพื้นที่ห่างไกลทางตอนเหนือของสวีเดน ในพื้นผิวน้ำ และน้ำ ที่เมืองสฟาลบาร์ ประเทศนอร์เวย์ และในทะเลอาร์กติก และผิวน้ำในแอนตาร์กติก

นอกจากนี้ การศึกษาสารกลุ่ม PFAS รายงานว่า PFHxS พบในความเข้มข้นสูงที่สุดในหิมะขั้วโลก ในทำนองเดียวกันสำหรับหิมะขั้วโลก จากอ่าวฮัดสัน (Hudson Bay) ประเทศแคนาดา PFHxS เป็นอันดับสองรองจาก PFOS ที่พบความเข้มข้นในดับ ในพลาสติกจากหิมะขั้วโลกที่เมืองสฟาลบาร์ ประเทศนอร์เวย์ มีระดับ PFHxS อยู่ในช่วง 4.9 - 70 ng/g/น้ำหนักเปียก ในช่วงปี 2000 -2014 ซึ่งความเข้มข้นในหิมะขั้วโลกที่พบ ใกล้เคียงกับที่รายงานของมนุษย์ที่อาศัยอยู่ใกล้กับโรงงานผลิตฟลูออโรเคมีในประเทศจีน (ซึ่งในทางกลับกันเป็นลำดับความสำคัญที่สูงกว่าประชากรทั่วไปในจีน) ทั้งนี้ ความเข้มข้นของ PFHxS ในแถบขั้วโลกลดลงอย่างมีนัยสำคัญในช่วงปี 2003 - 2009 (-8.8% อยู่ในช่วง 12.5% ถึง -4.8% ในช่วงความเชื่อมั่น 95%) ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 2009 - 2014 อยู่ที่ +5% แม้ว่าจะไม่มีนัยสำคัญภายใน 95% ของช่วงความเชื่อมั่น การเปลี่ยนแปลงรายปีจะแตกต่างกันระหว่าง -1% ต่อปีถึง + 11% ต่อปี ภายในช่วงความเชื่อมั่น 95% นอกจากนี้ ยังพบว่า ความเข้มข้นของ PFAS ที่ลดลงอย่างรวดเร็วหลังจาก C₆₋₈ perfluoroalkyl sulfonates ค่อย ๆ หมดไป เนื่องจากการเคลื่อนย้ายทางอากาศของสารตั้งต้นที่ระเหยลดลง ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของระดับ PFHxS เมื่อเร็ว ๆ นี้ น่าจะเกิดจากการเคลื่อนย้ายในมหาสมุทร ขั้วโลกของ PFAS อย่างไรก็ตาม การศึกษาระดับ PFHxS ในอากาศอาร์กติกของนอร์เวย์ พบว่า มีปริมาณที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (<0.007–2.2 pg / m³; p<0.006) ได้รับการตรวจพบในช่วงปี 2009 - 2015 และผลลัพธ์เหล่านี้สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของระดับหิมะขั้วโลกที่สังเกตได้ ในการศึกษาในระดับของ PFHxS ในดับของสุนัขจิ้งจอกอาร์กติก (Arctic foxes) ที่เก็บในช่วงปี 1997 - 2014 อยู่ในช่วง <0.05–139 ng/g/น้ำหนักเปียก ความเข้มข้นของ PFHxS ของสุนัขจิ้งจอกอาร์กติกลดลง 11% ต่อปี ตั้งแต่ปี 2002 - 2014 และการเปลี่ยนแปลงรายปีที่มีความน่าจะเป็น 95% อยู่ระหว่าง -17% ถึง -5% แนวโน้ม PFHxS ของหิมะขั้วโลกและสุนัขจิ้งจอกอาร์กติก มีความคล้ายคลึงกันมาก่อนหน้านี้ และหลังจากที่พวกมันได้รับการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการกินอาหาร และการกินอาหารที่เพียงพอ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาพภูมิอากาศ สะท้อนให้เห็นถึงแนวโน้มที่แท้จริงในสัตว์ และสะท้อนให้เห็นถึงสายใยอาหารของพวกมัน

ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าความเข้มข้นของ PFAS ในหิมะขั้วโลกและสุนัขจิ้งจอกอาร์กติกส่วนใหญ่ได้รับผลกระทบจากการปลดปล่อยมลพิษ มีการศึกษาในหิมะขั้วโลกจาก 5 แห่ง ในแถบหนาวเย็นของอเมริกาเหนือ และ 2 แห่ง ในแถบหนาวเย็นของยุโรป และกรีนแลนด์ และมีการตรวจพบ PFHxS ในหิมะขั้วโลกในทุกพื้นที่ที่ทำการศึกษา โดยพื้นที่เมืองสฟาลบาร์ ประเทศนอร์เวย์ ในแถบหนาวเย็นของยุโรป พบความเข้มข้นเฉลี่ย 2,940 ng/g (ในช่วง 2,260 - 4,430 ng/g/น้ำหนัก) ในดับของหิมะขั้วโลก ซึ่งเป็นความเข้มข้นสูงสุดของ PFHxS ที่มีรายงานในหิมะขั้วโลก ในการเก็บตัวอย่างของหิมะขั้วโลก ในปี 2006 จากการศึกษาการกระจายในเนื้อเยื่อพบว่าระดับของ PFHxS สูงสุดใน ดับ (30.9 ± 2.1 ng/g) และ เลือด (18.0 ± 1.1 ng/g) ส่วนความเข้มข้นในสมอง กล้ามเนื้อ และไขมัน มีระดับที่ใกล้เคียงกัน (1.37 ± 0.10; 1.87 ± 0.1; 1.55 ± 0.20 ng/g ตามลำดับ) โดยพบว่า PFHxS มีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในเพศหญิง ซึ่งผู้ที่ทำการศึกษได้ระบุว่า อาจเกิดจากการกระจายเพศที่ไม่สม่ำเสมอ (ชาย 14 และหญิง 6 คน) และการศึกษาในเพศหญิงมีจำนวนจำกัด ทั้งนี้ ในการศึกษาเพิ่มเติม ยังตรวจพบ PFHxS ในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในทะเล

(ที่มา: UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4 Additional information on perfluorohexane sulfonic acid (CAS No: 355-46-4, PFHxS), its salts and PFHxS-related compounds)

การศึกษาจำนวนหนึ่งได้รายงานแนวโน้มเวลาสำหรับ PFHxS ในสายพันธุ์ และแหล่งกำเนิดต่าง ๆ อย่างไรก็ตาม มีความคลาดเคลื่อนบางประการในข้อมูลเหล่านี้และแนวโน้มเพิ่มขึ้นลดลง และไม่มีนัยสำคัญใด ๆ ในการทบทวน

การศึกษาแนวโน้มอย่างเป็นระบบข้อมูลส่วนใหญ่ที่เกี่ยวกับ PFHxS ไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม ที่กล่าวไว้ในข้างต้น แนวโน้มของ PFHxS ในหมีขั้วโลกในแถบหนาวเย็นของยุโรป (เมืองสฟาลบาร์ประเทศนอร์เวย์) มีการเปลี่ยนแปลงปีละ 5% (แม้ว่าจะไม่มีนัยสำคัญที่ 95% ของช่วงความเชื่อมั่นก็ตาม) ในช่วงปี 2010 - 2014 แนวโน้มของสุนัขจิ้งจอกอาร์กติกจากพื้นที่เดียวกันมีแนวโน้มที่กำลังลดลง ดังนั้นแนวโน้มในปัจจุบันมักขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของการปลดปล่อย แหล่งอาหาร (บนบก ทางทะเล) และที่ตั้ง (ในเมืองชนบท) ท่ามกลางปัจจัยอื่น ๆ

4.2 การรับสัมผัสในมนุษย์ (Human exposure)

เส้นทางการรับสัมผัสสำหรับสารกลุ่ม PFAS รวมถึง PFHxS ประกอบด้วย ฝุ่นภายในอาคาร อาหาร น้ำดื่ม และอากาศในร่ม และกลางแจ้ง PFHxS PFOS และ PFOA เป็นสารกลุ่ม PFAS ที่ถูกตรวจพบบ่อยที่สุดในตัวอย่างเลือดของประชากรทั่วโลก และยังพบในเลือดจากสายสะดือและน้ำนมมารดา ซึ่ง PFHxS ถูกถ่ายปัสสาวะในครรภ์ผ่านทางรกในคน และถูกขับออกมาทางน้ำนม ปัจจัยของรูปแบบการดำเนินชีวิตก็มีส่วนทำให้เกิดการรับสัมผัสสาร จากการบริโภคอาหารที่เข้าไมโครเวฟ และความถี่ต่ำในการกำจัดฝุ่นภายในอาคารโดยการดูดฝุ่น มีความเกี่ยวข้องกับระดับ PFHxS และสารกลุ่ม PFAS อื่น ๆ ในซีรัมที่สูงขึ้นตลอดจนการใช้เครื่องครัวประเภทเทฟลอน (Teflon) (Polytetrafluoroethylene: PTFE) และอาหารแช่แข็ง (preheated packaged foods) รวมถึงการใช้สารป้องกันคราบสกปรกในพรมที่เพิ่มขึ้น งานวิจัยจำนวนหนึ่งรายงานว่าการปนเปื้อนของ PFHxS ในอาหาร

(ที่มา: UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4 Additional information on perfluorohexane sulfonic acid (CAS No: 355-46-4, PFHxS), its salts and PFHxS-related compounds)

ในการศึกษาของประเทศสวีเดน พบว่า ในช่วงปี 1999 - 2010 การลดลงของรับสัมผัสในอาหารของมนุษย์ลดลง จากการสังเกต (ตั้งแต่ 55 - 20 pg/kg/น้ำหนักตัว/วัน) โดยพบว่า ไข่ และปลา มีส่วนทำให้มนุษย์ได้รับ PFHxS ในอาหารมากที่สุด ในการศึกษาของประเทศเนเธอร์แลนด์ พบว่า กลุ่มสัตว์น้ำที่มีเปลือกแข็ง (Crustaceans) ปลาที่มีไขมันต่ำ (Lean fish) แปะ และเนย (44, 23, 18 และ 16 pg/g (น้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ) มีการปนเปื้อน PFHxS ในระดับสูง และปลาที่มีไขมันสูง (Fatty fish) อุตสาหกรรมน้ำมัน ผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ และไก่ มีการปนเปื้อน PFHxS ในระดับต่ำ (<10 pg/g (น้ำหนักแห้ง)) ในตัวอย่างอาหารมนุษย์จำนวน 2,948 รายการ ในยุโรปมีการระบุปริมาณ PFHxS ที่พบในตัวอย่างอาหาร คิดเป็นจากผัก (2%) ผลไม้ (21%) เนื้อสัตว์ (1%) ปลาและอาหารทะเลอื่น ๆ (2%) และน้ำดื่ม (12%)

โครงการ PERFluorinated Organics in Our Diet: PERFOOD ได้พัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้ เป็นเครื่องอ้างอิงในการกำหนด PFAS รวมไปถึง PFHxS ในรายการอาหาร และคำนวณปริมาณการบริโภคอาหาร ในยุโรปที่แตกต่างกันซึ่งมีตั้งแต่ 35 ถึง 105 pg/kg (น้ำหนักตัว)/วัน สำหรับผู้ใหญ่ และ 69 ถึง 329 pg/kg (น้ำหนักตัว)/วัน (ค่าประมาณเฉลี่ย) สำหรับเด็ก ผลการศึกษาจาก Northern-Norway Mother-Child Contaminant Cohort Study (2007-2009) พบว่า ผู้บริโภคเนื้อสัตว์ (consumers of game) จำนวนมากมีระดับ PFHxS สูงขึ้นโดยมีความแตกต่าง 20% ระหว่างกลุ่มที่บริโภคสูงสุดและต่ำสุด การศึกษาที่ใช้ข้อมูลจากการสำรวจการตรวจสุขภาพและโภชนาการแห่งชาติของสหรัฐอเมริกา (NHANES) ในปี 2013 - 2014 ในเด็กอายุ 3 -11 ปี พบว่าระดับ PFHxS ในซีรัมที่สูงขึ้นมีความสัมพันธ์กับการบริโภคผลไม้และน้ำผลไม้

จากการศึกษาในประเทศออสเตรเลียสำหรับ PFHxS ในอาหาร และตัวอย่างน้ำในธรรมชาติ ซึ่งส่วนใหญ่มาจากสถานที่พบการปนเปื้อน โดยพบการปนเปื้อนที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดในเนื้อวัว (13.31 µg/kg) เนื้อกระต่าย เนื้อกระต่าย(4.94 µg/kg) และไข่ (4.27 µg/kg) และอาหารอื่น ๆ ที่มีความเข้มข้นสูง ได้แก่ กลุ่มสัตว์น้ำที่มีเปลือกแข็ง ตับปลา และเนื้อแกะ (Food Standards Australia New Zealand)

คาดว่า การดื่มน้ำจากแหล่งที่อยู่ใกล้ หรือในบริเวณที่มีการปนเปื้อน เป็นหนึ่งในเส้นทางการรับสัมผัสที่สำคัญที่สุดของ PFAS สำหรับมนุษย์ การศึกษาการตรวจสอบทางชีวภาพของมนุษย์สรุปได้ว่าการสัมผัสกับ PFHxS (และ PFAS อื่น ๆ) ผ่านน้ำดื่มอาจทำให้ระดับซีรัมในเลือดสูงขึ้น เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับสัมผัสสาร (จากการศึกษาในสหรัฐอเมริกา เยอรมนี สวีเดน และอิตาลี) ในประเทศสวีเดน การรับสัมผัสสาร PFHxS ผ่านน้ำดื่มนำไปสู่ระดับซีรัมในเลือดที่สูงขึ้น 180 เท่า เมื่อเทียบกับกลุ่มอ้างอิง โดยเริ่มขึ้นในเดือนกุมภาพันธ์ 2014 สำนักงานอาหารแห่งชาติสวีเดน (Swedish National Food Agency: NFA) ได้ทำการสำรวจน้ำดื่มในสวีเดน ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า ประชากรสวีเดน 1 ใน 3 หรือ 3.6 ล้านคน ได้รับน้ำดื่มจากแหล่งน้ำที่ได้รับผลกระทบจาก PFAS รวมถึง PFHxS ในปี 2010 - 2015 มีการตรวจพบ PFHxS ในน้ำดื่มใน 23 รัฐของสหรัฐอเมริกาในบรรดาระบบประปา 134 แห่งที่ให้บริการผู้คน 5.5 ล้านคน (ฐานข้อมูลน้ำประปาของ EWG) และตรวจพบ PFHxS มากกว่า 200 ตัวอย่างจาก 5,000 ระบบน้ำสาธารณะที่ทำการคัดกรองสำหรับ PFAS ในสหรัฐอเมริกา

(ที่มา: UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4 Additional information on perfluorohexane sulfonic acid (CAS No: 355-46-4, PFHxS), its salts and PFHxS-related compounds)

การรับสัมผัสอาจเกิดขึ้นจากอากาศภายในอาคาร โดยส่วนใหญ่เกิดจากฝุ่นละออง ในครัวเรือนแคนาดารักษาพรหม โดยใช้สเปรย์เคลือบเบาะและป้องกันคราบสกปรกภายในบ้าน (Scotchgard™) เป็นประจำในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา โดยพรหมในห้องครอบครัวถูกพบว่า มี PFHxS ~ 3000 ng/g และระดับเลือดในครอบครัว แตกต่างกันตั้งแต่ 27.3–423 ng/ml และพบว่า ในเด็กที่มีอายุน้อยที่สุด จะมีระดับความเข้มข้นสูงสุด การศึกษาของแคนาดา ได้แสดงค่ามัธยฐานของฝุ่นจากสภาพแวดล้อมภายในอาคารที่ 23.1 ng/g ในขณะที่ตรวจพบ 45.5 ng/g ในบ้านและศูนย์รับเลี้ยงเด็กในสหรัฐอเมริกา และพบระดับ PFHxS ในฝุ่นจากศูนย์เฟอร์นิเจอร์และโรงแรมในนอร์เวย์อยู่ระหว่าง 1,600 ถึง 2,300 ng/g โดย PFHxS เป็นสารกลุ่ม PFAS ที่โดดเด่นในตัวอย่างร่วมกับ 6: 2 diPAP ซึ่งพบในระดับที่สูงใกล้เคียงกันในช่วง 330–3,300 ng/g

(ที่มา: UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4 Additional information on perfluorohexane sulfonic acid (CAS No: 355-46-4, PFHxS), its salts and PFHxS-related compounds)

การตรวจพบ PFHxS ในมนุษย์ทั่วโลก โดยตรวจพบระดับสูง (1,790 µg/l ของซีรัมในเลือด) ในผู้ที่บริโภคน้ำดื่มที่ปนเปื้อน PFHxS พบระดับในซีรัมมีตั้งแต่ <1–1790 µg/l และอัตราการตรวจพบ PFHxS สูงกว่า 98% ในหญิงตั้งครรภ์ในกลุ่มประชากรที่ใน เชียงไฮ้ นอร์เวย์ทางตอนเหนือ กรีนแลนด์ และเดนมาร์ก โดยตรวจพบ PFHxS ในทุกตัวอย่างของมารดา และสายสะดือ เลือด และพลาสมา ในการศึกษาผู้หญิง และเด็กแรกเกิด (n = 7) จากรัสเซีย ซึ่งจะพบความแตกต่างทางเพศที่ชัดเจน สำหรับการกำจัดในผู้หญิงอายุระหว่าง 15 - 50 ปี มีประสิทธิภาพมากกว่าผู้ชายในการขับถ่าย PFHxS โดยมีครึ่งชีวิต 4.7 และ 7.4 ปีตามลำดับ

ในทารก ยังสามารถรับสัมผัสสาร PFHxS ผ่านทางน้ำนมมารดา แต่อย่างไรก็ตามการเคลื่อนย้ายจากเลือดของมารดาไปยังน้ำนมมารดา ของสาร PFHxS มีความสามารถน้อยกว่าเมื่อเทียบกับสาร PFOS และหลังจาก 6 เดือนแรก ระดับความเข้มข้นของซีรัมในทารกเพิ่มขึ้น 4 - 3.5 เท่าของ PFOS และ PFHxS ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเลือดจากสายสะดือ มีการตรวจพบ PFHxS ในน้ำนมมารดามากกว่า 70% ที่ทำการวิเคราะห์ในประเทศญี่ปุ่น มาเลเซีย ที่ความเข้มข้นเฉลี่ยตั้งแต่ 6.45 (มาเลเซีย) - 15.8 (ฟิลิปปินส์) pg / ml และในการศึกษาอื่น ๆ มีรายงานระดับตั้งแต่ <0.005 ถึง 0.3 ug / l

การเลี้ยงลูกด้วยน้ำนมมารดา อาจเป็นเส้นทางที่มีประสิทธิภาพในการกำจัด PFHxS จากเลือดของมารดา โดยมีการเปรียบเทียบความเข้มข้นของซีรัมของมารดาที่ให้นมบุตร และไม่ได้ให้นมบุตร แสดงให้เห็นว่าการให้นมบุตร ช่วยลดความเข้มข้นของ PFHxS, PFOS และ PFOA ในซีรัมของมารดาได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า สามารถลดปริมาณของสาร PFOS และ PFOA ได้ 3% และ 1% สำหรับ PFHxS ต่อเดือน ในซีรัมของมารดาที่ให้นมบุตร ในการศึกษาการติดตาม ของสวีเดนได้วิเคราะห์ PFHxS ในน้ำนมมารดา จากตัวอย่างในเมืองสตอกโฮล์ม และโกเธนเบิร์ก พบว่า ในสตอกโฮล์มความเข้มข้นของ PFHxS (มีช่วง pg/ml ต่ำ) มีการเพิ่มขึ้นในชาว 1972 - 2015 แม้ว่า จะพิจารณาในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ทั้งในสตอกโฮล์ม และโกเธนเบิร์ก ได้ตรวจพบ PFHxS ในเด็กอายุ 3-11 ปี จาก NHANES ในปี 2013 - 2014 ที่ความเข้มข้นใกล้เคียงกับในวัยรุ่นและผู้ใหญ่ สิ่งนี้ชี้ให้เห็นถึงการสัมผัสกับ PFHxS หรือสารตั้งต้นกับประชากรในสหรัฐอเมริกา และเด็กอายุ 3 - 11 ปี ซึ่งส่วนใหญ่เกิดหลังจากยกเลิกการใช้ PFOS ในสหรัฐอเมริกา ในปี 2002

ในการศึกษาแนวโน้มชั่วคราวของ PFAS ที่แตกต่างกันในซีรัมของผู้หญิงที่คลอดครั้งแรก (primiparous women) ในเมืองอุพซอลา (Uppsala) ประเทศสวีเดน พบว่าระดับ PFHxS ในซีรัมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญระหว่างปี 1996 - 2010 (8.3% / ปี) โดยความเข้มข้นในปี 2010 อยู่ที่ประมาณ 6.5 ng/ml พบเวลาเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า 11.7 ปี สำหรับกลุ่มตัวอย่างเดียวกันกับกลุ่มตัวอย่างตั้งแต่ปี 1997-2012 สำหรับ PFHxS มีการสังเกตแนวโน้มการลดลง อย่างมีนัยสำคัญสำหรับ PFOS เชิงเส้นเทียบกับเชิงเส้น + แบบแยกแขนงในช่วงเวลานั้น แต่มีเพียงการลดลงที่ไม่มี นัยสำคัญสำหรับ PFHxS ต่อมาพบว่าเกิดจากการปนเปื้อนในน้ำดื่มที่มาจากการใช้ โฟมดับเพลิงประเภทโฟมสร้างฟิล์มน้ำ ในสนามบิงทหารที่ถูกปิด โดยมีระดับ ของ PFHxS ในพื้นดิน น้ำดื่ม แตกต่างกันไปตั้งแต่ 16 ng/l (น้ำเข้าสนามบิง) ถึง 690 ng/l (น้ำออกจากสนามบิง) และความเข้มข้นในบ่อน้ำรวมคือ 83 ng/l

ในการศึกษาการตรวจสอบทางชีวภาพของมนุษย์เมื่อเร็ว ๆ นี้ในเมือง Ronneby ในสวีเดน ผู้คนได้รับสัมผัส สาร PFAS ในระดับสูงผ่านทางน้ำดื่ม รวมถึง PFHxS (1,700 ng/l ในปี 2013) จากสนามบิงทหารบริเวณใกล้เคียง และระดับของ PFHxS สูงที่สุดเท่าที่เคยมีรายงานมาในสวีเดน (277 ng/ml ในช่วง 12 - 1,660)

แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของ PFHxS ยังพบในตัวอย่างซีรัมจากประเทศนอร์เวย์ ระดับซีรัมในผู้ชาย (อายุ 40-50 ปี) สำหรับ PFHxS เพิ่มขึ้นจากปี 1976 ถึงต้นปี 1990 โดยที่ระดับคงที่จนถึงปี 2006 ความเข้มข้นของ PFHxS อยู่ระหว่าง ระดับต่ำสุดที่ 0.1 µg/l ในปี 1977 และสูงสุดที่ 3.4 µg/l ในปี 2000 และความเข้มข้นเท่ากับ 1.4 µg/l ในปี 2006 พบการลดลง 61% สำหรับความเข้มข้นของค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิตตามอายุ และเพศของ PFHxS ระหว่างปี 2000 - 2001 ถึงปี 2015 ในผู้บริจาคโลหิต และไม่พบการลดลงของระดับ PFHxS ในซีรัมในสตรีชาวแคลิฟอร์เนียอายุ 50 - 80 ปี ในช่วงปี 2011 ถึงปี 2015 เมื่อเทียบกับ PFAS อื่น ๆ ที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ในการศึกษาระยะยาวของผู้ชาย ที่ดำเนินการในภาคเหนือของนอร์เวย์ความเข้มข้นของ PFOS และ PFOA สูงที่สุดในช่วงปี 1994 - 2001 ตามลำดับ ในขณะที่ระดับ PFHxS เพิ่มขึ้นในปี 2001 และไม่ลดลงในระหว่างปี 2001 ถึง 2007

ในการศึกษาการกระจายของเลือดจากทารกแรกเกิด ในเมืองนิวยอร์ก สหรัฐอเมริกาตั้งแต่ปี 1997 - 2007 พบว่า ระดับ PFHxS เพิ่มขึ้นและสูงสุดในปี 2000 และลดระดับลง ส่วนระดับของ PFOS และ PFOA ลดลงต่ำกว่า ระดับในปี 1997

ในการทบทวนอย่างเป็นระบบยังไม่รวมข้อมูลจากการสัมผัสจากอาชีพและหรือประชากรที่สัมผัสกับ แหล่งกำเนิด เช่น น้ำดื่มที่ปนเปื้อนความเข้มข้นของ PFOS, PFDS และ PFOA ในมนุษย์ โดยทั่วไปจะลดลงและ

ความเข้มข้นของ PFHxS ที่เพิ่มขึ้นได้เริ่มลดลงในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาการสร้างการสัมผัสกับมนุษย์ในอดีตโดยใช้ข้อมูลการตรวจสอบทางชีวภาพในซีรัมจากสหรัฐอเมริกา และออสเตรเลีย โดยใช้แบบจำลองหลักการทางเภสัชจลนศาสตร์ (Pharmacokinetic) ของประชากรพบว่า PFOS และ PFOA ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ไม่พบแนวโน้มของ PFHxS นอกจากนี้ความเข้มข้นของ PFHxS ในซีรัมยังเป็นไปตามรูปแบบอายุที่แตกต่างจาก PFOS ซึ่งบ่งชี้ว่าการสัมผัสกับ PFHxS ทั่วโลกยังคงดำเนินอยู่และไม่ได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญตั้งแต่ต้นปี 2000

การรับสัมผัสสารจากการทำงานอาจทำให้ระดับ PFHxS ในเลือดสูงขึ้น จากการศึกษาพบว่า ระดับ PFOS และ PFHxS ในซีรัมของนักผจญเพลิงอยู่ในช่วง 92–343 และ 49–326 ng/ml ตามลำดับ (ในขณะที่กลุ่มควบคุมมี PFOS และ PFHxS 1 - 40 และ 0.2 - 22 ng/ml ตามลำดับ) ในโรงงานผลิตสารฟลูออโรเคมีของจีน สำหรับสารประกอบที่เกี่ยวข้องกับ PFOS พบว่าฝุ่นในร่ม (67.3%) และอาหาร (31.6%) เป็นแหล่งที่ใหญ่ที่สุดในการรับสัมผัสสาร PFHxS ของมนุษย์ และความเข้มข้นเฉลี่ย PFHxS ของน้ำดื่มเท่ากับ 0.80 ng/l ความเข้มข้นของ PFHxS ในซีรัมอยู่ในช่วง 12.8–10,546 ng/ml และระดับฝุ่นในอาคารอยู่ระหว่าง nd-257201 ng/g (ค่าเฉลี่ย = 15,726)

ในการศึกษาอื่น ๆ ของโรงงานผลิตฟลูออโรเคมีในเขตเดียวกัน พบว่าความเข้มข้นของ PFHxS ในซีรัมของสมาชิกในครอบครัวของคนงานอยู่ในช่วง 4.33-3,164 ng/ml โดยฝุ่นในที่อยู่อาศัยที่เชื่อมต่อกับโรงงานมี PFHxS อยู่ในช่วง 0.44 ถึง 708 ng/g ซึ่งสูงกว่า ผู้ที่อาศัยในพื้นที่ปลูกอย่างมีนัยสำคัญ PFHxS ถูกพบในการแพร่กระจายในอาหารในช่วง 0.067 - 0.448 ng/g/ww และน้ำดื่ม PFHxS ตั้งแต่ nd - 3.2 ng/l และการศึกษาความเข้มข้นของ PFHxS ในซีรัมของคนงานอยู่ในช่วง <LOD ถึง 19,837 ng / mL (มัธยฐาน = 764 ng / mL) ระดับ PFHxS ในซีรัมในผู้ปฏิบัติงานที่ได้รับสาร แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยมีความเข้มข้นในปีสภาวะอยู่ระหว่าง <LOD – 77.1 ng / mL (มัธยฐาน = 1.7 ng/ml)

(ที่มา: UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1 Report of the Persistent Organic Pollutants Review Committee on the work of its fourteenth meeting - Risk profile on perfluorohexane sulfonic acid (PFHxS), its salts and PFHxS-related compounds)

5. การศึกษาความเป็นพิษ

5.1 ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และนก (Toxicity to aquatic organisms and birds)

ข้อมูลความเป็นพิษต่อระบบนิเวศของสาร PFHxS ยังไม่ครอบคลุมถึงความเป็นพิษในปลา จากผลการวิจัยที่มีอยู่สำหรับสาร Perfluorinated acids อื่น ๆ บ่งชี้ว่าความเป็นพิษจะเพิ่มขึ้นเมื่อคาร์บอน (Carbon) มีความยาวเพิ่มขึ้น และซัลโฟเนต (Sulfonates) มีฤทธิ์มากกว่าคาร์บอกซิเลต (Carboxylates) ผลการวิจัยที่มีอยู่ของ Perfluorinated acids ที่ไม่ใช่สาร PFHxS บ่งชี้ว่า ความเป็นพิษของสารกลุ่มนี้คือความเป็นพิษแบบเรื้อรัง ดูการตัดผ่านจาก C₄ และ C₈-homologues (PFBS และ PFOS) อาจบ่งบอกถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการสัมผัสกับ PFHxS ข้อมูลความเป็นพิษของปลาที่มีอยู่ สำหรับ C₈ homologue, PFOS บ่งชี้ถึงความเป็นไปได้ในการเพิ่มอัตราการตายในรุ่นลูก เมื่อรุ่นแม่สัมผัสกับความเข้มข้นต่ำถึง 0.01 mg/L แม้ว่า PFBS จะแสดงให้เห็นว่าก่อให้เกิดความเป็นพิษเฉียบพลันต่อปลาจะมีระดับต่ำ แต่ยังคงพบว่า PFBS ก่อให้เกิดความผิดปกติของระบบต่อมไทรอยด์ในสัตว์ทะเลหลายชั่วอายุ การได้รับ PFBS (0, 1.0, 2.9 และ 9.5 µg/L) มาจากไข่ F0 จนถึงวัยเจริญพันธุ์ ในขณะที่ F1 และ F2 ไม่ได้รับการสัมผัส น้ำหนักตัวลดลงอย่างมีนัยสำคัญสำหรับปลา F0 ทั้งเพศหญิงและเพศชายที่สัมผัสปริมาณ 2.9 µg/L และ 9.5 µg/L เป็นเวลา 6 เดือนและในเพศเมีย F0 พลาสมาระดับ T3 ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (41%) ในกลุ่ม 9.5 µg/L ในลูกน้ำ F1 พบว่า T3 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในกลุ่ม 1 µg/L การฟักไข่ล่าช้าควบคู่ไปกับการเพิ่มระดับ T3 ในตัวอ่อน F1 นอกจากนี้การหยุดชะงักของ F2 larvae TH ยังแสดงด้วยระดับ T4 ที่เพิ่มขึ้น (เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในกลุ่ม 9.5 µg/L) จากการสังเกตพบว่าการได้รับพลังงานจากการเปลี่ยนแปลง ทำให้การแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับ TH (deiodinase 1 และต่อมไทรอยด์ที่จับกับโกลบูลิน) เพิ่มขึ้น

ในการทดสอบวงจรชีวิตแบบเรื้อรังโดยใช้ความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยของ PFOS ในช่วง 1 ถึง 100 µg /L ค่า Chironomid *Chironomus tentans* EC 50 อยู่ที่ ~ 95 µg /L สำหรับจุดสิ้นสุดการรอดชีวิต การเติบโต และการเกิด โดย 2 – 3 รายการที่มีขนาดต่ำกว่าในรายงานสำหรับสิ่งมีชีวิตในน้ำอื่น ๆ สิ่งนี้อาจสะท้อนถึงผลกระทบต่อฮิโมโกลบิน เนื่องจากตัวอ่อนค่อย ๆ ซีดลง จากการสูญเสียฮีโมโกลบิน ซึ่งจุลินทรีย์และสาหร่ายในระบบนิเวศทางน้ำ อาจได้รับผลกระทบจากผลกระทบของเยื่อหุ้มเซลล์จาก PFAS ในสิ่งแวดล้อม และพบความสามารถในการซึมผ่านของเมมเบรนที่เพิ่มขึ้น และการตอบสนองต่อการรับรู้ quorum (ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการเริ่มต้นของการตอบสนองของแบคทีเรีย เช่น biofilm สารพิษ หรือการผลิตยาปฏิชีวนะ) ในกลุ่มแบคทีเรียที่ได้รับสัมผัสกับสาร PFBS PFHxS หรือ PFOS และพบรูปแบบการเพิ่มความแข็งแรงด้วยความยาวของพันธะเพิ่มขึ้น โดย PFHxS พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญที่ 50 mg/L แต่สำหรับ PFOS พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.3 mg/L

ผลการศึกษาของ PFHxS ต่อสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกในระดับสิ่งแวดล้อม การศึกษาในกบเสือดาวเหนือ (Northern leopard frog) (n = 36 x 2 ตัวจำลอง) ถูกสัมผัสกับสาร PFHxS, PFOS, PFOA หรือ 6: 2 fluorotelomer sulfonate (6: 2 FTS) ในระดับความเข้มข้น 0 10 100 และ 1,000 µg/L เป็นเวลา 40 วัน พบว่าการรอดชีวิตสูงกว่า 90% แม้ว่าสาร PFOS จะแสดงค่าปัจจัยความเข้มข้นทางชีวภาพ (Bioconcentration factor: BCF) ที่สูงกว่า (2 รายการมีขนาดที่สูงกว่า) สารประกอบทดสอบอื่น ๆ ในการศึกษาครั้งนี้ แต่สาร PFHxS มีศักยภาพมากกว่าสำหรับจุดสิ้นสุด (ระยะ gosner ในการพัฒนาและความยาวจากจุมูกถึงช่องขั้วถ่ายของกบ) ในวันที่ 40 พบว่ามีนัยสำคัญทางสถิติสำหรับทุกปริมาณของ PFHxS ที่ทดสอบ และ PFOS สองปริมาณสูงสุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารกลุ่ม PFAS ทั้งหมดมีแนวโน้มที่จะชะลอการพัฒนาของกบ

การศึกษาเกี่ยวกับกบเล็บแอฟริกัน (African clawed frog) ได้บ่งชี้ถึงศักยภาพในการขัดขวางต่อมไร้ท่อเมื่อทดสอบ PFBS และ PFOS ที่ความเข้มข้น 0 0.1 1 100 และ 1,000 µg/ L จากระยะ 46/47 ถึง 2 เดือนหลังการเปลี่ยนแปลง PFOS ที่ใช้ในการศึกษานี้มีความบริสุทธิ์ 98% และตรวจพบระดับ PFHxS ในช่วง 3.4–4.8 และ

18.1 - 42.6 µg /L ในน้ำด้วย PFOS 100 และ 1,000 µg/L ตามลำดับ อย่างไรก็ตามน่าจะคาดได้ว่า ผลกระทบของ PFOS ที่สังเกตได้ คือ การรอดชีวิตเกิน 85% สำหรับการศึกษาทั้งหมด และไม่พบว่ามีน้ำหนักตัวลดลง หลังจากได้รับสารเป็นเวลา 4 เดือน ทั้ง PFOS และ PFBS สนับสนุนการแสดงออกของตัวรับฮอร์โมนเอสโตรเจน และแอนโดรเจนในสมอง และตัวรับฮอร์โมนเอสโตรเจนในระดับการสัมผัส 0.1 µg/L เป็นเวลา 2 เดือน และความบกพร่องของตับและเนื้อเยื่อ (การเสื่อมของตับ การเจริญเติบโตมากเกินไปของตับ และการเพิ่มขึ้นของ sinusoids ในเลือด) ที่ความเข้มข้นสูง (100 - 1000 µg / L) สำหรับทั้ง PFOS และ PFBS อย่างไรก็ตามไม่พบการเปลี่ยนแปลงของดัชนีตับ PFOS ที่ความเข้มข้น 1 100 และ 1,000 µg/L ทำให้เกิดสเปอร์มาโตโกเนียเสื่อม ในขณะที่ไม่พบผลกระทบดังกล่าวสำหรับ PFBS จากการตัดผ่านของ C₄ และ C₈-homologes (PFBS และ PFOS) อาจบ่งบอกถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการสัมผัสกับ PFHxS

การศึกษาในนกแสดงให้เห็นว่า PFHxS มีผลต่อการเดินทางของฮอร์โมนไทรอยด์และยีนที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเซลล์ประสาทที่ 8.9 ถึง 38,000 ng/g จากการฉีดไขที่ความเข้มข้นของผลต่ำสุดที่สังเกตได้ (Lowest Observed Effect Concentration :LOEC) คือ 890 ng ของ PFHxS/g พบค่าน้ำหนักเมื่อหย่านม (Weaning Weight: WW) สำหรับการพัฒนาตัวอ่อนของไก่เลคฮอน (Leghorn Chicken) (ปราศจากพลาสมา T4) ระดับ T4 ที่ปราศจากพลาสมาลดลงในลักษณะที่ขึ้นอยู่กับปริมาณในตัวอ่อนที่สัมผัสกับ PFHxS จาก 8.9 ng/g โดยมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่เกิดขึ้นที่ 890 ng/g พบผลต่อการแสดงออกของยีนในการเพาะเลี้ยงเซลล์ประสาทหลักของนกในช่วงความเข้มข้น 0.1-10 µM นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์เชิงลบระหว่าง PFHxS ในพลาสมา และอัตราส่วนทั้งหมด T3/ปราศจากฮอร์โมนไทรอยด์ T3 ของนกทะเลในอาร์กติก

5.2 ความเป็นพิษในสัตว์ฟันแทะที่เกี่ยวข้องกับมนุษย์ (Toxicity in rodents relevant for human)

จากการศึกษาทดลองในสัตว์ฟันแทะที่สัมผัสกับสาร PFHxS แสดงผลเสียต่อดังต่อไปนี้ และผลกระทบจากการเผาผลาญที่เกี่ยวข้อง เช่น ผลต่อระดับคอเลสเตอรอลในเลือด ไลโปโปรตีน ไตรกลีเซอไรด์ และกรดไขมันในเลือด โดยพบว่ามีผลต่อดังต่อไปนี้ คือ การเจริญเติบโตที่เพิ่มขึ้นของมากเกินไปของเซลล์ตับอย่างมีนัยสำคัญ (น้ำหนักตับที่เพิ่มขึ้น 56%) ในหนูตัวผู้หลังจากได้รับสารดังกล่าวเป็นเวลา 42 วัน ที่ปริมาณ 10 mg/kg น้ำหนักตัว/วัน และเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในน้ำหนักตับสัมพัทธ์ในขนาด 3 และ 10 mg/kg/วัน ในการศึกษาอื่นพบว่า น้ำหนักตับสัมบูรณ์เพิ่มขึ้น 110% หลังจากได้รับ PFHxS เป็นเวลา 28 วัน ที่ปริมาณ 6 mg/kg/วัน ในหนูตัวผู้ที่ดัดแปลงพันธุกรรม ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นของไลโปโปรตีนที่ประกอบด้วย apoB ที่ได้รับสารดังกล่าวทำให้ตับเกิดภาวะที่มีไขมันในเลือด คอเลสเตอรอลรวมในเลือด และไตรกลีเซอไรด์ลดลง อาจเป็นไปได้ว่าการหลังไลโปโปรตีนที่มีความบกพร่องของ PFHxS จากตับเป็นกลไกที่นำไปสู่การสะสมของไลโปโปรตีน และไตรกลีเซอไรด์ในตับทำให้เกิดตับและไขมันในเลือดและลดไลโปโปรตีนในซีรัมและไตรกลีเซอไรด์ในเลือด ในการศึกษาความเป็นพิษต่อระบบสืบพันธุ์ พัฒนาการในหนูพบว่า น้ำหนักตับเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในเพศชายและเพศหญิง F0 จาก 1 mg/kg. น้ำหนักตัว/วัน เป็นเวลา 42 วัน และสูงสุดที่ 3 mg/kg. น้ำหนักตัว/วัน น้ำหนักตับที่เพิ่มขึ้น 70% มีความสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตที่มากเกินไปของเซลล์ตับในระดับปานกลางถึงขั้นที่ทำให้เกิดโรคสตีเรียรอยด์ การตายของเซลล์เดี่ยว และอัลคาไลน์ฟอสฟาเทส (ALP) ที่เพิ่มขึ้น รวมถึงคอเลสเตอรอลในเลือดที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ คือ ปริมาณที่น้อยที่สุดของสารเคมีที่ได้ (Lowest observed adverse effect level: LOAEL) ที่ 0.3 mg/kg. น้ำหนักตัว/วัน โดยพิจารณาจากการลดคอเลสเตอรอลในเลือดทั้งหมดในปริมาณทั้งหมดได้มาจากน้ำหนักตับสัมบูรณ์และสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในหนูเพศผู้และการเจริญเติบโตมากเกินไปของเซลล์ตับ ในการศึกษาเห็นได้จากค่าที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 3 mg/kg. น้ำหนักตัว/วัน

ผลการศึกษาของ PFHxS ต่อดังต่อไปนี้ เป็นไปได้ว่า บางส่วนเป็นสื่อกลางผ่านการกระตุ้นตัวรับนิวเคลียร์ ซึ่งมีงานวิจัยหลายชิ้นได้สำรวจผลทางกลไกของ PFHxS ต่อการทำงานของตับ การแสดงออกของยีน และการกระตุ้นตัวรับ

ที่กระตุ้นด้วย peroxisome proliferator (PPAR) α ในการศึกษาของ Wolf et al., 2008 พบว่า PFHxS สามารถกระตุ้นทั้งตัวรับ PPAR- α ของหนู และมนุษย์ในหลอดทดลองด้วย LOECs ที่ 8.76 และ 4.38 $\mu\text{g}/\text{mL}$ ตามลำดับ (เท่ากับ 20 และ 10 μM) ในการเปลี่ยนเซลล์ไตของลิงเขียวแอฟริกัน (African green monkey) นอกจากนี้ PFHxS ยังกระตุ้นตัวรับ PPAR- α ของแมวน้ำไบคาล (Baikal seals) ในการทดสอบการกระตุ้นการทำงาน (transactivation) ในลักษณะที่ขึ้นอยู่กับปริมาณของยา ในการศึกษาของหนูป่า และ PPAR- α null ที่สัมผัสกับ PFHxS ที่ปริมาณ 10 mg/kg /วัน เป็นเวลา 7 วัน พบว่ามีผลต่อดับ (น้ำหนักตัวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ภาวะไขมันในตับ) ของทั้งสองสายพันธุ์ ในขณะที่การสัมผัสกับ PPAR- α agonist WY-14643 ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบในหนู PPAR- α null ซึ่งบ่งชี้ว่าผลกระทบต่อดับโดย PFHxS เกิดขึ้นโดยไม่ขึ้นกับ PPAR- α ข้อมูลการแสดงออกของยีนยังระบุด้วยว่า PFAS บางตัวมีศักยภาพในการกระตุ้นตัวรับที่เปิดใช้งานส่วนประกอบ (Constitutive Activated Receptor: CAR) และ PPAR- γ PFHxS ยังส่งผลต่อการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการเผาผลาญไขมันและคอเลสเตอรอลในหนู ในการเริ่มต้นการเพาะไขมัน ของ PFHxS มีศักยภาพมากกว่า PFOS ในการกระตุ้นการสะสมของไตรกลีเซอไรด์ และ PFASs ทั้งสองทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่รุนแรงในการแสดงออกของยีนโดยมีความคล้ายคลึงกับที่สังเกตได้ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา PPAR- γ ในการศึกษาอื่นพบว่า PFHxS สามารถยับยั้งช่องว่างทางแยกการสื่อสารระหว่างเซลล์ (Gap Junctional Intercellular Communication: GJIC) ได้อย่างรวดเร็วโดยขึ้นอยู่กับขนาดของยา และย้อนกลับได้

การสัมผัสกับ PFHxS ยังแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางโลหิตวิทยาในหนูตัวผู้ที่สัมผัสเป็นเวลา 42 วัน โดย ฮีมาโทคริต (Hematocrit) และจำนวนเม็ดเลือดแดงลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ 3 mg/kg/น้ำหนักตัว/วัน ความเข้มข้นของฮีโมโกลบินลดลงอย่างมีนัยสำคัญในกลุ่ม 1 mg/kg/วัน และเวลาที่เลือดเริ่มแข็งตัว (Prothrombin time: PT) เปลี่ยนแปลงในทุกขนาดที่ทดสอบ ยกเว้นที่ขนาด 1 mg/kg/น้ำหนักตัว/วัน อย่างไรก็ตาม ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ทางโลหิตวิทยาในหนูตัวผู้ที่สัมผัสกับ PFHxS ใน 3 mg/kg/น้ำหนักตัวเป็นเวลา 42 วัน

ความเป็นพิษต่ออวัยวะของต่อมไทรอยด์ จากการสัมผัสกับ PFHxS ในหนูเพศผู้ F0 ที่สัมผัสกับ PFHxS ที่ปริมาณ 0, 0.1, 1.0, 3.0 และ 10 mg/kg เป็นเวลา 42 วัน พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของการเจริญเติบโตที่มากเกินไปของต่อมไทรอยด์ การเพิ่มจำนวนของเซลล์เยื่อหุ้มพอลิคลูลาร์ ที่เพิ่มขึ้นตามขนาดของยา อย่างไรก็ตามไม่มีผลใด ๆ ใน F0 ตัวเมีย ที่ความเข้มข้นของซีรัมในหนูเพศเมียต่ำกว่าตัวผู้ประมาณ 8 เท่า กลไกพื้นฐานสำหรับผลของต่อมไทรอยด์เชื่อว่าเกิดจากการเพิ่มการหมุนเวียนของ thyroxine ในพลาสมา (T4) ซึ่งส่งผลให้เกิดการกระตุ้นของฮอร์โมนกระตุ้นต่อมไทรอยด์และการเจริญเติบโตมากเกินไป การศึกษาทางกลไกบางอย่างได้สำรวจผลของ PFHxS ต่อวิถีของฮอร์โมนไทรอยด์ PFHxS มีความสามารถกับ Thyroxine (T4) เพื่อจับกับ transthyretin โปรตีนขนส่งฮอร์โมนไทรอยด์ของมนุษย์ ซึ่งเป็นพาหะของ T4 หลักในน้ำไขสันหลังและแสดงออกในระดับสูงในช่วงก่อนคลอดและหลังคลอดในช่วงแรก นอกจากนี้ PFHxS ยังยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์ triiodothyronine (T3) แบบพึ่งยาในหลอดทดลองที่ความเข้มข้นต่ำ (10⁻⁸ ถึง 10⁻⁵ Molar (M)) แต่เพิ่มการเพิ่มจำนวนเซลล์ที่ความเข้มข้นสูงขึ้น (10⁻⁴ M)

ในการศึกษาการตรวจคัดกรองความเป็นพิษต่อระบบสืบพันธุ์ พัฒนาการในหนู CD-1 ที่สัมผัสกับ PFHxS ที่ปริมาณ 0 0.3 1.0 และ 3.0 mg/kg/น้ำหนักตัว/วัน พบว่า จำนวนรอดชีวิต มีค่าเฉลี่ยลดลงอย่างมีนัยสำคัญจาก 1.0 mg/kg/น้ำหนักตัว/วัน และความสมบูรณ์ลดลง พบดัชนีที่ 3.0 mg/kg/น้ำหนักตัว/วัน แม้ว่าจะไม่แตกต่างจากการควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ในการตอบสนองต่อยาที่ชัดเจนยังขาดสำหรับการตอบสนองเหล่านี้ และปริมาณสูงสุด ถือว่ามีปริมาณต่ำ สำหรับการเปรียบเทียบพบว่า PFOS สามารถลดขนาดของครอกได้โดยอัตราการตายที่ 2 mg/kg และ 10 mg/kg สำหรับหนู

พฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับขนาดยาของตัวเต็มวัย และการรบกวนเกี่ยวกับกระบวนการรับรู้ (Cognitive) พบได้ในหนูหลังจากได้รับ PFHxS ในตัวอ่อนแรกเกิดในช่วงพัฒนาการของสมองที่อ่อนแอ (9.2 mg/kg/น้ำหนักตัว) PFHxS ส่งผลกระทบต่อระบบ cholinergic ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมที่เกิดจากนิโคตินในสัตว์ที่โตเต็มวัยซึ่งเป็นไปตามข้อค้นพบก่อนหน้านี้สำหรับ PFOA และ PFOS ระดับของโปรตีนหลายชนิดที่สำคัญในการกระตุ้นการเติบโตของสมองซึ่งบ่งบอกถึงพัฒนาการของสมองตามปกติและการทำงานของความรู้ความเข้าใจได้รับผลกระทบ 24 ชั่วโมงหลังการสัมผัส และระดับทอรีนในส่วนนอกของสมองใหญ่ (Cerebral cortex) แตกต่างจากการควบคุมที่ระยะเวลา 4 เดือนในเพศผู้ ในการศึกษาอื่นเกี่ยวกับผลการพัฒนาในหนูขาวไม่พบผลต่อการเคลื่อนไหวของร่างกายสำหรับหนูที่สัมผัสในมดลูกและผ่านการให้นมเป็น 0.3 - 10 mg/kg/วัน และ 0 - 3 mg/kg อย่างไรก็ตามความแตกต่างของระยะเวลาในการกำจัดระหว่างหนูเพศเมียและหนู (2 ต่อ 30 วัน) อาจส่งผลให้เกิดการแตกต่างกันของผลการพัฒนาระบบประสาทที่สังเกตได้ระหว่างหนูตัวใหญ่ (Rat) กับหนูเลี้ยง (Mice)

ผลกระทบต่อระบบประสาทของ PFHxS ได้รับการศึกษาเพิ่มเติมและพบว่า PFHxS ลดการทำงานของเซลล์ประสาทที่เกี่ยวข้องกับการเรียนรู้และความจำ PFHxS (100 μ M) และลดศักยภาพในระยะยาวในบริเวณ hippocampus CA1 ในหนูที่โตเต็มวัยที่มีความสามารถเทียบเท่ากับ PFOS นอกจากนี้ความถี่ที่เพิ่มขึ้นของกระแสโพสซินแนปติกขนาดเล็กที่เกิดขึ้นเอง รวมทั้งการไหลเข้าของแคลเซียมขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนั้นได้รับการสังเกตหลังจากได้รับการเพาะเลี้ยงเซลล์ประสาทหลักของ hippocampal ถึง 100 μ M PFHxS และพบว่า PFHxS ทำให้เกิดการตายของเซลล์ในหลอดทดลองในเซลล์ประสาท dopaminergic (PC12) และเซลล์หลักของกลูตามาเทอร์จิก ซึ่งมีปริมาณที่ทดสอบสอดคล้องกับ การศึกษาในร่างกาย (0.3 - 10 mg/kg/วัน) ซึ่ง,ความเข้มข้นของซีรัมที่ 111 - 505 μ M

มีการตรวจสอบรูปแบบของต่อมไร้ท่อสำหรับ PFHxS ในหลอดทดลอง PFHxS สามารถยับยั้ง 11-beta-dehydrogenase isozyme 2 (11b-HSD2) ที่เกี่ยวข้องกับการเผาผลาญฮอร์โมนคอร์ติโคสเตียรอยด์ในไมโครโซมของไตของมนุษย์และหนู ที่ความเข้มข้นสูงสุดครึ่งหนึ่งของการยับยั้ง (IC50s) ของกิจกรรม 11b-HSD2 ของมนุษย์และหนู เท่ากับ 18.97 และ 62.87 μ M PFHxS ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า PFHxS มีสามารถต้านแอนโดรเจน และเอสโตรเจนที่อ่อนแอในหลอดทดลอง PFHxS เป็นปฏิปักษ์กับแอนโดรเจนที่เหนี่ยวนำตัวรับแอนโดรเจน (AR) ในหลอดทดลอง (IC50 = 30 μ M) และการกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตัวรับเอสโตรเจน (ER) ระหว่าง 10⁻⁵ และ 10⁻⁴ M (20% ของการกระตุ้น E2) อย่างไรก็ตามในการสัมผัสร่วมกับ E2 (25 pM) PFHxS เพิ่มการตอบสนองต่อ ER ที่เกิดจาก E2 ได้มากขึ้นถึง 187% (~ พบการปรับปรุงที่คล้ายกันกับ PFOA และ PFOS) PFHxS มีฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของอะโรมาเทส (CYP19) IC50 = 298 μ M (เซลล์มะเร็งในรกของมนุษย์ JEG-3) และแทนที่ฮอร์โมนคอร์ติโคสเตอรอนจากโปรตีนจับในซีรัมที่แยกได้จากลูกไก่และนกอินทรีหัวขาว (Bald Eagle)

ไม่มีการตรวจสอบผลภูมิคุ้มกันของ PFHxS ในหลอดทดลอง หรือในการทดลองในร่างกาย อย่างไรก็ตามในการศึกษาในหลอดทดลองพบว่า PFAS ที่เกี่ยวข้อง (PFBS, PFOS ,Perfluorooctane sulfonamide :PFOSA, PFOA, Perfluorodecanoic acid: PFDA และ 8:2 fluorotelomer alcohol: 8: 2 FTOH) แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการกดภูมิคุ้มกัน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสิ่งนี้อาจเกิดขึ้นกับ PFHxS ผ่านกลไกเดียวกันได้เช่นเดียวกับ PFBS และ PFOS

5.3 ระบาดวิทยาของมนุษย์ (Human epidemiology)

การศึกษาด้านระบาดวิทยาส่วนใหญ่ตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างระดับ PFHxS และผลกระทบต่อสุขภาพเป็นแบบตัดขวาง (การวัดผลและการสัมผัสในเวลาเดียวกัน) โดยมีข้อจำกัดสำหรับการศึกษาเหล่านั้น แม้ว่าครึ่งชีวิตที่ยาวนานของ PFHxS (8.5 ปีโดยมีช่วง 2.2 ถึง 27 ปี) จะเพิ่มความเป็นไปได้ที่การวัดในซีรัมในปัจจุบันแสดงถึงการสัมผัสในอดีตซึ่งอาจเกี่ยวข้องทางชีวภาพสำหรับผลที่สังเกตได้ แต่ก็มีแนวโน้มที่จะมีการจำแนกประเภทการสัมผัสที่ไม่ถูกต้อง การศึกษาที่คาดหวังในการประเมินผลกระทบในเด็กที่สัมพันธ์กับการสัมผัสของเด็กปฐมวัยสามารถเพิ่ม

ความมั่นใจในหลักฐานนี้ การออกแบบการศึกษาและความแปรปรวนร่วมก็มีความแตกต่างกันระหว่างการศึกษาและในการศึกษาบางระดับของ PFHxS มีความสัมพันธ์อย่างมากกับ PFASs ในซีรัมอื่น ๆ และทำให้ผลลัพธ์ที่สังเกตได้ของ PFHxS ลดลง

การศึกษาทางระบาดวิทยาแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างระดับ PFASs และ PFHxS ในซีรัมกับระดับคอเลสเตอรอลไลโปโปรตีนไตรกลีเซอไรด์ และกรดไขมันในเลือด ในการประเมินผลการศึกษาทางระบาดวิทยาเกี่ยวกับ PFASs พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของเอนไซม์ในซีรัมและการเพิ่มขึ้นของบิลิรูบินในซีรัมในการศึกษา PFOA PFOS และ PFHxS ซึ่งบ่งบอกถึงความเสียหายของตับในการวิเคราะห์แบบตัดขวางของผู้ใหญ่ในแคนาดาพบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่าง PFHxS และผลลัพธ์ของคอเลสเตอรอล (Total cholesterol: TC) คอเลสเตอรอลไลโปโปรตีนความหนาแน่นต่ำ โดยมีอัตราส่วนของคอเลสเตอรอลรวม/ไลโปโปรตีนความหนาแน่นสูง (High Density Lipoprotein (HDL) และคอเลสเตอรอลที่ไม่ใช่ HDL พบหลังจากกระบวนการเลือกตัวอย่างการเพิ่มน้ำหนัก ไม่พบหลักฐานที่สนับสนุนความสัมพันธ์ระหว่าง PFOA และ PFOS กับผลลัพธ์ของคอเลสเตอรอล พบการเพิ่มขึ้นของคอเลสเตอรอลเชิงเดี่ยวในเชิงบวกด้วยการเพิ่ม decile ของ PFHxS เช่นเดียวกับ PFOA และ PFOS ในการศึกษาจากโครงการสุขภาพ C8 ของประชากรที่อาศัยอยู่ใกล้โรงงานเคมี อย่างไรก็ตามมีการศึกษาและพบความสัมพันธ์เชิงลบกับ PFHxS และ TC, non-HDL และ LDL ในประชากรสหรัฐฯทั่วไป ในขณะที่พบความสัมพันธ์เชิงบวกสำหรับ PFOA, PFOS และ PFNA ในหญิงตั้งครรภ์ในออร์เวย์พบความสัมพันธ์เชิงบวกกับ HDL-cholesterol ใน 5 PFASs คือ PFHxS จากการศึกษาหญิงตั้งครรภ์จากสเปนพบว่า PFOS และ PFHxS มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความทนทานต่อกลูโคสบกพร่องและเบาหวานขณะตั้งครรภ์

ผลต่อทางเดินของฮอร์โมนไทรอยด์ที่แสดงออกจากการได้รับ PFHxS ในการศึกษาทางระบาดวิทยา ระดับของ T4 ในระดับทั้งหมดพบว่า PFHxS มีการเพิ่มขึ้นตามระดับ ในประชากรสหรัฐฯทั่วไปความสัมพันธ์ที่เป็นบวก แต่ไม่มีนัยสำคัญ และยังพบ T4 ของ PFOS และ PFOA ทั้งหมด ในการศึกษาอื่น ๆ ของประชากรกลุ่มเดียวกันที่มีระดับ PFHxS ในซีรัมที่สูงขึ้นมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของ T3 และ T4 ทั้งหมดในผู้หญิง ในผู้ชายพบความสัมพันธ์เชิงลบสำหรับ PFHxS ในซีรัมและ T4 ของประชากรทั่วไปในสหรัฐอเมริกา ผู้ศึกษายังพบว่า ความเสี่ยงของภาวะต่อมไทรอยด์ทำงานมากเกินไปจะไม่แสดงอาการในผู้หญิงเพิ่มขึ้นเมื่อมี PFHxS ในซีรัมเพิ่มขึ้น ไม่พบความเชื่อมโยงเชิงสาเหตุระหว่างระดับ PFHxS, PFOA หรือ PFOS ในซีรัมและความเสี่ยงต่อการเกิดภาวะน้ำตาลในเลือดต่ำในหญิงตั้งครรภ์ ในกรณีศึกษาการควบคุมจากแคนาดา จากการศึกษาการเกิดย้อนหลังในสาธารณรัฐเกาหลีได้มีการสำรวจความสัมพันธ์ของ PFAS และฮอร์โมนไทรอยด์ในเลือดจากสายสะดือ การวิเคราะห์เฉพาะเพศพบว่าการได้รับ PFHxS ก่อนคลอดมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับ T3 ในเด็กผู้หญิงและ PFOS ไม่มีความเกี่ยวข้องกับพาราไธร์มอดที่เกี่ยวข้องกับต่อมไทรอยด์ ระดับ T4 ในทารกแรกเกิดเพศชายมีความสัมพันธ์ทางลบกับการเพิ่มการได้รับ PFHxS ก่อนคลอดในการศึกษาในกลุ่มมารดาจากสหรัฐอเมริกา โดยใช้ข้อมูลจากประชากรในสหรัฐอเมริกา และพบตัวบ่งชี้ความเครียด 2 ตัว คือแอนติบอดีต่อมไทรอยด์ - เพอร์ออกซิเดส (thyroid-peroxidase antibody: TPOAb) และ iodine status ไม่ปรับเปลี่ยนความสัมพันธ์ระหว่าง PFAS บางชนิดกับ TH เพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตาม PFHxS และ PFOS มีความสัมพันธ์เชิงลบกับ Free T4 ในกลุ่มเล็กที่มีการสัมผัสร่วมกับ TPOAb สูง และไอโอดีนต่ำ PFHxS PFOA PFOS และ PFNA มีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับ FreeT3/FreeT4, TSH และ TT3 จากการทบทวนอย่างเป็นระบบเกี่ยวกับผลกระทบของ PFAS ในหญิงตั้งครรภ์และเด็กพบว่าหลักฐานบางอย่างเกี่ยวกับความสัมพันธ์เชิงบวกของการได้รับ PFHxS และ PFOS และระดับ TSH ในเลือดของมารดา แต่ไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับ T3 และ T4

การศึกษาทางระบาดวิทยาของมนุษย์ได้พิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่าง PFAS ในซีรัมรวมถึง PFHxS และผลต่อพัฒนาการทางระบบประสาทหรือระบบประสาทในเด็ก จากโครงการ C8 - health Stein and Stavitz ได้ตรวจสอบ

ความสัมพันธ์แบบตัดขวางในเด็ก (อายุ 5-18 ปี; n = 10,456) ระหว่างความเข้มข้นของซีรัม PFOS, PFOA PFNA และ PFHxS ของผู้ปกครอง การวินิจฉัยโดยแพทย์เกี่ยวกับโรคสมาธิสั้น (ADHD – Attention Deficit Hyperactivity Disorder) แม้ว่าประชากรกลุ่มนี้จะมีการสัมผัสกับ PFOA สูงสุด แต่ความสัมพันธ์ที่แข็งแกร่งที่สุดระหว่างการสัมผัสและผลลัพธ์ที่พบได้สำหรับ PFHxS โดยมีอัตราต่อรองที่สูงขึ้นสำหรับควอไทล์ 2-4 เมื่อเทียบกับควอไทล์ที่ต่ำที่สุดตั้งแต่ 1.44 ถึง 1.59 (ระดับ PFHxS อยู่ในช่วง 0.25 - 276.4 ng/ml) ไม่พบความสัมพันธ์กับโรค ADHD ของ PFOS PFOA และ PFNA นอกจากนี้ยังพบอัตราต่อรองที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญสำหรับเด็กสมาธิสั้นในการศึกษาอื่นจากสหรัฐอเมริกาโดยใช้ข้อมูลจาก NHANES ในปี 1999 - 2000 และในปี 2003 - 2004 โดยมีระดับ PFHxS เพิ่มขึ้น 1 ug / mL n = 571 อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ทั้ง PFOA PFOS และ PFNA มีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับโรค ADHD ที่รายงานโดยผู้ปกครอง ในการศึกษาตรวจสอบระดับเลือดของสารประกอบ perfluoro- ในเด็กและความสัมพันธ์กับการยับยั้งพฤติกรรมผลการศึกษาพบว่าระดับ PFHxS ในเลือดมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับการขาดดุลยั้งพฤติกรรมในเด็ก (n = 83) สูงเมื่อเทียบกับการได้รับ PFHxS ก่อนคลอดในระดับต่ำ ยังสัมพันธ์กับพฤติกรรมที่เป็นปัญหาซึ่งประเมินโดยใช้แบบสอบถามจุดแข็ง และความยากลำบากในการศึกษาเด็กอายุ 5 - 9 ปี จากทั้งกรีนแลนด์และยูเครน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ไม่พบความสัมพันธ์ที่สำคัญระหว่างระดับ PFHxS ก่อนคลอด (เช่นเดียวกับ PFOS) และการควบคุมพฤติกรรมในเด็กอายุ 5 และ 8 ปี ในกลุ่มประชากรตามรุ่น จากสหรัฐอเมริกา (n = 256)

การศึกษาทางระบาดวิทยาบางชิ้นถึงผลกระทบที่ก่อให้เกิดภูมิคุ้มกันหรือการปรับสภาพ (Modulative) ที่เกิดจากการสัมผัส PFASs และ PFHxS ในช่วงก่อนคลอดและในวัยเด็ก ความสัมพันธ์ระหว่างการได้รับ PFAS บางชนิดก่อนคลอด และความชุกของโรคติดเชื้อ ของเด็กที่มีอายุไม่เกิน 4 ปีได้รับการตรวจสอบในคุณแม่ลูก 1,558 คู่ ในประเทศญี่ปุ่น การได้รับ PFOS และ PFHxS ก่อนคลอดพบว่ามีความสัมพันธ์กับการเกิดโรคติดเชื้อ (เช่น ออติสซึม ปอดบวม ไวรัส RS และโรคไขกระดูก) ในช่วงแรกเกิด สำหรับ PFHxS พบว่ามีการเชื่อมโยงในกลุ่มเด็กผู้หญิงเท่านั้น (หรือ: 1.55, (95% CI: 0.976, 2.45); p สำหรับแนวโน้ม = 0.045) พบความสัมพันธ์แบบผกผันระหว่างระดับ PFHxS ในซีรัมของมารดาและระดับของแอนติบอดีต่อต้านหัตถ์เยอรมัน (สังเกตได้จาก PFOA, PFOS และ PFNA) (n = 50) พบความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างระดับ PFHxS ในซีรัมและจำนวนตอนของโรคกระเพาะ และลำไส้อักเสบเมื่ออายุ 3 ปี (จากการศึกษา PFOA) (n = 66) การศึกษาอัตราส่วนต่อรองในการศึกษาตามกลุ่มที่ดำเนินการที่ 1.78 (95% CI: 1.08; 2.93) สำหรับความเข้มข้นของแอนติบอดีที่ไม่เพียงพอเมื่ออายุ 7 ขวบ สำหรับวัคซีนบาดทะยักที่มีความเข้มข้นของซีรัม PFHxS เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเมื่ออายุ 5 ปี การศึกษาติดตามผลโดยรวมสองกลุ่มที่เกิดจากเกาะแฟโรในปี 1997 - 2000 และ ปี 2007 - 2009 การลดลงอย่างมีนัยสำคัญของแอนติบอดีในซีรัมก่อนกระตุ้นต่อวัคซีนบาดทะยักเมื่ออายุ 5 ปี มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นในซีรัมที่เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเมื่อแรกเกิดพบการลดลงที่คล้ายกันสำหรับ PFOA แบบจำลองสมการโครงสร้างแสดงให้เห็นว่าการได้รับ PFAS เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าที่อายุ 7 ปี สัมพันธ์กับการสูญเสียความเข้มข้นของแอนติบอดีคือตีบที่ 13 ปี 10 - 30% สำหรับ PFAS ทั้งห้าชนิด การศึกษาในปัจจุบันได้ขยายผลการค้นพบก่อนหน้านี้เกี่ยวกับการตอบสนองของแอนติบอดีที่บกพร่องในกลุ่มนี้เมื่ออายุน้อยกว่าดังนั้นจึงเพิ่มการสนับสนุนแนวคิดที่ว่ามีการระบุการป้องกันการสัมผัส PFAS ที่แข็งแกร่งขึ้นอย่างมาก พบโรคหอบหืดในกลุ่มย่อยเล็ก ๆ ของโรคหัดคางทูมและหัดเยอรมัน (MMR) ในเด็กที่ไม่ได้รับการฉีดวัคซีน ความสัมพันธ์ถูกย้อนกลับในกลุ่มที่ได้รับการฉีดวัคซีน MMR แต่การเพิ่มขึ้นสองเท่าของซีรัม PFHxS เมื่ออายุ 5 ขวบมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดโรคหอบหืดที่ไม่ใช่โรคภูมิแพ้และโรคเรื้อรังที่เพิ่มขึ้นเมื่ออายุ 13 ปี แต่อาจเป็นผลการวิจัยโดยบังเอิญ อย่างไรก็ตาม ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างซีรัม PFHxS กับโรคหอบหืดหรือหายใจไม่ออกในการศึกษาแบบตัดขวางของเด็กอายุ 12 - 19 ปี ในสหรัฐอเมริกา (n = 1877) การศึกษาของแคนาดา (n = 1242) ของการได้รับ PFHxS และสารบ่งชี้ภูมิคุ้มกันจากเลือดจากสายสะดือ (IgE, IL-33, TSLP) รายงานว่าไม่มีความสัมพันธ์ที่สำคัญ การศึกษาตามกลุ่มการเกิดในอนาคตของผู้หญิง 1056

คนพบว่า การได้รับ PFOA PFDA PFDOA และ PFHxS ก่อนคลอดเพิ่มความเสี่ยงต่อการเป็นโรคผิวหนังภูมิแพ้ในเด็ก และในเด็กเพศหญิงในช่วง 24 เดือนแรกของเด็ก

การศึกษาบางชิ้นระบุว่า PFHxS และ PFAS บางชนิดอาจส่งผลกระทบต่อ การสืบพันธุ์ในมนุษย์ ทั้งการศึกษาทางระบาดวิทยาและในหลอดทดลองชี้ให้เห็นว่า Perfluoroalkyl acids อาจมีผลต่อการส่งสัญญาณของเซลล์รังไข่และการเจริญพันธุ์โดยรวม จากการศึกษาเมื่อเร็ว ๆ นี้ได้รวบรวมเลือดและของเหลวจากรูขุมขนจาก 36 คนที่ได้รับการทำเด็กหลอดแก้ว (In Vitro Fertilization) ในสหรัฐอเมริกา ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการนับรูขุมขนพื้นฐานมีความสัมพันธ์ในทางตรงกันข้ามกับความเข้มข้นของ PFHxS ในพลาสมาโดยระบุว่า PFAS เป็นสารประกอบที่น่าสนใจในบริบทของพยาธิวิทยาของรังไข่ ในกรณีศึกษาการควบคุมจากเดนมาร์กพบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่างระดับ PFAS ในซีรัม (PFDA และ PFNA) และการแท้งบุตรและความสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญกับ PFHxS พบว่าการปรับอัตราต่อรอง 1.53 (95% CI: 0.99, 2.38) ในขณะที่ไม่พบความสัมพันธ์ สำหรับ PFOA และ PFOS (n = 56 ราย (การแท้งบุตร) และการควบคุม 336 (การคลอด)) ในการศึกษาในกลุ่มกำเนิดจากแคนาดา ระหว่างปี 2008 - 2011 n = 1625 ความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของ PFOA และ PFHxS ในพลาสมาของเพศหญิงมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการอุจจาระที่ลดลงโดยวัดจากระยะเวลาในการตั้งครุฑที่ยาวนานขึ้นและอัตราการมีบุตรยากที่เพิ่มขึ้นในขณะที่ไม่มีนัยสำคัญ และพบการเชื่อมโยงสำหรับ PFOS

ในประชากรของสหรัฐอเมริกาในการสำรวจการตรวจสุขภาพและโภชนาการแห่งชาติ (National Health and Nutrition Examination Survey: NHANES) ในปี 2009 - 2010 (n = 1566) ความชุกของโรคกระดูกพรุนสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญในคอวโกลีในซีรัม PFHxS ที่สูงที่สุด และต่ำที่สุดที่ OR 13.2 (95% CI: 2.72-64.15) ยังพบ ORs ที่มีนัยสำคัญสำหรับ PFOA และ PFNA ในการศึกษากรณีควบคุม (n = 77 ราย และ 81 ส่วนควบคุม) ของความสัมพันธ์ระหว่างระดับซีรัมของสาร POPs บางชนิด และความเสี่ยงต่อมะเร็งเต้านมในเพศหญิง ในเกาะกรีนแลนด์เด็กพบความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญระหว่างความเสี่ยงมะเร็งเต้านมและ PFHxS

5.4 ความเป็นพิษของสารผสม และผลรวมของความหลากหลายของแรงกดดัน (Mixture toxicity and combined effects of multiple stressors)

จากการศึกษาจะพบว่าข้อมูลความเสี่ยงของสาร PFHxS มักจะถูกตรวจพบร่วมกับ PFAS อื่น ๆ (เช่น PFOS และ PFOA) ในตัวอย่างเลือดจากเด็กและอื่น ๆ ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงเส้นทางการสัมผัสที่หลากหลายและหลายเส้นทางของผลข้างเคียงโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับเด็กที่กำลังพัฒนา แต่ความรู้เกี่ยวกับความเป็นพิษของสารผสม PFAS ในสภาวะที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมที่ยังไม่แพร่หลาย แต่การศึกษาบางชิ้นได้ตรวจสอบผลของส่วนผสมของ PFAS ที่ตรวจพบบ่อยที่สุดในซีรัมของมนุษย์ พบว่ามีผลมากกว่าสารเติมแต่งสำหรับส่วนผสมของ PFHxS PFOS PFOA PFNA และ PFDA เมื่อทดสอบฤทธิ์ต่อต้านแอนโดรเจนในหลอดทดลองที่ความเข้มข้นที่สอดคล้องกับ 1 μM ของแต่ละองค์ประกอบ การผสมแบบ Binary ของ PFOA + ทั้ง PFNA, PFHxA PFOS หรือ PFHxS ที่ทดสอบการกระตุ้น PPAR-alpha ในหลอดทดลองทำให้เกิดเส้นโค้งการตอบสนองความเข้มข้นที่สอดคล้องอย่างใกล้ชิดกับเส้นโค้งที่คาดการณ์ไว้สำหรับการเพิ่มการตอบสนองและการเพิ่มความเข้มข้นที่ความเข้มข้นต่ำ (1-32 μM) ส่วนผสมของ 10 PFASs (รวม PFHxS) ในปริมาณที่สมดุล (ความเข้มข้นสุดท้ายของแต่ละ PFAS: 1.56-50 μM) ทำหน้าที่ในลักษณะเติมแต่งเมื่อทดสอบการเปลี่ยน PPAR-alpha จากแมวน้ำไบคาล (baikal seal) การศึกษาการทำงานของแต่ละสาร และสารผสมของ PFASs ($C_4 - C_{11}$) มีความสัมพันธ์ที่ชัดเจนในการตอบสนองต่อความเข้มข้นที่ไม่ใช่เชิงเดียวในเซลล์ตับของมนุษย์ ผลของการผสมแบบ Binary ทั้งสามของ PFAS หนึ่งรายการที่มีการรวมกันของ PFHxA / PFHxS แสดงให้เห็นว่าผลการทำงานร่วมกันเกิดขึ้นภายใต้ความเข้มข้นที่มีประสิทธิผลของ IC0 IC10 และ IC50 ในสารผสมในขณะที่ภายใต้ IC-20 ผลการทำงานร่วมกันเกิดขึ้นภายใต้ PFSA ในสัดส่วนที่สูงกว่าเท่านั้น

ในการศึกษาความเป็นพิษต่อพัฒนาการในหนูพบว่าเมื่อให้ผลต่อระดับ T4 ในซีรัมจุดสิ้นสุด antiandrogenic และน้ำหนักตัวในกลุ่มที่สัมผัสกับ PFHxS และการผสมการหยุดชะงักของต่อมไร้ท่อ (EDmix) มากกว่าที่พบใน PFHxS หรือ EDmix เพียงอย่างเดียว ซึ่งบ่งชี้ว่า PFHxS และ EDmix ทำให้เกิดผลกระทบซึ่งกันและกันในจุดสิ้นสุดที่หลากหลายแม้จะมีลักษณะการทำงานที่แตกต่างกัน

จากการศึกษาหมีขั้วโลกในกรีนแลนด์ตะวันออก (n = 10) พบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่าง PFCA's และ PFSA's กับการทำงานของเอนไซม์ตัวส่งสัญญาณประสาทและความหนาแน่นของตัวรับตัวส่งสัญญาณประสาท โดย PFSA's มีผลต่อสมองเฉลี่ย (C₄ - C₁₀) เท่ากับ 28.8 ng/g ww โดย PFOS คิดเป็น 91% (PFHxS เฉลี่ย 1.1 ng/g ww ~ 3.81%) ทั้ง PFCA's และ PFSA's แสดงความสัมพันธ์เชิงลบกับความหนาแน่นของตัวรับ muscarine acetylcholinesterase ระบบ cholinergic ได้รับผลกระทบเช่นเดียวกับในการศึกษาหนู นอกจากนี้ความเข้มข้น steroid hormones were determined in eight brain regions ไม่สามารถอธิบายระดับได้ด้วยความเข้มข้นในซีรัม การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แสดงให้เห็นความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างผลรวมของ PFCA's และผลรวม PFSA's และ 17-alpha- hydroxypregnenolone (OH-PRE) และสเตียรอยด์หลายชนิดมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับผลรวมของ PFCA's ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของ PFAS ที่สะสมทางชีวภาพเกิดขึ้นพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของฮอร์โมนสเตียรอยด์ในสมอง การศึกษาเหล่านี้บ่งชี้ว่าความเข้มข้นของ PFAS บางชนิดในหมีขั้วโลกจากกรีนแลนด์ตะวันออก เกินขีดจำกัดสำหรับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและฮอร์โมน

การศึกษาล่าสุดเกี่ยวกับหมีขั้วโลกจากเมืองสفالบาร์ (Svalbard) ในประเทศนอร์เวย์ พบความสัมพันธ์เชิงลบระหว่างระดับ Σ₆PFASs (รวมถึง PFHxS) กับฮอร์โมนไทรอยด์บางชนิดและระบุว่า PFAS มีส่วนช่วยในการเปลี่ยนแปลงสถานะสมดุลของฮอร์โมนไทรอยด์ในหมีขั้วโลกโดยการเปลี่ยนระดับของ FreeT3 สำหรับสารที่ศึกษาทั้งหมด (PCB, สารกำจัดศัตรูพืชที่มีคลอรีน และ ΣPFAS) ระดับ T3 มีความสัมพันธ์เชิงลบกับสารมลพิษที่บ่งชี้ว่า T3 มีความไวมากกว่า THs อื่น ๆ ในการศึกษาหมีขั้วโลกและลูกจากเมืองสفالบาร์ พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในระดับ PFHxS ระหว่างปี 1998 - 2008 โดยมีระดับที่สูงกว่าระดับที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบต่อสุขภาพในมนุษย์รวมถึงผลกระทบต่อระบบประสาทและการเปลี่ยนแปลงของระดับคอเลสเตอรอลในเลือด

มีหลักฐานจากการศึกษาทดลองและข้อบ่งชี้จากการศึกษาทางระบาดวิทยาในมนุษย์พบว่า PFHxS อาจส่งผลต่อการเผาผลาญไขมัน โดยมีรายงานว่าอาหารและสถานะการเผาผลาญเป็นปัจจัยหลักที่กำหนดปริมาณ PFAS ในหมีขั้วโลกเพศเมียจากเมืองสفالบาร์ และปัจจัยต่าง ๆ เช่นการอดอาหารส่งผลต่อระดับ PFHxS ที่สะสมโดยหมีขั้วโลกเพศเมีย ระดับของ PFHxS มีความสัมพันธ์เชิงลบอย่างมีนัยสำคัญกับยูเรีย: อัตราส่วนของครีเอตินที่บ่งชี้สถานะการอดอาหาร PFAS บางตัว (Σ₆PFCA ที่มีโซ่คาร์บอน 8 ถึง 13 และ Σ₂PFSA ที่มีคาร์บอน 6 และ 8 ตัว) มีส่วนทำให้เกิดผลกระทบหลายอย่างที่พบในหมีขั้วโลกจากเมืองสفالบาร์ และในการศึกษาล่าสุดแสดงให้เห็นว่าการสัมผัส PFAS เกี่ยวข้องกับตัวบ่งชี้ทางชีวภาพของการเผาผลาญพลังงาน (ยีนที่เกี่ยวข้องกับไขมันและคอเลสเตอรอลในพลาสมา HDL และไตรกลีเซอไรด์) ความสัมพันธ์ระหว่าง PFASs กับคอเลสเตอรอลและ HDL มีความชัดเจนมากขึ้นเมื่อรวมกับความหนาแน่นและความหนาแน่นของน้ำแข็งในทะเลที่ลดลงซึ่งบ่งชี้ว่าการลดลงของน้ำแข็งในทะเลและ PFASs (และสารประกอบออร์กาโนฮาโลเจนอื่น ๆ) มีผลในทางลบต่อหมีขั้วโลก

นักล่าอันดับต้น ๆ ของอาร์กติก เช่น หมีขั้วโลกเป็นหนึ่งในสายพันธุ์ที่ได้รับสารมลพิษมากที่สุดในโลก และอยู่ในช่วงเวลาที่ต้องการพลังงานตามฤดูกาลเนื่องจากความแปรปรวนของอุณหภูมิความร้อนของอาหารการสืบพันธุ์และการจำศีล เป็นที่ทราบกันดีว่า PFAS บางชนิดรวมถึง PFHxS จะสะสมทางชีวภาพในช่องที่อุดมด้วยโปรตีน (ไขมันและเลือด ฯลฯ) แต่ไม่ชัดเจนว่าสภาพร่างกาย (เช่นความอดอยาก) ส่งผลต่อความเข้มข้นของเนื้อเยื่อและการกระจายตัวของเนื้อเยื่ออย่างไร PFASs และการเปลี่ยนแปลงที่เป็นไปได้ของความเป็นพิษ ผลกระทบของ Cocktail เนื่องจาก

ความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของสาร POPs ในการจัดเก็บไขมันรวมถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจะส่งผลต่อช่วงเวลาเหล่านี้ PFHxS มีความสัมพันธ์กับโปรตีนสูง และไม่อยู่ภายใต้การเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพ ในสุนัขจิ้งจอกอาร์กติก เนื้อเยื่อไขมันเป็นเนื้อเยื่อเดียวที่ได้รับผลกระทบจากสภาพร่างกายโดยสุนัขจิ้งจอกแบบลินจะมีความเข้มข้นของ PFHxS สูงกว่าสุนัขจิ้งจอกไขมันถึงสามเท่า ความแปรปรวนตามฤดูกาลอย่างมากของปริมาณไขมันในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในแถบอาร์กติกอาจส่งผลต่อความเข้มข้นของเนื้อเยื่อของ PFAS บางชนิดรวมถึง PFHxS และเพิ่มผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างฤดูจำศีล ผลกระทบที่เกิดขึ้นไม่เพียงแต่เกี่ยวข้องกับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของ PFAS เท่านั้น แต่ยังรวมถึงความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของสาร POPs อื่น ๆ ในอวัยวะเป้าหมายในระหว่างที่สภาพร่างกายอ่อนแอลง ซึ่งอาจเพิ่มความเปราะบางต่อไป

ขีดจำกัดในการสะสมสำหรับ PFAS ในน้ำดื่มและน้ำใต้ดินได้ถูกกำหนดไว้ในสวีเดนและเดนมาร์ก โดยในสวีเดนจำกัดความเข้มข้น 90 ng/l สำหรับ PFAS11 (PFBS, PFHxS, PFOS, 6: 2 FTS, PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA) แนวทางเดียวกันนี้ ถูกบังคับใช้ในเดนมาร์ก สหรัฐอเมริกา และเยอรมนี ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับเนื้อหาของ PFOS และ PFOA ในน้ำดื่ม นอกจากนี้ในข้อเสนอสำหรับ European Drinking Water Directive มีการเสนอค่าจำกัดสำหรับกลุ่ม PFAS ค่า 0.1 µg / L สำหรับ PFAS แต่ละตัวและ 0.5 µg / L สำหรับ PFAS ทั้งหมดตามที่แนะนำ

(ที่มา: UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1 Report of the Persistent Organic Pollutants Review Committee on the work of its fourteenth meeting - Risk profile on perfluorohexane sulfonic acid (PFHxS), its salts and PFHxS-related compounds)

6. การจัดการกากของเสีย

จากแหล่งที่มาของการปลดปล่อยสาร PFHxS พบสูงที่สุดจากการใช้งาน และการกำจัดผลิตภัณฑ์ที่ใช้สาร PFHxS ก่อนหน้านี้ คณะกรรมการพิจารณาทบทวนสารมลพิษที่ตกค้างยาวนาน (POPRC) ได้พัฒนาชุดคำแนะนำเพื่อจัดการแนวโน้มของของเสียจาก PFOS การตัดสินใจ POPRC-6/2 สรุปชุดมาตรการลดความเสี่ยงในกรอบการดำเนินงานในระยะสั้น ระยะกลาง และระยะยาว เนื่องจากรูปแบบการใช้งานของสาร PFHxS, its salts and PFHxS-related compounds มีความคล้ายคลึงกับสาร PFOS คำแนะนำเหล่านี้ส่วนใหญ่จึงใช้ได้กับสาร PFHxS รวมถึงการใช้เทคนิคที่ดีที่สุด และแนวปฏิบัติด้านสิ่งแวดล้อมที่ดีที่สุด เทคโนโลยีการทำลายของเสียที่มีสาร PFOS ในการผลิตในปัจจุบัน และการใช้ PFOS ในอุตสาหกรรม และไม่ควรมีการฝังกลบของเสียเหล่านี้ เว้นแต่จะได้รับการบำบัดน้ำชะขยะที่มีการปนเปื้อนของสาร PFOS อย่างเหมาะสม เพื่อให้แน่ใจว่ามีการจัดเก็บที่ปลอดภัยเมื่อถูกทำลาย เทคโนโลยีไม่พร้อมใช้งานในการเริ่มการตรวจสอบอย่างเร่งด่วนในหลุมฝังกลบขยะที่มีของเสียจากผู้ผลิต PFOS หรือจากผู้ใช้ PFOS ในอุตสาหกรรม (กระดาษ พรม สิ่งทอ การชุบโครเมียมและอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่ใช้ PFOS น้ำดื่มจากอ่างเก็บน้ำและบ่อน้ำในบริเวณใกล้เคียง ของหลุมฝังกลบเหล่านี้และรอบ ๆ การผลิต PFOS และพื้นที่ผู้ใช้ควรได้รับการวิเคราะห์" ซึ่งคำแนะนำนี้ ได้รับการพัฒนาเพื่อลดความเสี่ยงจากการใช้งาน สินค้าคงคลังที่มีอยู่ การรีไซเคิล ผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภค ในหลุมฝังกลบของเทศบาล และการแพร่กระจายออกจากสถานที่ที่มีการปนเปื้อน

(ที่มา: UNEP/POPS/PORC.15/7/Add.1 Report of the Persistent Organic Pollutants Review Committee on the work of its fifteenth meeting)

7. ข้อเสนอแนะและกลไกทางกฎหมายในต่างประเทศ

สหภาพยุโรป ในปี 2017 สาร PFHxS and its salts ถูกระบุภายในสหภาพยุโรปว่าเป็นสารที่มีความน่ากังวลสูง (Substances of Very High Concern: SVHC) และถูกเพิ่มในบัญชีรายการสารของ REACH เนื่องจากมีคุณสมบัติตกค้างยาวนานและการสะสมทางชีวภาพ สาร PFHxS เป็นไปตามเกณฑ์สำหรับสารที่มีตกค้างยาวนานสูง และสะสมทางชีวภาพสูง (very Persistent and very Bioaccumulative: vPvB) ซึ่งหมายความว่า ผู้ผลิต ผู้นำเข้า และห่วงโซ่อุปทาน ต้องลดการปลดปล่อยและการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ ตลอดวงจรชีวิตของสาร โดยไม่อยู่ในข้อบังคับของการจัดการความเสี่ยง รายชื่อสารที่ถูกพิจารณาผู้ผลิตจะต้องแจ้งข้อมูลเกี่ยวกับการใช้สาร PFHxS ที่สูงกว่าความเข้มข้น 0.1% ตามมาตรา 33 ของ REACH จากการติดตามผล วันที่ 12 เมษายน 2019 ประเทศนอร์เวย์ได้ยื่นข้อเสนอเพื่อแก้ไขภาคผนวก XVII ของ REACH เพื่อจำกัด การผลิต การใช้ และการวางจำหน่ายในตลาดของ PFHxS its salts and PFHxS related compounds อย่างไรก็ตามยังไม่มีมาตรการหรือการตัดสินใจสำหรับ PFHxS ทั้งในสหภาพยุโรปหรือทั่วโลก

ประเทศแคนาดา ได้กำหนดสารประกอบที่เกี่ยวข้องกับ PFHxS บางชนิด อยู่ในรายการสารเสพติดในประเทศของแคนาดา (DSL) ซึ่งเป็นสินค้าคงคลังของสารที่ผลิตหรือได้รับการผลิตนำเข้าหรือใช้ในประเทศในระดับการค้า และบุคคลใดก็ตามที่ตั้งใจจะนำเข้าหรือผลิตสารในแคนาดาที่ไม่ได้อยู่ในรายชื่อของ DSL (เช่น PFHxS, PFHxSF หรือสารประกอบที่เกี่ยวข้องกับ PFHxS ที่ยังไม่ได้อยู่ใน DSL) จะต้องยื่นการแจ้งเตือนที่จำเป็นภายใต้ข้อบังคับการแจ้งเตือนสารใหม่ กฎระเบียบเหล่านี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีการนำสารใหม่เข้าสู่ตลาดของแคนาดาก่อนที่จะได้รับการประเมินทางนิเวศวิทยาและสุขภาพของมนุษย์ อาจมีการกำหนดมาตรการการจัดการภายใต้กระบวนการนี้เพื่อลดความเสี่ยงใด ๆ ต่อสิ่งแวดล้อมหรือสุขภาพของมนุษย์ และได้กำหนดมาตรฐานของสาร PFHxS สำหรับน้ำดื่มไว้ที่ 0.6 µg /l

ประเทศออสเตรเลีย มีแบบแผนการแจ้งและประเมินสารเคมีอุตสาหกรรมแห่งชาติ(National Industrial Chemicals Notification & Assessment Scheme: NICNAS) ในการจัดทำแผนปฏิบัติการสำหรับการประเมินและการจัดการสารเคมีซึ่งอาจลดลงของ PFCAs, PFSA's และสารเคมีที่คล้ายกัน โดยสมมติฐานหลักที่ระบุไว้ในแผนปฏิบัติการนี้คือ สารเคมีที่มีห่วงโซ่ perfluorinated ที่สั้นสุดโดยกลุ่ม sulfonyl จะย่อยสลายเป็น perfluoroalkyl sulfonate (ที่มีความยาวโซ่เดียวกัน)

ประเทศนอร์เวย์ ได้เพิ่มรายชื่อสาร PFHxS, its salts and PFHxS-related compounds ในบัญชีรายชื่อสารสำคัญระดับประเทศ โดยมีเป้าหมายระดับชาติที่จะยุติการใช้งานภายในปี 2020

ประเทศสวีเดน ได้กำหนดให้มีการแจ้งข้อมูลเกี่ยวกับ PFAS รวมถึง PFHxS โดยรายงานไปยังการขึ้นทะเบียนผลิตภัณฑ์ที่หน่วยงานเคมีภัณฑ์ของสวีเดน ซึ่งเริ่มเป็นครั้งแรกในเดือนกุมภาพันธ์ 2020 และจะมีผลโดยไม่คำนึงถึงความเข้มข้นของสารแม้ว่าจะไม่จำเป็นต้องระบุความเข้มข้นก็ตาม หน่วยงานเคมีภัณฑ์แห่งสวีเดน ได้เผยแพร่กลยุทธ์ในการลดการใช้ PFAS ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมควรลดและยุติการใช้งานในที่สุด การดำเนินการเพื่อบรรลุจุดมุ่งหมายนี้รวมถึงการจัดลำดับความสำคัญของการดำเนินมาตรการเพื่อการใช้งานที่อาจส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมโดยตรงอย่างมีนัยสำคัญ กลยุทธ์ที่นำเสนอเกี่ยวกับวิธีการใช้โพลีเมอร์ที่มี PFASs ในสวีเดน และสรุปได้ว่าจำเป็นต้องมีกฎหมายระดับชาติที่ควบคุมการใช้โพลีเมอร์ที่มีสาร fluorinated สูง และ สำนักงานอาหารแห่งชาติสวีเดน ได้แนะนำขีดจำกัด 0.09 µg/l สำหรับน้ำดื่มโดยพิจารณาจากปริมาณ PFAS 11 ชนิด ได้แก่ (1) PFBS (2) PFHxS (3) PFOS (4) 6: 2 FTSA (5) PFBA (6) PFPeA (7) PFHxA (8) PFHpA (9) PFOA (10) PFNA และ (12) PFDA)

ประเทศเดนมาร์ก ในปี 2014 สำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมของประเทศ ได้เผยแพร่การศึกษาการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินที่เกี่ยวข้องแหล่งที่มาของสาร perfluoroalkyl รวมถึง สาร PFHxS and PFHxS-related compounds จากผลการวิจัยของการปนเปื้อนน้ำใต้ดิน และนำไปสู่การกำหนดค่ามาตรฐานในปริมาณน้ำดื่มสำหรับสารกลุ่ม PFASs 12 ตัว ได้แก่ (1) Perfluorobutane sulfonic acid: PFBS (2) PFHxS (3) PFOS (4) Perfluorooctanesulfonamide: PFOSA (5) 6:2-fluorotelomer sulfonic acid (6:2 FTS) (6) Perfluorobutanoic acid: PFBA (7) Perfluoropentanoic acid: PFPeA (8) Perfluorohexanoic acid: PFHxA (9) Perfluoroheptanoic acid: PFHpA (10) PFOA (11) Perfluorononanoic acid: PFNA และ (12) Perfluorodecanoic acid: PFDA โดยจำกัดค่าในน้ำดื่ม 0.1 µg/L และเป็นเกณฑ์รวมสำหรับการมี PFAS ทั้ง 12 ชนิด และใช้เกณฑ์รวมกับน้ำใต้ดิน

สหรัฐอเมริกา มีการห้ามใช้สารเคมีในกลุ่มใหม่นี้โดยไม่ได้รับการประเมินล่วงหน้าเกี่ยวกับการใช้งานของ United States Environmental Protection Agency (US EPA) ของสหรัฐอเมริกาเผยแพร่แผนปฏิบัติการเกี่ยวกับ PFAS แบบโซ่ยาว (นิยามว่า PFSA > C₅ และ perfluorocarboxylic acids (PFCAs) > C₇) รวมถึง PFHxS its salt และสารตั้งต้นในปี 2009 สารเคมี PFAS โซ่ยาวทั้งหมดถูกระบุว่า มีแนวโน้มที่จะคงอยู่สะสมทางชีวภาพและเป็นพิษ EPA ของสหรัฐอเมริกาเผยแพร่แผนปฏิบัติการ PFAS ที่กว้างขึ้นในเดือนกุมภาพันธ์ 2019 ซึ่งระบุขั้นตอนเพิ่มเติมที่ EPA กำลังดำเนินการเพื่อทำความเข้าใจและจัดการ PFAS ให้ดีขึ้นรวมถึง PFHxS เมื่อเร็ว ๆ นี้รัฐวอชิงตันได้ประกาศใช้ร่างพระราชบัญญัติห้ามการใช้สารเคมี perfluorinated ในบรรจุภัณฑ์อาหาร รวมทั้ง จำกัดการใช้ในโพลีเมอร์และอุปกรณ์ป้องกันภัยส่วนบุคคล ในหลายรัฐของสหรัฐอเมริกาได้ประกาศใช้ข้อจำกัด ที่รวมถึง PFHxS สำหรับน้ำดื่ม ในรัฐแมสซาชูเซตส์ของโดยแนะนำขีดจำกัด 0.07 µg/L สำหรับ PFOA PFOS PFHxS PFNA และ PFHpA รวมกันหรือแยกกันในน้ำดื่ม (Mass. Gov) กระทรวงสาธารณสุข รัฐมินนิโซตาแนะนำค่าคำแนะนำที่ 0.027 µg/L สำหรับ PFHxS (MDH) และรัฐเวอร์มอนต์แนะนำให้จำกัดปริมาณในน้ำดื่มไว้ที่ 0.02 µg/L สำหรับ PFOA PFOS PFHxS PFHpA และ PFNA รวมกัน (Health Vermont) รัฐนิวแฮมป์เชียร์ จำกัดปริมาณน้ำดื่มที่เสนอไว้ที่ 0.018 ug /L และรัฐมิชิแกนมีระดับการคัดกรองน้ำดื่มสำหรับ PFHxS ที่ 0.084 ug /L ทั้งนี้ EPA ของสหรัฐอเมริกาใช้การผสมผสานระหว่างแนวทางด้านกฎระเบียบ และความสมัครใจ ซึ่งรวมถึงกฎการใช้งานใหม่ที่สำคัญและโครงการ PFOA Stewardship ประจำปี 2010/2015 (OECD, 2015) โดยสมัครใจ EPA ของสหรัฐอเมริกาคำหนดระดับที่ปรึกษาด้านสุขภาพสำหรับ PFOA และ PFOS ในน้ำดื่ม นอกจากนี้การใช้หน่วยงานที่กำหนดโดยกฎการตรวจสอบสารปนเปื้อนที่ไม่ได้รับการควบคุมของพระราชบัญญัติน้ำดื่มปลอดภัย EPA ของสหรัฐอเมริกาได้ตรวจสอบสารกลุ่ม PFAS 6 รายการในน้ำดื่มสำเร็จรูปรวมถึง PFHxS เพื่อทำความเข้าใจการเกิดขึ้นในระบบน้ำดื่มของสหรัฐอเมริกา และข้อมูลเหล่านี้ต้องเปิดเผยข้อมูลต่อสาธารณะ

สาธารณรัฐเกาหลี ได้รวมสาร PFHxS กับสาร PFOS และสาร PFOA เป็นพารามิเตอร์การตรวจสอบน้ำดื่มเบื้องต้น ในปี 2018 โดยกำหนดค่าจำกัดเบื้องต้นสำหรับน้ำดื่มของสาร PFHxS = 0.48 µg/L สาร PFOS และสาร PFOA = 0.07 µg/L (ที่มา: UNEP/POPS/PORC.15/7Add.1 Report of the Persistent Organic Pollutants Review Committee on the work of its fifteenth meeting)

8. ข้อมูลเกี่ยวกับทางเลือกอื่น ๆ (ผลิตภัณฑ์และกระบวนการ)

ปัจจุบันยังไม่มีข้อมูลที่เผยแพร่เกี่ยวกับลักษณะ คุณสมบัติ และประสิทธิภาพของทางเลือกในการใช้สาร PFASs ในการใช้งานส่วนใหญ่ เนื่องจากข้อมูลมักถูกปกปิดเป็นความลับทางการค้า แม้จะมีความพยายามหลายครั้ง แต่ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องก็ไม่ได้เปิดเผยข้อมูลเกี่ยวกับการผลิตและการใช้ PFHxS อย่างไรก็ตาม ยังมีทางเลือกในการใช้งานอื่น ๆ ที่ได้รับการรับรองจากภาคอุตสาหกรรมแล้ว ดังนั้น จึงควรเป็นทางเลือกที่นำมาใช้ ซึ่งการประเมินทางเลือกสำหรับ PFHxS จึงขึ้นอยู่กับการใช้งานทั่วไป ที่ระบุใน Risk Profile ของสาร และพิจารณาการทำงานของ PFHxS ในการใช้งาน ว่ามีความใกล้เคียงกับสาร PFOS หรือ PFOA (ในบางกรณี)

8.1 สารทางเลือกสำหรับการใช้งานเฉพาะด้าน (Application-specific alternative substances)

สารทดแทนสำหรับ PFHxS, its salts and PFHxS-related compounds ได้แก่ สารเคมีและเทคนิคทางเลือก รวมถึง ทางเลือกอื่นที่ไม่ใช่สารเคมี เช่น การออกแบบหรือการเปลี่ยนแปลงผลิตภัณฑ์ และต้องแน่ใจว่า การทดแทนนี้ จะได้รับการหลีกเลี่ยงจากสารตกค้าง และสารพิษอื่น ๆ ซึ่งการทดแทนที่ไม่เหมาะสม ได้ถูกระบุว่า เมื่อสารพิษ ถูกนำมาทดแทนด้วยสารเคมีชนิดอื่น ที่พิสูจน์ในภายหลังว่าไม่เหมาะสม เนื่องจากสารดังกล่าวเป็นสารพิษตกค้างยาวนาน และสะสมในสิ่งมีชีวิต (Persistent, Bioaccumulative and Toxic: PBT) และข้อกังวลอื่น ๆ ดังนั้น การลดความเป็นไปได้ของการทดแทนที่ไม่เหมาะสมสำหรับสาร PFHxS และสารประกอบที่เกี่ยวข้อง โดยใช้สารที่คล้ายคลึงกับสารกลุ่ม perfluoroalkyl acids (PFAAs) และสารประกอบที่เกี่ยวข้อง เป็นสิ่งที่ท้าทาย เนื่องจากเป็นสารเคมีกลุ่มใหญ่ ทำให้การใช้สารทดแทนจึงมีจำกัด ความท้าทายในการจัดการกับสารเคมีกลุ่มใหญ่ โดยองค์การจัดการสารเคมีแห่งสหภาพยุโรป (European Chemicals Agency: ECHA) ได้เสนอวิธีการจัดกลุ่ม ซึ่งเป็นวิธีที่สำคัญในการลดโอกาส การใช้สารทดแทนที่ไม่เหมาะสม เช่นเดียวกับ หน่วยงานระดับชาติในหลายประเทศ ในกรณีของ PFAAs สายโซ่ยาว (long-chain PFAAs, their salts and related compounds) สามารถแทนที่ได้โดย PFAAs สายสั้น (short-chain PFAAs, their salts and related compounds) (short-chain PFAAs defined as C₂-C₇ perfluorocarboxylic acids (PFCAs) and C₃-C₅ PFASs) และสารทางเลือกอื่น ๆ ที่มีฟลูออรีนเป็นส่วนประกอบ ซึ่งถือว่าปลอดภัยสำหรับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรม แม้ว่า PFAAs สายโซ่สั้น โดยทั่วไปจะสะสมทางชีวภาพได้น้อยกว่า แต่ยังคงมีการตกค้าง ความสามารถในการละลายน้ำได้ดี และมีความคล่องตัวสูง ซึ่งทำให้ยากต่อการกักเก็บ และควบคุมการแพร่กระจายของสารเหล่านี้ภายในสิ่งแวดล้อมมากกว่า PFAAs สายโซ่ยาว

ก่อนหน้านี้ คณะกรรมการพิจารณาทบทวนสารมลพิษที่ตกค้างยาวนาน (Persistent Organic Pollutants Review Committee: POPRC) ได้กล่าวถึงปัญหาของสารทดแทน PFAS ที่ไม่เหมาะสมของสาร PFOA และ PFOS ในคำแนะนำสำหรับทางเลือกอื่นสำหรับ PFOS และคำแนะนำสำหรับการขึ้นบัญชี PFOA ภายใต้อนุสัญญาสตอกโฮล์มฯ ที่ประชุมรัฐภาคีอนุสัญญาสตอกโฮล์มฯ สมัยที่ 9 มีมติตัดสินใจ เนื่องจาก PFAS สายสั้นเป็นสารเคมีกลุ่มใหญ่ที่มีคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่แตกต่างกัน และเนื่องจากคณะกรรมการ POPRC ไม่ได้ตรวจสอบข้อมูลจากกลุ่มใหญ่นี้ การอ้างอิงเฉพาะเพื่อหลีกเลี่ยง PFAS สายโซ่สั้น (โพลีดีบุกเพลิง) จึงไม่เกิดขึ้น และแทนที่ด้วยถ้อยคำต่อไปนี้: ส่งเสริมให้ภาคีและประเทศอื่น ๆ ใช้ทางเลือกอื่นแทน PFOA its salts และสารประกอบที่เกี่ยวข้องกับ PFOA หากเป็นไปได้และมีประสิทธิภาพในขณะที่พิจารณาว่าโพลีดีบุกเพลิงที่ใช้ฟลูออรีนอาจมีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมสุขภาพของมนุษย์ และผลกระทบต่อเศรษฐกิจและสังคมอันเนื่องมาจากความคงทนและการเคลื่อนย้าย และ PFAS แบบสายโซ่สั้นทางเลือกแสดงความสามารถในการละลายน้ำที่สูงกว่าและการเคลื่อนย้ายสิ่งแวดล้อมที่เพิ่มขึ้นมากกว่าสายโซ่ยาวของ PFASs เพื่อหลีกเลี่ยงการแทนที่ PFAA อื่น ๆ ที่ไม่เหมาะสมต่อไปนี้จะเน้นไปที่ทางเลือกทางเคมีที่ไม่ใช่ฟลูออไรด์ และเทคนิคทางเลือกที่ไม่ใช่สารเคมีเป็นหลัก

ตารางด้านล่าง จะแสดงภาพรวม โดยระบุหมวดหมู่การใช้งาน และทางเลือกอื่น ๆ สำหรับ PFHxS ตามด้วย ข้อมูลการใช้งาน และทางเลือก ในกรณีที่จุดสำคัญอยู่ที่แนวทางทางเคมีและทางเทคนิคที่ไม่ใช่ฟลูออไรด์ (ทางเลือกที่มี ฟลูออรีนจะระบุเฉพาะสำหรับการใช้งานที่ทางเลือกทางเคมีที่ไม่ใช่ฟลูออไรด์และเทคนิคทางเลือกยังไม่ได้รับการพิสูจน์ ว่าสามารถใช้ได้กับทุกการใช้งานในหมวดหมู่ผู้ใช้)

ภาพรวมของการใช้สารทางเลือก (Overview of alternatives)

การใช้งาน	สารทางเลือก	ประเภทสารทางเลือก
1. โฟมดับเพลิง (Fire-fighting foam)	มี	สารเคมีทางเลือกประเภทที่ไม่ใช่ฟลูออรีน และฟลูออรีน
2. การชุบโลหะ (Metal plating)	มี	สารเคมีทางเลือก (ไม่ใช่ฟลูออรีน และ ฟลูออรีน) และการแก้ไขทางเทคนิค
3. สิ่งทอ (Textiles)	มี	สารเคมีทางเลือก(ไม่ใช่ฟลูออรีน และ ฟลูออรีน) และการแก้ไขทางเทคนิค
4. สารขัดเงา และสารทำความสะอาด/ซักล้าง (Polishing, cleaning- and washing agents)	มี	สารเคมีทางเลือกประเภทที่ไม่ใช่ฟลูออรีน
5. สารเคลือบผิววัสดุ (Coating, impregnation/ proofing)	มี	สารเคมีทางเลือกประเภทที่ไม่ใช่ฟลูออรีน
6. การผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และเซมิคอนดักเตอร์ (Electronic and semiconductors)	มี	สารเคมีทางเลือกประเภทที่ไม่ใช่ฟลูออรีน และฟลูออรีน

8.1.1 โฟมดับเพลิงประเภทฟลูออรีน (Fluorinated fire-fighting foams)

โฟมดับเพลิงที่มีฟลูออรีน รวมถึง ประเภทโฟมสร้างฟิล์มน้ำ (Aqueous film-forming foams: AFFF) เป็น โฟมที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการป้องกันของเหลวไวไฟที่มีอันตรายสูง หรือของแข็งติดไฟออกจากอากาศที่มีออกซิเจน สูง ฟิล์มน้ำ ซึ่งอยู่ระหว่างเชื้อเพลิงและโฟม จะทำให้พื้นผิวของเชื้อเพลิงเย็นลง ทำหน้าที่เป็นวัสดุป้องกันไอน้ำ และรองรับการแพร่กระจายของโฟมบนเชื้อเพลิง โดยทั่วไปโฟมดับเพลิงประเภท AFFFs ถูกสร้างขึ้นโดยการรวมสารลด แรงตึงผิวของไฮโดรคาร์บอนสังเคราะห์กับสารลดแรงตึงผิวที่มีฟลูออรีน และใช้เป็นสูตรโฟมดับเพลิง Class B สำหรับดับไฟเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนเหลว โฟมฟลูออรีนในประเภทนี้เรียกว่า โฟมฟลูออโรโปรตีน (FP) หรือโฟมฟลูออโรโปรตีนที่สร้างฟิล์ม (FFFP) โฟมดับเพลิง Class B ที่ปราศจากสารฟลูออรีน (F3) มีพื้นฐานมาจากส่วนผสมที่กลุ่มเดียวกับสารลดแรงตึงผิวไฮโดรคาร์บอน

สารเพอร์ฟลูออไรด์ (เช่น PFOS และ PFHxS) ที่ใช้ในโฟมดับเพลิงประเภท AFFF ได้รับการผลิตอย่างจริงจัง โดยใช้ ECF (น้ำที่อยู่ภายนอก) โดยใช้ไฮโดรเจนฟลูออไรด์เป็นวัตถุดิบควบคู่ไปกับวัสดุอินทรีย์ (Buck et al., 2011) การผลิตสารฟลูออรีน ECF อาจผลิตได้ทั้งแบบแยกแขนง และแบบเส้นตรง รวมทั้งผลิตภัณฑ์ที่มีความยาวโซ่ต่างกัน ในผลิตภัณฑ์ PFOS อาจมี PFHxS 1 - 10% เว้นแต่จะถูกทำความสะอาด และถูกนำออกไปอย่างไม่ตั้งใจของ PFHxS การเลิกใช้ AFFF ที่มี PFOS อย่างสมบูรณ์จะช่วยลดการปลดปล่อยสาร PFHxS และสารประกอบที่เกี่ยวข้องกับ PFHxS สู่อากาศ

การตรวจพบสาร PFHxS และสารประกอบที่เกี่ยวข้องกับ PFHxS ใน AFFF ยังพบในดินและน้ำใต้ดินที่ได้รับผลกระทบจากกิจกรรมการฝึกอบรมที่ใช้ AFFF มากที่สุด เป็นผลมาจากการใช้งาน ของโฟมที่มีส่วนผสมของ PFOS ที่มี PFHxS ในปริมาณที่ไม่ได้ตั้งใจ อย่างไรก็ตาม AFFF ที่มี PFHxS เป็นสาร ประกอบเพอร์ฟลูออไรด์ ที่ถูกใช้ในอดีต เนื่องจากอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานของ AFFF 10 – 20 ปี ความเข้มข้น สดักสำหรับ AFFF อาจยังมี PFHxS อยู่ นอกจากนี้ AFFF บางส่วนที่ผลิต ในปี 2015 ในประเทศจีน มีการใช้ PFHxS แทน PFOS

จากข้อมูลของ Eurofeu (European Committee of the Manufacturers of Fire Protection Equipment and Fire Fighting Vehicles) อุตสาหกรรมโฟมดับเพลิงในยุโรปและอเมริกาเหนือได้ดำเนินโครงการ EPA Stewardship ของสหรัฐอเมริกาอย่างเต็มที่ โดยการหยุดผลิต AFFF ที่ใช้ C₈ ทั้งหมด แม้ว่าจะมีคลังคงค้างอยู่ สามารถบ่งชี้ได้ว่า โฟมฟลูออรีนที่ผลิตจนถึงปี 2015 อาจมีสาร C₈ perfluorinated และหลังจากนั้น นโยบายการใช้ ‘C₆ Pure’ ได้ถูกนำมาใช้ ซึ่ง โฟม ‘C₆ Pure’ มีสารเรืองแสง ที่ผลิตโดยวิธี telomerisation ดังนั้นจึงไม่ควรมี PFHxS

ทางเลือกอื่นสำหรับ PFHxS ในโฟมดับเพลิง Class B

แบ่งเป็น 2 ทางเลือกหลัก ให้พิจารณา ดังนี้

1) ทางเลือกที่ปราศจากฟลูออรีน

ผู้ผลิตโฟมดับเพลิงหลายราย ให้โฟมที่ปราศจากฟลูออรีนซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน Class B การรับรองประสิทธิภาพการดับเพลิง แต่มีข้อยกเว้นเพียงประการเดียวคือ U.S. Mil Spec (MIL-F-24385) ที่ไม่เพียงแต่เกี่ยวข้องกับมาตรฐานประสิทธิภาพ แต่ยังระบุถึงการรวมสารเคมีสังเคราะห์จากฟลูออรีน (fluorochemicals) อย่างไรก็ตาม กระทรวงทหารเรือสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นผู้ดูแล Mil-Spec ได้ใช้เวลาหลายปีในการพิจารณาเปลี่ยนมาตรฐาน Mil-Spec ให้อิงตามประสิทธิภาพมากกว่าการอ้างอิงเนื้อหาทางเคมีเฉพาะ และคุณสมบัติ ในเดือนตุลาคม ปี 2018 วุฒิสภาสหรัฐอเมริกาได้อนุมัติการอนุญาตอีกครั้งเป็นเวลา 5 ปี สำหรับองค์การบริหารการบินแห่งชาติ (Federal Aviation Administration - FAA) ซึ่งเปลี่ยนมาตรฐานการปฏิบัติงานสำหรับโฟมดับเพลิง เพื่ออนุญาตให้ใช้โฟมที่ปราศจากฟลูออรีนในสนามบินพลเรือน

ปัจจุบันมีการใช้โฟมที่ปราศจากฟลูออรีนในสนามบินพลเรือนในเครือรัฐออสเตรเลีย ราชอาณาจักรเดนมาร์ก ราชอาณาจักรสวีเดน และสนามบินศูนย์กลางหลัก ๆ เช่น London Heathrow Gatwick, Dubai, Stuttgart, Edinburgh และ Auckland ที่สนามบินพลเรือนในราชอาณาจักรนอร์เวย์ การทดแทนนี้ครอบคลุมทั้งระบบคงที่และระบบเคลื่อนที่ ด้วยคุณสมบัติทางทหารหลายประการ จึงได้แบ่งออกเป็นโฟมที่ปราศจากฟลูออรีน นอกจากนี้ ในส่วนของน้ำมัน และก๊าซกำลังอยู่ในขั้นตอนการแบ่งโฟมที่ปราศจากฟลูออรีน (ทั้งนอกชายฝั่งและบนบก) ซึ่งทุกภาคส่วนต่างพอใจและมั่นใจในผลการดำเนินงานนี้

สถาบันควบคุมอัคคีภัยและภัยพิบัติ Heyrothsberge สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี ได้ทดสอบโฟมดับเพลิงที่ปราศจากฟลูออรีน 6 ชนิด และโฟมที่มีส่วนผสมของ PFAS สำหรับความสามารถในการดับไฟของเหลวที่มีขีดต่างกัน 5 ชนิด ซึ่งอาจเป็นส่วนประกอบของไฮโดรคาร์บอน ซึ่งสรุปได้ว่า โฟมที่ปราศจากฟลูออรีนแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับโฟมที่มี PFAS นอกจากนี้ยังมีข้อสังเกตใน PFOA RME ของรัฐควีนส์แลนด์ในออสเตรเลีย รายงานว่าโฟมที่ปราศจากฟลูออรีนจำนวนมากได้รับการยอมรับว่าเป็นไปตามมาตรฐานการดับเพลิงที่เข้มงวดที่สุดและมีประสิทธิภาพสูงกว่าโฟมฟลูออรีนในรูปแบบฟิล์มในสถานการณ์ต่างๆและปราศจากฟลูออรีน โฟมถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในสนามบินและสิ่งอำนวยความสะดวกอื่น ๆ รวมถึงแท่นขุดเจาะน้ำมันและก๊าซ

LASTFIRE ซึ่งเป็นกลุ่ม บริษัท น้ำมัน 16 แห่ง ได้ริเริ่มโครงการในช่วงปลายทศวรรษ 1990 เพื่อทบทวนความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับถังเก็บน้ำมันเชื้อเพลิงบนหลังคาแบบลอยตัวขนาดใหญ่ ในปี 2018 ได้ทดสอบโฟมดับเพลิงประเภท AFFF C₆ บริษัทใหม่ 6 ชนิด และโฟมที่ปราศจากฟลูออรีน 2 ชนิดในถังขนาดใหญ่และจากประสบการณ์

สรุปได้ว่าไม่มีโฟมรุ่นใหม่ (ไม่ว่าจะเป็นฟลูออรีน หรือปราศจากฟลูออรีน) ที่ถือได้ว่าเป็นการแทนที่ 'ลดลง' ที่สามารถใช้ทดแทนสูตรที่ใช้ก่อนหน้านี้ได้ตามที่กำหนด การพิจารณาความเป็นไปได้ของทางเลือกจำเป็นต้องพิจารณาทั้งประสิทธิภาพในการดับเพลิงและความเข้ากันได้กับการควบคุมระบบที่มีอยู่และวิธีการใช้งาน ซึ่งแนะนำว่าความสามารถด้านประสิทธิภาพของโฟมทางเลือกจะขึ้นอยู่กับสูตรและประเภทของอุปกรณ์การใช้งานที่ใช้ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะระบุว่าทางเลือกที่มีฟลูออรีน C₆ ทั้งหมดทำงานได้ดีกว่าทางเลือกที่ไม่มีฟลูออรีนทั้งหมด และในทางกลับกัน

มีข้อมูลที่เปิดเผยต่อสาธารณะค่อนข้างน้อยเกี่ยวกับโครงสร้างทางเคมีหรือคุณสมบัติของทางเลือกที่ปราศจากฟลูออรีน มีการระบุผู้ผลิตและผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์จำนวนหนึ่งของโฟมที่ปราศจากฟลูออรีนที่ได้รับการรับรองความปลอดภัยโดยที่รายละเอียดของสูตรที่แน่ชัดไม่ถูกเปิดเผย เนื่องจากเป็นความลับทางการค้า อย่างไรก็ตาม สิทธิบัตรสำหรับโฟมที่ไม่มีฟลูออรีนจะให้ข้อมูลเชิงลึกมากขึ้น ตัวอย่างเช่นในสิทธิบัตร Solberg มีการระบุส่วนผสมต่อไปนี้ Diethylene glycol butyl ether, xanthan gum, starch, carbonized sugar, diethanolamine lauryl sulfate, sodium decyl ethoxy sulfate, cocamidopropyl betaine, cocamidopropyl hydroxysultaine, sodium octyl sulfate, sodium decyl sulfate, และ alkyl polyglucoside

ประโยชน์จากการใช้โฟมที่ปราศจากฟลูออรีนเกี่ยวข้องกับการลดผลกระทบระยะยาวต่อสิ่งแวดล้อมในขณะที่เกิดผลกระทบระยะสั้นที่เกี่ยวข้องกับความเป็นพิษเฉียบพลันเนื่องจากความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (Biochemical Oxygen Demand : BOD) และความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical Oxygen Demand: COD) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จากโฟมที่มีฟลูออรีน และโฟมที่ปราศจากฟลูออรีนสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ในขณะที่ AFFF มีสารฟลูออรีนที่ตกค้างอยู่

2) ทางเลือกที่ใช้ฟลูออไรด์แบบสายโซ่สั้น

จากข้อมูลของ Fire Fighting Foam Coalition โฟมดับเพลิงประเภท AFFF ชนิดใหม่ทั้งหมดมีสารพื้นฐานเป็น Fluorotelomers สารลดความตึงผิว (fluorosurfactants) และสารลดความตึงผิวแบบสายโซ่สั้น (C₆) (เช่น PFASs แบบโซ่สั้นที่มี <C₇ PFCAs หรือ <C₆ PFSA)) ซึ่งเป็นสารเคมีสังเคราะห์จากฟลูออรีน (fluorochemicals) ที่มีมากกว่าการใช้ในเป็นสารพื้นฐาน Fluorotelomers ในช่วง 25 ปีที่ผ่านมากระบวนการ Telomerisation ซึ่งนอกเหนือจาก Electrochemical Fluorination: ECF แล้ว เป็นกระบวนการสำคัญในการผลิตสารเพอร์ฟลูออไรด์ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ปกติมีคาร์บอนที่ไม่ใช่ฟลูออไรด์สองตัวระหว่างหมู่ฟังก์ชันและโซ่เพอร์ฟลูออไรด์ การศึกษาระบุว่า ฟลูออโรเทลโลเมอร์ (fluorotelomers) จะย่อยสลายเป็นกรดเพอร์ฟลูออไรด์ในธรรมชาติ เช่น 6:2 Fluorotelomer Sulfonate (6:2 FTS) ซึ่งทำให้ลดระดับของ PFHpA และ PFHxA แต่ไม่ใช้กับ PFHxS มีโฟมดับเพลิงประเภท AFFF ที่ได้รับการรับรองใน Class B หลายตัวในตลาดที่ใช้สารฟลูออโรซิฟิเคชันที่ทำโดยกระบวนการ Telomerisation เมื่อเทียบกับโฟม C₈ ต้องใช้ความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของฟลูออโรสารลดแรงตึงผิว C₆ หรือสารลดแรงตึงผิว Oligomeric เพื่อให้ได้ผลในการดับเพลิงที่มีประสิทธิภาพ

สิ่งแวดล้อมทางน้ำ ทั้งในน้ำผิวดิน และน้ำใต้ดิน ในหลายภูมิภาคที่ปนเปื้อนด้วย PFAS (รวมถึง PFHxS) และส่งผลให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม สถานที่ฝึกดับเพลิงที่มีการใช้โฟมดับเพลิง AFFF ที่มี PFAS (มักตั้งอยู่ที่สนามบินและสนามฝึกทหาร) ที่ยอมรับได้ว่าเป็นหนึ่งในแหล่งที่มาของการปนเปื้อน PFAS ที่สำคัญซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และค่าใช้จ่ายในการแก้ไขในจุดดังกล่าวอย่างมาก นอกจากนี้ PFAS สายโซ่สั้น ทางเลือกที่มี <C₇ PFCAs หรือ <C₆ PFSA (รวมถึงสารตั้งต้น) มีความสามารถในการละลายน้ำที่ค่อนข้างสูงกว่า และเพิ่มความคล่องตัวในสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ ยังให้ความสำคัญกับ “แนวทาง Cradle to Grave” มากขึ้น ในควินส์แลนด์

ออสเตรเลียยังมีการควบคุมสารโพลีบรสิฟลูออไรด์ C6 ($\leq C6 = 99.995\%$ ของ PFASs) มากขึ้น รวมถึง ไม่นุญาตให้ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมโดยตรงต้องบรรจุในบรรจุภัณฑ์ให้ครบถ้วนและต้องกำจัดเป็นของเสียที่ได้รับการควบคุม

แนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุดที่ได้รับการพัฒนาโดยอุตสาหกรรมโพลี สำหรับการใช้โพลีที่มีฟลูออรีนเนื่องจากความกังวลเกี่ยวกับมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และรวมถึงคำแนะนำต่อไปนี้:

(1) โพลีฟลูออไรด์ Class B ควรใช้เฉพาะในสถานการณ์ที่ก่อให้เกิดอันตรายจากไฟไหม้ของเหลวไวไฟอย่างมีนัยสำคัญ

(2) ก่อนตัดสินใจใช้โพลีฟลูออรีน Class B สำหรับอันตรายจากไฟไหม้ที่เป็นของเหลวโดยเฉพาะให้ตรวจสอบว่าเทคนิคอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ฟลูออไรด์สามารถบรรลุการดับเพลิงและความต้านทานการเผาไหม้ที่ต้องการหรือไม่

(3) เทคนิคทางเลือกและสารที่ใช้ต้องได้รับการประเมินอย่างถี่ถ้วนหน้าถึงสถานการณ์ฉุกเฉินที่ต้องการการตอบสนองอย่างเร่งด่วน

(4) ใช้โพลีสำหรับการฝึกอบรมที่ไม่มีสารลดความตึงผิวของน้ำ “Fluorosurfactants” เพื่อวัตถุประสงค์ในการฝึกอบรม

(5) ใช้วิธีการทดสอบของเหลวอื่น แทนสารลดความตึงผิวของน้ำ สำหรับการทดสอบระบบคงที่และระบบปรับสัดส่วนโพลีของเครื่องยนต์ และ

(6) จัดให้มีการกักเก็บการบำบัดและการกำจัดสารละลายโพลีอย่างเหมาะสม ไม่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมโดยตรง และจัดทำแผนการรวบรวมน้ำที่ไหลจากอัคคีภัยที่มีการใช้โพลี Class B ที่มีฟลูออรีน

นอกจากนี้ องค์กรร่วมผู้ผลิตโพลี (Fire Fighting Foam Coalition Inc.: FFFC) ให้ข้อมูลว่า: ไม่แนะนำให้ใช้โพลี Class B สำหรับความอันตรายใน Class A (ไม้) หรือ Class C (ไฟฟ้า) ที่มีภัยคุกคามจากไฟไหม้ของเหลวไวไฟน้อยที่สุดหรือไม่มีเลย หากมีภัยคุกคามของเหลวไวไฟใน Class C จะต้องถูกยกเลิกการให้พลังงานเนื่องจากโพลีมีน้ำที่สามารถนำไฟฟ้าได้ ตัวอย่างสถานการณ์ที่ไม่จำเป็นต้องใช้โพลี Class B ได้แก่ ไฟป่า เพลิงไหม้อาคารและที่อยู่อาศัย ห้องคอมพิวเตอร์ และสิ่งอำนวยความสะดวกด้านการสื่อสารโทรคมนาคม ร้านอาหารและห้องครัวเชิงพาณิชย์ และการป้องกันสิ่งอำนวยความสะดวกทั่วไป ทั้งนี้ โพลี Class B อาจไม่จำเป็นสำหรับภัยคุกคามจากเพลิงไหม้ของเหลวไวไฟขนาดเล็ก เช่น รถยนต์เกิดเพลิงไหม้โดยไม่มีการรั่วไหลของเชื้อเพลิงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถใช้น้ำหรือเครื่องดับเพลิงชนิดผงเคมีแห้งได้

การรับรู้ข้อเท็จจริงเหล่านี้นำไปสู่มติตัดสินใจในการประชุมรัฐภาคีสัญญาสตอกโฮล์มฯ สมัยที่ 9 ซึ่งระบุว่า “สนับสนุนให้ภาคีและประเทศอื่น ๆ ใช้ทางเลือกอื่นแทน perfluorooctane Sulfonic Acid , its salts และ Perfluorooctane Sulfonyl Fluoride ในกรณีที่มีทางเลือกที่เป็นไปได้และมีประสิทธิภาพ ในขณะที่พิจารณาว่าโพลีดับเพลิงที่ทำจากฟลูออรีนอาจส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมสุขภาพของมนุษย์และผลกระทบทางเศรษฐกิจและสังคมอันเนื่องมาจากการตกค้างยาวนาน และความคล่องตัวในการเคลื่อนที่” ซึ่งคำแนะนำเดียวกันนี้ถูกนำมาใช้สำหรับ PFOA

8.1.2 การชุบโลหะ (Metal plating)

ในคราวการประชุมทางเลือกสำหรับการใช้ PFOS ในหลายทางเลือกรวมถึง สารเคมีทางเลือกที่ไม่ใช่ฟลูออไรด์ และแนวทางทางเทคนิค

การชุบโลหะแข็งใช้เพื่อป้องกันชิ้นส่วนโลหะจากการสึกหรอและการกัดกร่อน ในอุตสาหกรรมลูกกลิ้ง กระบอกไฮดรอลิก และเพลลาข้อเหวี่ยง เป็นตัวอย่างในอุตสาหกรรมการชุบฮาร์ดโครม ผ่านกระบวนการชุบด้วยไฟฟ้า (electroplating) โดยโครเมียมชั้นบาง ๆ จะถูกสะสมบนผิวโลหะ หรือพื้นผิวโลหะผสมของชิ้นงาน ซึ่งความต้านทานและความแข็งแรงเป็นคุณลักษณะที่สำคัญ ในการใช้งานเหล่านี้ ชิ้นงานจะถูกแช่ลงในอ่างกรดโครเมียม (hexavalent chromium, Cr (VI)) Fume suppressants เป็นสารเคมีที่ถูกใช้ในอ่างโครเมียมเพื่อลดปริมาณโครเมียมที่สูญเสียไป

พื้นผิว เนื่องจาก Cr (VI) เป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ และสารยับยั้งควีน (หมอก) ช่วยลดการสัมผัสจากการทำงานและความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งในระบบทางเดินหายใจ สารระงับการดูดควันเคมี (หมอก) เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ลดแรงตึงผิวของสารละลายซัพและโดยการควบคุมแรงตึงผิวฟองก๊าซในกระบวนการจะมีขนาดเล็กลงและเพิ่มขึ้นซ้ำกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่และหมอกมีโอกาสน้อยที่จะปล่อยออกสู่อากาศและ หยดน้ำตกลงไปในอ่างซัพ

ยังมีความไม่ชัดเจนจากข้อมูลที่เปิดเผยต่อสาธารณะเกี่ยวกับ PFHxS ว่าถูกใช้อย่างกว้างขวางในการซัพโลหะอย่างไร อย่างไรก็ตามสิทธิบัตรบางฉบับ (Dainippon, 1979, 1988; 3M, 1981; Hengxin, 2015) ถูกระบุไว้สำหรับการใช้ PFHxS เคลือบของมันและสารประกอบต่างๆที่เกี่ยวข้องกับ PFHxS ในการซัพโลหะเป็นสารยับยั้งหมอกซึ่งบ่งชี้ว่าการใช้ดังกล่าวอาจเกิดขึ้น และมีแนวโน้มว่าอย่างน้อย Hubei Hengxin ในประเทศจีนได้ทำการตลาดเกลือโพแทสเซียมของ PFHxS สำหรับการซัพโลหะ และ PFHxSF เป็นวัตถุดิบสำหรับการซัพด้วยไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ (เกี่ยวกับการตกตะกอน ฯลฯ) และควรสังเกตว่าการผลิต (รวมถึงการนำเข้า) หรือการแปรรูปเกลือของ PFHxS 2 ชนิดคือ tridecafluorohexanesulfonic acid, compound with 2,2'-iminodiethanol (1:1); CAS No. 70225-16-0 และ potassium N-ethyl-N-[(tridecafluorohexyl)sulphonyl]glycinate; CAS No. 67584-53-6 สำหรับใช้เป็น ส่วนประกอบของสารดูดซับรวมทั้งสารลดแรงตึงผิวหรือสารระงับควีนที่ใช้ในกระบวนการซัพเพื่อผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จะไม่ถือเป็นการใช้งานใหม่ที่มีนัยสำคัญภายใต้การรายงานภายใต้กฎการใช้ใหม่ที่สำคัญของ EPA ของสหรัฐอเมริกาของสารเคมี perfluoroalkyl sulfonates และสาร perfluoroalkyl carboxylate แบบสายโซ่ยาว นอกจากนี้เนื่องจากการผลิต PFHxS โดยไม่ได้ตั้งใจในระหว่างกระบวนการฟลูออไรเซชันด้วยกระแสไฟฟ้า (ECF: Electrochemical Fluorination) มีแนวโน้มว่าสารยับยั้งหมอก/ควีนที่ประกอบด้วย PFOS ที่ใช้สำหรับการซัพโลหะมีปริมาณโดยไม่ได้ตั้งใจของ PFHxS, its salts และสารประกอบที่เกี่ยวข้องกับ PFHxS

เทคนิคทางเลือกที่ไม่ใช้สารเคมี

มีเทคโนโลยีทางเลือกบางอย่างที่กั้นการใช้สารเคมีและป้องกันการปลดปล่อยโครเมียม (Cr) (VI) ในระหว่างกระบวนการซัพ รวมถึงการใช้ ซึ่งรวมถึงการเคลือบ PTFE ที่ด้านบนของอ่าง ตาข่าย หรือผ้าคลุมและสำหรับอ่างเคลือบ นอกจากนี้ยังมีการใช้อุปกรณ์ควบคุม เช่น Composite Mesh Pads (CMP) หรือ Chromic Acid Fume Scrubber ในการจับละอองลอยจากการซัพโครเมียม ตามคำแนะนำ BAT/BEP สำหรับการ ใช้ PFOS เทคนิคเหล่านี้ถือเป็นทางเลือกอื่นสำหรับการใช้อุปกรณ์ควบคุมที่ใช้ PFOS และมีการระบุว่ามีปัจจัยใดที่จำกัดการเข้าถึงของอุปกรณ์ควบคุมเหล่านี้ และยังมีจำหน่ายทั่วไปในประเทศแคนาดา ซึ่งระบบ CMP เป็นระบบที่รวบรวมและเคลื่อนย้ายโครเมียมที่ถูกปลดปล่อยผ่านแผ่นตาข่ายซึ่งอนุภาคโครเมียมจะควบแน่นและรวมตัว โดยส่วนใหญ่ใช้วิธีการทางกายภาพ โดยทั่วไประบบ CMP ประกอบด้วยขั้นตอนแผ่นตาข่ายหลายขั้นตอน ขั้นตอนแรกจะกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่ ขั้นตอนกลางจะกำจัดอนุภาคที่เล็กกว่าและขั้นตอนสุดท้ายจะกำจัดอนุภาคขนาดเล็ก ระบบ CMP มีประสิทธิภาพในการกำจัดละอองและกำจัดการปล่อยละอองของกรดโครมิก จากข้อมูลยังไม่แน่ชัดว่าการใช้ระบบ CMP จะทำให้ของเสียกรดโครมิกเพิ่มขึ้นหรือไม่ และความเสี่ยง/ต้นทุนที่เกิดจากสิ่งนี้ เทคนิคทางเลือกเพิ่มเติมที่มีให้ ได้แก่ การซัพโครเมียมโดยใช้นาโนเทคโนโลยี และระบบหกเหลี่ยมที่สร้างขึ้นจากแหล่งกักเก็บอัจฉริยะที่สามารถกักเก็บสารเคมีป้องกันการกัดกร่อนซึ่งก่อนหน้านี้ไม่สามารถใช้ร่วมกับสารเคลือบได้ อย่างไรก็ตามยังไม่ชัดเจนว่าสามารถใช้เทคนิคเหล่านี้สำหรับการซัพโลหะแข็งและการซัพโลหะตกตะกอนได้หรือไม่

ทางเลือกการใช้สารเคมี

จากการศึกษาของ Poulsen และคณะ แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้สารยับยั้งละอองที่ปราศจาก PFOS สำหรับการซัพฮาร์ดโครเมียมแบบไม่ผ่านการตกตะกอน (Cr VI) ในระบบวงปิด Fumetrol® 21 เป็นทางเลือกหนึ่งที่มีฟลูออรีนจาก Atotech ซึ่งขึ้นอยู่กับ 1H, 1H, 2H, 2H-perfluorooctane sulfonic acid (6: 2 fluorotelomer sulfonic

acid; CAS No. 27619-97-2) ที่ช่วยลดการปล่อย Cr (VI) สารเคมีฟลูออโรอัลคิลทางเลือกนี้จะย่อยสลายเป็นส่วนผสมของกรดเพอร์ฟลูออโรคาร์บอกซิลิกที่มีโซ่อัลคิลที่มีคาร์บอนเปอร์ฟลูออไรด์ไม่เกิน 6 อะตอม ความพยายามที่จะใช้ Cr (III) สำหรับการชุบสารถือโครเมียมยังคงดำเนินอยู่สำหรับการพัฒนาทางเลือกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมแทนโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในการชุบโครเมียม นอกจากนี้ยังมีทางเลือกอื่นที่ปราศจากฟลูออรีน เช่น อัลคิลซัลโฟเนต (alkylsulfonate) และโอเลียมิน (olea amine)

8.1.3 สิ่งทอ (Textiles)

สารกลุ่ม PFASs ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในสิ่งทอเพื่อให้สามารถกันน้ำ น้ำมัน และสิ่งสกปรกของวัสดุ รวมถึงสามารถระบายอากาศได้ มีการอ้างอิงจาก Hubei Hengxin พบว่า สารประกอบที่เกี่ยวข้องกับ PFHxS [N-methyl-perfluorohexane-1-sulfonamide] ethyl acrylate (CAS No. 67584-57-0) ถูกใช้ในผลิตภัณฑ์เพื่อกันน้ำมันและน้ำสำหรับหนังและสิ่งทอ ซึ่งการใช้ PFAS ในการผลิตสิ่งทอมีสัดส่วนประมาณ 50% ของการใช้ PFAS ทั่วโลก ในการศึกษาของประเทศเดนมาร์ก ได้ระบุถึงกลุ่มสารเคมีทางเลือก 5 กลุ่ม คือ (1) พาราฟิน (paraffins) (2) กรดสเตียริก – เมลามีน (stearic acid-melamine) (3) ซิลิโคน (silicone) (4) เดนไดรเมอร์ (dendrimers) และ (5) วัสดุนาโน และสรุปได้ว่า มีทางเลือกที่ไม่ใช่ฟลูออไรด์ ซึ่งให้ความทนทานต่อการกันน้ำ แต่ยังมีข้อจำกัดในการกันน้ำมัน และสิ่งสกปรก กลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ปราศจากฟลูออโรคาร์บอน และกันน้ำสำหรับสิ่งทอ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ เช่น BIONIC-FINISH®ECO และ RUCO-DRY® ECO จำหน่ายโดย Rudolf Chemie Ltd., Geretsried / ประเทศเยอรมันนี Purtex® WR, Purtex® WA, Purtex® AP จำหน่ายโดย Freudenberg Group, Weinheim / ประเทศเยอรมันนี และ ecorepel® จำหน่ายโดย Schoeller Technologies AG, Sevelen / ประเทศสวิสเซอร์แลนด์ นอกจากนี้ยังมีการใช้งานในการปรับสภาพพื้นผิวสิ่งทอ และพรมที่ใช้อะคริเลต (Acrylate) เมทาคริเลต (Methacrylate) และอะดิเพต (Adipate) ในการศึกษาของผู้บริโภคเพื่อตรวจสอบความแตกต่างของการทำงานระหว่างสาร PFAS สายโซ่ยาว (C_8) และสาร PFAS สายโซ่สั้น (C_2) และสารเคมีป้องกันที่ไม่ใช่ฟลูออไรด์ ภายในผ้าของเครื่องแต่งกายกลางแจ้ง เพื่อรายงานการเปรียบเทียบความแตกต่างของสารดังกล่าว ที่มีจำหน่ายทั่วไปในปัจจุบัน โดยการประเมินการกันน้ำของผ้าในเครื่องแต่งกายกลางแจ้ง ตลอดจนคุณสมบัติในการกันน้ำ ความทนทานต่อน้ำและน้ำมัน สำหรับผู้บริโภคที่ใส่เครื่องแต่งกายกลางแจ้ง พบว่า สารเคมีที่ไม่มีฟลูออไรด์สามารถตอบสนองความต้องการในการกันน้ำได้ และผู้เขียนได้เสนอว่า การใช้ PFAS ในเครื่องแต่งกายกลางแจ้ง จึงเป็นการใช้งานทางวิศวกรรมที่มากเกินไป โดยให้การกันน้ำได้มากกว่าที่ผู้บริโภคต้องการ ในการศึกษาความแตกต่างของโพลีเมอร์ฟลูออรีนแบบสายโซ่ข้าง (Side-chain Fluorinated Polymers (SFPs)) และสารกันน้ำที่ไม่ใช่ฟลูออไรด์ ที่ใช้โพลีไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxanes) หรือไฮโดรคาร์บอน แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการกันน้ำและความทนทานที่ดีเยี่ยมในบางกรณี ในขณะที่ SFP แบบสายโซ่สั้นมีทางเลือกอื่นที่แข็งแกร่งกว่า เมื่อเทียบกับแบบสายโซ่ยาวของ SFPs ในแง่ของการกันน้ำ ทั้งนี้ ความแข็งแกร่งในการกันน้ำมัน และความทนทานจะลดลง ตามความยาวของสายโซ่ perfluoroalkyl สำหรับ SFPs สารทางเลือกที่ไม่ใช่ฟลูออไรด์ ไม่สามารถกันน้ำมันได้ ซึ่งอาจจำกัดศักยภาพในการทดแทนในการใช้งานในสิ่งทอ ที่ต้องการการป้องกันของเหลวที่ไม่มีขั้ว เช่น สิ่งทอทางการแพทย์ในชุดผ่าตัด และผ้าปูเตียงในห้องพักผู้ป่วย เครื่องแต่งกายของแพทย์และพยาบาลและสำหรับห้องปฏิบัติการ รวมถึงบุคลากรที่ต้องได้รับการปกป้องจากเลือดและของเหลวในร่างกายที่เป็นพาหะในการติดเชื้อและไวรัส ซึ่งข้อมูลนี้สอดคล้องกับข้อมูลในการประเมินทางเลือกสำหรับสาร PFOS ที่ได้รายงานความก้าวหน้าในปี 2018 อย่างไรก็ตามในการศึกษาเดียวกันนี้ได้แสดงให้เห็นในการทดลองว่าสารกันน้ำที่ปราศจากฟลูออรีน และย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สามารถให้การขจัดคราบได้ในระดับหนึ่ง

8.1.4 สารขัดเงา และสารทำความสะอาด/ซักล้าง (Polishing, cleaning- and washing agents) รวมถึง สารเคลือบผิววัสดุ (Coating, impregnation/ proofing)

มีข้อมูลเพียงเล็กน้อยเกี่ยวกับข้อมูลและลักษณะของสารเคมีในผลิตภัณฑ์เหล่านี้ ตัวอย่างเช่น ‘Impregno’ สารเคลือบหิน สารกันน้ำและสิ่งสกปรก ที่ปราศจากส่วนผสมของฟลูออรีน

ข้อมูลเกี่ยวกับการใช้สาร PFHxS ในผลิตภัณฑ์สารขัดเงา และสารทำความสะอาด/ซักล้าง ที่เปิดเผยต่อสาธารณะยังมีไม่มาก มีการรายงานการใช้สารประกอบที่เกี่ยวข้องกับ PFHxS คือ (CAS No. 67584-53-6, [N-Ethyl-N-(tridecafluorohexyl) sulfonyl] glycine, potassium salt) ในสารขัดเงาและสารทำความสะอาด/สารซักล้าง ระหว่างปี 2000 - 2015 ในราชอาณาจักรเดนมาร์ก ราชอาณาจักรนอร์เวย์ และราชอาณาจักรสวีเดน และสารประกอบที่เกี่ยวข้องกับ PFHxS (CAS No. 67584-61-6, 2-[Methyl[(tridecafluorohexyl) sulfonyl]amino]ethyl methacrylate) พบในสารที่ใช้ย้อมในการพิสูจน์อักษร เพื่อป้องกันความชื้นจากเชื้อรา ฯลฯ อย่างน้อยใน 4 ผลิตภัณฑ์ ในระหว่างปี 2003 และปี 2009 ในราชอาณาจักรเดนมาร์ก นอกจากนี้ ยังพบสารประกอบของ PFHxS CAS No. 67584-61-6 ที่จดทะเบียนในประเภทการใช้งานเดียวกันในราชอาณาจักรนอร์เวย์ ในปี 2011

FluoroCouncil ได้รายงานที่ผู้จำหน่ายทั่วโลกได้เสนอทางเลือกที่ “ไม่ใช่ฟลูออไรด์” ได้แก่

- (1) สารกันน้ำที่ใช้ไฮโดรคาร์บอน ประกอบด้วยสูตรเกลือของโลหะพาราฟิน (Hydrocarbon wax-based repellents consisting of paraffin-metal salt formulations)
- (2) โพลียูรีเทนที่ดัดแปลงทำให้ไม่ชอบน้ำ (Polyurethane Hydrophobic modified polyurethanes) หรือเรียกว่า เดนไดเมอร์ (dendrimers)
- (3) ผลิตภัณฑ์ที่ใช้พอลิซิลอกเซน (polysiloxane-based products) และ
- (4) สารกันน้ำที่ทำจากเรซินซึ่งประกอบด้วยเรซินเมลามีนที่ดัดแปลงกรดไขมัน (Resin-based repellents consisting of fatty acid modified melamine resins.)

8.1.5 การผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และเซมิคอนดักเตอร์ (Electronic and semiconductors)

ในงานศึกษาหลายชิ้น พบรายงานการปลดปล่อยสาร PFHxS จากอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PFOS ถูกแทนที่โดย PFHxS ในการใช้ประโยชน์ดังกล่าว จากการสำรวจพบ PFHxS เป็นองค์ประกอบหลักของ PFAS ในน้ำทิ้งขั้นสุดท้ายจากโรงงานผลิตเซมิคอนดักเตอร์ในสาธารณรัฐจีน (ไต้หวัน) ข้อมูลนี้มีน้ำหนักมากขึ้นจากข้อมูลที่บ่งชี้ว่า PFHxS ถูกใช้ในอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์ โดย PFHxS (133.3 ng/L) ร่วมกับ PFOS (128.7 ng/L) เป็นหนึ่งในสารปนเปื้อนหลักในสถานที่ระบายน้ำเสียจากโรงงานผลิตเซมิคอนดักเตอร์ ซึ่งสารกลุ่ม PFASs ทั้งสองชนิดพบอยู่ในน้ำทิ้งในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่า PFHxS เป็นสารหลักในกระบวนการดังกล่าว สารกลุ่ม PFAS (เช่น PFOS หรือ PFHxS) จะไม่หลงเหลืออยู่ในเซมิคอนดักเตอร์ แต่ในกรณีที่ไม่มีการกำจัด PFASs จากน้ำเสีย ก่อนการปล่อย จะทำให้มีการปนเปื้อนในน้ำเสียและถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม

ทั้งนี้ ยังไม่มีข้อมูลอื่น ๆ เกี่ยวกับกระบวนการเฉพาะในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเซมิคอนดักเตอร์ที่ใช้ PFHxS จึงจำเป็นต้องตรวจสอบข้อมูลทั้งหมดที่มีอยู่เกี่ยวกับทางเลือกของ PFOS ภายในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเซมิคอนดักเตอร์ ตามคำแนะนำเกี่ยวกับทางเลือกอื่นสำหรับ PFOS ของสารประกอบที่ใช้ PFOS จำนวนหนึ่ง เป็นสิ่งจำเป็นในระหว่างการติดตามวิธีการลิโทกราฟีแบบใช้แสง (photolithography) ที่สำคัญในการผลิตเซมิคอนดักเตอร์ชิป

- (1) การสร้างลวดลาย/ภาพถ่ายที่ละเอียดเป็นพิเศษเป็นพิเศษเป็นตัวสร้างกรดโฟโต้และสารลดแรงตึงผิว
- (2) สารเคลือบป้องกันแสงสะท้อนที่เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีลักษณะการทำงานเฉพาะ

สาร PFHxS เช่น PFOS สามารถใช้เป็นสารลดแรงตึงผิวในการผลิตสารประกอบในเคมีคอนดักเตอร์ และจะถูกล้างออกในระหว่างกระบวนการบำบัดครั้งต่อไป

มีการระบุสารเคมีทางเลือกที่ไม่ใช่ฟลูออไรด์ในหลายชนิด ในการประเมินสารทางเลือกสำหรับ PFOS ซึ่งสารทางเลือกต่อไปนี้ ได้รับการจัดประเภทว่าอาจไม่มีลักษณะเป็นสาร POP คือ เอมีล อะซิเตต (amyl acetate) อะนิโซล (anisole) นอร์มอล บิวทิว อะซิเตต (n-butyl acetate) เอทิล แลคเตต (ethyl lactate) เมทิล -3 เมทิลโพรพิโอเนต (methyl-3 methoxypropionate) และโพรพิลีนไกลคอลเมทิลอีเธอร์อะซิเตต (propylene glycol methyl ether acetate) นอกจากนี้ บทความทางวิทยาศาสตร์ ระบุว่า ควรพัฒนากระบวนการต้านทานแสง (photo-resist system) ที่ปลอดการใช้ PFOS

8.2 การใช้งานอื่น ๆ

นอกเหนือจากการใช้งานที่กล่าวมาข้างต้นแล้วหมวดหมู่การใช้งานอื่น ๆ ที่เป็นไปได้อาจรวมถึงสารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ สารหน่วงไฟ กระจก และในอุตสาหกรรมน้ำมัน ตลอดจนเสื้อผ้าสำหรับทำครัว นอกจากนี้ ข้อมูลจากแหล่งต่าง ๆ ระบุว่ามีการตรวจพบ PFHxS ในวัสดุสัมผัสอาหาร สารเคลือบหลุมร่องฟัน กาวโพลีสำหรับงานสถาปัตยกรรม และสารเคลือบ รวมทั้งในการใช้งานบางอย่างในอาคารและการก่อสร้าง

9. การสำรวจข้อมูลการนำเข้า – ส่งออก การผลิต การจำหน่าย และการใช้สาร Perfluorohexane sulfonic acid (PFHxS), its salts and PFHxS related compounds ในประเทศไทย

กรมควบคุมมลพิษ ได้จัดส่งแบบสอบถามให้ผู้ประกอบการบริษัทที่เกี่ยวข้องกับสาร PFHxS ในกลุ่มอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้สารเคมีดังกล่าว อาทิ อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ สิ่งทอ เพอร์นิเจอร์ ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม พลาสติก หล่อโลหะ หนังและผลิตภัณฑ์ เคมี การพิมพ์และบรรจุภัณฑ์ และอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ดับเพลิง จำนวน 937 แห่ง เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบในการยกร่างข้อเสนอการควบคุมสารดังกล่าว เป็นวัตถุอันตรายภายใต้ พระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 ผลปรากฏว่า

9.1 ข้อมูลการดำเนินงานที่เกี่ยวข้องกับสาร PFHxS

- (1) มีบริษัทส่งแบบสอบถามตอบกลับ จำนวน 155 แห่ง คิดเป็นร้อยละ 16.54 ของแบบสอบถามทั้งหมด
- (2) มีการดำเนินงานที่เกี่ยวข้องกับสาร PFHxS จำนวน 4 แห่ง คิดเป็นร้อยละ 2.58 ของแบบสอบถามที่ได้รับตอบกลับ ส่วนใหญ่เป็นผู้ใช้งาน โดยใช้สาร PFHxS เป็นส่วนผสมของน้ำยาดับเพลิง
- (3) ไม่มีการดำเนินงานที่เกี่ยวข้องกับสาร PFHxS จำนวน 151 แห่ง คิดเป็นร้อยละ 97.42 ของแบบสอบถามที่ได้รับตอบกลับ

ที่	ชื่อสถานประกอบการ	ประกอบกิจการ	การดำเนินงานที่เกี่ยวข้อง	วัตถุประสงค์	ชื่อทางการค้าของผลิตภัณฑ์ที่ใช้	ปริมาณการใช้เฉลี่ย/ปี
1.	บริษัท ไทยอิตาซี ลวดอาบน้ำยา จำกัด	ผลิตลวดทองแดง ลวดอลูมิเนียม เคลือบน้ำยา	ผู้ใช้	ถังดับเพลิงประเภทโฟมดับเพลิง	Fire Killer	27 กก.
2.	บริษัท นิปปอนเคมีคอล จำกัด	ผลิต จำหน่ายเครื่องดับเพลิง และน้ำยาดับเพลิง	ผู้นำเข้า	ผลิตและจำหน่ายโฟมดับเพลิง	Orchidee Europe BVBA	(พ.ศ.2558) 10,000 กก.*

ที่	ชื่อสถานประกอบการ	ประกอบกิจการ	การดำเนินงานที่เกี่ยวข้อง	วัตถุประสงค์	ชื่อทางการค้าของผลิตภัณฑ์ที่ใช้	ปริมาณการใช้เฉลี่ย/ปี
					ประเทศเบลเยียม	(พ.ศ.2560) 12,000 กก.*
						(พ.ศ. 2562) 8,000 กก.*
					Integrated Fire Protection Pvt. Ltd.ประเทศอินเดีย	(พ.ศ. 2559) 7,000 กก.*
						(พ.ศ. 2561) 6,000 กก.*
3.	บริษัท เซออน เคมิคัลส์ (ไทยแลนด์) จำกัด	ผลิต Aliphatic Hydrocarbon Resin และผลิตวัตถุพลอยได้ ได้แก่ C4 Raffinate (C4R), C5 Raffinate (C5R)	ผู้ใช้	ส่วนผสมในโฟมดับเพลิง	Elinex AFFF-AR 3X3 UL	ครอบครอง 285 ลิตร (15 แกลลอน)
4.	บริษัท ซีพีทีซี จำกัด (มหาชน)	ผลิตแผ่นพีวีซีแบบแข็ง	ผู้ใช้	ส่วนผสมในโฟมดับเพลิง	Elinex AFFF 3% Firechem AFFF 3%	480 ลิตร

9.2 ข้อมูลความเห็นเกี่ยวกับการยกเลิกการใช้และการจำกัดการใช้สาร PFHxS

(1) เห็นด้วยหากมีการจำกัดการใช้สาร PFHxS จำนวน 107 แห่ง คิดเป็นร้อยละ 81.06 ของผู้ที่ให้ความเห็น เนื่องจากเพื่อให้สามารถควบคุมการใช้ได้ในอัตราที่เหมาะสมและเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อม (คิดจาก 132 แห่ง)

(2) ไม่เห็นด้วยหากมีการจำกัดการใช้สาร PFHxS จำนวน 25 แห่ง คิดเป็นร้อยละ 18.94 ของผู้ที่ให้ความเห็น

(3) เห็นด้วยหากมีการยกเลิกการใช้สาร PFHxS จำนวน 115 แห่ง คิดเป็นร้อยละ 86.47 ของผู้ที่ให้ความเห็น เนื่องจากสาร PFHxS มีความเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ดังนั้น จึงเห็นควรยกเลิกการใช้และหาสารที่อันตรายน้อยกว่ามาทดแทน

(4) ไม่เห็นด้วยหากมีการยกเลิกการใช้สาร PFHxS จำนวน 18 แห่ง คิดเป็นร้อยละ 13.53 ของผู้ที่ให้ความเห็น เนื่องจากหากมีการยกเลิก อาจจะทำให้การจัดหาโฟมดับเพลิงประเภทอื่นได้ยากและมีค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น (คิดจาก 133 แห่ง)

(5) ไม่ได้ให้ข้อคิดเห็นในประเด็นดังกล่าว จำนวน 15 แห่ง

9.3 ข้อมูลความเห็นเกี่ยวกับการทราบความเป็นอันตรายของสาร PFHxS

(1) ทราบถึงความเป็นอันตรายต่อมนุษย์ หรือสิ่งแวดล้อมของสาร PFHxS และผลิตภัณฑ์ที่มีสาร PFHxS เป็นส่วนประกอบ จำนวน 74 แห่ง คิดเป็นร้อยละ 49.66 ของผู้ที่ให้ความเห็น

(2) ไม่ทราบถึงความเป็นอันตรายฯ จำนวน 75 แห่ง คิดเป็นร้อยละ 50.33 ของผู้ที่ให้ความเห็น

(3) ไม่ได้ให้ข้อคิดเห็นในประเด็นดังกล่าว จำนวน 3 แห่ง

9.4 ข้อเสนอแนะอื่น ๆ เพิ่มเติม

(1) ขอให้หน่วยงานราชการตรวจสอบบริษัทที่ใช้และการกำจัดสารเคมีอันตรายทุกตัว เพื่อลดการกระทบต่อสิ่งมีชีวิต เพราะมนุษย์เป็นโรคมะเร็งแต่ละปีเป็นจำนวนมาก

(2) ถ้าเป็นการจำกัดการใช้ จะต้องมีการระบุการจำกัดเก็บและทำลายสารเคมีชนิดนี้ เพื่อลดการสะสมในสิ่งแวดล้อม

(3) ควรใช้มาตรฐานของยุโรปในการกำหนดขอบเขตและชนิด ตลอดจนสารทดแทนเพื่อเป็นเกณฑ์กับประเทศไทย

(4) บริษัทฯ พร้อมดำเนินการเพื่อให้สอดคล้องตามกฎหมาย เพื่อความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม

(5) ควรจำกัดการใช้เฉพาะสินค้าไม่ใช่วางขายทั่วไป ใครก็ซื้อได้ เพราะอันตรายมาก

(6) ในการเปลี่ยนแปลงระดับการควบคุมของวัตถุอันตราย (จากระดับต่ำไประดับที่สูงขึ้น) ควรจะมีการแจ้งล่วงหน้าไม่น้อยกว่า 2 ปี ขึ้นไป มี Action plan และ Time line ที่ชัดเจน เพื่อให้ผู้ประกอบการเตรียมตัว และปรับสูตรการผลิตได้ทันกาล ที่สำคัญคือทำอย่างไรที่จะทำให้ผู้ประกอบการที่เกี่ยวข้อง รับผิดชอบต่ออย่างทั่วถึง (ช่องทางในการกระจายข่าวสาร) และส่งผลกระทบต่อคนน้อยที่สุด

(7) ควรมีการให้ความรู้/แนะนำสารเคมีหรือผลิตภัณฑ์อื่นที่ใช้ทดแทนสาร PFHxS ได้ เพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่ออุตสาหกรรมที่มีการใช้งานสาร PFHxS ในการผลิต

(8) ควรสอบถามอุตสาหกรรมที่ใช้โดยตรงว่าหากมีการจำกัดหรือยกเลิกจะมีผลกระทบต่อคนน้อยเพียงใด

10. การศึกษาการปนเปื้อนของสาร PFHxS ในสิ่งแวดล้อมประเทศไทย

สารกลุ่ม Perfluoroalkyl sulfonic acids (PFSA) ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมของประเทศ ซึ่งทำให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนของสารมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม ปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่ศึกษาการปนเปื้อนของสารกลุ่มดังกล่าว โดย รศ.ดร. สุวรรณ บัญยานนท์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ได้ศึกษาการปนเปื้อนของสารกลุ่ม PFSA ในแหล่งน้ำต่าง ๆ ของประเทศไทย และมีรายงานการตรวจพบการปนเปื้อนของ PFHxS ดังนี้

- การศึกษาการปนเปื้อนของสารประกอบเพอร์ฟลูออไรด์ (PFCs) ในแม่น้ำเจ้าพระยา และแม่น้ำบางปะกง โดยการศึกษาดังกล่าว มุ่งเน้นไปที่การเกิดขึ้นของ PFCs ในแม่น้ำและการปล่อยน้ำทิ้งในนิคมอุตสาหกรรม โดยทำการสำรวจในแม่น้ำเจ้าพระยา แม่น้ำบางปะกง และนิคมอุตสาหกรรม 3 แห่ง ผลการวิจัยพบการปนเปื้อนของ PFHxS ปริมาณสูงในบางตัวอย่างน้ำในแม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งคิดเป็น 10% ของ PFCs ในตัวอย่างแม่น้ำสายย่อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปนเปื้อนของ PFCs ในแม่น้ำสายหลักส่วนใหญ่มาจากแม่น้ำสายย่อย

- การศึกษาระดับของสารประกอบ Perfluorinated (PFCs) ในน้ำบาดาลบริเวณเขตเทศบาลและโรงงานอุตสาหกรรมที่ไม่เหมาะสมในสถานที่กำจัดขยะในประเทศไทย และการศึกษาการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ โดยทำการเก็บตัวอย่างทั้งหมด 27 ตัวอย่างใน 2 จังหวัด คือ จังหวัดอยุธยา และจังหวัดชลบุรี ทำการวิเคราะห์โดยการสกัดสารประกอบ PFCs 7 ชนิด (PFHpA PFOA PFNA PFDA PUnA PFHxS และ PFOS) ด้วยวิธีการสกัดสารตัวอย่างด้วยตัวดูดซับของแข็ง (Solid Phase Extraction: SPE) และการวิเคราะห์ด้วยโครมาโทกราฟี ของเหลวประสิทธิภาพสูง ควบคู่กับแมสสเปกโตรมิเตอร์ (HPLC-MS/MS) ผลการวิจัยพบการปนเปื้อนของ PFHxS ในตัวอย่างแหล่งน้ำใต้ดิน บริเวณรอบสถานที่กำจัดขยะอุตสาหกรรม โดยมีความถี่ตั้งแต่ 0.31% ถึง 12.64% ซึ่งอาจบ่งชี้ว่ามีการใช้ เป็นสารทดแทนสำหรับสารประกอบเพอร์ฟลูออไรด์สายโซ่ยาวในกระบวนการทางอุตสาหกรรม เนื่องจากมีความยาวสายโซ่สั้นกว่า หรืออาจเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากจากย่อยสลายของสารประกอบทางเลือกอื่น ๆ เช่น เพอร์ฟลูออโรเฮกเซนซิลโพลีฟลูออไรด์ (PHxSF, C6F13SO2F) และอนุพันธ์อื่น ๆ

- การปนเปื้อนและการควบคุม Perfluoroalkyl Substances (PFASs) ในน้ำใต้ดิน จากผลการวิจัยพบปริมาณการปนเปื้อน PFASs รวมรอบแหล่งลึกลบทั้งขยะ ต.หนองแห่น และ ต.มาบไผ่ ในระดับ 4.43 ถึง 10.80 ng/L และ 2.64 ถึง 42.01 ng/L ตามลำดับ โดยมีปริมาณสาร PFOA และ สาร PFOS มากที่สุด รวมทั้งยังพบว่าสาร PFHxS ถูกตรวจพบมากในน้ำใต้ดิน โดยเฉพาะรอบแหล่งลึกลบ ทั้งขยะอุตสาหกรรม ซึ่งอาจเป็นเพราะสาร PFHxS ถูกนำมาใช้ทดแทนสาร PFOS ในกระบวนการอุตสาหกรรม เนื่องจากมีสายคาร์บอนที่สั้นกว่า