

# Polütsükliiliste aromaatsete süsivesinike (PAH) sisaldus traditsiooniliselt suitsutatud kala- ja lihatoodetes

Töö teostajad:  
Mari Reinik, PhD  
Jüri Ruut, MSc  
LABRIS, riskihindamise osakond  
07.02.- 02.03.2023

## Sisukord

Ülesande püstitus.....	1
Suitsutamine ja PAH teke .....	2
Õiguslik taust.....	3
PAH sisaldused Põllumajandus- ja Toiduameti võetud suitsutatud liha- ja kalatoodete proovides .....	4
PAH sisaldused traditsiooniliselt suitsutatud toodetes ja seda mõjutavad faktorid.....	5
PAH sisaldused .....	6
PAH-de sisaldust mõjutavad faktorid.....	6
Traditsiooniline suitsutamine.....	7
Temperatuur ja aeg .....	7
Kasutatav küttematerjal.....	8
PAH jaotumine tootes ja toote kattekiht .....	8
Toote rasvasisaldus.....	9
Liha liik.....	9
Muud mõjufaktorid ja võimalikud meetmed .....	10
Kokkuvõte .....	11
Kasutatud kirjandus .....	13

## Ülesande püstitus

Käesolev eksperdiarvamus on valminud vastamaks Põllumajandus- ja Toiduameti (PTA) esitatud küsimustele:

- 1) Millistel tingimustel (sh suitsutamise kestus, liha-/kalatoote liik, toote rasvasisaldus, suitsutuskambri niiskuse sisaldus, hapniku juurdepääs, kasutatava puidu liik, suitsu temperatuur) traditsioonilisel suitsutamisel on võimalik, et PAH-de sisaldust ei detekteerita või on alla määramispiiri?
- 2) Kui samas traditsioonilises suitsusaunas või suitsuahjus on valmistatud suitsutatud liha- või kalatoode, millest ühel juhul on võetud kasutusele meetmed PAH tekke alandamiseks ja teisel juhul meetmeid kasutusele ei võeta, siis kui mitme kordne võib olla maksimaalne erinevus

lõpptoote PAH sisalduses kui meetmed on kasutusele võetud, võrreldes olukorraga kui neid kasutusele võetud ei ole?

3) Kui palju mõjutab proovivõtumeetod traditsiooniliselt suitsutatud liha- ja kalatoodete PAH-de tulemust?

Selgitus:

Komisjoni määruse (EÜ) nr 1881/2006 raames viiakse läbi riiklikku järelevalvet PAH sisaldusele suitsutatud toodetes. Suitsutatud liha- ja kalatoodete kategoorias tuvastatakse rohkelt piirnormide ületusi. Piirnormi ületuse korral tuleb käitlejal rakendada meetmeid, et tagada ohutu ning nõuetekohane toode ning tõendada seda uuesti PAH analüüsi teostades. Selline praktika on viinud olukorrani, kus käitlejapoolsel proovi võtmisel PAH-de sisaldust ei detekteeritud või on alla määramispiiri, kuid kui proovi võttis PTA järelevalveametnik, ületas PAH-de summa piirnormi 200-kordselt.

## Suitsutamine ja PAH teke

Polütsükliised aromaatsed süsivesinikud (PAH) kondenseeritud aromaatsetest tsükliitist koosnevad ühendid, mis tekivad eelkõige kõrgematel temperatuuridel mittetäieliku põlemise käigus ehk tingimustes, kus hapniku juurdepääs on piiratud. Üks olulisematest PAH-sid tekitavatest toiduvalmistamise protsessidest on suitsutamine. Tänapäeval kasutatakse suitsutamist eelkõige tootele iseloomuliku maitse ja välimuse andmiseks, samas pikendab suitsutamine märkimisväärselt toote säilivusaega (Ciecierska ja Obiedzinski, 2007).

Suits on polüdispersne segu vedelatest ja tahketest osakestest diameetriga 0,08–0,15 µm õhus. See on muutuva koostisega sõltuvalt suitsu genereerimise meetodist ja temperatuurist, puidu päritolust ja koostisest, puidu veesisaldusest jm. Peale suitsu genereerimist liigub see ahju, kus temperatuur langeb ja suits hakkab osaliselt kondenseeruma ahju pindadele ja toidule. Sadenemise määr sõltub temperatuurist, niiskusest, lenduvusest ja suitsujoa kiirusest. Sõltuvalt tingimustest võib jagada suitsutusprotsessid kolmeks: külmsuitsutamine temperatuuridel 15–258 °C; soe suitsutamine 25–508 °C; kuumsuitsutamine 50–858 °C (Šimko, 2005). Erinevates allikates on pakutud mõningal määral erinevaid liigitusi.

Puidusuitsus tekivad PAH-d ligniini termilise pürolüüsi ja järgneva ligniini komponentide kondensatsiooni tulemusena temperatuuril üle 350 °C. Seetõttu annab kõrgema ligniinisaldusega puit ka suuremaid PAH-de sisaldusi temperatuuridel, kus PAH teke on soodustatud (500–900 °C) (Essumang *et al.*, 2013).

Tavalisemad suitsu komponendid on fenoolid, karbonüülühendid ja happed. Kui suitsu genereerimistemperatuur ületab 400 °C, on PAH-de teke vältimatu (Sikorski ja Sinikewicz, 2014). Lisaks PAH-dele põhjustab suitsutamine toidu saastust mitmete teiste oletatavate kantserogeenide ja mutageenidega, nagu formaldehüüd ja heterotsükliised amiinid (Racovita *et al.*, 2020). Sonogo *et al.* (2022) artiklis on analüüside käigus leitud lisaks PAH-dele ka PAH oksüdeeritud ja nitreeritud derivaate (OPAH ja NPAH). Viimased võivad moodustuda mittetäieliku põlemise protsessis, aga ka PAH-de osavõtul toimuvates keemilistes, fotokeemilistes ja bioloogilistes reaktsioonides ning võivad toimida PAH-dest toksilisemate ühenditena omades veel suuremat kantserogeenset toimet.

Suitsutamisel puutub kuum või külm suits kokku eelsoolatud toote pinnaga, tekitades soovitud sensoorseid muutusi ning suurendades toodete stabiilsust. Suitsutamine vähendab mikroobset saastust ja pidurdab rasvade oksüdeerumist. Suitsutamine on efektiivne meetod patogeensete mikroorganismide (*Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella spp.*, jne) kasvu pidurdamiseks. Protsessi käigus väheneb vee aktiivsus, mis avaldab mõju toote tekstuurile (kõvadusele) ja valkude stabiilsusele (Gomez *et al.*, 2020).

Suitsutamine aitab oluliselt pikendada toote säilivusaega, mis on tingitud mitmete suitsus sisalduvate fenoolsete ühendite koostoimest toiduga. Lisaks pikemale säilivusajale annab suitsutamine toodetele organoleptilise lisaväärtuse: toodete välimus paraneb, tekib iseloomulik suitsune lõhn ja maitse, mille annavad kombinatsioonis fenoolid, karbonüülühendid ja laktoonid (Racovita *et al.*, 2020).

## Õiguslik taust

Kuna PAH-d on genotoksilised kantserogeenid, siis tuleks nende sisaldused toidus hoida nii madalal kui võimalik. Euroopa komisjoni määrusega (EU) 1881/2006 kehtestatud piirnormid Benso(a)püreeni (BaP) ja 4 PAH summa (PAH4) sisaldusele suitsutatud liha- ja kalandustoodetes on toodud tabelis 1.

Tabel 1. Euroopa komisjoni määrusega (EU) 1881/2006 kehtestatud piirnormid Benso(a)püreeni (BaP) ja 4 PAH summa (PAH4) sisaldusele suitsutatud liha- ja kalandustoodetes

Grupi nr.	Tootegrupp	Benso(a)-püreen (BaP)	Benso(a)püreeni (BaP), bens(a)antratseeni (BaA), benso(b)fluoranteeni (BbF) ja krüseeni (CHR) summa (PAH4)
6.1.4.	Suitsuliha ja suitsulihatooted	2,0	12,0
6.1.5.	Suitsukala lihaskude ja suitsutatud kalandustooted, välja arvatud punktides 6.1.6 ja 6.1.7 nimetatud kalandustooted	2,0	12,0
6.1.6.	Suitsutatud kilu ja konserveeritud suitsutatud kilu; suitsutatud räim pikkusega ≤ 14 cm ja konserveeritud suitsutatud räim pikkusega ≤ 14 cm	5,0	30,0
6.1.7.	Kahepoolmelised molluskid (suitsutatud)	6,0	35,0

Piirnorme kohaldatakse toitude söödava osa suhtes. See tähendab, et analüüsimiseks eemaldatakse tootelt mittesöödavad osad (mittesöödavad kestad, paks mittesöödav kalanahk, -luud, -pea). Tervikuna söömiseks ettenähtud kalade puhul kohaldatakse piirnormi terve kala suhtes.

## PAH sisaldused Põllumajandus- ja Toiduameti võetud suitsutatud liha- ja kalatoodete proovides

PTA 2022.a. võetud järelevalveproovid analüüsiti Terviseameti laborites. Analüüsid teostati vastavalt EVS-EN ISO/IEC 17025 standardi nõuetele akrediteeritud gaas- ja vedelikkromatograafilistel meetoditel. Analüüsiti 4 ühendi (benso(*a*)püreeni, bens(*a*)antratseeni, benso(*b*)fluoranteeni, krüseeni) sisaldusi. Üksikute ühendite määramispiirid olid vahemikus 0,2–0,5 µg/kg (LOQ), avastamispiirid 0,1–0,2 µg/kg (LOD).

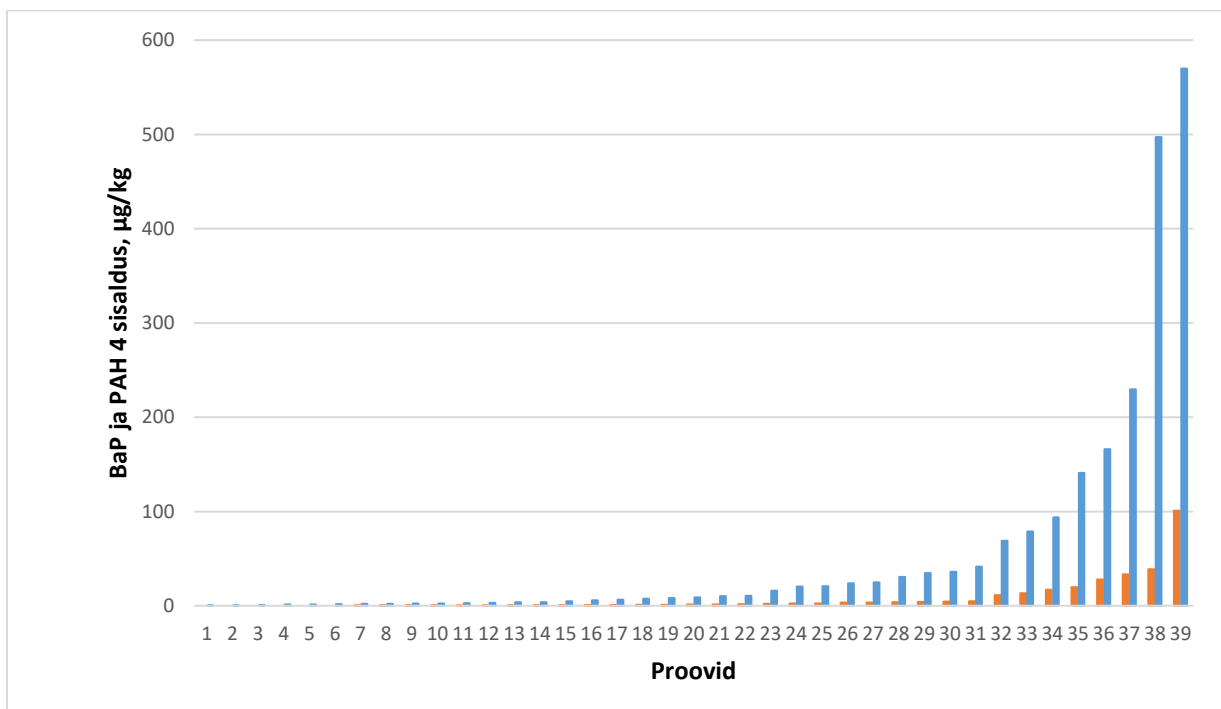
PAH4 summa on arvatud võttes alla määramispiiri jäävad sisaldused arvesse kui  $(LOD+LOQ)/2$ . Alla avastamispiiri jäänud sisaldused („ei leitud“) loeti võrdseks nulliga.

Neljast uuritud PAH-st on enamasti suuremad sisaldused krüseenil ja benso(*a*)püreenil ning väiksemad benso(*a*)püreenil ja benso(*b*)fluoranteenil.

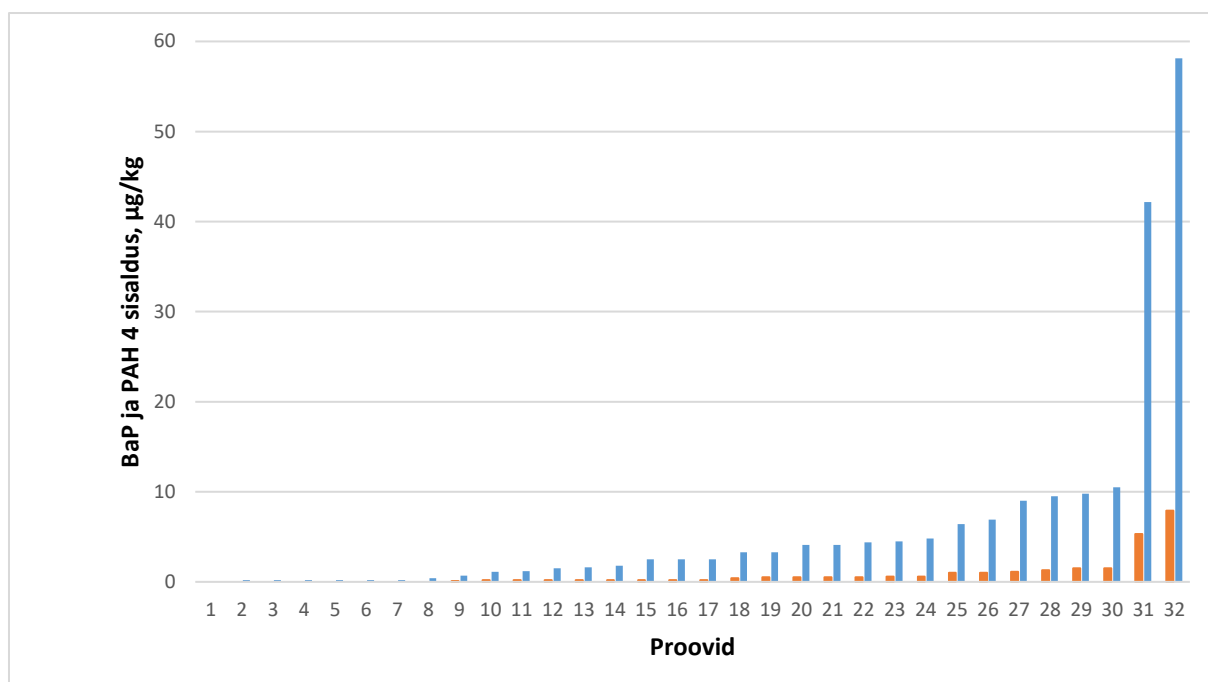
Analüüsitud lihatoodetest (39 proovi) jäi 6 proovi puhul BaP sisaldus alla avastamispiiri ning 5 puhul alla määramispiiri. PAH4 sisaldused jäid alla määramispiiri 2 lihaproovi korral (maasuitsusink ja kuumsuitsutatud liha). Mediaansisaldus oli BaP puhul 1,1 ja PAH4 puhul 8,3 µg/kg. Sisalduste jaotus on toodud joonisel 1.

Kalaproovides (32 proovi) oli BaP sisaldus alla avastamispiiri 8-l korral, alla määramispiiri 7 proovi puhul. PAH4 korral jäi ühes proovis sisaldus alla avastamispiiri ning seitsmes proovis alla määramispiiri. Mediaansisaldused olid vastavalt 0,2 BaP ja 2,5 µg/kg PAH4 jaoks. Kalaproovide PAH sisalduste jaotus on toodud joonisel 2.

Andmestiku alusel ei ole võimalik teha otseseid järeldusi selle kohta, kuivõrd erinesid sisaldused nn. tööstuslikult suitsutatud toodetes ja koduses majapidamises valmistatud toodetes.



Joonis 1. BaP ja PAH4 sisaldused 2022.a. analüüsitud suitsulihaproovides (PTA andmed).



Joonis 2. BaP ja PAH4 sisaldused 2022.a. analüüsitud suitsukalaproovides (PTA andmed).

Kylakallio analüüsis 2018–2020.a. Eesti toodete PAH sisalduste tulemusi oma 2022.a. Maaülikoolis kaitstud bakalaureusetöös. Töös järeldati, et kodustes tingimustes suitsutatud lihatooted sisaldavad PAH-sid vähemalt 4 korda rohkem kui tööstuslikud tooted. Tulemuste kokkuvõte on toodud tabelis 2.

Tabel 2. PAH4 sisaldused Eestis 2018–2020.a. (Kylakallio, 2022)

	PAH4 sisalduste vahemik, µg/kg	PAH4 mediaansisaldus, µg/kg
Kodustes tingimustes suitsutatud lihatooted	0,3–572	10,4
Tööstuslikes tingimustes suitsutatud lihatooted	ei leitud – 11,1	3,4
Suitsukala	ei leitud – 97	1,6

## PAH sisaldused traditsiooniliselt suitsutatud toodetes ja seda mõjutavad faktorid

PAH sisalduste ja neid mõjutavate tegurite kohta on avaldatud palju artikleid. Suure materjalihulga tõttu keskenduti antud töös eelkõige viimase 10–15 aasta jooksul avaldatud materjalidele ning pigem lähiriikides tehtud uuringutele. Kirjanduse ülevaatamise käigus leiti mitu põhjalikku kokkuvõtet erinevate autorite poolt avaldatud PAH sisaldustest toidus ning neid mõjutavatest teguritest, nt Ledesma *et al.* 2016, Onopiuk *et al.* 2021, Singh *et al.* 2020 ja 2023. Järelduste tegemine andmete võrreldavuse kohta on sageli keeruline, kuna analüüsitud PAH-de nomenklatuur on varieeruv, erinevad on ka kasutatud analüüsimeetodite

määramispiirid. Tihti ei ole arusaadav, mida konkreetselt mõistetakse traditsioonilise suitsutamise all ning missugused olid suitsutamise tingimused ning suitsuahju ehitus.

## PAH sisaldused

Erinevate autorite töödes avaldatud suitsutatud toodete PAH analüüside tulemused on toodud tabelis 3. Esitatud on eelkõige lähiriikide ja traditsioonilist suitsutamist kajastavad andmed. BaP ja PAH4 sisaldused varieeruvad oluliselt, isegi sadades kordades. Maksimaalsed sisaldused sõltuvad suurel määral proovivõtust – kui hästi on üles leitud suure sisaldusega tooted. Samas on näha pea igas uuringus määramispiiri lähedasi või sellest allapoole jäävaid sisaldusi, eelkõige BaP osas. PAH4 puhul on alla määramispiiri sisaldustega proove vähem, kuna tavaliselt on BaP-st kõrgemad sisaldused PAH4 hulka kuuluvatel BaA-1 ja krüseenil.

Tabel 3. BaP ja PAH4 sisaldused erinevate autorite töödes.

allikas	Maatriks	BaP, µg/kg	PAH4, µg/kg
Rozentāle <i>et al.</i> 2015	Traditsiooniliselt suitsutatud Läti lihatooted	0,05–6,0 mediaan 0,21	0,15–33,7 mediaan 2,1
Rozentāle <i>et al.</i> 2018	Traditsiooniliselt suitsutatud Eesti, Läti, Leedu lihatooted	0,05–166 Eesti toodete mediaan 0,18	0,42–628 Eesti toodete mediaan 1,8
Wretling <i>et al.</i> 2010	Rootsi suitsusingsid, peekon	0,3–36,9 (sink) 0,4–15,9 (peekon)	0,3–208,7 (sink) 0,3–88,4 (peekon)
Hokkanen <i>et al.</i> 2018	Suitsulihatooded Sealihast tooted  Suitsukalad	keskmine 2,2 <0,26–40 mediaan 0,8 keskmine 0,7	keskmine 11 <0,26–200 mediaan 1,9 keskmine 3,9
Duedahl-Oelsen <i>et al.</i> 2006	Suitsukala Peekon	<0,08–3,9 <0,08–0,09	
Kafouris <i>et al.</i> 2020	Küprose traditsiooniliselt suitsutatud lihatooted	24% sisaldustest alla avastamispiiri, lisaks 15% alla määramispiiri	8,8% sisaldustest alla avastamispiiri, lisaks 1,5% alla määramispiiri
Santos <i>et al.</i> 2011	Portugali traditsiooniliselt suitsutatud vorstid	0,32–0,63	1,84–6,94
Zachara <i>et al.</i> 2017	Poola sealihasingid Traditsiooniliselt suitsutatud Tööstuslikult suitsutatud	1,0–2,65  Ei leitud – 0,73	8,9–24,6  1,27–7,76

## PAH-de sisaldust mõjutavad faktorid

Ledesma *et al.* (2016) ülevaates käsitleti 10 suitsutusprotsessi varieeritavat parameetrit: kütuse tüüp, suitsutusmeetod (otsene/kaudne), suitsu genereerimisprotsess (pürolüüsi temperatuur ja

õhuvool), toidu kaugus ja asend kütteallika suhtes, toote rasvasisaldus ja selle muutumine; suitsutamise aeg, protsessi temperatuur, varustuse puhtus ja hooldus, suitsuahju disain ja hooldus, toote kattekiht. Olulisimad parameetrid on suitsutamismeetod (otsene või kaudne, st välise suitsu genereerimisega), temperatuur ja toote kest.

#### Traditsiooniline suitsutamine

Traditsioonilisel suitsutamisel puutub puidu mittetäielikul põlemisel tekkiv suits otseselt kokku suitsutatava tootega, mis võib viia selle märkimisväärse saastatuseni PAH-dega juhul, kui protsess pole kontrollitud. Kriitilised parameetrid on temperatuur, aeg, niiskus, suitsu allikas ja ahju tüüp (EFSA, 2008). Traditsioonilisel kuumsuitsutusprotsessil on suitsu temperatuur 130 °C ja liha temperatuur 80 °C, kuigi osad autorid pakuvad ka madalamaid 55–80 °C (Ledesma *et al.*, 2016). Et saavutada rikkalikku sügavpruuni toote pinda ja tugevat aroomiprofiili, peab olema suitsutusaeg piisavalt pikk. Need, nn. mustaks suitsutatud või talusuitsutooted, sisaldavad ka rohkem PAH-sid (Šimko, 2005). Lätis läbi viidud tarbijate eelistuste uuringus leiti, et tarbijad eelistavad pigem just tumeda pinnaga toodet (Rožentāle *et al.* 2018).

Wretling *et al.* (2010) ülevaates toodi välja, et traditsiooniliste saunas suitsutatud sinkide PAH sisaldused võivad olla kõrged: 10-s proovis 11-st oli EL BaP piirnorm 5,0 µg/kg ületatud. Kala otsene suitsutamine saepuru või puidulaastude kohal annab tavaliselt mõõdukad või madalad BaP sisaldused (ka alla määramispiiri), kuid vahel võib piirnormi ületamist ette tulla. Järeldati, et kuna Rootsis on kasutusel erineva suuruse ja varustusega suitsutuskambreid, ei saa ette näha täpseid meetmeid PAH kontsentratsioonide vähendamiseks: oluline on see, et ettevõtjad oleksid probleemist teadlikud, analüüsiks toodete uuringutulemusi, et leida just oma tootmisele sobilik lahendus.

Soomlaste avaldatud uuringus leiti, et otsene suitsutamine tekitas selgelt suuremaid PAH sisaldusi, kuid oli ka proove, kus PAH kontsentratsioonid jäid alla määramispiiri. BaP-i ei leitud, kui suitsuallikas oli tootest enam kui 5 m kaugusel (Hokkanen *et al.*, 2018).

#### Temperatuur ja aeg

Tiwo *et al.* 2019 töös leiti, et PAH sisaldus sõltub suitsu tihedusest, õhu juurdepääsust, protsessi kestusest ja toote pinna suurusest ning eriti suitsutamise temperatuurist.

Pöhlmann *et al.* (2012) uuris PAH sisalduste sõltuvust suitsu tihedusest ja ventilaatori kiirusest. Mõlemad eelnimetatud faktorid olid otseselt proportsionaalsed suitsu genereerimise temperatuuriga. Ventilaatori kiirusel 750 p/min oli suitsu genereerimistemperatuur 440 °C (kerge suits) kuni 580 °C (tugev suits), 1500 p/min juures oli see 490 °C (kerge suits) kuni 715 °C (tugev suits) ja 3000 p/min juures 583 °C (keskmine suits) kuni 750 °C (tugev suits). Maksimaalne suitsu genereerimise temperatuur sõltus ka puiduhakke niiskusest: kõrgema niiskusega materjal andis madalama genereeritava suitsu temperatuuri. Järeldati, et suitsu tihedus avaldab PAH tekkele suuremat mõju kui ventilaatori kiirus.

Pöhlmann *et al.* (2012, 2013 b) töödes leiti, et suitsu genereerimistemperatuuri alandamine alla 500 °C ei anna piisavalt head suitsust maitset. Samas PAH ja fenoolsete ühendite sisalduste vahel otsest korrelatsiooni ei leitud. PAH sisalduste minimeerimiseks tuleb hoida temperatuur alla 600 °C (Ledesma *et al.*, 2016). Soovitav värvi saamiseks tuleb sel juhul suitsutamisaega pikendada.

PAH4 sisalduste lineaarset tõusu suitsutuskambri temperatuuri tõusuga on demonstreeritud Racovita *et al.* (2020) uuringus. Temperatuuri tõus 55 °C - 95 °C viis BaP ja PAH4 sisalduste enam kui 3-kordse suurenemiseni. BaP ja PAH sisaldused tõusid esimese 6 suitsutamistunni jooksul, misjärel jäid stabiilseks. Stabiliseerumise põhjuseks võib olla oluline toodete

rasvasisalduse vähenemine ajas. Juba peale 2 tundi suitsutamist 75 °C juures olid BaP ja PAH piirnормid ületatud. Suitsutamise aja pikenedes 2 tunnilt 6 tunnini suurenes BaP sisaldus 3 korda ja PAH sisaldus üle 2 korra.

Min *et al.* (2018) töös järeldati, et PAH moodustumine sõltub rohkem temperatuurist kui ajast. Märkades tingimustes veiselihamassist tootemudeliga tehti katsed temperatuuri tõstmisel 80 °C-lt 120 °C-ni ning suitsutusaja pikendamisel 15 minutilt 30 minutini. BaP sisaldus tõusis mõlema faktori muutmisel 0,5 - 1,14 µg/kg, PAH4 sisaldus 1,36 -3,12 µg/kg.

Lihatoodete puhul suurenesid PAH sisaldused oluliselt (ca 10 korda), kui suitsutusaeg ületas 5 tundi. Kalatoodetel ei olnud suitsutamisaega ja PAH vahel sellist korrelatsiooni. Järeldati, et aeg on üks kriitilisi faktoreid ja see tuleb hoida nii lühikesena kui võimalik, samas arvesse võttes toote ohutust ja säilivusaega. Kõige olulisem faktor on suitsu genereerimise temperatuur: kui seda tõsta 400–1000 °C, siis suureneb PAH sisaldus suitsus lineaarselt (Hokkanen *et al.*, 2018).

Oluline roll on toote asukohal suitsutuskambris: madalaimad PAH4 ja PAH16 sisaldused olid kambri tagaosas olnud toodetele, kõrgeimad keskosas (Pöhlmann 2013 a).

Roseiro *et al.* (2011) töös näidati, et suitsutuskambris erinevatele kõrgustele asetatud vorstide PAH sisaldused varieeruvad, olles suurimad keskmisel ja kõrgemal tasemel asunud toodete pinnal. Toote siseosa PAH sisaldused on vastupidised, mis on ilmselt tingitud kõrgemast toote temperatuurist ja sellest tingitud rasva sulamisest.

#### Kasutatav küttematerjal

PAH4 kontsentratsioon varieerus oluliselt sõltuvalt ahju kütteks kasutatavast saepuru sordist: 3 tunni 75 °C protsessi korral olid ploompuidu kasutamisel PAH4 sisaldused peaaegu 5 korda kõrgemad kui kasepuidu korral. Samas olid õunapuu kasutamisel sisaldused madalaimad, ca 25–30% madalamad PAH4 tasemed võrreldes kasega (Racovita *et al.*, 2020).

Duedahl-Oelsen *et al.* uuringute (2010) tulemused näitasid, et PAH moodustumisel on põletatava puidu liigil oluline osa: ka varasemates allikates on soovitatud kasutada pigem kõva puitu (tamm, kirss, kask) pehme puidu asemel, kuid vaja oleks veel rohkem uuringuid. Lisaks avaldavad mõju ka puidu niiskusesisaldus, põlemiskambri temperatuur ja hapniku juurdepääs. Essumang *et al.* (2013) uuringus leiti positiivne korrelatsioon suitsukala PAH ja põletatava puidu ligniinisalduse ning suitsutamise aja vahel.

Hitzel *et al.* töös (2013) otsiti alternatiivse tavapärasele kasepuidule. Hikkoripuu kasutamisel õnnestus BaP ja PAH4 sisaldusi vähendada 35–55%.

Stumpe-Viksna *et al.* (2008) leidis, et puidu liik mõjutab oluliselt lihatoodete PAH sisaldust: madalaimad sisaldused on lepa ja õunapuu korral, kõrgeimad kuuse puhul. Erinevus BaP sisaldustes oli 6,04 kuni 35,07 µg/kg ja PAH16 summalt 47,94 kuni 470,91 µg/kg.

#### PAH jaotumine tootes ja toote kattekiht

PAH-d akumulatsioonid peamiselt toote pinnal, kuid toimub ka mõningane difusioon toote sisemusse, mille juures on määrav roll veeaktiivsusel ja rasvasisaldusel. Hulgaliselt PAH-sid sisaldava tahma/nõe eest on heaks barjääriks toote kattekiht, nt vorstikest. Suitsuvorsti (chorizo) analüüsil leiti, et kogu toote puhul (vorst koos kestaga) olid BaP sisaldused vastavalt 3,1–98 µg/kg ja PAH4 sisaldused 38–1367 µg/kg. 97% PAH-dest olid nahakihi, mis tavaliselt enne söömist eemaldatakse (Fasano *et al.*, 2016).

Ciecierska ja Obiedzinski (2007) töös on võrdlevalt toodud PAH sisaldused toote pealiskihis (0,5 cm) ja toote sisemuses. Traditsioonilisel meetodil suitsutati uuritavad tooted sisemise suitsugeneraatoriga vanaaegsetes ahjudes, kuivatamise/suitsutamise aeg oli 3–4 tundi. Peale seda tooteid aurutati sisetemperatuurini 68–72 °C ning jahutati. BaP ja PAH4 sisaldused toote



väliskihis olid vastavalt 0,43 ja 14,87 µg/kg, toote siseosas 0,27 ja 1,81 µg/kg. Seega PAH4 sisalduse erinevus sise- ja väliskihis oli ca 8-kordne.

Kuhn *et al.* (2009) analüüsisid PAH sisaldusi seakõhu proovide keskelt ja äärtelt (1 cm). Erinevused PAH sisaldustes proovi sise- ja pinnaosa vahel suurenesid suitsutamistemperatuuri ja protsessi kestuse tõustes. 16 EFSA PAH sisaldus kogu tootes suurenes seakõhu kuumsuitsutamisel 1 tunni ja 3 tunni jooksul ca 2,2 korda.

Kartalovic *et al.* (2022) töös analüüsiti peekoni keskosa ja nahakihti. PAH4 sisalduste erinevus traditsiooniliselt kuivatatud ja suitsutatud peekoni puhul oli suhteliselt väike ilmselt peekoni lipofiilsete omaduste tõttu (14,84 µg/kg keskel, 10,61 µg/kg pinnal ja 17,37 µg/kg nahakihis). PAH4-st detekteeriti vaid BaA ja BbF, BaP ja krüseen olid alla määramispiiri.

Kubiak ja Polak-Sliwinska töös (2015) leiti, et traditsioonilisel meetodil suitsutatud lihatoodetel BaP sisaldus toote siseosas oli 3,04–3,44 µg/kg, tööstuslikul meetodil 1,02 - 1,10 µg/kg. PAH4 väliskihis/siseosas traditsioonilisel suitsutamisel peekonil 24,27/6,83 µg/kg, vorstil 24,13/6,72 µg/kg.

Viineriproovidel uuriti erinevaid kestade materjale: madalaima BaP sisalduse andis tsellulooskest (0,08 µg/kg), kõrgeima naturaalne lambasool (0,81 µg/kg) (Pöhlmann *et al.* 2013 a).

Onopiuk *et al.* (2021, 2022) leidsid, et naturaalne kest suurendab PAH sisaldust tootes. Suitsutatava toote kaitsvasse materjali mähkimine võib vähendada PAH sisaldust.

Vranešević *et al.* (2022) uuringu tulemused näitasid olulist PAH sisalduste erinevust suitsutatud kuivsoolatud seafilee pinnal (BaP 7,33 µg/kg; PAH4 61,14 µg/kg) võrreldes toote siseosaga (BaP < LOQ; PAH4 – ei leitud).

Kala suurus mõjutab oluliselt PAH sisaldust: keskmised sisaldused olid väikestel kaladel ca 3 korda suuremad kui suurtel kaladel (Hokkanen *et al.*, 2018).

Zachara *et al.* (2017) töös tõdeti, et traditsiooniliselt suitsutatud toodete PAH sisaldused olid oluliselt kõrgemad kui tööstuslikel ning kõrgemad sisaldused olid väiksema läbimõõduga toodetel (vorstid) ja väikestel kaladel.

#### Toote rasvasisaldus

Kõrgemad PAH sisaldused leiti suurema rasvasisaldusega proovides pikemaajalises suitsutamisel (Kafouris *et al.*, 2020).

Positiivse korrelatsiooni kala rasvasisalduse ja PAH tekke vahel märkis ära ka Essumang *et al.* (2013).

10% rasvasisalduse juures oli BaP sisaldus viinerites 0,28 µg/kg ja 39% rasvasisalduse korral 1,37 µg/kg (Pöhlmann *et al.* 2013 a). Ka Onopiuk *et al.* (2021, 2022) leidsid, et lihatoodete kõrge rasvasisaldus suurendab PAH sisaldust.

Tiwo *et al.* 2019 töös märgiti, et kõrgem toote rasvasisaldus soosib PAH imbumist pealiskihist toote sisemusse.

#### Liha liik

Djinovic *et al.* (2008) uuringus leiti, et veisesinkides olid lõplikud PAH sisaldused peaaegu kahekordsed võrreldes sealihast sinkidega. Samas olid protsessi alguses (peale kolmandat päeva) pea kõikide PAH-de sisaldused sealiha puhul kõrgemad. Näidati, et PAH sisaldused

sõltuvad liha liigist sama pinna/ruumala suhte korral. Naha või kesta olemasolu on heaks barjääriks, et suits ei imbuks peekoni sisemusse.

Onopiuk *et al.* 2022 detekteerisid kõrgeimad PAH sisaldused suitsutatud sealihatoodetes.

Muud mõjufaktorid ja võimalikud meetmed

Šimko (2005) näitas, et vorstide puhul on efektiivne BaP sisalduse alandamise meede vorstide keetmine: BaP sisaldus vähenes 4,8 µg/kg kuni 1,9 µg/kg. Maksimaalne langus tekkis 20 min keetmise järel, hiljem jäi sisaldus konstantseks. BaP vähenemine oli otseses proportsioonis väljakeedetud rasva hulga. Näidati, et toote pakendamine LDPE (madaltihe polüetüleen) kottidesse vähendab PAH sisaldust: röstitud pardinaha BaP sisaldus vähenes 3,5-lt 1,9 µg/kg-ni, kui seda hoiti LDPE-sse pakituna 24 tundi. Tähdeldati ka, et PAH kontsentratsioone suitsutatud lihatoodetes mõjutavad ka keskkonnafaktorid, nt valgus ja hapniku juurdepääs.

Vranešević *et al.* (2022) uuringu tulemused näitasid olulist PAH sisalduste erinevust suitsutatud kuivsoolatud seafilee pinnal (BaP 7,33 µg/kg; PAH4 61,14 µg/kg). Näidati, et toote loputamine peale suitsutamist alandab oluliselt PAH sisaldusi pinnal (BaP 3,43 µg/kg; PAH4 25,33 µg/kg). Loputamise käigus pesti suitsutatud sealiha tükke kraaniveega, mille tulemusena osa mustast pealiskihist eemaldati. PAH sisaldused alanesid oluliselt, sellega välditi ka PAH imbumist toote sisemusse kuivatamisel ja säilitamisel.

Babic *et al.* (2018) töös uuriti suitsufiltrite kasutamist karpkala suitsutamisel PAH sisalduste vähendamiseks. Leiti, et traditsioonilist suitsutusprotsessi saab kontrollida heade tootmistavade kasutamisega (GMP) ning täiendava tseoliitfiltri kasutamine vähendas PAH sisaldusi 2–3 korda. Tiwo *et al.* (2019) töös leiti, et 100 µm metallfiltri kasutamine aitab hoida sisaldused EL-i normide piires.

Onopiuk *et al.* (2021, 2022) leidsid, et toote kaitsvasse materjali mähkimine, eelkuumutamine ja marineerimine võivad vähendada PAH sisaldust.

PAH kogust mõjutab toote veeaktiivsus ning PAH sisaldusi on võimalik teatud määral alandada algele tootele antioksidantide lisamisega (Min *et al.*, 2018).

PAH sisalduste vähendamisele aitab kaasa looduslike antioksidantide ja vürtside lisamine toote marineerimiseks enne suitsutamist, kuuma veega blanšeerimine ja saastaineid vähendava pakkematerjalide kasutamine peale suitsutamisprotsessi (Zhu *et al.* 2022).

Pirsaheb *et al.* (2022) töötasid välja mudeli grillitud liha jaoks PAH sisalduste prognoosimiseks sõltuvalt liha liigist, lõikest, naha olemasolust, grillimistemperatuurist ja ajast. Mudel ei käsitle suitsutatud tooteid.

Singh *et al.* (2020) on koostanud ülevaate PAH vähendamise võimalustest erinevatel toiduvalmistusmeetoditel (sh suitsutamine) tootegruppide kaupa. On toodud välja vähendusvõimalused protsentides. Need võimalused ei arvesta toodete sensoorsete omaduste säilitamisega ega tarbija eelistustega. Järeldati, et tehnoloogiliselt on võimalik PAH sisaldusi vähendada peaaegu 100% võrra, kui võtta kasutusele meetmed, sh suitsutamismeetod (traditsiooniliselt tööstuslikult kontrollitule), erinevad suitsu genereerimise viisid, filtrid, erinevad puidud, suitsutamisaeg, temperatuurirežiim, toodete kaitsekihid, rasvasisaldus, ahju parameetrid. Singh *et al.* (2023) töö sisaldab ülevaate viimaste aastate PAH sisalduste artiklitest ja vähendamise võimalustest erinevates toidugruppides (eelkõige mitte suitsutatud tooted).

Swaney-Stueve *et al.* (2019) uurisid suitsutatud sealihatoodete tarbijale meelepärast. Leiti, et välimus oli määravaim, kuid ka aroom oli oluline. Kõige suurema korrelatsiooniga oli punase värvi intensiivsus, samas oli suitsune aroom pigem negatiivses korrelatsioonis meelepärastusega.

Meetmed PAH sisalduste vähendamiseks on süstemaatiliselt esitatud *Codex alimentarius*'e juhendis CAC/RCP 68-2009.

Püssa (2013) võttis kokku üldised reeglid PAH sisalduste minimeerimiseks lihatoodes: tuleks suitsutada võimalikult rasvavaest liha madalal temperatuuril pikema aja jooksul vältides kokkupuudet avatud leegiga, eriti toodete all oleva leegiga. Samas peab protsess tagama võimalike bakteriaalsete ja endogeensete toksiinide inaktiveerimise.

## Kokkuvõte

1) Millistel tingimustel (sh suitsutamise kestus, liha-/kalatoote liik, toote rasvasisaldus, suitsutuskambri niiskuse sisaldus, hapniku juurdepääs, kasutatava puidu liik, suitsu temperatuur) traditsioonilisel suitsutamisel on võimalik, et PAH-de sisaldust ei detekteerita või on alla määramispiiri?

- PAH teket suitsus ei ole võimalik täielikult vältida, kui suitsu genereerimistemperatuur on üle 400 °C;
- iseloomuliku suitsuse maitse saavutamiseks peaks olema suitsu genereerimistemperatuur vähemalt 500 °C, et tekiks piisavas koguses fenoolseid ühendeid;
- sõltuvalt puiduliigist võivad PAH sisaldused tootes varieeruda kordades;
- niiskem puit annab madalama suitsu genereerimise temperatuuri;
- PAH sisaldused tootes suurenevad suitsu tiheduse tõustes;
- oluline roll on suitsuahju/kambri ehitusel: kui kaugel ja mis asendis on suitsu allikas; kuidas on paigutatud töödeldavad tooted;
- kõrgemad PAH sisaldused tekivad suurema rasvasisaldusega toodetes (nt sealihatoodetes);
- PAH sisaldused tõusevad suitsutusaja pikenedes (eriti lihatoodetel), kuid kõige määravamaks faktoriks on ikkagi temperatuur.

Kui mitmeid faktoreid muuta PAH tekke vähenemise suunas, siis on võimalik saada määramispiirist allapoole jääva PAH sisaldusega toode. Suitsutustingimuste kardinaalsel muutmisel ei ole tõenäoliselt tegemist enam nii visuaalselt kui ka sensorsetelt omadustelt samasuguse tootega. Kui PAH teket püüda maksimaalselt vähendada, ei pruugi enam olla tagatud toote mikrobioloogiline ohutus ning algne toote säilivusaeg.

Erinevates töödes on nn. traditsioonilise suitsutamise tingimused väga erinevad, need pole selgelt määratletud ning sageli pole need ka täpselt kirjeldatud. Kuna pole ka teada, missuguseid tingimusi ja kontrole Eesti tootjad kasutavad, ei saa teiste autorite eksperimentides saadud numbrilisi väärtusi meie oludesse otseselt üle kanda.

2) Kui samas traditsioonilises suitsusaunas või suitsuahjus on valmistatud suitsutatud liha- või kalatoode, millest ühel juhul on võetud kasutusele meetmed PAH tekke alandamiseks ja teisel juhul meetmeid kasutusele ei võeta, siis kui mitme kordne võib olla maksimaalne erinevus

lõpptoote PAH sisalduses kui meetmed on kasutusele võetud, võrreldes olukorraga kui neid kasutusele võetud ei ole?

Kirjandusallikate andmetel on võimalik vähendada suitsutatud toodetes PAH sisaldust üle 90% ja isegi teatud juhtudel peaaegu 100% võrra. See tähendab väga radikaalselt suitsutustingimuste muutmist ja protsessi kontrollimist.

Ei saa ette näha täpseid meetmeid PAH kontsentratsioonide vähendamiseks teadmata suitsuahju ehitust ja senini kasutatavat tehnoloogiat. Ettevõtjad peaksid analüüsima oma toodete uuringutulemusi, et leida just oma tootmisele sobilik lahendus.

3) Kui palju mõjutab proovivõtumeetod traditsiooniliselt suitsutatud liha- ja kalatoodete PAH-de tulemust?

Tavaliselt võetakse laborianalüüsiks kas 1 tükk sinki või 1 suurem kala, massiga ca 1 kg, millest labor valmistab sellest keskmise proovi: mittedööv osa (nt paks kalanahk, -luud ja –pea) eemaldatakse, sööv osa homogeniseeritakse. 1 singitüki või kala puhul ei pruugi saadav analüüsitulemus olla esinduslik. PAH sisaldus sõltub toote pinna/ruumala suhtest: lameda ja lapiku tüki pind võib olla kuni 2 korda suurem kui ligilähedaselt kerakujulisel tükil, samas võib olla pinnakihis ca 90% PAH-dest. Väikeste kalade ja vorstikeste pinna osakaal on veelgi suurem, mistõttu on neis ka sisaldused suuremad. Lisaks toote suurusele/kujule sõltub PAH sisaldus konkreetse toote asukohast suitsutuskambris.

Hokkanen *et al.* (2018) sedastavad, et selektiivse proovivõtmisega saab välimuse järgi mitte võtta väiksema PAH sisaldusega tooteid. Tõenäoliselt kehtib ka vastupidine: selektiivse proovivõtmisega saab tootja proovivõtmisel välistada tõenäoliselt suurema PAH sisaldusega tooted.

## Kasutatud kirjandus

Kirjanduse loetelus on toodud läbi vaadatud allikad. Kõigile neist käesolevas töös viidatud ei ole.

- Adeyeye, S.A.O., Ashaolu, T.J., 2022. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Formation and Mitigation in Meat and Meat Products. *Polycyclic Aromatic Compounds* 42, 3401–3411. <https://doi.org/10.1080/10406638.2020.1866039>
- Aksun Tümerkan, E.T., 2022. Investigations of the Polycyclic Aromatic Hydrocarbon and Elemental Profile of Smoked Fish. *Molecules* 27. <https://doi.org/10.3390/molecules27207015>
- Asamoah, E.K., Nunoo, F.K.E., Addo, S., Nyarko, J.O., Hyldig, G., 2021. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in fish smoked using traditional and improved kilns: Levels and human health risk implications through dietary exposure in Ghana. *Food Control* 121, 107576. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107576>
- Babić, J., Vidaković, S., Škaljac, S., Kartalović, B., Ljubojević, D., Ćirković, M., Teodorović, V., 2017. Factors affecting elimination of polycyclic aromatic hydrocarbons from traditional smoked common carp meat. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 85, 012086. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/85/1/012086>
- Babić, J.M., Kartalović, B.D., Škaljac, S., Vidaković, S., Ljubojević, D., Petrović, J.M., Ćirković, M.A., Teodorović, V., 2018. Reduction of polycyclic aromatic hydrocarbons in common carp meat smoked in traditional conditions. *Food Additives & Contaminants: Part B* 11, 208–213. <https://doi.org/10.1080/19393210.2018.1484821>
- CAC/RCP 68-2009 Code of Practice for the Reduction of Contamination of Food with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) from Smoking and Direct Drying Processes. [https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCXC%252B68-2009%252FCXP\\_068e.pdf](https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCXC%252B68-2009%252FCXP_068e.pdf)
- Chen, L., Liu, R., Wu, M., Yu, H., Ge, Q., Zhang, W., 2021. Nitrosamines and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Smoke-Cured Bacon (Larou) of Artisanal and Industrial Origin. *Foods* 10. <https://doi.org/10.3390/foods10112830>
- Ciecierska, M., Obiedzinski, M., 2007. Influence of smoking process on polycyclic aromatic hydrocarbons' content in meat products. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, vol. 6, pp. 17–28.
- Coroian, C.O., Coroian, A., Becze, A., Longodor, A., Mastan, O., Radu-Rusu, R.-M., 2023. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Occurrence in Traditionally Smoked Chicken, Turkey and Duck Meat. *Agriculture* 13. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010057>
- Djinovic, J., Popovic, A., Jira, W., 2008. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in different types of smoked meat products from Serbia. *Meat Science* 80, 449–456. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.01.008>
- Duedahl-Olesen, L., Christensen, J.H., Højgård, A., Granby, K., Timm-Heinrich, M., 2010. Influence of smoking parameters on the concentration of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Danish smoked fish. *Food Additives & Contaminants: Part A* 27, 1294–1305. <https://doi.org/10.1080/19440049.2010.487074>
- Duedahl-Olesen, L., White, S., Binderup, M.-L., 2006. POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS (PAH) IN DANISH SMOKED FISH AND MEAT PRODUCTS. *Polycyclic Aromatic Compounds* 26, 163–184. <https://doi.org/10.1080/10406630600760527>
- Dutta, K., Shityakov, S., Zhu, W., Khalifa, I., 2022. High-risk meat and fish cooking methods of polycyclic aromatic hydrocarbons formation and its avoidance strategies. *Food Control* 142, 109253. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109253>

- EFSA, 2008. Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain on a request from the European Commission on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Food. The EFSA Journal (2008) 724, 1-114. <https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/724>
- EmelOz, 2020. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons as Food Toxicant in Smoked Fishes. JOR 51, 109–118.
- Essumang, D.K., Dodoo, D.K., Adjei, J.K., 2013. Effect of smoke generation sources and smoke curing duration on the levels of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) in different suites of fish. Food and Chemical Toxicology 58, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2013.04.014>
- Fasano, E., Yebra-Pimentel, I., Martínez-Carballo, E., Simal-Gándara, J., 2016. Profiling, distribution and levels of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in traditional smoked plant and animal foods. Food Control 59, 581–590. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.06.036>
- Gomes, A., Santos, C., Almeida, J., Elias, M., Roseiro, L.C., 2013. Effect of fat content, casing type and smoking procedures on PAHs contents of Portuguese traditional dry fermented sausages. Food and Chemical Toxicology 58, 369–374. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2013.05.015>
- Gómez, I., Janardhanan, R., Ibañez, F.C., Beriain, M.J., 2020. The Effects of Processing and Preservation Technologies on Meat Quality: Sensory and Nutritional Aspects. Foods 9. <https://doi.org/10.3390/foods9101416>
- Hitzel, A., Pöhlmann, M., Schwägele, F., Speer, K., Jira, W., 2013. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and phenolic substances in meat products smoked with different types of wood and smoking spices. Food Chemistry 139, 955–962. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.02.011>
- Hokkanen, M., Luhtasela, U., Kostamo, P., Ritvanen, T., Peltonen, K., Jestoi, M., 2018. Critical Effects of Smoking Parameters on the Levels of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Traditionally Smoked Fish and Meat Products in Finland. Journal of Chemistry 2018, 2160958. <https://doi.org/10.1155/2018/2160958>
- Iko Afé, O.H., Kpoclou, Y.E., Douny, C., Anihouvi, V.B., Igout, A., Mahillon, J., Hounhouigan, D.J., Scippo, M.-L., 2021. Chemical hazards in smoked meat and fish. Food Science & Nutrition 9, 6903–6922. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2633>
- Kafouris, D., Koukkidou, A., Christou, E., Hadjigeorgiou, M., Yiannopoulos, S., 2020. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in traditionally smoked meat products and charcoal grilled meat in Cyprus. Meat Science 164, 108088. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108088>
- Kartalovic, B., Okanovic, D., Babic, J., Djordjevic, V., Jankovic, S., Cirkovic, M., 2015. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Smoked Ham. Procedia Food Science 5, 144–147. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2015.09.042>
- Kartalović, B., Puljić, L., Kovačević, D., Markovčić, M., Vranešević, J., Habschied, K., Mastanjević, K., 2022. The Content of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Slavonska slanina—Traditionally Smoked and Dry-Cured Bacon. Processes 10. <https://doi.org/10.3390/pr10020268>
- Kitts, D.D., Pratap-Singh, A., Singh, A., Chen, X., Wang, S., 2023. A Risk–Benefit Analysis of First Nation’s Traditional Smoked Fish Processing. Foods 12. <https://doi.org/10.3390/foods12010111>
- Komisjoni määrus (EÜ) nr 1881/2006, 19. detsember 2006, millega sätestatakse teatavate saasteainete piirnõrmiid toiduainetes <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:02006R1881-20230101>
- Krarup Hansen, K., Turi, I., Sundset, M.A., Mathiesen, S.D., 2022. Bridging traditional and scientific knowledge on reindeer meat smoking - a pilot study. International Journal of Circumpolar Health 81, 2073056. <https://doi.org/10.1080/22423982.2022.2073056>



- Kubiak, M., Polak-Śliwińska, M., 2015. The level of chosen Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in meat products smoked by using an industrial and a traditional method 30, 137–147.
- Kuhn, K., Nowak, B., Behnke, A., Seidel, A., Lampen, A., 2009. Effect-based and chemical analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in smoked meat: a practical food-monitoring approach. *Food Additives & Contaminants: Part A* 26, 1104–1112.  
<https://doi.org/10.1080/02652030902855414>
- Ledesma, E., Rendueles, M., Díaz, M., 2016. Contamination of meat products during smoking by polycyclic aromatic hydrocarbons: Processes and prevention. *Food Control* 60, 64–87.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.07.016>
- Mastanjević, K., Kartalović, B., Puljić, L., Kovačević, D., Habschied, K., 2020a. Influence of Different Smoking Procedures on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Formation in Traditional Dry Sausage Hercegovačka kobasica. *Processes* 8.  
<https://doi.org/10.3390/pr8080918>
- Mastanjević, K., Puljić, L., Kartalović, B., Grbavac, J., Jukić Grbavac, M., Nadaždi, H., Habschied, K., 2020b. Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Heregovački pršut—Traditionally Smoked Prosciutto. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17. <https://doi.org/10.3390/ijerph17145097>
- Min, S., Patra, J.K., Shin, H.-S., 2018. Factors influencing inhibition of eight polycyclic aromatic hydrocarbons in heated meat model system. *Food Chemistry* 239, 993–1000.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.020>
- Onopiuk, A., Kołodziejczak, K., Marcinkowska-Lesiak, M., Poltorak, A., 2022. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons using different extraction methods and HPLC-FLD detection in smoked and grilled meat products. *Food Chemistry* 373, 131506.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131506>
- Onopiuk, A., Kołodziejczak, K., Szpicer, A., Wojtasik-Kalinowska, I., Wierzbička, A., Póltorak, A., 2021. Analysis of factors that influence the PAH profile and amount in meat products subjected to thermal processing. *Trends in Food Science & Technology* 115, 366–379.  
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.043>
- Pirsaheb, M., Dragoi, E.-N., Vasseghian, Y., 2022. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Formation in Grilled Meat products—Analysis and Modeling with Artificial Neural Networks. *Polycyclic Aromatic Compounds* 42, 156–172.  
<https://doi.org/10.1080/10406638.2020.1720750>
- Pöhlmann, M., Hitzel, A., Schwägele, F., Speer, K., Jira, W., 2013a. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and phenolic substances in smoked Frankfurter-type sausages depending on type of casing and fat content. *Food Control* 31, 136–144.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.09.030>
- Pöhlmann, M., Hitzel, A., Schwägele, F., Speer, K., Jira, W., 2013b. Influence of different smoke generation methods on the contents of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and phenolic substances in Frankfurter-type sausages. *Food Control* 34, 347–355.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.05.005>
- Pöhlmann, M., Hitzel, A., Schwägele, F., Speer, K., Jira, W., 2012. Contents of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and phenolic substances in Frankfurter-type sausages depending on smoking conditions using glow smoke. *Meat Science* 90, 176–184.  
<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.06.024>
- Püssa, T., 2013. Toxicological issues associated with production and processing of meat. *Meat Science* 95, 844–853. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.04.032>
- Racovita, R.C., Secuianu, C., Ciuca, M.D., Israel-Roming, F., 2020. Effects of Smoking Temperature, Smoking Time, and Type of Wood Sawdust on Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Accumulation Levels in Directly Smoked Pork Sausages. *J. Agric. Food Chem.* 68, 9530–9536. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c04116>

- Rascón, A.J., Azzouz, A., Ballesteros, E., 2019. Trace level determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in raw and processed meat and fish products from European markets by GC-MS. *Food Control* 101, 198–208. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.02.037>
- Roseiro, L.C., Gomes, A., Santos, C., 2011. Influence of processing in the prevalence of polycyclic aromatic hydrocarbons in a Portuguese traditional meat product. *Food and Chemical Toxicology* 49, 1340–1345. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2011.03.017>
- Rozentāle, I., Stumpe-Vīksna, I., Začs, D., Siksna, I., Melngaile, A., Bartkevičs, V., 2015. Assessment of dietary exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons from smoked meat products produced in Latvia. *Food Control* 54, 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.01.017>
- Rozentale, I., Zacs, D., Bartkiene, E., Bartkevics, V., 2018. Polycyclic aromatic hydrocarbons in traditionally smoked meat products from the Baltic states. *Food Additives & Contaminants: Part B* 11, 138–145. <https://doi.org/10.1080/19393210.2018.1440637>
- Sikorski, Z.E., Sinkiewicz, I., 2014. Principles of Smoking, in: *Handbook of Fermented Meat and Poultry*. pp. 39–45. <https://doi.org/10.1002/9781118522653.ch6>
- Šimko, P., 2005. Factors affecting elimination of polycyclic aromatic hydrocarbons from smoked meat foods and liquid smoke flavorings. *Molecular Nutrition & Food Research* 49, 637–647. <https://doi.org/10.1002/mnfr.200400091>
- Singh, L., Agarwal, T., Simal-Gandara, J., 2023. Summarizing minimization of polycyclic aromatic hydrocarbons in thermally processed foods by different strategies. *Food Control* 146, 109514. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109514>
- Singh, L., Agarwal, T., Simal-Gandara, J., 2020. PAHs, diet and cancer prevention: Cooking process driven-strategies. *Trends in Food Science & Technology* 99, 487–506. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.030>
- Sikorski, Z. E., Sinikiewicz, I., 2014. Smoking. Traditional. *Encyclopedia of Meat Sciences* (2nd Ed.), 321-327.
- Škaljac, S., Jokanović, M., Tomović, V., Šojić, B., Ikonić, P., Peulić, T., Ivić, M., Vranešević, J., Kartalović, B., 2022. Color Characteristics and Content of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons of Traditional Dry Fermented Sausages Throughout Processing in Controlled Conditions. *Polycyclic Aromatic Compounds*. <https://doi.org/10.1080/10406638.2020.1853183>
- Škaljac, S., Petrović, L., Jokanović, M., Tomović, V., Tasić, T., Ivić, M., Šojić, B., Ikonić, P., Džinić, N., 2017. The influence of smoking in traditional conditions on content of polycyclic aromatic hydrocarbons in Petrovská klobása. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 85, 012046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/85/1/012046>
- Sonogo, E., Bhattarai, B., Duedahl-Olesen, L., 2022. Detection of Nitrated, Oxygenated and Hydrogenated Polycyclic Aromatic Compounds in Smoked Fish and Meat Products. *Foods* 11. <https://doi.org/10.3390/foods11162446>
- Stumpe-Vīksna, I., Bartkevičs, V., Kukāre, A., Morozovs, A., 2008. Polycyclic aromatic hydrocarbons in meat smoked with different types of wood. *Food Chemistry* 110, 794–797. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.03.004>
- Swaney-Stueve, M., Talavera, M., Jepsen, T., Severns, B., Wise, R., Deubler, G., 2019. Sensory and Consumer Evaluation of Smoked Pulled Pork Prepared Using Different Smokers and Different Types of Wood. *Journal of Food Science* 84, 640–649. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14469>
- Tiwo, C.T., Tchoumboungang, F., Nganou, E., Kumar, P., Nayak, B., 2019. Effect of different smoking processes on the nutritional and polycyclic aromatic hydrocarbons composition of smoked *Clarias gariepinus* and *Cyprinus carpio*. *Food Science & Nutrition* 7, 2412–2418. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1107>
- Vranešević, J., Kartalović, B., Vidaković Knežević, S., Škaljac, S., Jokanović, M., 2022. Reduction of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons to Improve Safety of Traditional



(Homemade) Smoked Dry-cured Pork Loin. Polycyclic Aromatic Compounds 1–6.

<https://doi.org/10.1080/10406638.2022.2153883>

Wretling, S., Eriksson, A., Eskhult, G.A., Larsson, B., 2010. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Swedish smoked meat and fish. *Journal of Food Composition and Analysis* 23, 264–272. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2009.10.003>

Zachara, A., Gałkowska, D., Juszcak, L., 2017. Contamination of smoked meat and fish products from Polish market with polycyclic aromatic hydrocarbons. *Food Control* 80, 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.04.024>

Zhu, Z., Xu, Y., Huang, T., Yu, Y., Basse, A.P., Huang, M., 2022. The contamination, formation, determination and control of polycyclic aromatic hydrocarbons in meat products. *Food Control* 141, 109194. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109194>