

Elektronisen nenän käyttö elintarviketutkimuksessa

Biotekniikka
Bioteknologian laitos, teknillinen tiedekunta
Kandidaatin tutkielma

Laatija:
Klara Kaipio

2026
Turku

Kandidaatintutkielma

Tutkinto-ohjelma, oppiaine: Biotekniikka

Tekijä: Klara Kaipio

Otsikko: Elektronisen nenän käyttö elintarviketutkimuksessa

Ohjaaja: Oskar Laaksonen

Sivumäärä: 15 sivua

Päivämäärä: 24.4.2026

Elektroninen nenä on analyysilaitteisto, joka jäljittelee ihmisen hajuaistimusta erilaisten anturiteknologioiden ja koneoppimismallien avulla. Elintarviketeollisuudelta edellytetään kasvavissa määrin nopeampia, kustannustehokkaampia sekä luotettavampia arviointimenetelmiä elintarvikkeiden laatu- ja määrävaatimusten noustessa. Tähän kysyntään on ehdotettu elektronista nenää, joka on jatkuvan kehitystyön kohteena. Tutkielman tavoitteena on tarkastella elektronisen nenän toimintaperiaatetta, selvittää sovelluskohteita, käsitellä sen vahvuuksia ja heikkouksia, sekä tulevaisuuden mahdollisuuksia.

Tutkielmassa johdatellaan lukija aiheeseen selvittämällä elintarviketutkimuksen tavoitteita ja laadunvalvonnan tärkeyttä. Elektronisen nenän toiminta perustuu erilaisiin anturiteknologioihin ja signaalin käsittelyyn koneoppimisen mallien avulla. Anturiteknologioita on useita erilaisia, mutta tutkielmassa käsitellään erityisesti metalli-oksidi puolijohtimiin, johtaviin polymeereihin sekä optisiin antureihin pohjautuvia ratkaisuja. Elektronisen nenän sovelluskohteita tarkastellaan elintarvikkeiden säilyvyysajan arvioinnissa, jossa anturit tunnistavat pilaantuvan elintarvikkeen tuottamia haihtuvia orgaanisia yhdisteitä. Tämä mahdollistaa pilaantumisprosessin varhaisen havaitsemisen. Lisäksi anturien herkkyys haihtuvien yhdisteiden vähäisellekin vaihtelulle tarjoaa mahdollisuuden hyödyntää laitteistoa aromi- ja laatuarviointiin sekä autenttisuuden ja väärennösten tunnistamiseen.

Elektronisen nenän vahvuudet perustuvat sen kustannustehokkuuteen, nopeuteen ja toistettavuuteen. Vaikka anturiteknologiat ovat jatkuvan kehityksen kohteena ja eri teknologioita yhdistelemällä voidaan saavuttaa laaja selektiivisyys, niitä pidetään analyysilaitteiston heikoimpana kohtana. Näitä vahvuuksia ja heikkouksia selvitetään suhteessa muihin käytössä oleviin analyysimenetelmiin.

Tutkielma kokoaa lopuksi elektronisen nenän tulevaisuuden kehityssuuntia ja arvioi sen mahdollisia käyttömahdollisuuksia. Analyysimenetelmä vaatii vielä lisätutkimusta, erityisesti anturiteknologioiden osalta. Jatkuva kehitys kuitenkin laajentaa elektronisen nenän sovelluspotentiaalia entisestään, myös elintarviketutkimuksen ulkopuolella.

Avainsanat: Elektroninen nenä, anturiteknologiat, elintarviketutkimus

Sisällys

1	Johdanto	2
2	Elektronisen nenän toimintaperiaate	4
2.1	Anturitekniologiat	4
2.1.1	Metalli-oksidi puolijohdimet (MOS)	4
2.1.2	Johtava polymeeri (CP)	5
2.1.3	Optinen anturi	5
2.2	Signaalien esikäsittelymenetelmät ja analysointi	6
3	Sovelluskohteita	8
3.1	Säilyvyysajan arviointi	8
3.2	Aromi- ja laatuarviointi	10
4	Elektronisen nenän vahvuudet ja heikkoudet	12
5	Johtopäätökset	15
	Lähteet	16

1 Johdanto

Elintarvikkeiden laadunvalvonta on keskeisessä asemassa nopeasti etenevää elintarviketeollisuutta ja sen kehitystä. Laadunvalvonnan keskiössä ovat muun muassa kysymykset tuotteiden säilyvyydestä, varastoinnista sekä oikeellisuudesta. Kuten (Lu ja muut 2022) artikkelissaan toteavat, kuluttajien vaatimukset laadun suhteen kasvavat jatkuvasti ja yritysten on vastattava näihin tarpeisiin. Kuluttajien kysyntä on myös luonut tilaa huonolaatuisille ja jopa väärennetyille tuotteille, jotka voivat aiheuttaa merkittävää haittaa kuluttajien fyysiselle ja henkiselle terveydelle (Mahanti ja muut 2024).

Kasvun ja tuottavuuden lisäämisen ongelmiin on pyritty löytämään erilaisia teknologioita ja menetelmiä, joilla laatua pyritään tarkkailemaan ja parantamaan. Yksi tärkeimmistä laadunvalvonnan menetelmistä on aistinvarainen tutkimus, jossa hyödynnetään ihmisten aisteja; näkö-, haju-, maku-, kuulo- sekä tuntoaisteja. Pitkän kehitys- ja tutkimustyön tuloksena aistinvaraisen arvioinnin avulla voidaan parantaa huomattavasti tuotteiden laatua, mutta koska tutkimus perustuu ihmisten psykologisiin ja fysiologisiin ominaisuuksiin, arviointivirheiltä ei voida välttyä. Lisäksi kuten Lu ja muut (2022) julkaisussaan mainitsevat, perinteisten menetelmien sovellusalueiden rajallisuuden vuoksi ne eivät täysin pysty vastaamaan markkinoiden kysyntään.

Myös muihin perinteisiin analyysimenetelmiin liittyy rajoitteita. Vaikka kemialliset ja mikrobiologiset menetelmät ovat tarkkoja, ne vaativat usein paljon resursseja kuten aikaa, rahaa ja osaamista. Ne vaativat koulutetun henkilöstön muun muassa näytteiden esikäsittelyyn ja vaativien laboratoriolaitteistojen käyttämiseen. Tämän vuoksi elintarviketutkimuksessa on kiinnostuttu löytämään uudenlaisia menetelmiä, jotka voisivat toimia perinteisten menetelmien rinnalla tai jopa itsenäisesti.

Yksi tapa päästä yli nykyisistä tutkimukseen liittyvistä ongelmista on aistien elektronisoiminen. Elintarvikkeet tuottavat haihtuvia orgaanisia yhdisteitä läpi tuotanto-, kuljetus- ja varastointiprosessin. Yhdisteet syntyvät elintarvikkeissa tapahtuvista kemiallisista reaktioista, sekä ulkoisten mikro-organismien vaikutuksesta ja ne ovat vahvasti kytköksissä ruuan laatuun ja turvallisuuteen. (Xing ja muut 2023)

Elektroninen nenä on analyysimenetelmä, joka yleisesti koostuu kahdesta osasta: kaasuja aistivista antureista, sekä informaatiota käsittelevästä järjestelmästä (Cheng ja muut 2021). Anturit reagoivat näytteen sisältämiin haihtuviin yhdisteisiin ja tuottavat signaaleja, joita voidaan myöhemmissä vaiheissa analysoida tilastollisin ja koneoppimisen keinoin. Analyysilaitteiston tarkoituksena on jäljitellä ihmisen hajuaistimuksen mekanisme ja analysoinnin tuloksena näytteitä voidaan esimerkiksi luokitella, vertailla tai yhdistää erilaisiin laadullisiin ominaisuuksiin.

Analyysimenetelmää on käytetty jo laajasti eri tieteenalojen sovelluskohteissa, kuten lääketieteessä, ympäristötieteissä, sekä turvallisuus- ja rikostekniikassa. Lisäksi erityisesti elintarvikekehityksessä käyttö on lisääntynyt, sillä se tarjoaa nopean ja kustannustehokkaan tavan esimerkiksi laaduntarkkailuun tai kehitystyöhön. Menetelmä ei kuitenkaan poista tarvetta perinteisille menetelmille, vaan sen tarkoituksena on laajentaa elintarvikekehityksen työkaluja kustannustehokkaampana vaihtoehtona.

Tutkielmassa selvitetään, miten elektronista nenää voidaan hyödyntää elintarviketutkimuksessa sekä millaisia mahdollisuuksia, rajoitteita ja tulevaisuuden näkymiä teknologialla on. Lisäksi selvitetään elektronisen nenän toimintaperiaatetta, eli minkälaisia anturi- ja analyysimenetelmiä analyysilaitteistoissa käytetään. Tutkielma tarjoaa kokonaiskuvan elektronisen nenän sovelluskohteista ja arvioi sen käyttöä elintarviketutkimuksessa.

2 Elektronisen nenän toimintaperiaate



Kuva 1. Elektronisen nenän toimintaperiaate

2.1 Anturiteknologiat

Elektronisen nenän ydin on sen antureissa. Laitteen näytteenottolaite kerää haihtuvia orgaanisia yhdisteitä näytteen yläpuolisesta tilasta ja kuljettaa ne antureille, jolloin anturit reagoivat niihin niille ominaisella tavalla käytetystä anturiteknologiasta riippuen. Anturit lähettävät sähköisiä signaaleja, jotka myöhemmin käsitellään ja luokitellaan tunnistusohjelmistoilla. (Li ja muut 2023). Erilaisilla antureilla on toisistaan eroavat selektiivisyydet ja sovellusmahdollisuudet. Ristiherkkyydellä tarkoitetaan ilmiötä, jossa erilaiset kaasuanturit reagoivat eri tavalla yhdisteisiin (Xing ja muut 2023). Kuten Röck ja muut (2008) julkaisussaan toteavat, jokaiselle anturityypille on olemassa useita mahdollisuuksia hienosäätää anturin selektiivisyyttä ja erilaisten anturityyppien muunninperiaatteiden moninaisuutta ei pidä sivuuttaa.

2.1.1 Metalli-oksidi puolijohtimet (MOS)

Metalli-oksidi puolijohtimet (engl. metal oxide semiconductor, MOS) ovat yleisimmin käytettyjä anturityyppejä aromien tunnistuksessa (Li ja muut 2023). MOS-antureiden toiminta perustuu sen pinnassa olevien metallien sähkönjohtavuuden muuttumiseen. Kun kaasu kohtaa anturin pinnan, tapahtuu kemiallinen reaktio, joka muuttaa anturin sähköistä signaalia (Goel ja muut 2023). Ennen mittaamisen aloittamista antureiden puolijohtava kalvo - joka on yleensä tina- tai sinkkioksidia – altistetaan ilmassa oleville happimolekyyleille, jolloin ne adsorboituvat pinnalle ja sitovat elektroneja puolijohteesta. Anturin pinta kuumennetaan, jolloin happimolekyyleistä muodostuu lämpötilasta riippuen erilaisia happi-ioneita. Tällöin anturin resistanssi eli kyky vastustaa sähkövirran kulkua on korkea (Goel ja muut 2023). Tätä resistanssin arvoa pidetään mittauksessa nollana, eli myöhempiä tuloksia verrataan aloitustilanteen vastuksen arvoon.

Kun mittaus aloitetaan, anturin pinta altistetaan tutkittaville haihtuville yhdisteille eli kaasuille. Kun pinnan happi-ionit reagoivat pelkistävien kaasujen kanssa (esimerkiksi CO_2 , H_2), elektroneja vapautuu takaisin puolijohteeseen ja resistanssi laskee. Vastuksen muutos toimii mittasignaalina, jota tunnistamalla ja luokittelemalla voidaan selvittää kaasun koostumus. (Goel ja muut 2023)

2.1.2 Johtava polymeeri (CP)

Johtaviin polymeereihin (engl. conducting polymers, CP) perustuvat anturit toimivat siten, että polymeerin sähkönjohtavuuden ominaisuudet muuttuvat, kun tutkittava kaasu osuu anturin pintaan. Niissä yleisesti käytettäviä polymeerejä ovat esimerkiksi polyaniliini ja polypyrroli. Polymeerien rakenteet mahdollistavat sähkön johtamisen ja niiden kemiallisia ryhmiä voidaan muokata siten, että ne reagoivat herkästi tiettyntyyppisten molekyylien kanssa. Kun kaasu adsorboituu polymeerin pintaan, se voi toimia joko elektroninluovuttajana tai – vastaanottajana. Tämä muuttaa sen varauksenkuljettajien määrää, joko lisäämällä tai vähentämällä elektronitiheyttä, joka vaikuttaa suoraan materiaalin sähkönjohtavuuteen. Sähkönjohtavuus muuttuu riippuen kaasun koostumuksesta ja muutos voidaan mitata sähköisinä signaaleina. (Dong ja muut 2025)

2.1.3 Optinen anturi

Optiset anturit tunnistavat haihtuvien orgaanisten yhdisteiden signaaleja optisten ominaisuuksien, kuten värin, absorbanssin, läpäisevyyden, heijastavuuden ja fluoresenssin muutosten perusteella. Esimerkiksi kolorimetriset anturimatriisit (Colorimetric Sensor Arrays, CSA) perustuvat kemiallisesti reagoiviin väriaineisiin, jotka muuttavat väriä eri kaasujen vaikutuksesta. Ne koostuvat jostain optisesta kaasulle herkästä materiaalista, joilla on tietty tunnistuskyky, sekä kiinteästä kantajasta. Esimerkiksi pH-indikaattorit ovat usein käytettyjä kolorimetrisissä antureissa niiden stabiiliuden ja edullisuuden vuoksi. Ne toimivat hyvin erityisesti orgaanisen kudoksen, kuten lihan pilaantumisen havaitsemiseen. Pilaantumisen edessä haihtuvat amiinit reagoivat kiinteään kantajaan kiinnitetyn pH-indikaattorin kanssa ja tapahtuu värimuutos. Näin lihan tuoreus voidaan havaita visuaalisesti. (Xing ja muut 2023)

Toinen elektronisissa nenissä hyödynnetty optinen anturitekniikka on pintaplasmoniresonanssi (Surface Plasmon Resonance, SPR). Se perustuu metallipinnan taite- ja massatiheyden muutoksiin biomolekyylien sitoutuessa siihen. Menetelmässä valo kohdistetaan metallipinnoitetulle lasille tietyssä kulmassa, jolloin osa valon energiasta siirtyy metallipinnan vapaille elektroneille muodostaen pintaplasma-aaltoja. Tämä aiheuttaa heijastuneen valon intensiteetin jyrkän laskun ja jos metallipinnan lähellä on tapahtunut molekyylien sitoutumista erilaisten fysikaalisten ja kemiallisten vuorovaikutusten avulla, optiset ominaisuudet muuttuvat. Takaisin heijastuneen valon kulman muutoksia voidaan mitata reaaliajassa, joka tekee siitä herkän ja ei-tuhoavan menetelmän biomolekyylien tunnistamiseen, pitoisuuksien määrittämiseen ja vuorovaikutusten tutkimiseen. (Xing ja muut 2023)

2.2 Signaalien esikäsittelymenetelmät ja analysointi

Antureista saatu signaali täytyy muuttaa luettavaan muotoon, jotta voidaan muodostaa niin sanottu ”hajusormenjälki”. Yksittäisen anturin vaste on yksinkertainen, mutta kun käytössä on useita antureita samanaikaisesti, muodostuva signaali on monimutkainen. Sen takia tarvitaan kehittyneitä laskennallisia menetelmiä, joilla antureiden signaaleja voidaan tulkita. Nykyään koneoppimisen algoritmit ovat merkittävästi edistäneet kaasumolekyylien hajuprofiilien ja ristiherkkyysien tulkintaa. Koska algoritmien soveltuvuus voi vaihdella, usein käytetään monia eri koneoppimismenetelmiä rinnakkain ja vertaillaan niiden suorituskykyjä. Näin maksimoidaan antureiden antamien signaalien arviointi ja päästään parhaisiin mahdollisiin tuloksiin. (Xing ja muut 2023)

Esikäsittely on tärkeä vaihe ennen signaalien analysointia. Sen avulla voidaan korostaa olennaisia piirteitä ja vähentää datan ulottuvuuksia, joka puolestaan parantaa datan laatua. Esikäsittelyyn kuuluu muun muassa analyysin suorituskykyä ja luotettavuutta heikentävän kohinan poistamista. Kohinaan voi olla monia syitä, kuten ympäristötekijät (tuuli, kosteus, lämpötila), epätäydelliset anturit tai niiden fyysiset vauriot muun muassa vanhenemisen takia, ristiherkkyys sekä sähkökohina. Yksi merkittävä kohinan lähde on myös mittausdatasta poikkeavat arvot. Taustakohinan poistoon on olemassa useita tapoja, joista yleisimmin käytettyjä ovat signaalin tasoitus (engl. smoothing), derivaatat, normalisointi ja offset-korjaus. (Mahanti ja muut 2024)

Signaalien analysoinnissa käytetään koneoppimista (engl. machine learning, ML).

Koneoppimisen menetelmiä on paljon erilaisia ja sopivimman ML- menetelmän valitsemiseen vaikuttaa datan luonne, tehtävätyyppi ja halutut lopputulokset. Lisäksi usein yhdistellään useita eri koneoppimisen menetelmiä, jotta saavutetaan paras mahdollinen tulos. (Mahanti ja muut 2024)

Koneoppimisen menetelmät voidaan jakaa karkeasti neljään eri kategoriaan, joita ovat perinteinen koneoppiminen (engl. classical learning), vahvistusoppiminen (engl. reinforcement learning), yhdistelmämallit (engl. ensemble methods) sekä neuroverkot ja syväoppiminen (engl. neural networks & deep learning). Perinteinen koneoppiminen sisältää luokittelu, regressio, ryhmittely ja kuvioiden etsintätekniikoita. Näitä ovat esimerkiksi tukivektorimallit (engl. support vector machines, SVM) sekä lineaarinen regressio. Vahvistusoppimisella tarkoitetaan algoritmeja, jotka oppivat niin sanottujen palkkioiden ja rangaistusten avulla. (Mahanti ja muut 2024)

Yhdistelmämallit nimensä mukaisesti yhdistelevät eri koneoppimisen malleja saavuttaakseen paremman ennusteen. Wijaya ja muut (2022) käyttivät naudanlihan laadun arviointiin keskittyneessä tutkimuksessaan yhdistelmämallia, joiden avulla pystyttiin sekä optimoimaan antureiden valintaa, että parantamaan hajudatan luokittelua. Neuroverkkoja ja syväoppimista puolestaan käytetään, kun analysoidaan suurempia datamääriä. Ne pyrkivät jäljittelemään ihmisen hajuaistia ja siten havaitsevat monimutkaisia hajukuvia. Useimmin käytettyjä menetelmiä ovat esimerkiksi konvoluutioneuroverkot (engl. convolutional neural network, CNN) ja rekurrentiset neuroverkot (engl. recurrent neural network, RNN). (Mahanti ja muut 2024)

Eri koneoppimisen mallien tehokkuuden ja luotettavuuden arvioimiseksi on tärkeää mitata niiden suorituskykyä. Sitä voidaan mitata muun muassa tarkkuuden, herkkyuden ja täsmällisyyden perusteella. Arviointimenetelmä riippuu kuitenkin aina käytetystä koneoppimisen menetelmästä (Mahanti ja muut 2024) sekä siitä, miten data-aineisto jaetaan mallin opettamista ja testaamista varten. Anwar ja Anwar (2025) havaitsivat kanan laadun arvioimista käsittelevässä tutkimuksessaan, että datan jakotapa vaikutti elektronisen nenän signaaleja käsittelevän koneoppimismallin tarkkuuteen merkittävästi. Random Forest koneoppimismalli saavutti 100 % tarkkuuden satunnaisesti jaetulla datalla ja vain 69 % tarkkuuden ei-satunnaisella jaolla.

3 Sovelluskohteita

Elektronista nenää käytetään monissa erilaisissa sovelluskohteissa elintarviketeollisuuden alalla. Sen avulla on tutkittu muun muassa elintarvikkeiden säilyvyyttä, tuoreutta, laatua, autenttisuutta ja tehty väärennösten tunnistamista. Analyysilaitteiston sovellukset perustuvat siihen, että elintarvikkeista vapautuvat haihtuvat orgaaniset yhdisteet muuttuvat esimerkiksi varastoinnin ja säilytyksen aikana sekä raaka-aineen alkuperän ja väärennöksen seurauksena. Elektronisen nenän avulla voidaan tutkia esimerkiksi sitä, miten hajuprofiili muuttuu tai verrata sitä perinteisten menetelmien tuottamiin tuloksiin.

3.1 Säilyvyysajan arviointi

Elintarvikkeiden säilyvyysajalla tarkoitetaan sitä, kuinka pitkään elintarvike säilyttää hyväksyttävän laadun ja turvallisuuden. Yksi laadun ominaisuus on tuoreus, joka heikkenee varastoinnin aikana. Tuoreudenvälvontaan on kehitetty monia menetelmiä, kuten aistinvarainen analyysi, kromatografia ja mikrobiologiset analyysit. Ne ovat tehokkaita, mutta kalliita ja aikaa vieviä menetelmiä. Tämän vuoksi elektronista nenää on ehdotettu vaihtoehtoiseksi menetelmäksi tuoreuden valvontaan. (Sánchez ja muut 2024)

Sánchez ja muut (2024) tutkivat tuoreen kalan säilyvyysajan arvioimista elektronisen nenän avulla. Tutkimuksen tavoitteena oli luokitella jokikala Tinca tinca (Suutari) sen tuoreustilan mukaan. Tuoreustilaa selvitettiin mittaamalla, miten aerobisten mesofiilisten mikro-organismien lisääntyminen vaikuttaa kalan aistinvaraisen hajun heikkenemiseen. Lisääntynyt aerobisten mesofiilisten määrä korreloi negatiivisesti haju- ja makuprofiiliin ja toimii siten merkittävänä laadun indikaattorina. Tutkimus keskittyi elektronisen nenän kykyyn erottaa eri tuoreusasteet ja yhdistää saadut tulokset mesofiilisten bakteerien esiintymiseen.

Tutkimuksessa käytetty elektroninen nenä koostuu viidestä metalli-oksidi puolijohdin pohjaisesta (MOS) kaasuanturista (taulukko 1), sekä ympäristöolosuhteita mittaavista antureista. Erilaiset anturit yhdessä tarjoavat laajan selektiivisyyden. Antureiden keräämät tiedot analysoitiin käyttämällä pääkomponenttianalyysiä, joka osoitti selkeän erottumisen eri varastointipäivien välillä. Lisäksi tehtiin myös PLS-analyysi, joka kertoi tuoreuden ja mikrobimäärän välisen korrelaation. Ennen analyysimenetelmiä data esikäsiteltiin käyttämällä standardeja normalisointitekniikoita. Molemmilla menetelmillä saavutettiin korkea

onnistumisprosentti, joka kertoo menetelmien tehokkuudesta tuoreuden tutkimisessa.

(Sánchez ja muut 2024)

Taulukko 1. Sánchez ja muut (2024) kalan säilyvyyden tutkimisessa käytetyt elektronisen nenän MOS-anturit ja niiden signaalit. Muokattu taulukosta Sánchez ja muut (2024).

Anturi	Valmistaja	Signaalit
BME680	<i>Bosch Sensortech GmbH, Saksa</i>	Lämpötila, Suhteellinen kosteus, Paine, Resistanssiarvo (Ω)
SGP30	<i>Sensirion AG, Sveitsi</i>	CO ₂ , TVOC-arvot ¹ , H ₂ -raakasignaali ² , Etanoli-raakasignaali
ZMOD4410	<i>Reneas Electronic Corporation, Japani</i>	Etanoli- raakasignaali, Resistanssiarvo (Ω), CO ₂ , TVOC-arvot, IAQ ³
CCS811	<i>ScioSense B.V., Alankomaat</i>	CO ₂ , TVOC-arvot, Resistanssiarvo
iAQ-Core	<i>ScioSense, Eindhoven, Alankomaat</i>	CO ₂ - arvo (ppm), TVOC-arvot (ppb), Resistanssiarvo (Ω)

1. Kokonaishaihtuvat orgaaniset yhdisteet (engl. Total Volatile Organic Compounds)
2. Signaali peräisin anturin resistanssista
3. Ilmanlaatuindeksi (engl. Air Quality Index)

Samantyyppisiä tuloksia saivat myös Al-Hooti ja muut (2024), jotka tutkivat elektronisen nenän käyttöä tuoreiden sardiinien mikrobipilaantumisen havaitsemisessa. Tutkimuksessa kaloja säilytettiin sekä 0°C lämpötilassa, että huoneen lämpöä vastaavassa 25°C lämpötilassa. Elektronisen nenän tuloksia verrattiin kokonaisbakteerimäärään sekä pilaantumiseen liittyvien bakteerien määrään ja tuloksissa havaittiin selvää korrelaatiota.

Näiden tutkimusten perusteella elektroninen nenä soveltuu hyvin tuoreuden ja säilyvyysajan tutkimiseen erityisesti helposti pilaantuvissa elintarvikkeissa. Menetelmän vahvuutena on nopea mittaus, jolloin hajuprofiilin muuttumista voidaan seurata varastoinnin aikana. Elektroninen nenä ei kuitenkaan täysin korvaa perinteisiä menetelmiä, sillä tuloksiin vaikuttavat muun muassa anturivalinnat, elintarvikkeen tyyppi sekä käytetty tilastollinen analyysimenetelmä.

3.2 Aromi- ja laatuarviointi

Elintarvikkeiden aromi, eli sille luontainen haju, muodostuu useista kompleksisista yhdisteistä, jotka yhdessä luovat tietyn aromiprofiilin. Aromi on myös yksi tärkeimmistä tekijöistä elintarvikkeen laadun arvioinnissa ja siinä, hyväksyykö kuluttaja tuotteen käyttöönsä. Kahvin aromi ja maku syntyvät pääasiassa korkeassa lämpötilassa tapahtuvan paahtamisen seurauksena. Astuti ja muut (2024) tutkivat Arabica kahvipapujen aromin luokittelusta niiden paahtoasteen perusteella. Tutkimuksessa käytettiin MOS kaasuantureilla, varusteltua elektronista nenää, sekä luokittelumenetelmiä, jotka yhdistivät koneoppimista, tekoälyneuroverkkoja (engl. artificial neural network, ANN) sekä laskennallista analyysiä Pearsonin korrelaatiokertoimien avulla.

Raakoja Arabica- kahvipapuja paahtettiin viidessä eri lämpötilassa: 185 °C, 195 °C, 205 °C, 215 °C ja 225 °C astetta, jotta saadaan eri paahtoasteita vaaleasta tummaan. Paahtamisen aikana syntyy paljon erilaisia haihtuvia orgaanisia yhdisteitä, joita tutkittiin kuudella erilaisella MOS-anturilla. Mittauksia toistettiin noin 50 kertaa, jotta voitiin varmistaa antureiden luotettavuus. Toistettavuustestissä antureiden standardipoikkeamat (STD) olivat alle 20 % kaikissa mittauksissa. (Astuti ja muut 2024)

Pearsonin korrelaatiokertoimella saatiin selvitettyä, että kaksi antureista oli tehokkaampia kahvipapujen aromin tunnistamiseen kuin toiset. Se ei silti poissulje sitä, etteikö kaikkia antureita tarvita, vaan vahvistaa tutkimuksen luottamusta. Signaalien analysoinnissa käytettiin ANN-syväoppimisteknologiaa, joka tuotti luotettavat luokittelutulokset. Ristiin validoinnissa saatiin korkeita tarkkuusarvoja – alhaisimmillaankin vaalea-keskipaahdolle 95,9 % ja korkeimmillaan keskipaahdolle jopa 98,8 %. Ristiin validoinnilla kuvataan koneoppimisen todellista suorituskykyä vertaamalla syväoppimisen tarkkuutta perinteisiin menetelmiin. (Astuti ja muut 2024)

Kahvin lisäksi elektronista nenää on hyödynnetty myös muiden elintarvikkeiden laatuarviointiin. Hidayat ja muut (2019) tutkivat kahdeksalla MOS-anturilla varustetulla elektronisella nenällä mustan teen (*Camellia Sinensis*) laatua. Näytteet koostuivat seitsemästä eri indonesialaisesta mustan teen tuotemerkestä, joista jokaisesta otettiin viisi näytettä viiden päivän ajan. Antureiden antamat signaalit analysoitiin PCA:n ja luokittelumenetelmien avulla. Tulosten perusteella teenäytteet voitiin luokitella kolmeen eri laatuluokkaan niiden

hajuprofiilin mukaan. Tutkimuksessa havaittiin myös se, että elektroninen nenä on toimiva analyysimenetelmä laadun tarkkailuun teollisuusolosuhteissa, sillä se on nopea ja objektiivinen verrattuna esimerkiksi aistinvaraiseen arviointiin.

4 Elektronisen nenän vahvuudet ja heikkoudet

Elektroninen nenä on loistava työkalu elintarviketutkimuksessa, kuten laadunvalvonnassa, tuoreuden tutkimisessa sekä kehityksessä pitkin prosessia. Suurimmat vahvuudet liittyvät sen nopeuteen, kustannustehokkuuteen ja toistettavuuteen. Lisäksi tärkeä etu niiden käytössä on, että valmis laitteisto ei tarvitse aktiivisesti koulutettua henkilöstöä sen käyttöön. Kuten Mahanti ja muut (2024) toteavat, perinteiset laboratoriomenetelmät ovat aikaa vieviä, kalliita, edellyttävät näytteiden esikäsittelyä ja vaativat erityistaitoja. Elektronisella nenällä näitä resursseja kuluu vähemmän, sillä analyysi tapahtuu siellä, missä prosessi on käynnissä. Tämän takia ajatus elektronisen nenän käytöstä on tullut yhä suosittumaksi elintarvikealalla.

Elektronista nenää käytettäessä voidaan jäljitellä aistinvaraista tutkimusta, mutta koska aistit on elektronisoitu, tuloksiin ei liity inhimillisiä ihmisten hajuaistimuksen yksilöllisyyteen ja subjektiivisuuteen liittyviä tutkimusvirheitä. Lisäksi asiantuntijapaneelin tekemä tutkimus on kallis prosessi, sillä se vaatii koulutettuja ihmisiä, jotka voivat työskennellä vain suhteellisen lyhyitä aikoja (Peris ja Escuder-Gilabert 2009). Menetelmä ei kuitenkaan poista ihmisraadin arvioinnin tarvetta kokonaan, sillä edelleen laitteisto täytyy kouluttaa vertaamalla sen tuloksia perinteisiin analyysimenetelmiin ja tutkimustuloksiin.

Tämä korostuu siinä, että elektroninen nenä ei yksinään kerro, mistä havaittu hajuprofiilin muutos johtuu. Esimerkiksi kalan säilyvyyden tutkimuksessa (Sánchez ja muut 2024) on ensin selvitettävä, mikä pilaantumista aiheuttaa ja sen jälkeen voidaan elektronisen nenän avulla luokitella sen säilyvyyttä. Se voi esimerkiksi määrittellä hajuprofiilin poikkeavan tuoreen kalan hajuprofiilista, mutta ei yksinään määritä, että kyseessä on pilaantumisreaktio. Tämän takia elektronista nenää käytetään usein yhdessä perinteisempien menetelmien kanssa, varsinkin kehitysvaiheessa.

Anturiteknologiat ovat kehittyneet huomattavasti nimenomaan elektronisten nenien kehityksen mukana ja nykypäivänä erilaisia antureita yhdistelemällä, voidaan saavuttaa laaja selektiivisyys ja herkkyys. Silti anturit ovat edelleen analyysilaitteiston heikoin kohta. Yksi tärkeimmistä rajoituksista on heikko herkkyys ja selektiivisyys silloin, kun halutaan erottaa toisistaan hyvin samankaltaisia yhdisteitä. Tämä voi johtaa epätarkkuuksiin ja vääriin tuloksiin erityisesti monimutkaisten näytteiden analysoinnissa. Lisäksi antureihin voi

kohdistua ristiherkkyyttä, jolloin ne reagoivat samanaikaisesti useisiin eri yhdisteisiin. Se voi aiheuttaa epäselvyyttä tiettyjen hajujen tunnistuksessa. (Mahanti ja muut 2024)

Näytteiden valmistus ja näytteenotto ylipäättään ovat erittäin virheherkkiä vaiheita, sillä ympäristötekijät, kuten lämpötila, kosteus ja paine voivat helposti vaikuttaa mittauksen tarkkuuteen ja luotettavuuteen. Lisäksi jotkin anturityypit, kuten MOS-anturi tarvitsee kuumennuksen tasapainotilansa saavuttamiseksi ennen mittausta. Tämä on sekä aikaa, että energiaa kuluttava vaihe ja rajoittaa laitteiston käytännöllisyyttä tietyissä sovelluksissa. (Tan ja Xu 2020)

Taulukossa 2 on esitelty tarkemmin tiettyihin anturityyppeihin kohdistuvista rajoituksista ja soveltuvuuksista. Siitä huomataan, että esimerkiksi erityisesti MOS-antureilla on taipumusta ristiherkkyteen ja optisten antureiden ongelmana on matalien pitoisuuksien näytteiden rajoitettu herkkyys.

Taulukko 2. Elektronisessa nenässä käytettyjen anturien vertailu niiden soveltuvuuden ja rajoitusten perusteella

Muokattu taulukosta Mahanti ja muut (2024).

Anturityyppi	Soveltuvuus	Rajoitukset
Metalli-oksidi puolijohdin (MOS)	Laaja valikoima havaittavia yhdisteitä	Ristiherkkyys, vaatii optimaaliset olosuhteet
Johtava polymeeri (CP)	Herkkyys tietyille hajuille	Rajallinen selektiivisyys, huolet vakaudesta
Optinen anturi	Nopea, näytteitä tuhoamaton analyysi	Rajallinen herkkyys matalille pitoisuuksille, herkkyys ympäristötekijöille

Jotta elektronisten nenien mittaukset pysyisivät tarkkoina, niitä pitää kalibroida säännöllisin väliajoin. Ilman kalibrointia suorituskyky voi heikentyä muun muassa ympäristöolosuhteiden muutosten tai vanhenemisen seurauksena. Erilaiset huoltotoimenpiteet ja kalibroinnit aiheuttavat lisäkustannuksia käyttäjälle. (Mahanti ja muut 2024). Siitä huolimatta kyseistä

analyysilaitteistoa voidaan pitää kustannustehokkaana valintana elintarviketutkimuksessa ja -kehityksessä.

Anwar ja Anwar (2025) totesivat tutkimuksessaan, että signaalien käsittelyyn käytettyjen koneoppimismallien tuloksia on arvioitava kriittisesti. Riippuen siitä, jaetaanko data-aineistoa satunnaisesti vai ei-satunnaisesti opetus- ja testidataksi, tulokset voivat vääristyä. Tutkimuksessa esimerkiksi huomattiin, että satunnaisesti jaetulla datalla saatiin 100 % tarkkuus, kun taas ei-satunnaisella jaolla tarkkuudeksi saatiin vain 69 %.

5 Johtopäätökset

Tutkielmassa käsiteltiin elektronisen nenän toimintaperiaatetta ja sen sovelluskohteita elintarviketutkimuksessa. Aihetta on tutkittu jo kymmenien vuosien ajan, ja tutkimus on ottanut valtavia kehitysaskelia vuosien saatossa. Tutkimukset osoittavat, että analyysilaitteistolla on laajoja sovellusmahdollisuuksia elintarviketutkimuksen saralla, mutta sen käyttöä voidaan laajentaa myös alan ulkopuolelle.

Elektronisten nenien suurin haaste liittyy tällä hetkellä anturiteknologioihin, mutta niiden jatkuva kehitys mahdollistaa yhä nopeampia ja luotettavampia tutkimustuloksia elintarviketutkimuksessa. Anturiteknologian kehitykseen liittyy vahvasti ympäristöolosuhteiden vaikutusten pienentäminen sekä näytteenkäsittelyn minimoiminen. Lisäksi laitteistoissa tullaan tulevaisuudessa yhä enemmän hyödyntämään nanokokoluokan antureita, jolloin antureiden määrä lisääntyy. Tällä hetkellä elektronisissa nenissä käytetään maksimissaan muutamia kymmeniä antureita, mutta koon pienentyessä voidaan lähestyä ihmisen nenän hajureseptorien määrää, joka on satoja hajureseptoreita. Tämä lisää herkkyyttä ja selektiivisyyttä entisestään sekä laajentaa käyttökohteiden määrää.

Lisäksi koneoppimisen työkalut ja tekoälyn kehitys auttavat kouluttamaan analyysilaitteistoa. Niiden avulla voidaan päästä myös eroon nykyisestä rajoitteesta, jossa tarvitaan perinteisempiä analyysimenetelmiä elektronisen nenän rinnalle selvittämään, mitä tietyt hajuprofiilin muutokset tarkoittavat. Näiden muutosten ansiosta elektronisen nenän sovellusmahdollisuudet voivat laajentua entisestään ja niiden suosio voi kasvaa monilla aloilla.

Tällä hetkellä elektronisella nenällä tehtyjen mittausten vertailu kirjallisuudessa on hankalaa. Se johtuu siitä, että anturiryhmien valinta, näytteiden valmistus, näytteidenottotavat sekä signaalien analyysitavat vaihtelevat tutkimuksissa, joka tekee tuloksista vertailukelvottomia. Tutkimusta helpottaakseen olisi tulevaisuudessa hyvä kehittää jokin käyttäjille yhteinen kirjasto, johon voi ladata standardisoidulla laitteistolla kerättyä dataa. Tämä mahdollistaisi muiden käyttäjien datan hyödyntämisen omien mallien kehitykseen.

Lähteet

- Al-Hooti, H. S., Al-Bulushi, I. M., Al-Attabi, Z. H., Rahman, M. S., Al-Subhi, L. K. & Al-Habsi, N. A. (2024) Efficiency of Electronic Nose in Detecting the Microbial Spoilage of Fresh Sardines (*Sardinella longiceps*). *Foods* **13**:428.
- Anwar, H. & Anwar, T. (2025) Quality assessment of chicken using machine learning and electronic nose. *Sens Bio-Sens Res* **47**:100739.
- Astuti, S. D., Wicaksono, I. R., Soelistiono, S., Permatasari, P. A. D., Yaqubi, A. K., Susilo, Y., ... Syahrom, A. (2024) Electronic nose coupled with artificial neural network for classifying of coffee roasting profile. *Sens Bio-Sens Res* **43**:100632.
- Cheng, L., Meng, Q.-H., Lilienthal, A. J. & Qi, P.-F. (2021) Development of compact electronic noses: A review. *Meas Sci Technol* **32**:062002.
- Dong, R., Yang, M., Zuo, Y., Liang, L., Xing, H., Duan, X. & Chen, S. (2025) Conducting Polymers-Based Gas Sensors: Principles, Materials, and Applications. *Sensors* **25**:2724.
- Goel, N., Kunal, K., Kushwaha, A. & Kumar, M. (2023) Metal oxide semiconductors for gas sensing. *Eng Rep* **5**:e12604.
- Hidayat, S. N., Triyana, K., Fauzan, I., Julian, T., Lelono, D., Yusuf, Y., ... Peres, A. M. (2019) The Electronic Nose Coupled with Chemometric Tools for Discriminating the Quality of Black Tea Samples In Situ. *Chemosensors* **7**:29.
- Li, Y., Yang, K., He, Z., Liu, Z., Lu, J., Zhao, D., ... Qian, M. C. (2023) Can Electronic Nose Replace Human Nose?—An Investigation of E-Nose Sensor Responses to Volatile Compounds in Alcoholic Beverages. *ACS Omega* **8**:16356–16363.
- Lu, L., Hu, Z., Hu, X., Li, D. & Tian, S. (2022) Electronic tongue and electronic nose for food quality and safety. *Food Res Int* **162**:112214.

- Mahanti, N. K., Shivashankar, S., Chhetri, K. B., Kumar, A., Rao, B. B., Aravind, J. & Swami, D. V. (2024) Enhancing food authentication through E-nose and E-tongue technologies: Current trends and future directions. *Trends Food Sci Technol* **150**:104574.
- Peris, M. & Escuder-Gilabert, L. (2009) A 21st century technique for food control: Electronic noses. *Anal Chim Acta* **638**:1–15.
- Röck, F., Barsan, N. & Weimar, U. (2008) Electronic Nose: Current Status and Future Trends. *Chem Rev* **108**:705–725.
- Sánchez Ramiro, Alejo Maria, Escribano Patricia, Arroyo Patricia, Melendez Felix, & Lozano Jesus (2024) Evaluation of the Shelf Life of Fresh Fish Using an Electronic Nose. *Chem Eng Trans* **112**:115–120.
- Tan, J. & Xu, J. (2020) Applications of electronic nose (e-nose) and electronic tongue (e-tongue) in food quality-related properties determination: A review. *Artif Intell Agric* **4**:104–115.
- Wijaya, D. R., Afianti, F., Arifianto, A., Rahmawati, D. & Kodogiannis, V. S. (2022) Ensemble machine learning approach for electronic nose signal processing. *Sens Bio-Sens Res* **36**:100495.
- Xing, Z., Zogona, D., Wu, T., Pan, S. & Xu, X. (2023) Applications, challenges and prospects of bionic nose in rapid perception of volatile organic compounds of food. *Food Chem* **415**:135650.