



**TURUN
YLIOPISTO**

**Per- ja polyfluorialkyyliyhdisteiden (PFAS)
esiintyminen elintarvikkeissa ja menetelmät niiden
poistamiseksi**

Biokemian
kandidaatin tutkielma

Laatija: Lauri Nurmi

2.5.2025

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Kandidutkielma

Oppiaine: Biokemia

Tekijä(t): Lauri Nurmi

Otsikko: Per- ja polyfluorialkyyliyhdisteiden (PFAS) esiintyminen elintarvikkeissa ja menetelmät niiden poistamiseksi

Ohjaaja(t): Tutkijatohtori Tanja Seppälä ja professori Baoru Yang

Sivumäärä: 17 sivua

Päivämäärä: 2.5.2025

Per- ja polyfluorialkyyliyhdisteet (PFAS) ovat fluoria sisältäviä hiilyyhdisteitä. Ne ovat kemiallisesti erittäin pysyviä niissä esiintyvien C – F- sidosten vuoksi. Pysyvyyden vuoksi PFAS-yhdisteet eivät hajoa spontaanisti, vaan kertyvät ympäristöön ja organismeihin. Ympäristöön PFAS-yhdisteitä päätyy erityisesti teollisuuden päästöistä sekä jätevesistä. PFAS-yhdisteitä käytetään myös monissa elintarvikkeiden kanssa kontaktissa olevissa materiaaleissa, kuten pakkauksissa ja keittiövälineissä. Ympäristön ja kontaktimateriaalien kautta PFAS-yhdisteet voivat päätyä elintarvikkeisiin ja sitä kautta ihmiskehoon. PFAS-yhdisteet aiheuttavan monenlaisia terveyshaittoja, kuten immuunijärjestelmän heikkenemistä. PFAS-pitoisuudet vaihtelevat merkittävästi erilaisten elintarvikkeiden välillä. Kala ja merenelävät sisältävät keskimäärin suurimpia PFAS-pitoisuuksia, kasviperäisissä elintarvikkeissa PFAS-pitoisuudet yleensä pienempiä. Myös alueellinen vaihtelu elintarvikkeiden PFAS-pitoisuuksissa on merkittävää. Elintarvikkeiden PFAS-pitoisuuden määrittämiseen käytetään tyypillisesti erilaisia nestekromatografiaan perustuvia analyysimenetelmiä, myös biologisia menetelmiä tutkitaan. PFAS-yhdisteiden terveyshaittojen vuoksi on tärkeää, että niitä pystytään poistamaan sekä elintarvikkeista, että kontaminaation lähteistä, kuten ympäristöstä. On havaittu, että yksinkertainen paistaminen vähentää PFAS-pitoisuutta kalassa ja merenelävissä. Ympäristöstä PFAS-yhdisteitä voidaan poistaa erilaisilla fysikaalis-kemiallisilla käsittelyillä. Lisäksi tutkitaan mahdollisuuksia mikrobien käytössä PFAS-yhdisteiden poistamiseen ympäristöstä.

Avainsanat: elintarvikkeet, ympäristö, PFAS, kontaminaatio, poistaminen

Sisällysluettelo

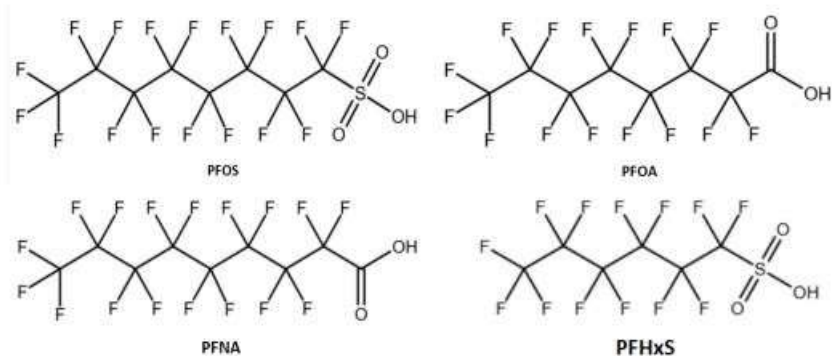
1	Johdanto	4
2	PFAS-yhdisteiden reitit elintarvikkeisiin	6
3	PFAS-yhdisteiden esiintyminen elintarvikkeissa	8
3.1	Kala ja merenelävät	8
3.2	Lihatuotteet	9
3.3	Kananmunat	10
3.4	Maitotuotteet	10
3.5	Kasvituotteet	11
4	Menetelmät PFAS-yhdisteiden havaitsemiseksi	12
5	Menetelmät PFAS-yhdisteiden poistamiseksi	15
5.1	Yksinkertaiset lämpökäsittelyt	15
5.2	Muut fysikaalis-kemialliset käsittelyt	16
5.3	Biologiset käsittelyt	18
6	Yhteenveto	20
	Lähteet	21

1 Johdanto

Per- ja polyfluorialkyyliyhdisteet (PFAS) ovat laaja ryhmä fluoria sisältäviä hiilyhdisteitä. PFAS-yhdisteissä fluoriatomit ovat korvanneet hiiliketjussa tyypillisesti esiintyvät vetyatomit tai osan niistä. Nämä hiilen ja fluorin väliset sidokset ovat erityisen voimakkaita, mikä selittää PFAS-yhdisteiden poikkeuksellisen voimakasta kemiallista pysyvyyttä.

PFAS-yhdisteiden voimakas kemiallinen pysyvyys on ongelmallista, sillä se mahdollistaa niiden kertymisen elinympäristöihin, kuten vesistöihin ja maaperään. Elinympäristöistä PFAS-yhdisteet voivat siirtyä ravintona käytettyihin eläimiin ja kasveihin. Koska PFAS-yhdisteet eivät hajoa näiden eliöiden elimistöissä, päätyvät ne ravinnon mukana ihmiskehoon. THL:n (2024) mukaan suomalaisten merkittävin PFAS-altistuksen lähde onkin ravinto. Vähäistä altistumista tapahtuu myös huonepölyn ja hengitysilman kautta. Merkittävimpiä yksittäisiä PFAS-yhdisteille altistavia ruoka-aineita ovat kala, hedelmät, liha sekä kananmunat (Schrenk ja muut 2020).

Eri organisaatioilla on erilaisia määritelmiä PFAS-yhdisteille, joten arvio niiden määrästä vaihtelee lähteestä riippuen. Laajasta PFAS-yhdisteiden joukosta muutamat ovat erityisen merkittäviä elintarvikkeiden kannalta. Näitä ovat muun muassa perfluoriooktaanisulfonihappo (PFOS), perfluoriooktaanihappo (PFOA), perfluorinonaanihappo (PFNA) sekä perfluoriheksaanisulfonihappo (PFHxS). Näiden neljän PFAS-yhdisteen rakenne on esitetty kuvassa 1. Euroopan elintarviketurvallisuusvirasto (EFSA) on linjannut, että ihminen voi altistua viikossa näille neljälle yhdisteelle yhteensä 4,4 nanogrammaa painokiloa kohden ilman merkittäviä terveysriskejä (Schrenk ja muut 2020). THL on määrittänyt PFAS-yhdisteiden pitoisuuksia suomalaisten seerumissa ja havainnut, että ne ylittävät matalan riskin rajan (THL 2024). Viimeisin laaja mittaus on vuodelta 2014, jonka jälkeen pitoisuuksien tiedetään pienentyneen muun muassa rajoitustoimien ansiosta. PFAS-yhdisteet eivät THL:n mukaan ole keskeinen terveyshaittojen aiheuttaja Suomessa. EFSA:n arvioiden mukaan tilanne ei kuitenkaan ole yhtä hyvä muualla Euroopassa (Schrenk ja muut 2020).



Kuva 1. Perfluorioktaanisulfonihapon (PFOS), perfluorioktaanihapon (PFOA), perfluorinonaaninonihapon (PFNA) ja perfluoriheksaanisulfonihapon (PFHxS) rakennekaavat.

PFAS-yhdisteillä on havaittu olevan monia haitallisia terveysvaikutuksia. Yksi parhaiten tunnetuista on immuunijärjestelmää heikentävät vaikutukset (Ehrlich ja muut 2023). Kenties huolestuttavin PFAS-yhdisteiden vaikutus immuunijärjestelmään on rokotteiden tehokkuuden heikkeneminen. Erityisen haitallista tämä on imetysikäisille vauvoille, jotka altistuvat PFAS-yhdisteille äidinmaidon kautta. Aikuisilla huolenaiheena on tehosterokotteiden heikentynyt teho. Immuunijärjestelmää heikentävien vaikutusten lisäksi on epäilty PFAS-yhdisteiden heikentävän lisääntymisterveyttä sekä naisilla, että miehillä (Qu ja muut 2024).

Tässä tutkielmassa käsitellään PFAS-yhdisteiden keskeisiä reittejä elintarvikkeisiin, niiden esiintyvyyttä erityyppisissä elintarvikkeissa sekä tutustutaan erilaisiin kromatografisiin ja biologisiin menetelmiin PFAS-yhdisteiden tunnistamiseen ja kvantitointiin elintarvikkeista ja ympäristöstä. Lisäksi käsitellään fysikaalisia sekä biologisia menetelmiä PFAS-kontaminaation poistamiseen.

2 PFAS-yhdisteiden reitit elintarvikkeisiin

Yksi merkittävimmistä ympäristöperäisistä PFAS-kontaminaation lähteistä ovat vesistöt, joihin PFAS-yhdisteet päätyvät lukuisista eri lähteistä (Salvatore ja muut 2022). Pelkästään Yhdysvalloissa uskotaan olevan yli 57 000 kohdetta, joista PFAS-yhdisteet pääsevät saastuttamaan vesistöjä ja muuta ympäristöä. Kohteisiin kuuluu teollisuuskohteita, jätevedenpuhdistamoita, sotilaskohteita sekä lentokenttiä. Näistä selvästi suurin osa, noin 85 %, on teollisuuskohteita. Suomessa ei ole suoritettu yhtä kattavaa kartoitusta, mutta on todennäköistä, että kontaminaation lähteet ovat samankaltaisia (Junntila ja muut 2019). Itämereen päätyy ainakin 17 kilogrammaa PFAS-yhdisteitä vuosittain. Erityisesti Vantaanjoessa PFAS-kontaminaatio on runsasta.

Yleisesti tunnetuimpia PFAS-yhdisteiden käyttökohteita teollisuudessa ovat tarttumattomalla pinnoitteella päällystettyjen keittiötarvikkeiden, kuten paistinpannujen, valmistus sekä erilaiset vettä kestävätkä tekstiilit (Glüge ja muut 2020). Näiden lisäksi käyttökohteita on lukuisia, kuten maalit ja elektroniikassa käytettävät piirilevyt. Käytettyjä PFAS-yhdisteitä on yli 1400 ja niiden käyttökohteita yli 200 erilaista. Yhdysvalloissa teollisuuden PFAS-päästöjä pyritään seuraamaan Yhdysvaltain ympäristönsuojeluviraston (EPA) TRI (Toxic release inventory)-tietokannan avulla (Salvatore ja muut 2022). EPA kuitenkin vaatii ainoastaan 175 PFAS-yhdisteen käytön ilmoittamisen, minkä vuoksi tietokannan tietojen perusteella saatu kuva PFAS-yhdisteiden käytöstä ei ole todenmukainen. Tehtaat jättävät ilmoitukset usein myös tekemättä. Esimerkiksi vuonna 2020 TRI-tietokantaan lisättiin vain 39 ilmoitusta PFAS-yhdisteiden käyttöön liittyen, mikä on luultavasti huomattavasti alakanttiin. Pohjoismailla on yhteinen SPIN (Substances in Preparations in Nordic Countries)-tietokanta, jolla seurataan pohjoismaissa teollisuudessa käytettyjen kemikaalien määriä sekä niiden käyttökohteita (Glüge ja muut 2020). Tietokannassa on mukana myös PFAS-yhdisteitä. Tietokannan mukaan pohjoismaiden suurimmat PFAS-yhdisteitä käyttävät teollisuuden alat ovat muovin ja kumin tuotanto, elektroniikkateollisuus sekä maali- ja pintakäsittelyaineiden valmistus. Muita merkittäviä aloja ovat rakennusteollisuus sekä kemianteollisuus.

Lentokenttien ja sotilaskohteiden aiheuttaman PFAS-kontaminaation lähde on pääasiassa vesipitoisen kalvon muodostavat sammutusvaahdot eli AFFF-sammutusaineet (Salvatore ja muut 2022). Näitä aineita käytetään erityisesti polttoainepalojen sammuttamiseen.

Yhdysvaltain ilmailuhallinnon (FAA) direktiivin mukaan fluorattujen AFFF-sammutusaineiden käyttö olisi pitänyt lopettaa vuonna 2021. Käyttö on kuitenkin edelleen jatkunut, sillä käyttöön hyväksytyä korvaavaa sammutusainetta ei ole ollut saatavilla. Harjoituskäytössä AFFF:ien käyttö on kuitenkin lopetettu.

Kontaminaation lähteeksi mainitaan lisäksi jätevedenpuhdistamot (Salvatore ja muut 2022). Jäteveden puhdistusprosessissa ei itsessään käytetä PFAS-yhdisteitä, mutta jätevesi sisältää niitä usein. Vedenpuhdistusprosessin aikana ne eivät poistu vedestä täysin ja vapautuvat puhdistamolta ympäristöön veden mukana. Osa PFAS-yhdisteistä sen sijaan jää puhdistamalla kerättävään lietteeseen, jota käytetään pelloilla lannoitteena.

Ympäristöperäisen kontaminaation lisäksi PFAS-yhdisteet voivat päätyä elintarvikkeisiin erilaisten materiaalien kautta. PFAS-yhdisteitä on käytetty pakkausmateriaaleissa mm. niiden vettä ja rasvaa hylkivien ominaisuuksien ansiosta (Schaidler ja muut 2017). Tällaisia ominaisuuksia vaativat esimerkiksi pikaruokaravintoloiden lyhytaikaiseen ruoan säilyttämiseen tarkoitettut pakkaukset, kuten kääreet sekä mikropopkornipakkaukset. PFAS-yhdisteet, kuten muutkin pakkausmateriaalien sisältämät yhdisteet, voivat siirtyä pakkauksesta niissä säilytettäviin elintarvikkeisiin ja epäsuorasti lisätä ravinnosta saatavan PFAS-kuormituksen määrää (Ramírez Carnero ja muut 2021). Siirtymistehokkuuteen vaikuttavat ainakin elintarvikkeen rasvapitoisuus, kosteus, pH sekä suolapitoisuus.

On myös saatu näyttöä, että PFAS-yhdisteitä sisältävät paistinpannut saattavat aiheuttaa PFAS-kontaminaatiota elintarvikkeissa (Cole ja muut 2024). Tarttumattomalla pinnoitteella päällystetyissä paistinpannuissa käytetään usein Teflonia (polytetrafluorieteeni). Cole ja muut (2024) tutkivat muun muassa Teflon-pannujen aiheuttamaa PFAS-kontaminaatiota käyttämällä tyypillisen ruoan koostumusta jäljittelevää hyytelöä. He havaitsivat, että Teflon-paistinpannulla paistetusta hyytelöstä löytyi muutamia Teflon-mikrohiukkasia. Uusista paistinpannuista irtosi keskimäärin kaksi mikrohiukkasta ja vanhemmista viisi.

3 PFAS-yhdisteiden esiintyminen elintarvikkeissa

PFAS-pitoisuudet vaihtelevat erityyppisten elintarvikkeiden välillä (Pasecnaja ja muut 2022). Eläinperäiset elintarvikkeet sisältävät keskimääräisesti suurempia PFAS-pitoisuuksia kuin kasviperäiset. Alueellinen vaihtelu elintarvikkeiden PFAS-pitoisuudessa on merkittävää, jonka vuoksi keskimääräisen PFAS-pitoisuuden määrittäminen tietyille elintarvikeryhmälle ei ole mahdollista. Tässä luvussa pyritäänkin muodostamaan yleiskuva erityyppisten elintarvikkeiden aiheuttamasta PFAS-altistuksesta muutaman esimerkkitutkimuksen avulla.

3.1 Kala ja merenelävät

PFAS-pitoisuuksia kalassa ja merenelävissä on tutkittu säännöllisesti (Schrenk ja muut 2020). Pitoisuudet ovat melko korkeita etenkin muihin elintarvikeryhmiin verrattuna, erityisesti PFOS- ja PFOA-kontaminaatio on runsasta. Yksi mahdollinen selitys tälle on vesistöjen muita elinympäristöjä runsaampi PFAS-kontaminaatio. Alueellinen sekä lajienvälinen vaihtelu PFAS-pitoisuuksissa on myös merkittävää.

Itämerestä kalastetun kalan PFAS-pitoisuus vaihtelee välillä 0,31 – 10 nanogrammaa grammassa kalaa (Koponen ja muut 2015). Suurimmat keskimääräiset pitoisuudet löytyivät lohesta sekä kuhasta. Suurimmat yksittäiset pitoisuudet taas löytyivät silakasta sekä kuhasta. Alueellinen vaihtelu oli merkittävää myös Itämeren sisällä. Matalimmat keskimääräiset PFAS-pitoisuudet havaittiin Hangon edustalta pyydystetyistä kaloista (noin 0,30 ng g⁻¹). Korkeimmat pitoisuudet havaittiin Oulun ja Porin edustalta pyydystetystä kalasta (6,2 – 7,4 ng g⁻¹). Koponen ja muut (2015) määrittivät lisäksi PFAS-pitoisuuksia sisävesistä pyydetystä kalasta. Tutkitut sisävesialueet olivat Päijänne ja Vanhankaupunginlahti. Päijänteestä pyydytetyn kalan PFAS-pitoisuus oli samalla tasolla tai hieman alempi kuin Itämerestä pyydytetyllä. Vanhankaupunginlahden ahvenet sisälsivät huomattavasti Itämeren ahvenia enemmän PFAS-yhdisteitä. Pitoisuus vaihteli välillä 20 – 46 ng g⁻¹. Syy tälle on luultavasti Vantaanjoen varren teollisuuslaitokset ja vedenpuhdistamot. Koponen ja muut (2015) tutkivat lisäksi PFAS-pitoisuutta kalakasvattamossa kasvatetussa kalassa. Pitoisuus ei ylittänyt määritysrajaa millään tutkituista lajeista.

Muualla Euroopassa kalan PFAS-pitoisuuksia on tutkittu ainakin Kreikassa (Kedikoglou ja muut 2019) ja Belgiassa Flanderin alueella (Cornelis ja muut 2012). Molemmat tutkimukset määrittivät PFOA:n sekä PFOS:n pitoisuuksia. Kreikkalaisen kalan PFOA-pitoisuus vaihteli

välillä 0,58 – 6,19 ng g⁻¹ ja PFOS-pitoisuus välillä <0,5 – 5,8 ng g⁻¹ (Kedikoglou ja muut 2019). Myös Kreikassa suurimmat elintarvikkeiden PFAS-pitoisuudet löytyivät kalasta. Cornelis ja muut (2012) erottelivat tutkimuksessaan merikalat sekä makean veden kalat. Merikalojen PFOS-pitoisuus vaihteli välillä <0,12 – 62 ng g⁻¹ ja makean veden kalojen välillä 1,3 – 551 ng g⁻¹. Vastaavat PFOA-pitoisuudet vaihtelivat väleillä <0,065 – 5,4 ng g⁻¹ sekä <0,6 – 9,13 ng g⁻¹. Flanderin alueen kalojen PFAS-pitoisuus on mahdollisesti keskimääräistä korkeampi alueen PFAS-yhdisteitä käyttävän teollisuuden vuoksi.

3.2 Lihatuotteet

Kalan ja merenelävien ohella PFAS-yhdisteitä havaitaan säännöllisesti myös muissa eläinperäisissä elintarvikkeissa. Erityisen runsaita PFAS-pitoisuuksia on havaittu maksassa, johon PFAS-yhdisteet ja muutkin ympäristömyrkyt tyypillisesti kertyvät (Schrenk ja muut 2020).

Tyypillisesti ravintona käytettävien eläinten, kuten naudan, lampaan ja porsaan yleisesti syötävät osat, kuten sisä- ja ulkofilee eivät keskimäärin sisällä suuria määriä PFAS-yhdisteitä (Hlouskova ja muut 2013). Hlouskovan ja muiden (2013) tutkimuksessa näiden eläinten fileen PFAS-pitoisuus oli suurimmalla osalla näytteistä alle 0,10 ng g⁻¹. Vain kahdella näytteellä pitoisuus oli hieman tämän arvon yli, mutta ei silti korkea. Samojen eläinlajien maksojen PFAS-pitoisuus oli sen sijaan huomattavasti korkeampi. Selvästi suurin maksan PFAS-pitoisuus saatiin belgialaisista näytteistä, joissa se oli 2,99 ng g⁻¹ vastaavan fileen PFAS-pitoisuuden ollessa noin 0,070 ng g⁻¹. Maksan PFAS-pitoisuus oli siis tässä tapauksessa yli 40-kertainen fileeseen verrattuna. Muilla alueilla pitoisuudet maksassa olivat pienempiä, Norjassa ja Italiassa noin 0,65 ng g⁻¹ ja Tšekissä noin 0,29 ng g⁻¹.

Naudan lihassa havaittiin ainoastaan perfluoro-oktaanisulfoamidia (PFOSA) (Hlouskova ja muut 2013). Belgialaisissa nautanäytteissä PFOS oli kuitenkin runsain. Porsaan lihassa PFBA oli runsain kaikilla näytteillä. Maksanäytteiden runsain PFAS-yhdiste oli PFOS.

3.3 Kananmunat

Kananmunat ovat keskeinen osa ihmisten ruokavaliota. Niitä käytetään sellaisenaan, leivonnassa ja muun muassa majoneesien raaka-aineena. Useissa tutkimuksissa on havaittu, että myös kananmunat sisältävät PFAS-yhdisteitä.

Hlouskova ja muut (2013) määrittivät 21 eri PFAS-yhdisteen yhteispitoisuuksia useissa erilaisissa elintarvikkeissa, joista yksi ryhmä oli kananmunat. Tutkitut elintarvikkeet olivat peräisin neljästä Euroopan valtiosta: Belgiasta, Italiasta, Norjasta sekä Tšekistä. Kananmunien PFAS-pitoisuus oli tutkituista elintarvikeryhmistä kolmanneksi suurin jokaisen valtion näytteissä. Korkeampia pitoisuuksia havaittiin kalassa ja merenelävissä sekä naudan ja sian maksassa.

Korkein PFAS-pitoisuus havaittiin Belgiasta hankituista näytteistä, joissa se oli 0,245 ng g⁻¹ (Hlouskova ja muut 2013). Norjalaisten näytteiden PFAS-pitoisuus oli 0,195 ng g⁻¹ ja italialaisten 0,131 ng g⁻¹. Matalin pitoisuus havaittiin tšekkiläisissä näytteissä, joissa se oli 0,0455 ng g⁻¹.

Pitoisuuden lisäksi kananmunanäytteiden sisältämien PFAS-yhdisteiden välillä näyttää olevan alueellista vaihtelua (Hlouskova ja muut 2013). Italialaiset ja tšekkiläiset näytteet sisälsivät runsaasti perfluorobutaanihappoa (PFBA), kun taas norjalaisissa näytteissä selvästi runsain PFAS-yhdiste oli PFOS.

3.4 Maitotuotteet

Myös maitotuotteiden on havaittu olevan väylä PFAS-yhdisteille altistumiselle (Pasecnaja ja muut 2022). Maidon PFAS-kontaminaation määrään vaikuttaa moni asia, kuten tuotantoeläinten terveys ja niille syötettävän rehun puhtaus.

Puolalaisissa maitotuotteissa runsaiten esiintyviä PFAS-yhdisteitä ovat PFOA ja PFBA (Sznajder-Katarzyńska ja muut 2019). Tutkimuksessa määritettiin yhteensä kymmenen eri PFAS-yhdisteiden pitoisuuksia. PFBA:n pitoisuus vaihteli tuotteesta riippuen välillä 0,11 – 2,56 ng g⁻¹ ja PFOA:n välillä 0,07 – 0,50 ng g⁻¹. Korkein PFAS-yhdisteiden yhteispitoisuus oli luonnonjogurtista saatu 7,39 ng g⁻¹. Muita korkeahkoja pitoisuuksia havaittiin voista (4,18 ng

g^{-1}) ja Kefiiri-maitojuomasta ($3,56 \text{ ng g}^{-1}$). Näytteiden välinen vaihtelu oli kuitenkin tässäkin tutkimuksessa suurta.

Yleisesti ottaen Sznajder-Katarzyńskan ja muiden (2019) saamia PFAS-pitoisuuksia voisi pitää poikkeuksellisen korkeana, sillä monissa muissa tutkimuksissa ei ole havaittu yhtä korkeita pitoisuuksia. Hlouskova ja muut (2013) saivat tutkimuksessaan tuloksena matalia PFAS-pitoisuuksia maitotuotteissa. Pitoisuudet eivät ylittäneet arvoa $0,1 \text{ ng g}^{-1}$.

3.5 Kasvituotteet

Uskotaan, että kasvit voisivat saada PFAS-yhdisteitä juuriensa kautta kontaminoituneesta maaperästä ja vedestä (Schrenk ja muut 2020). Tutkimustieto kasvien PFAS-kontaminaation mekanismeista on vielä vähäistä, mutta PFAS-yhdisteitä on havaittu ainakin hedelmissä ja viljoissa (D'Hollander ja muut 2015). Lisäksi hiljattain on havaittu muun muassa soijan sekä riisiin sisältävän PFAS-yhdisteitä (Li ja muut 2024).

D'Hollander ja muut (2015) määrittivät kahdentoista eri PFAS-yhdisteen pitoisuutta eurooppalaisissa viljatuotteissa ja hedelmissä. PFOA ja PFOS olivat yleisimmän havaitut yhdisteet. Hedelmissä PFAS-yhdisteitä havaittiin viljatuotteita enemmän, mutta havaitut pitoisuudet eivät olleet suuria kummassakaan elintarvikeryhmässä, korkeimmillaan vain $0,54 \text{ ng g}^{-1}$. Vaikka pitoisuudet ovat pieniä, voivat ne olla merkittäviä ihmisten terveyden kannalta, sillä hedelmiä ja viljatuotteita syödään yleensä suurehkoja määriä (Schrenk ja muut 2020).

Li ja muut (2024) määrittivät 20 PFAS-yhdisteen pitoisuutta eri puolilla Kiinaa viljellyistä soijapavuista sekä riisistä. Soijapavuissa yleisimmät PFAS-yhdisteet olivat PFBA sekä PFOA. Riisissä yleisin PFAS-yhdiste oli OBS (natrium perfluorinonaanioksybentseenisulfonaatti). Lyhytketjuisia PFAS-yhdisteitä havaittiin enemmän kuin pitkäketjuisia. Soijapapujen PFAS-yhteispitoisuus oli $1,01 \text{ ng g}^{-1}$ ja riisiin $0,570 \text{ ng g}^{-1}$. Soijapapujen korkeampaa pitoisuutta voisi selittää niiden suurempi proteiini- ja lipidipitoisuus.

4 Menetelmät PFAS-yhdisteiden havaitsemiseksi

PFAS-yhdisteiden havaitsemiseen sekä pitoisuuden määrittämiseen käytetään useimmiten kromatografiaan perustuvia analyysijä. Erityisesti nestekromatografia on yleistä, sillä PFAS-yhdisteiden korkeat höyrystymispisteet vaikeuttavat kaasukromatografian käyttöä. Hiljattain on myös tutkittu biologisien organismien käyttöä vaihtoehtona kromatografisille menetelmille.

4.1 Kromatografiaan perustuvat menetelmät

Kromatografiset erottelumenetelmät ovat olleet jo pitkään käytössä ja niiden on havaittu toimivan myös usean PFAS-yhdisteen havaitsemiseen. Muun muassa Yhdysvaltain ruoka- ja lääkevirasto (FDA) sekä Yhdysvaltain maatalousvirasto (USDA) ovat kehittäneet kromatografiaan perustuvat menetelmät PFAS-yhdisteiden havaitsemiseen elintarvikkeista. FDA:n menetelmä (C-010.03) perustuu perinteiseen kaksivaiheiseen QuEChERS-näytteenesikäsittelymenetelmään (Genualdi ja deJager 2024). QuEChERS on lyhenne englannin kielisistä sanoista ”Quick, Easy, Cheap, Effective, Rugged and Safe” (nopea, helppo, halpa, toimiva, vakaa ja turvallinen). Menetelmän ensimmäisessä vaiheessa näyte uutetaan asetonitriilillä ja vesi poistetaan saostamalla suolan avulla (Stevens ja Jones 2010). Tämän jälkeen näytteestä poistetaan epäpuhtaudet uuttamalla kiinteällä sorbentilla ja esikäsittely on valmis. QuEChERS toteutetaan usein kaupallisella valmispakkauksella, joka sisältää tarvittavan suolan sekä pylvään, joka sisältää epäpuhtauksien poistossa käytettävän kiinteän sorbentin. Näytteen esikäsittelyn jälkeen itse erotus tapahtuu nestekromatografilla, jossa ajoliuoksina käytetään 5 mM ammoniumasetaattia ja 5 mM 1-metyyli piperidiini tislattuun veteen liuotettuna sekä 100 % metanolia (Genualdi ja deJager 2024).

USDA:n menetelmässä (CLG – PFAS 2.04) jäädytetty näyte homogenisoidaan jauhamalla, minkä jälkeen plasman annetaan sulaa (Shaw 2023). Sulaneeseen plasmaan lisätään aktiivihiihtä, jota haudutetaan vielä ennen kromatografista analyysia. Kromatografinen analyysi suoritetaan erittäin korkean suorituskyvyn nestekromatografilla (UHPLC), jossa ajoliuoksina käytetään 2 mM ammoniumasetaattia sekä 100 % metanolia. THL:n käyttämässä menetelmässä näytettä esikäsitellään tarvittaessa entsyymaattisesti, jonka jälkeen näyte uutetaan orgaanisella liuottimella (THL 2023). Määrittäminen tehdään nestekromatografisesti kolmoiskvadrupolimassaspektrometrillä.

Taylor ja Sapozhnikova (2022) tutkivat QuEChERSER-näytteenkäsittelymenetelmän käyttökelpoisuutta elintarvikkeille suunnatussa PFAS-analytiikassa. QuEChERSER on hiljattain kehitetty uudistettu versio vanhemmasta QuEChERS-menetelmästä (Lehotay 2022). Menetelmän alkuperäisen nimen loppuun lisätty ER-pääte muodostuu sanoista ”effective and robust” (tehokas ja vankka). Nykyaikaisten kromatografien kanssa käytettynä se tarjoaa paremmat mahdollisuudet analyysiin mm. lisäämällä tunnistettavissa olevia yhdisteitä. Taylor ja Sapozhnikova vertailivat lisäksi menetelmän suorituskykyä verrattuna edellä mainittuihin laajasti käytettyihin FDA:n ja USDA:n menetelmiin. Analyysin he suorittivat erittäin korkean suorituskyvyn nestekromatografilla (UHPLC). Massa-analyysi suoritettiin korkean resoluution massaspektrometrillä sekä kolmoiskvadrubolimassaspektrometrillä. Näiden kahden eri massaspektrometrin suorituskykyä vertailtiin keskenään. Tutkimuksessaan he käyttivät näytteitä naudasta, monnista sekä kananmunista.

QuEChERSER-menetelmän havaittiin olevan käyttökelpoinen PFAS-yhdisteiden analytiikkaan käytetyillä näytteillä (Taylor ja Sapozhnikova 2022). Menetelmän suorituskyvyn havaittiin lisäksi olevan parempi tai vähintään yhtä hyvä kuin FDA:n ja USDA:n menetelmillä. Ainut oleellinen ero näillä menetelmillä oli näytteen esikäsittely ja itse analyysi suoritettiin pääpiirteittäin samoin. Lisäksi menetelmällä pystyttiin tunnistamaan enemmän PFAS-yhdisteitä kuin vertailluilla menetelmillä.

PFAS-kontaminaatiota ympäristössä, erityisesti vesistöissä, on perinteisesti määritetty EPA:n niin kutsutulla Method 537 - menetelmällä tai uudemmalla 537.1 - menetelmällä (Shoemaker ja muut 2023). Menetelmä perustuu kiinteäfaasiuuttoon, nestekromatografiaan sekä Tandem-massaspektrometriaan. Menetelmällä voidaan tunnistaa 18 erilaista PFAS-yhdistettä, mutta se on kallis toteuttaa, eikä tulosta yleensä saada nopeasti, sillä menetelmää saavat käyttää ainoastaan EPA:n valtuuttamat laboratoriot (Young ja muut 2021).

4.2 Biologiset menetelmät

Yhdeksi vaihtoehdoksi kromatografiaan perustuville analyysimenetelmille on ehdotettu biologisia organismeja, sillä useiden mikrobien on havaittu olevan vuorovaikutuksessa PFAS-yhdisteiden kanssa (Yi ja muut 2019). Synteettisen biologian tarjoamilla ratkaisuilla pyritään nopeampaan, helpompaan ja edullisempaan analyysiin (Young ja muut 2021).

Biologisia menetelmiä ei ole vielä laajasti tutkittu. Todennäköisesti merkittävin aihetta käsittelevä tutkimus on vuonna 2021 julkaistu tutkimus, jossa Young tutkimusryhmineen tutki geneettisesti muokatun *Rhodococcus Jostii*-bakteerin RHA1-kannan hyödyntämistä PFAS-yhdisteiden havaitsemisessa sekä kvantifioinnissa. Bakteeriin oli kloonattu systeemi, jossa punaista fluoresenssivaloa lähettävän RFP-proteiinin ekspressiota säätelee prmA-promoottori. PFAS-yhdisteiden vaikutuksesta promoottori aktivoituu ja käynnistää säätelemiensä geenien ekspression. Ryhmä havaitsi reaaliaikaisen PCR:n avulla, että bakteerien prmA-promoottorin säätelemien geenien ekspressio kolminkertaistui bakteerien altistuessa PFAS-yhdisteille liuoksessa. PFAS-yhdisteitä sisältämättömässä vertailunäytteessä prmA-ekspressio oli mitätöntä.

PFAS-yhdisteiden läsnäolo ja pitoisuus voitaisiin siis määrittää näytteestä saatavan fluoresenssin perusteella (Young ja muut 2021). Fluoresenssin määrä olisi suoraan verrannollinen näytteen PFAS-pitoisuuteen, sillä prmA-promoottorin säätelemän RFP-proteiinin ekspressio kasvaa PFAS-pitoisuuden noustessa. Tällainen määrittäminen voitaisiin tehdä myös heikommin varustelluissa laboratorioissa ja mahdollisesti jopa kentällä.

Youngin ryhmän koejärjestelyissä bakteerisolut eivät kuitenkaan tuottaneet fluoresenssia riittävästi, eikä sitä voitu havaita visuaalisesti tai mittauslaitteella, vaikka pystyttiin toteamaan prmA-promoottorin vaste näytteen PFAS-yhdisteille. Saadut tulokset olivat kuitenkin lupaavia, ja tutkitun prmA-promoottorin sekä prmA/RFP-systeemin optimointi ja parempi ymmärtäminen ovat edelleen tutkimuksen kohteena. Tutkitaan myös mahdollisuutta, että jokin toinen promoottori voisi olla vielä herkempi PFAS-yhdisteille kuin prmA.

Biologisten menetelmien soveltuvuutta PFAS-yhdisteiden tunnistamiseen elintarvikkeista ei ole vielä tutkittu, mutta ympäristön PFAS-kontaminaation helppo ja luotettava tunnistaminen on merkittävää myös elintarvikkeiden kannalta, sillä merkittävä osa niiden PFAS-kontaminaatiosta on ympäristöperäistä.

5 Menetelmät PFAS-yhdisteiden poistamiseksi

PFAS-yhdisteiden terveyshaittojen vuoksi on tärkeää, että niitä pystytään poistamaan elintarvikkeista. Lisäksi on oleellista pystyä puhdistamaan PFAS-yhdisteitä pois ympäristöstä, sillä saastunut ympäristö on merkittävä PFAS-kontaminaation lähde elintarvikkeissa. PFAS-yhdisteiden poistamisesta tekee haastavaa niiden poikkeuksellisen voimakas kemiallinen pysyvyys.

5.1 Yksinkertaiset lämpökäsittelyt

Tutkimuksissa on saatu näyttöä, että yksinkertaiset lämpökäsittelyt vähentävät PFAS-pitoisuuksia kalassa ja muissa merenelävissä (Del Gobbo ja muut 2008). Käytännössä tällainen lämpökäsittely tarkoittaa normaalia paistamista. Paistamisen uskotaan heikentävän sidosta, jolla PFAS-yhdiste on kiinnittynyt lihan proteiineihin. Tämän sidoksen heikentyessä PFAS-yhdiste irtaantuu ja poistuu paistettavasta elintarvikkeesta siitä erittyvien nesteiden mukana. Paistaminen ei siis tuhoa PFAS-yhdisteitä itsessään, vaan ne siirtyvät kypsennisympäristöön, esimerkiksi veteen tai ruokaöljyyn.

Vendl ja muut (2022) ovat arvioineet meta-analyysissään viiden eri parametrin vaikutusta PFAS-yhdisteiden poistumistehokkuuteen merenelävistä paistamisen aikana. Arvioidut parametrit olivat paistolämpötila, paistoaika, paistonesteen ja paistettavan kudoksen välinen määräsuhde, PFAS-yhdisteen hiiliketjun pituus sekä paistoympäristö. Meta-analyysissään he käyttivät kymmentä soveltuvaa artikkelia.

Havaittiin, että paistamisen kesto vaikutti näistä parametreista PFAS-pitoisuuteen eniten (Vendl ja muut 2022). Kymmenen minuutin paistamisella PFAS-pitoisuus laski 56 % alkuperäisestä, 25 minuutin jälkeen pitoisuus oli vähentynyt 86 % alkuperäisestä. Ryhmä uskoo tämän johtuvan siitä, että paistoajan kasvaessa useampi PFAS-proteiini-sidos ehtii katketa. Sen sijaan paistolämpötilalla ei ollut suurta merkitystä PFAS-pitoisuuden laskuun.

Paistoympäristöllä (vesi, ruokaöljy tai ei mitään) havaittiin olevan vain vähäistä merkitystä PFAS-yhdisteiden poistumistehokkuuteen (Vendl ja muut 2022). Kun paistamiseen käytettiin ruokaöljyä, poistuivat lyhyketjuiset PFAS-yhdisteet pitkäketjuisia tehokkaammin. Muissa paistoympäristöissä vastaavaa eroa ei havaittu. Lisäksi suurempi määrä paistonestettä suhteessa

paistettavan kudoksen määrään tehosti PFAS-yhdisteiden poistumista. Tämä vaikutus oli voimakkaampi vettä paistonesteenä käytettäessä.

Tiedot lämpökäsittelyn merkityksestä rajoittuvat toistaiseksi mereneläviin, sillä asiaa ei ole tutkittu riittävästi muun tyyppisille elintarvikkeille (Vendl ja muut 2022). Tällainen helppo ja erikoisvälineitä vaatimaton menetelmä on kuitenkin merkittävä mereneläviin rajoittuessaankin, sillä ne sisältävät keskimäärin suurimpia pitoisuuksia PFAS-yhdisteitä (Schrenk ja muut 2020). Tulevaisuudessa olisi kuitenkin tärkeää selvittää, onko lämpökäsittelyillä samanlaisia vaikutuksia myös muunlaisten elintarvikkeiden, kuten naudan, porsaan sekä siipikarjan lihan kohdalla.

5.2 Muut fysikaalis-kemialliset käsittelyt

Yksinkertaisten lämpökäsittelyiden lisäksi on tutkittu myös muita fysikaalis-kemiallisia tapoja PFAS-yhdisteiden poistamiseen. Tällaisia ovat muun muassa ultraääneen perustuvat sonokemialliset käsittelyt sekä VEG-teknologiaa (vapor energy generator) hyödyntävät käsittelyt (Verma ja muut 2023). Nämä menetelmät eivät suoraan sovellu elintarvikkeille käytettäväksi muun muassa niissä käytettävien korkeiden lämpötilojen vuoksi. Niitä voidaan kuitenkin hyödyntää esimerkiksi juomaveden sekä maaperän PFAS-kontaminaation poistamiseen. Ympäristön PFAS-kontaminaation vähentyessä vähentyy myös riski ravintona käytettyjen eläimien ja kasvien PFAS-kontaminaatiolle.

Sonokemiallisten käsittelyjen on havaittu soveltuvan ainakin perfluoriooktaanisulfonihapon (PFOS) sekä perfluoriooktaanihapon (PFOA) hajottamiseen vesiliuoksesta (Moriwaki ja muut 2005). Sonokemiallisten käsittelyjen toiminta perustuu kavitaatioksi kutsuttuun ilmiöön, jossa nesteeseen muodostuu ultraääniaaltojen vaikutuksesta kuplia, jotka lopulta hajoavat. Ultraäänen vaikutuksesta kuplien sisällä vallitseva lämpötila kasvaa tuhansiin Celsius-asteisiin. Kun kupla lopulta hajoaa, syntyy veden pyrolyysin vaikutuksesta OH-radikaaleja, jotka kykenevät hajottamaan PFAS-yhdisteitä sekä muita orgaanisia saasteita.

Sonokemiallisen käsittelyn tehokkuutta voidaan kasvattaa korvaamalla reaktiotilan ilma argonilla (Moriwaki ja muut 2005). Reaktiotilan sisältäessä ilmaa PFOS:n puoliintumisaika käsittelyssä oli 102 minuuttia, argonia käyttäessä se pienentyi 43 minuuttiin. PFOA:lle vastaavat luvut olivat 45 ja 22 minuuttia. Argonia käytettäessä käsittelyllä saatiin parhaimmillaan hajotettua 60 % PFOS:sta ja 85 % PFOA:sta.

VEG-teknologia hyödyntää erittäin kuumaa kaasua yhdisteiden mineralisointiin maaperästä (Verma ja muut 2023). Mineralisoinnilla tarkoitetaan yhdisteen erottamista maa-aineksesta. Teknologian käyttökelpoisuus PFAS-yhdisteiden mineralisointiin laajassa mittakaavassa on edelleen tutkimuksen kohteena, mutta tulokset pienen mittakaavan kokeissa ovat olleet positiivisia. Teknologiaa on laajassa mittakaavassa hyödynnetty muiden ympäristömyrkköjen mineralisoinnissa.

Näiden menetelmien lisäksi on tutkittu erilaisten huokoisten sorbenttimateriaalien käyttämistä PFAS-yhdisteiden poistamiseen sitomalla ne tällaisiin materiaaleihin (Lai ja muut 2025). Nykyisin laajimmin käytettyjä sorbenttimateriaaleja ovat ioninvaihtohartsit sekä aktiivihiili. Näiden materiaalien affiniteetti lyhytketjuisia PFAS-yhdisteitä kohtaan on kuitenkin matala, eikä sitoutuminen ole erityisen nopeaa. Korvaaviksi sorbenteiksi tutkitaan muun muassa metalli-orgaanisia kehyksiä (metal-organic frameworks, MOF), kovalenttisia orgaanisia kehyksiä (covalent organic frameworks, COF) sekä huokoisia orgaanisia polymeerejä (porous organic polymers, POP). Näihin materiaaleihin pystytään tekemään muokkauksia jopa atomitasolla, mikä mahdollistaa niiden optimoinnin kohdeyhdisteen sitomiseen.

MOF:t koostuvat metallipohjaisista toissijaisista rakenneyksiköistä sekä orgaanisista ligandeista (Lai ja muut 2025). Nämä osat ovat kiinnittyneet toisiinsa koordinaatiosidoksella. Ominaisuuksiltaan ne ovat oivallisia etenkin jäteveden puhdistamisessa. Lisäksi on saatu näyttöä niiden soveltuvuudesta PFAS-yhdisteiden hajoamista katalysoivana fotokatalyyttinä (Wen ja muut 2022). Wen tutkimusryhmineen (2022) havaitsi liuoksen PFOA:n hajoavan lähes täydellisesti 24 tunnin aikana reaktiossa, jota katalysoitiin titaanipohjaisella MOF:lla.

COF:t koostuvat kevyistä alkuaineista muodostuvista molekyyleistä, jotka yhdistyvät toisiinsa voimakkaiden kovalenttisten sidosten kautta (Lai ja muut 2025). Näiden sidosten ansiosta COF:t ovat hyvin kestäviä materiaaleja, mikä mahdollistaa niiden käyttämisen sekä orgaanisten, että epäorgaanisten yhdisteiden sitomiseen. Lisäksi niiden ominaisuuksia voidaan muokata erityisen kattavasti tekemällä muokkauksia synteesireaktioon. COF:ien rakenteiden optimoiminen PFAS-yhdisteiden sitomiseen on kuitenkin osoittautunut vaikeaksi. On havaittu, että etenkin COF:ien huokoskoko on oleellista (Wang ja muut 2023). Optimaaliseksi huokoskokoksi on havaittu noin 2,5 - 4 kertaa suurempi kuin sidottava PFAS-yhdiste.

Myös POP:ien ominaisuuksia voidaan muokata tekemällä muutoksia synteesireaktioon. Niiden etuna on lisäksi vahva pysyvyys erilaisissa kemiallisissa ympäristöissä (Lai ja muut 2025). Ne sietävät muun muassa erittäin matalia sekä korkeita pH-tasoja sekä korkeaa suolapitoisuutta. Myös näiden materiaalien on havaittu sopivan PFAS-yhdisteiden sitomiseen. Esimerkiksi PAF-1-NDMB-materiaalin on havaittu kykenevän sitomaan PFOA:a 24 000 grammaa tunnissa milligrammaan materiaalia (Liu ja muut 2022). Näyteliuoksen PFOA-pitoisuus laski arvosta 1000 ppb arvoon 54 ppt vain muutamissa minuuteissa.

5.3 Biologiset käsittelyt

PFAS-yhdisteiden hajottamiseen kykenevät mikrobit ovat melko harvinaisia, mutta on löydetty muutamia kantoja, jotka siihen kykenevät. Tällaisia ovat muun muassa *Gordonia*-bakteerien kanta NB4-1Y (Shaw ja muut 2019) sekä *Rhodococcus jostii*-bakteerin RHA1-kanta (Yang ja muut 2022). Näiden kantojen bakteerit kykenevät tuottamaan PFAS-yhdisteiden C-F-sidoksia katkaisevia entsyymejä. Joissain PFAS-yhdisteissä esiintyvä rikki voi myös olla entsyymien vaikutuskohta. Kunkin bakteerilajin entsyymiprofiili on erilainen ja yksi laji pystyy hajottamaan korkeintaan muutamia erilaisia PFAS-yhdisteitä.

Gordonia NB4-1Y-kanta tuottaa nitrilotriasettaatti mono-oksigenaaseja sekä CysZ-tyypin sulfaattitransportteria (Van Hamme ja muut 2013). Shaw tutkimusryhmineen (2019) selvitti tämän bakteerikannan kykyä hajottaa kahta PFAS yhdistettä vähärikkisissä olosuhteissa. Tutkitut yhdisteet olivat 6:2 fluorotelomeeri sulfoamidoalkyylibetaniini (6:2 FTAB) sekä sen oletettu hajoamistuote 6:2 fluorotelomeerisulfonaatti (6:2 FTSA). Vähärikkisessä ympäristössä *Gordonia* NB4-1Y-bakteerit käyttävät rikkimetaboliassaan näiden yhdisteiden sisältämää rikkiä, samalla hajottaen niiden rakenteen. Bakteerit hajottivat 168 tunnin (yhden viikon) käsittelyssä 99,9 % 6:2 FTSA:sta ja 70,4 % 6:2 FTAB:sta. Käsittelyssä syntyvät hajoamistuotteet ovat kuitenkin myös PFAS-yhdisteitä, joten käsitelty materiaali vaatisi vielä jatkokäsittelyjä täydelliseen PFAS-yhdisteiden poistumiseen. Myös *Rhodococcus jostii* RHA1-kanta pystyy hajottamaan vähärikkisissä olosuhteissa 6:2 FTSA:a (Yang ja muut 2022). Kanta vähensi 6:2 FTSA-pitoisuutta tehokkaammin kuin *Gordonia* NB4-1Y. Pitoisuus pieneni 99 % 68 tunnissa, tosin hajoamistuotteet olivat tässäkin tapauksessa PFAS-yhdisteitä. *Rhodococcus jostii*:n keskeisiä entsyymejä ovat muun muassa alkaanisulfonaatti mono-oksigenaasi, sytokromi P450 sekä halohappodehalogenaasi.

Biologisten menetelmien käyttö PFAS-yhdisteiden hajottamiseen on vielä pitkälti alkuvaiheessa. Toistaiseksi tunnetaan hyvin rajallinen määrä hajottamiseen kykeneviä bakteerikantoja, eikä niiden käyttämien entsyymien biokemiallisia toimintaperiaatteita ymmärretä täysin (Berhanu ja muut 2023). Bakteerikantojen suorituskykyä laboratorio-olosuhteiden ulkopuolella ei ole myöskään laajasti tutkittu. Tästä huolimatta bakteerien käyttämisestä PFAS-yhdisteiden hajottamiseen toivotaan kustannustehokasta ja toimivaa vaihtoehtoa fysikaalis-kemiallisille käsittelyille.

6 Yhteenveto

PFAS-yhdisteitä esiintyy laajasti erilaisissa elintarvikkeissa, joihin niitä päätyy erityisesti ympäristöstä sekä myös joistain pakkausmateriaaleista. Kala on yleisesti elintarvikeryhmistä runsaiten PFAS-yhdisteitä sisältävä. Lisäksi maksan, lihan ja kananmunien on havaittu sisältävän muita elintarvikeryhmiä suurempia PFAS-pitoisuuksia. Matalia PFAS-pitoisuuksia on lisäksi havaittu ainakin maitotuotteissa sekä monissa kasviperäisissä elintarvikkeissa.

PFAS-yhdisteiden haitallisten terveysvaikutuksien takia on tärkeää, että saatavilla on menetelmiä sekä niiden havaitsemiseen, että poistamiseen elintarvikkeista sekä kontaminaation lähteistä ympäristössä. Havaitsemiseen käytetään usein nestekromatografista analyysiä, jossa ajoliuoksena käytetään polaarisia liuottimia kuten metanolia ja asetonitriiliä. Ennen nestekromatografista analyysiä näytteelle tehdään yleensä jonkinlainen esikäsittely. Yleinen esikäsittelymenetelmä on QuEChERS. Kromatografisten menetelmien ohelle on alettu lisäksi kehittää biologisia vaihtoehtoja.

PFAS-yhdisteiden määrää kalassa ja merenelävissä voidaan vähentää paistamalla. Paistaminen katkaisee proteiinien ja PFAS-yhdisteiden välisiä sidoksia, minkä seurauksena ne poistuvat lihasta erittyvän nesteen mukana. On epäselvää, voisiko paistaminen poistaa PFAS-yhdisteitä myös muista lihatuotteista. Toistaiseksi ei ole paljoa menetelmiä, joilla PFAS-yhdisteitä voidaan poistaa suoraan elintarvikkeista.

Ympäristön PFAS-kontaminaation vähentäminen on oleellista myös elintarvikkeiden kannalta, sillä merkittävä osa niiden PFAS-kontaminaatiosta on ympäristöperäistä. PFAS-yhdisteitä poistetaan ympäristöstä pääasiassa erilaisilla fysikaalis-kemiallisilla käsittelyillä. Näitä ovat muun muassa sonokemialliset käsittelyt sekä erittäin kuumaa höyryä hyödyntävä VEG-teknologia. Lisäksi tehokkaaksi ovat osoittautuneet erilaiset huokoisia rakenteita sisältävät materiaalit, jotka voidaan muokata optimaaliseksi PFAS-yhdisteiden poistajiksi. On myös tutkittu erilaisten mikrobien kykyä hajottaa PFAS-yhdisteitä.

Lähteet

- Berhanu, A., Mutanda, I., Taolin, J., Qaria, M. A., Yang, B. & Zhu, D. (2023) A review of microbial degradation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): Biotransformation routes and enzymes. *Sci Total Environ* **859**:160010.
- Cole, M., Gomiero, A., Jaén-Gil, A., Haave, M. & Lusher, A. (2024) Microplastic and PTFE contamination of food from cookware. *Sci Total Environ* **929**:172577.
- Cornelis, C., D'Hollander, W., Roosens, L., Covaci, A., Smolders, R., Van Den Heuvel, R., ... Bervoets, L. (2012) First assessment of population exposure to perfluorinated compounds in Flanders, Belgium. *Chemosphere* **86**:308–314.
- Del Gobbo, L., Tittlemier, S., Diamond, M., Pepper, K., Tague, B., Yeudall, F. & Vanderlinden, L. (2008) Cooking Decreases Observed Perfluorinated Compound Concentrations in Fish. *J Agric Food Chem* **56**:7551–7559.
- D'Hollander, W., Herzke, D., Huber, S., Hajslova, J., Pulkrabova, J., Brambilla, G., ... De Voogt, P. (2015) Occurrence of perfluorinated alkylated substances in cereals, salt, sweets and fruit items collected in four European countries. *Chemosphere* **129**:179–185.
- Ehrlich, V., Bil, W., Vandebriel, R., Granum, B., Luijten, M., Lindeman, B., ... Uhl, M. (2023) Consideration of pathways for immunotoxicity of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Environ Health* **22**:19.
- Genualdi, S., deJager, L., (2024) Determination of 30 Per and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Food and Feed using Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry (LC-MS/MS) < <https://www.fda.gov/media/131510/download?attachment> >.
(Luettu 27.12.2024)

- Glüge, J., Scheringer, M., Cousins, I. T., DeWitt, J. C., Goldenman, G., Herzke, D., ... Wang, Z. (2020) An overview of the uses of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Environ Sci Process Impacts* **22**:2345–2373.
- Hlouskova, V., Hradkova, P., Poustka, J., Brambilla, G., De Filippis, S. P., D'Hollander, W., ... Pulkrabova, J. (2013) Occurrence of perfluoroalkyl substances (PFASs) in various food items of animal origin collected in four European countries. *Food Addit Contam Part A* **30**:1918–1932.
- Junttila, V., Vähä, E., Perkola, N., Räike, A., Siimes, K., Mehtonen, J., ... Mannio, J. (2019) PFASs in Finnish Rivers and Fish and the Loading of PFASs to the Baltic Sea. *Water* **11**:870.
- Kedikoglou, K., Costopoulou, D., Vassiliadou, I. & Leondiadis, L. (2019) Preliminary assessment of general population exposure to perfluoroalkyl substances through diet in Greece. *Environ Res* **177**:108617.
- Koponen, J., Airaksinen, R., Hallikainen, A., Vuorinen, P. J., Mannio, J. & Kiviranta, H. (2015) Perfluoroalkyl acids in various edible Baltic, freshwater, and farmed fish in Finland. *Chemosphere* **129**:186–191.
- Lai, Z., Zhou, Y., Bai, S. & Sun, Q. (2025) Opportunity and Challenge of Advanced Porous Sorbents for PFAS Removal. *ChemSusChem* **18**:e202401229.
- Lehotay, S. J. (2022) The QuEChERSER Mega-Method. *LC GC Eur* **2022**:26–31.
- Li, X., Zhang, B., Hou, M., Qian, C., Ji, Z., Shi, Y. & Cai, Y. (2024) Occurrence of per- and polyfluoroalkyl substances in wheat, maize, rice, and soybean from chinese major grain producing regions. *J Hazard Mater* **480**:136509.
- Liu, X., Zhu, C., Yin, J., Li, J., Zhang, Z., Li, J., ... Ma, S. (2022) Installation of synergistic binding sites onto porous organic polymers for efficient removal of perfluorooctanoic acid. *Nat Commun* **13**:2132.

- Moriwaki, H., Takagi, Y., Tanaka, M., Tsuruho, K., Okitsu, K. & Maeda, Y. (2005) Sonochemical Decomposition of Perfluorooctane Sulfonate and Perfluorooctanoic Acid. *Environ Sci Technol* **39**:3388–3392.
- Pasecnaja, E., Bartkevics, V. & Zacs, D. (2022) Occurrence of selected per- and polyfluorinated alkyl substances (PFASs) in food available on the European market – A review on levels and human exposure assessment. *Chemosphere* **287**:132378.
- Qu, R., Wang, J., Li, X., Zhang, Y., Yin, T. & Yang, P. (2024) Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) Affect Female Reproductive Health: Epidemiological Evidence and Underlying Mechanisms. *Toxics* **12**:678.
- Ramírez Carnero, A., Lestido-Cardama, A., Vazquez Loureiro, P., Barbosa-Pereira, L., Rodríguez Bernaldo De Quirós, A. & Sendón, R. (2021) Presence of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Food Contact Materials (FCM) and Its Migration to Food. *Foods* **10**:1443.
- Salvatore, D., Mok, K., Garrett, K. K., Poudrier, G., Brown, P., Birnbaum, L. S., ... Corder, A. (2022) Presumptive Contamination: A New Approach to PFAS Contamination Based on Likely Sources. *Environ Sci Technol Lett* **9**:983–990.
- Schaider, L. A., Balan, S. A., Blum, A., Andrews, D. Q., Strynar, M. J., Dickinson, M. E., ... Peaslee, G. F. (2017) Fluorinated Compounds in U.S. Fast Food Packaging. *Environ Sci Technol Lett* **4**:105–111.
- Schrenk, D., EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (EFSA CONTAM Panel), Bignami, M., Bodin, L., Chipman, J. K., del Mazo, J., ... Schwerdtle, T. (2020) Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. *EFSA J* **18**.
- Shaw, D. M. J., Munoz, G., Bottos, E. M., Duy, S. V., Sauvé, S., Liu, J. & Van Hamme, J. D. (2019) Degradation and defluorination of 6:2 fluorotelomer sulfonamidoalkyl betaine

and 6:2 fluorotelomer sulfonate by *Gordonia* sp. Strain NB4-1Y under sulfur-limiting conditions. *Sci Total Environ* **647**:690–698.

Shaw, W. K. (2023) Screening, Determination, and Confirmation of PFAS by UHPLC-MS-MS <https://www.fsis.usda.gov/sites/default/files/media_file/documents/CLG-PFAS2.04.pdf> (Luettu 27.12.2024)

Shoemaker J. A., Tetterhorst D. R (2018) Determination of selected per- and polyfluorinated alkyl substances in drinking water by solid phase extraction and liquid chromatography/tandem mass spectrometry (LC/MS/MS) <https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NERL&dirEntryId=343042> (Luettu 27.12.2024)

Stevens, J., Jones, D. (2010) QuEChERS 101: The Basics and Beyond <https://www.agilent.com/library/eseminars/Public/QuEChERS_101_10_11_01.pdf> (Luettu 2.2.2025)

Sznajder-Katarzyńska, K., Surma, M., Wiczowski, W. & Cieślik, E. (2019) The perfluoroalkyl substance (PFAS) contamination level in milk and milk products in Poland. *Int Dairy J* **96**:73–84.

Taylor, R. B. & Sapozhnikova, Y. (2022) Comparison and validation of the QuEChERSER mega-method for determination of per- and polyfluoroalkyl substances in foods by liquid chromatography with high-resolution and triple quadrupole mass spectrometry. *Anal Chim Acta* **1230**:340400.

THL. PFAS-yhdisteet. (2024) <<https://thl.fi/aiheet/ymparistoterveys/ymparistomyrkyt/pfas-yhdisteet>> (Luettu 2.2.2025)

THL. PFAS-yhdisteiden analyysi. (2023) <<https://thl.fi/aiheet/ymparistoterveys/ymparistomyrkyt/ymparistomyrkyjen-analytiikka/pfas-yhdisteiden-analyysi>> (Luettu 2.2.2025)

- Van Hamme, J. D., Bottos, E. M., Bilbey, N. J. & Brewer, S. E. (2013) Genomic and proteomic characterization of *Gordonia* sp. NB4-1Y in relation to 6: 2 fluorotelomer sulfonate biodegradation. *Microbiology* **159**:1618–1628.
- Vendl, C., Pottier, P., Taylor, M. D., Bräunig, J., Gibson, M. J., Hesselson, D., ... Nakagawa, S. (2022) Thermal processing reduces PFAS concentrations in blue food – A systematic review and meta-analysis. *Environ Pollut* **304**:119081.
- Verma, S., Lee, T., Sahle-Demessie, E., Ateia, M. & Nadagouda, M. N. (2023) Recent advances on PFAS degradation via thermal and nonthermal methods. *Chem Eng J Adv* **13**:100421.
- Wang, W., Jia, Y., Zhou, S. & Deng, S. (2023) Removal of typical PFAS from water by covalent organic frameworks with different pore sizes. *J Hazard Mater* **460**:132522.
- Wen, Y., Rentería-Gómez, Á., Day, G. S., Smith, M. F., Yan, T.-H., Ozdemir, R. O. K., ... Zhou, H.-C. (2022) Integrated Photocatalytic Reduction and Oxidation of Perfluorooctanoic Acid by Metal–Organic Frameworks: Key Insights into the Degradation Mechanisms. *J Am Chem Soc* **144**:11840–11850.
- Yang, S.-H., Shi, Y., Strynar, M. & Chu, K.-H. (2022a) Desulfonation and defluorination of 6:2 fluorotelomer sulfonic acid (6:2 FTSA) by *Rhodococcus jostii* RHA1: Carbon and sulfur sources, enzymes, and pathways. *J Hazard Mater* **423**:127052.
- Yang, S.-H., Shi, Y., Strynar, M. & Chu, K.-H. (2022b) Desulfonation and defluorination of 6:2 fluorotelomer sulfonic acid (6:2 FTSA) by *Rhodococcus jostii* RHA1: Carbon and sulfur sources, enzymes, and pathways. *J Hazard Mater* **423**:127052.
- Yi, L., Peng, Q., Liu, D., Zhou, L., Tang, C., Zhou, Y. & Chai, L. (2019) Enhanced degradation of perfluorooctanoic acid by a genome shuffling-modified *Pseudomonas parafulva* YAB-1. *Environ Technol* **40**:3153–3161.

Young, N. A., Lambert, R. L., Buch, A. M., Dahl, C. L., Harris, J. D., Barnhart, M. D., ...

Jordan Steel, J. (2021) A Synthetic Biology Approach Using Engineered Bacteria to Detect Perfluoroalkyl Substance (PFAS) Contamination in Water. *Mil Med* **186**:801–807.