

Märkä- ja kuivaekstruusion hyödyntäminen vaihtoehtoisten proteiinien tuotannossa – kirjallisuuskatsaus

3.12.2024

Merja Saari, Seinäjoen ammattikorkeakoulu

Suositeltu viittaus: Saari, M. (2024). Märkä- ja kuivaekstruusion hyödyntäminen vaihtoehtoisten proteiinien tuotannossa – kirjallisuuskatsaus. *SeAMK Journal, 1*, artikkeli 4. https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2024112997652**Tiivistelmä:**

Katsauksen tavoitteena on tutkia ekstruusioprosessoinnin eroavaisuuksia ja laatuvaihteluita. Ekstruusiomenetelmä (kuiva-, märkä- tai PowerHeat) määrittyy sen mukaan, millaista lopputuotetta tavoitellaan, sekä minkälaiset jatkojalosteen käyttösovellukset ovat. Tarkoituksena on luoda viitekehys elintarvikealan kehitystyöhön osallistuville asiantuntijoille menetelmien hyödynnettävyydestä. Ekstruusiotekniikka on vanhaa teknologiaa, joka on uudistunut uusiin käyttösovelluksiin ja luonut oman markkinasegmentin liha-alan rinnalle liha-analogien muodossa. Aihe on ajankohtainen, sillä vaihtoehtoiset proteiinimarkkinat kasvavat jatkuvasti, väestön määrä kasvaa maapallolla ja ilmastonmuutos pakottaa etsimään kestävämpiä keinoja tuottaa proteiineja. Tarvitaan hiilineutraalimpia elintarvikkeen jalostus- ja kasvatustapoja eläinproteiinituotannon rinnalle. Aihepiiriä tarkastellaan tässä katsauksessa läpileikkaavasti olemassa olevan tutkimustiedon ja -datan pohjalta. Aineistona on käytetty tieteellisiä tutkimusartikkeleita, katsauksia sekä opinnäyte- ja valmistumistöitä. Aineisto rajattiin ja valittiin tutkimustiedon uutuusarvon, ajankohtaisuuden sekä aiheen osuvuuden perusteella. Lisäksi haluttiin tarkastella aihetta etenkin

prosessiparametrien eli teknisen tiedon valossa, jolloin lähteiksi valikoitui tutkimusdataa, missä kerrottiin hyvin tarkasti millä prosessiparametreillä tutkimus on toteutettu. Katsauksen pohjalta voidaan todeta kaksiruuviekstruusioprosessin olevan kertainvestointina kalliimpi kuin yksiruuviekstruuderi, mutta teknologisesti vakaampi ja säilyttäen proteiinin toiminnalliset ominaisuudet paremmin. Yksiruuviekstruuderilla voidaan ajaa läpi laajempi kategoria erilaisia raaka-aineita, mutta toiminnallisuus on heikompi.

Avainsanat: ekstruusioteknologia, ekstrudantti, kuivaekstruusio, liha-analogi, märkäekstruusio

Abstract:

Utilization of single and double screw extrusion in the production of alternative proteins – literature review

The aim of the review is to examine the differences and quality variations in extrusion processing. The extrusion method (dry, wet or PowerHeat) is determined by the type of product desired and the downstream applications. The aim is to provide a reference framework for experts involved in food development work on the usefulness of technology. Extrusion technology is old technology that has been renewed for new applications and has created its own market segment alongside the meat sector in the form of meat analogues. The topic is topical as alternative protein markets continue to grow, the global population is increasing, and climate change is forcing the search for more sustainable and carbon neutral food processing and cultivation methods to replace animal proteins. This review takes a cross-cutting look at this topic based on existing research knowledge and data. Scientific research articles, reviews, theses and dissertations have been used. The material was limited and selected based on the novelty, topicality and relevance of the research. In addition, the topic was to be examined, especially in the light of process parameters, i.e. technical data, and research data were selected as sources, where it was explained very precisely what process parameters were used in the research. Based on this review, it can be concluded that the twin-screw extrusion process is more expensive as a one-off investment than the single screw extruder but is technologically more stable and better preserves the functional properties of the protein. The single screw extruder can run through a wider category of different raw materials, but with lower functionality.

Key words: extrusion technology, extrudant, dry extrusion, meat analog, wet extrusion

1. Vaihtoehtoiset proteiinit ja ekstruusioteknogia

Ruokavaliomuutokset, kuluttajien vastuullisuuskäyttäytyminen, sekä maapallon kantokyky ovat vauhdittaneet vaihtoehtoisten proteiinien kehitystä, testaamista, sekä markkinoille saattamista (Ismail ym., 2020). Liha-alan rinnalle on noussut uusi markkinasegmentti, missä osa tai kokonaan lihansyönnistä pyritään korvaamaan vaihtoehtoisten proteiinien avulla. Proteiinilähteitä etsitään esimerkiksi viljoista, soijasta, pavuista, pähkinöistä, sekä erilaisista hernelajikkeista. 1990-luvulta lähtien teksturoidun proteiinikonsentraatin pääraaka-aineena on käytetty soijaa (Samard & Ryu, 2019). Monet kauppojen hyllyiltä nykyisin löytyvät liha-analogien (eli rakenteeltaan säiemäinen, lihan koostumusta jäljittelevä kasvispohjainen proteiinin lähde) ja teksturoidut kasviproteiinivalmisteiden (valmiste, joka sisältää kasviperäisiä proteiinilähteitä) raaka-aineet ovat peräisin

muualta maailmasta kuin Euroopasta. Etsiessä uusia vaihtoehtoja lihaproteiinille tulee kiinnittää huomioita ravintoarvoihin. Lähtökohtaisesti raaka-aine, missä on yli 30 % vähärasvaista proteiinia, joka soveltuu ominaisuuksiensa pohjalta ekstruusiokäsittelyyn voidaan pitää potentiaalisena vaihtoehtona liha-analogin raaka-aineeksi (Kyriakopoulou ym., 2019).

Tulevaisuudessa ekstruusioteknologioiden tutkimus kohdentuu etenkin terveellisten proteiinivaihtoehtojen (välipalat, analogit) tutkimukseen, sekä tuotekehitykseen (Huang ym., 2024). Muilta teollisuuden aloilta etenkin lääketeollisuus on osoittanut mielenkiintoa teknologian soveltamiseen erilaisten lääkkeiden valmistuksessa ja kehityksessä (Li ym., 2024).

Proteiini-isolaatin ja konsentraatin käsittelyyn voidaan käyttää yksi- tai kaksiruuviteknologiaa riippuen siitä minkä tyyppistä lopputuotetta tavoitellaan kuiva- ja märkäekstruusio prosesseissa. Hyvän vedensidontakyvyn omaavien proteiinien kanssa, mistä on tarkoitus jatkojalostaa liha-analogeja vaatii tietyn kosteuspitoisuuden (esim. 60–65 %), jotta lopputuotteeseen saadaan lihan kaltainen rakenne riittävissä prosessiolosuhteissa (Webb ym., 2023). Kaksiruuviekstruuderi (kuva 1) on alkuinvestointina kalliimpi, mutta säilyttää proteiinin toiminnalliset ominaisuudet paremmin lopputuotteen kannalta. Tutkimukset ovat verranneet ekstruusioprosessien tuotantokustannuksien eroavaisuutta, ja johtopäätöksenä ovat havainneet kaksiruuviekstruuderin olevan pitkällä aikajänteellä katsottuna edullisempi prosessimenetelmä. Kaksiruuviekstruuderi on prosessina vakaampi ja toimivampi pidemmällä aikavälillä verrattuna yksiruuviekstruuderiin. Vaikka kertainvestointikustannukset ovat suuremmat kuin yksiruuviekstruuderilla, ero tasaantuu pidemmän aikavälin tarkastelujaksolla (Plattner, 2020).



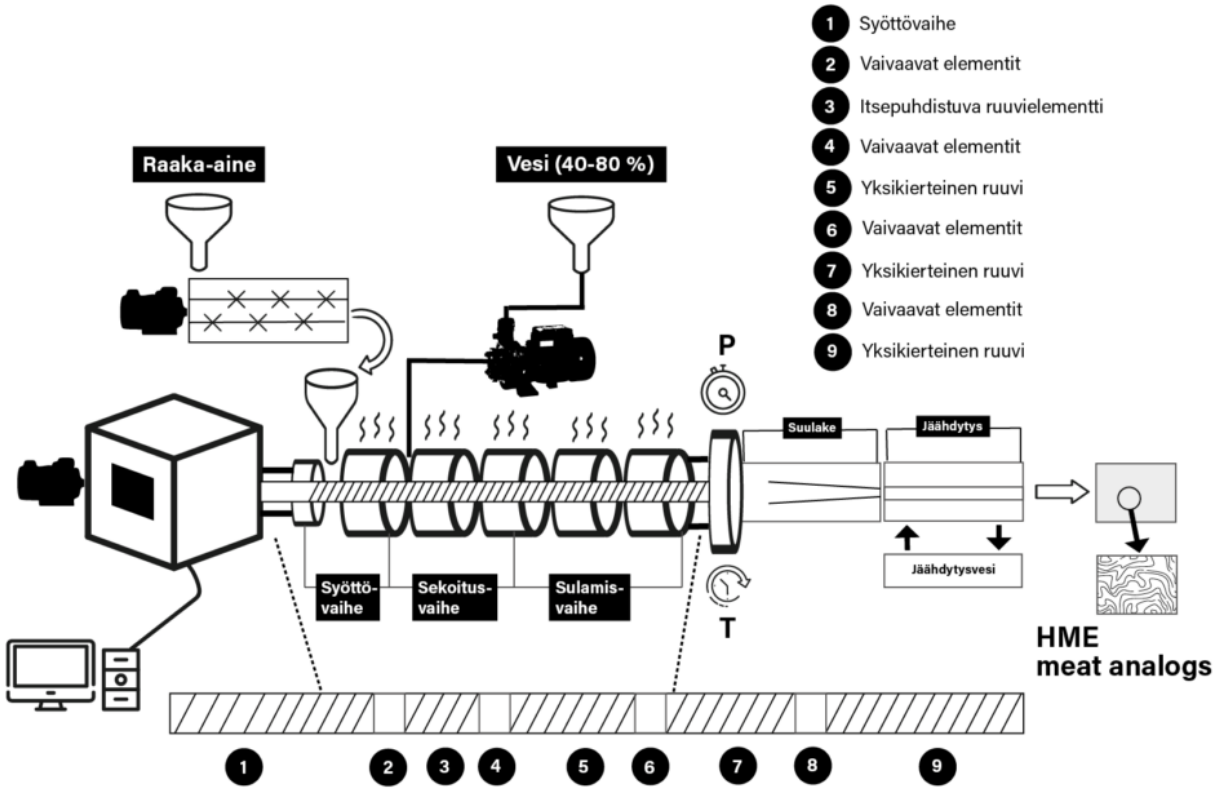
Kuva 1. Kaksiruuviekstruuderi, pilot-mittakaava SeAMK (Saari, 2024).

Yksiruuviekstruuderia käytetään laajemmin, koska sillä voidaan ajaa laajemmalla skaalalla raaka-aineita esimerkiksi liukenematonta ravintokuitua, tärkkelystä tms. (Delgado-Nieblas ym., 2015). Prosessointi

yksiruuviekstruuderilla jakautuu kolmeen prosessivaiheeseen; kuljetus, paisuminen ja teksturointi (Allen ym., 2007). Syöttövaiheessa jauhemainen raaka-ainemateriaali sekoittuu tasaisesti nesteen kanssa ja kulkeutuu sylinteriä pitkin heikon leikkausvoiman alaisena eteenpäin. Nesteen lisäämisellä pystytään säätämään märkäekstruusion kosteuspitoisuutta. Yleisimmin käytössä oleva neste on vesi, mutta raaka-aineeseen voidaan sekoittaa esimerkiksi öljyä halutussa suhteessa. Vesi toimii prosessissa pehmittimenä, sekä edesauttaa ylläpitämään proteiinipitoisen raaka-aineen stabiilina suulakepuristuksen aikana (Chen ym., 2010). Nesteen merkitys prosessin onnistumisen kannalta on erittäin tärkeä. Tutkimuksissa on huomattu, että oikean kosteustason ylläpitäminen on tärkeämpää prosessin kannalta kuin optimaaliset prosessointilämpötilat (Chen ym., 2010). Se edesauttaa nopeaa lämmönsiirtoa, lyhentää viipymisaikaa sekä auttaa vähentämään massan viskositeettia (Zhang ym., 2019).

2. Märkäekstruusioprosessi osana proteiinien jatkojalostusta

HME:ssä (Hot Melt Ekstrusion eli märkäekstruusiossa) syötön lämpötila on noin 80 ºC (Zhang ym., 2023). Ekstruuderin ydinosassa oleva puristus/ sulamisvyöhykeosassa lämpötila nousee käsiteltävän raaka-aineen mukaan keskimäärin 130 ºC asteeseen. Puristusosassa oleva ruuvi aiheuttaa raaka-ainemateriaaliseokseen suuremman leikkausvoiman, missä proteiineihin kohdistuu rakennetta muokkaavia leikkaus- ja puristusvoimia (kuvio 1). Proteiineja niin sanotusti hierretään ruuvin ja lämpötilan avulla (Zhang ym., 2019). Materiaali sekoittuu tasaiseksi massaksi sulamis-/muotoilu alueella, missä lämpötilan on noin 130–180 ºC (Thiébaud ym., 1996). Lämpötilan ja paineen vaikutuksen alaisena proteiinien rakenne muokkautuu lihan säiemäistä rakennetta jäljitteleväksi. Sulamis-/muotoiluvaihe kestää keskimäärin 150 s, parametrit vaihtelevat kuitenkin raaka-aineen proteiinirakenteen, sekä ominaisuuksien suhteen (Zhang ym., 2019).



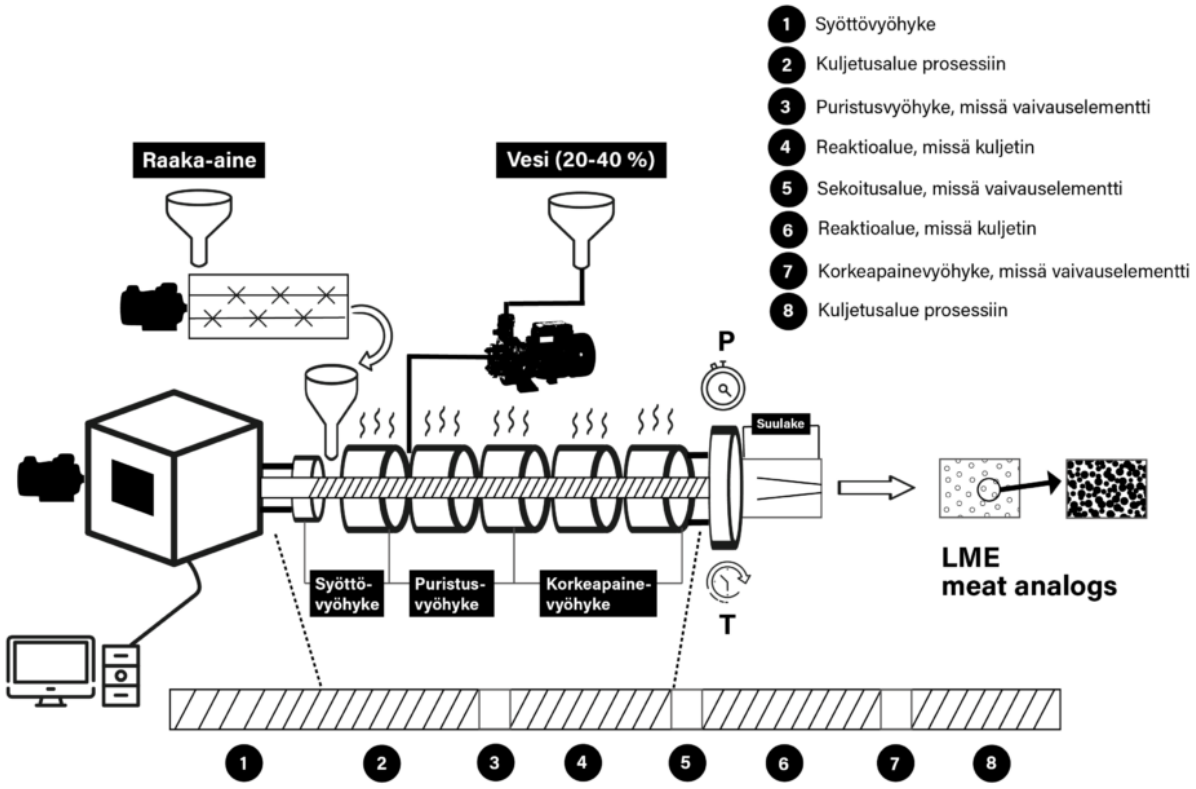
Kuvio 1. HME eli korkean kosteuden ekstruusio eli märkäekstruusion prosessikuvaus (Karjalainen, 2024; soveltaen Zhang ym., 2023).

Ekstruuderin suulakkeen halkaisijan suuruus vaikuttaa prosessinopeuteen. Pieni ja lyhyt suulake vähentää viipymäaikaa, sekä huonontaa teksturoinnin onnistumisastetta (Ryu, 2020). Jäähdytysvyöhykkeen lämpötila tulee olla alle 75 ºC, jolloin proteiinien uudelleen järjestäytyminen ja silloittuminen onnistuu parhaiten liha-analogin rakenteen kannalta (Zhang ym., 2019). Viskositeetin muutoksien ennaltaehkäisy on erityisen tärkeää onnistuneen lopputuotteen puolesta etenkin ekstruusioprosessin loppuvaiheessa (jäähdytys). Viskositeetin lasku aiheuttaa rakenteeseen venymistä ja nousu liiallista tiivistymistä. Suulake viimeistelee prosessista tulevan ekstrudantin ulkonäön halutun kaltaiseksi (esim. muru, suikale) (Zhang ym., 2023).

3. Kuivaekstruusion avulla proteiinimassan rakenteeseen lisää ilmavuutta

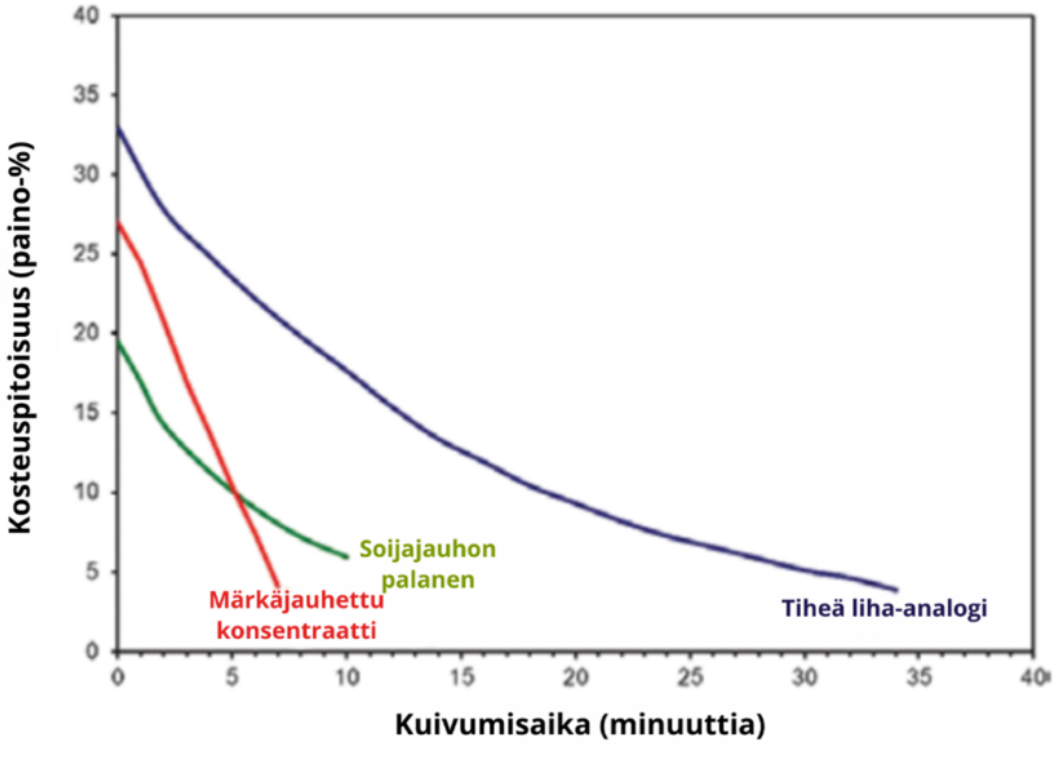
LME (Low Moisture Ekstrusion eli kuivaekstruusio) tekniikalla pystytään tuottamaan hyvin erityyppisiä massa-/aineseoksia. Kuivaekstruusiota hyödynnetään etenkin välipalatuotteiden, murojen tai vaikka ilmavien snack-tuotteiden valmistuksessa. Nimensä mukainen kuivaekstruusio perustuu massan alhaiseen kosteuspitoisuuteen, mikä edesauttaa pidentämään elintarvikkeen säilyvyyttä vähentämällä lipidien hapettumista, sekä parantamalla mikrobiologista laatua (Pansawat ym., 2008). Kuivaekstruusiota käytetään pääasiassa korkean tärkkelyspitoisuuden raaka-ainemassoihin kuten pastojen tai karkkien (esim. lakritsi) valmistukseen. Prosessi perustuu hellävaraiseen sekoittamiseen ja massan muotoiluun ilman varsinaista

ekstruusiokeittoa eli lämpötilan nostoa yhdessä korkean kosteuspitoisuuden kanssa (Choton ym., 2020). Prosessiin kuuluu syöttöastia, jonka kautta prosessiin ohjautuu raaka-ainetta. Syöttölaite ohjaa materian esikäsittelylaitteeseen, mistä raaka-aine jatkaa suulakepuristusosioon (kuvio 2).



Kuvio 2. Kuivaekstruusioprosessi (Karjalainen, 2024; soveltaen Zhang ym., 2023).

Kuivaekstruusiota pystytään hyödyntämään myös proteiinin käsittelyssä, kun lopputuotteelle halutaan ilmava ja kuivempi koostumus. Proteiinikäsittelyssä prosessin keskimääräinen kosteuspitoisuus pidetään 20–35 %. Varastoinnin kestävän kosteustason saavuttamiseksi ekstrudaatti kuivataan (kuvio 3), jotta kosteustaso pysyy stabiliina pitäen teksturoidun proteiinin laadukkaana.



Kuvio 3. Esimerkin omaisten ekstrudanttien kuivumisaikoja suhteessa kosteuspitoisuuteen (soveltaen Plattner, 2020).

Ekstrudaatteja voidaan kuivata kuljetinkuivaimissa missä ekstrudaatit ovat levittyneet tasaisesti ja kulkevat kuivausvyöhykkeiden läpi (Plattner, 2020). Matalan kosteustason ekstrudaatit, missä on käytetty korkean proteiinipitoisuuden omaavia raaka-aineita, ovat aistinvaraisesti tiheämpiä koostumukseltaan sekä kovempia rakenteeltaan (Allen ym., 2007). Lähtökohtaisesti kuivaekstruusion ekstrudaatit ovat matalampia proteiinitasonsa suhteen kuin märkäekstruusion liha-analogit. Kuiva-ekstruusio vaatii enemmän muita ainesosia kuten kuituja ja tärkkelystä koostumukseensa, jotta prosessi onnistuisi parhaiten. Proteiinitason nostaminen kuivaekstruusion raaka-ainejauhossa nostaa lopputuotteen murtumisherkkyyttä, sekä heikentää bulkkitiheyttä (Beck, 2018).

4. PowerHeater-ekstruusio vaihtoehtoisena proteiinivalmisteen jalostamismenetelmänä

Täysin märkäprosessointiin perustuva PowerHeat-ekstruusio perustuu epäsuoran lämpöenergian siirtymiseen emulsiopohjaiseen raaka-ainemateriaaliin. Emulsioon johtunut lämpöenergia koaguloi proteiinirakenteita saaden ne teksturoitumaan lihan kaltaisiksi lopputuotteiksi. Prosessin lopputuote on korkean veden sidontakyvyn omaava tuote (60–75 % kosteuspitoisuus), joten säilymisen takaamiseksi tulee huolehtia kylmäketjun säilymisestä (Plattner, 2020). Laitteisto itsessään on erilainen verrattaessa yksi- tai kaksiruuviekstruudereihin, eikä sovellu kuiva- tai märkäekstruusio prosesseihin sovellettavaksi. Prosessissa emulsio pumpataan PowerHeat suulakkeen läpi, jonka aikana proteiinien koaguloituminen ja rakenteen

koveneminen tapahtuvat. Prosessin loppuvaiheessa proteiinit laminoituvat kiinteäksi kuiturakenteeksi (Plattner, 2020).

5. Proteiinin teknofunktionaaliset ominaisuudet

Teknofunktionaaliset ominaisuudet määräytyvät sen mukaan onko mitattava proteiini formulaatio, konsentraatti vai isolaatti. Teknologisiksi ominaisuuksiksi luokitellaan sulavuuspisteet, vedensidontakyky, emulgoitumisaste, sekä lämpöstabiilisuus (Boukid, 2021). Teknofunktionaalisia ominaisuuksia tarkasteltaessa mietitään proteiinin ominaisuuksien vaikutusta lopputuotteen fysikaalisiin ja aistinvaraisiin ominaisuuksiin (koostumus, rakenne tms.). Teknilliset ominaisuudet vaikuttavat proteiinin kykyyn muokkautua prosessin aikana kuten miten proteiini geeliytyy tai kestää lämpötila muutoksen.

Kasvisproteiinien teknofunktionaaliset ominaisuudet ovat heikompia kuin eläinperäisten proteiinien. Erilainen rakenne hankaloittaa eläinproteiinien matkimista (lihaskudoksen rakenne) kasvisproteiinien pallomaisen muodon vuoksi. Lisäksi liukoisuus on eläinperäisiin proteiineihin verrattaen huono isoelektrisen pisteen takia. Erotusprosessin kemiallisessa hydrolyysissä pH-muuttuu heikentäen proteiinien liukoisuutta, sillä niiden liukoisuuteen vaikuttaa sähköstaattinen repulsio (Ismail ym., 2020).

Ekstruusioprosessin on todettu heikentävän etenkin proteiinien heikoimpia ominaisuuksia (geeliytyminen,vaahtoutuvuus, vedensidontakyky tms.) ja sidoksia (kuten vetysidokset, peptidisidokset) (Osen ym., 2015). Tutkimusten mukaan korkea kosteuspitoisuus vahvistaa proteiinien disulfidisidoksia, sekä vedyn välistä vuorovaikutusta (vetysidokset), samalla vähentäen proteiinien aggregaatioastetta eri ekstruusiovaiheiden aikana (Chen ym., 2011). Ekstruuderin tuottaman liha-analogin proteiiniverkoston muodostumisastetta voidaan määrittää Warner-Bratzler Shear Force (WBSF) menetelmällä. Tällä pystytään arvioimaan proteiinikorvikkeen rakenteen mureutta mittaamalla voimaa, jota liha-analogin leikkaaminen veitsellä vaatii. Rakenneprofiilianalyysi (TPA) määrittelee proteiinin kovuuden, koheesion ja joustavuuden mittaamalla puristusvoimaa, jota voidaan kohdistaa valmiiseen ekstrudaattiin (Dekkers, Boom, ym., 2018).

Mekaanista anisotropiaa voidaan mitata liha-analogista mittaamalla yhdensuuntaisesti ja kohtisuorassa kuituihin nähden esimerkiksi vetokokeella. Näytettä revitään erilleen tietyssä suunnassa, jotta voidaan arvioida näytteen ominaisuuksia (Chen ym., 2010). Materiaalitiheyden mittaamiseen ja erojen havainnointiin voidaan käyttää XRT:tä tai röntgentomografiaa. Liha-analogien tutkimisessa XRT:tä (röntgensäteet ja tietokoneavusteinen analyysi tuottavat poikkileikkausinformaatiota mitattavasta materiasta), voidaan hyödyntää proteiinirakenteen sisään jääneen ilman määrittelyyn (Dekkers, Emin, ym., 2018). Ilmataskuja muodostuu etenkin ekstruusioprosessissa. Vesi haihtuu proteiinikuidun sisältä muodostaen samalla ilmataskuja. Tämä vaikuttaa etenkin liha-analogin kuituominaisuuksiin (Dekkers, Emin, ym., 2018).

Spektroskopiaa pystytään hyödyntämään etenkin ekstrudantin pinnan tutkimiseen. Erilaisia menetelmiä ovat infrapuna, Raman, fluoresenssipolarisaatio, NMR (Nuclear magnetic resonance) eli ydinmagneettinen resonanssi, jolla voidaan mitata esimerkiksi liha-analogissa olevan nesteen ja proteiinisidoksien vuorovaikutteisuutta, sekä valonsironta, etenkin tiettyjen yhdisteiden karakterisoinnissa. FTIR (Fourier

Transform eli infrapunasäteily) tekniikkaa pystytään hyödyntämään rakenteellisten muutosten vaihtelevuutta havainnollistettaessa (Perisic ym., 2011). NMR menetelmää voidaan soveltaa muuttuvien olosuhteiden vaikutuksiin proteiinirakenteissa (säilytys ja käsittely). Tuloksista voidaan mitata proteiinirakenteen vedensidontakykyä (Marcone ym., 2013).

6. Yhteenveto

Tutkimus ekstruusioprosessin sovelluskohteista, laatuvaikutuksista, sekä uusien raaka-aineiden testauksessa on osaltaan vasta alussa. Vaikka ekstruusioteknologia itsessään on vanha teknologiamuoto 1960-luvulta, sen monet käyttökohteet ja sovellusmahdollisuudet ovat luoneet markkinoille uuden markkinasegmentin viimeisten vuosikymmenten aikana. Vertailtaessa menetelmiä keskenään (taulukko 1) huomataan molempien omaavan omat hyvät ja huonot puolensa. Investointia harkitsevan yrityksen kannattaa testata ja pilotoida prosessia ennen investointipäätöksen tekemistä. Tarkasteltaessa ekstruusioteknologioita olemassa olevan tiedon pohjalta huomataan, että itse teknologiaa on tutkittu suhteellisen paljon. Tulevaisuudessa olisi hyödyllisempää keskittää tutkimusta enemmän itse teknologiasta mahdollisiin sovelluskohteisiin, sekä poikkitieteellisesti myös muiden alojen sovelluskohteisiin. Tällainen tutkimus voisi luoda uusia innovaatioita, sekä mahdollistaa teknologian soveltuvuutta vieläkin laajemmin teollisuuden käyttökohteisiin.

Taulukko 1. Menetelmävertailu märkä- ja kuivaekstruusiotekniikoiden välillä (Plattner, 2020; Beck, 2018; Zhang ym., 2019; Zhang ym., 2023).

Ekstruusiomenetelmän valinta	*Hyvät puolet*	*Huonot puolet*	*Soveltuvuus*	*Proteiinin ominaisuudet*	*Lopputuotteen proteiinipitoisuus*
LME (Kuivaekstruusio)	Hyvä varastosäilyvyys, laaja-alaiset sovelluskohteet. Suuriin joustavuus erilaisten tekstuurien luomisessa.	Huonosti optimoituna, proteiinin ominaisuudet kärsivät.	Matalan kosteustason proteiinijalosteet (rouheet, murot, patukat).	Prosessin luomien olosuhteiden ansiosta proteiinit säikeistyvät ja puffautuvat (ilmautuvat) prosessista ulostullessaan. Lopullisen tekstuurin tuotteeseen aiheuttaa leikkausvoimat, lämpötilat, sekä retentioajan yhdistelmä.	10–80 %
HME (Märkäekstruusio)	Lihatuotteen kaltainen säiemmäinen proteiinirakenne.	Heikompi säilyvyys. Lipidit voivat hapettua aiheuttaen virhemakuja. Vitamiinit ja fytokemikaalit saattavat hajota ja menettää ravitsemukselliset ominaisuutensa.	Liha-analogit, säimäinen proteiinirakenne	Proteiinien denaturoituminen, ristisilloittuminen, disaggregoituminen, aggregoituminen, sekä rakenteen muutokset prosessin aikana.	<85 %
PowerHeat	Lihatuotteen kaltainen lopputulos.	Heikompi säilyvyys. Lipidit voivat hapettua aiheuttaen virhemakuja. Vitamiinit ja fytokemikaalit saattavat hajota ja menettää ravitsemukselliset ominaisuutensa.	Liha-analogit kuten proteiinipitoiset makkarat, pihvit, pyörykät tms.	Proteiinirakenteiden koaguloituminen emulssioon johtuneen lämpöenergian toimesta. Proteiinirakenne laminoituu kiinteäksi rakenteeksi.	10 ≤ 70 %

Seinäjoen ammattikorkeakoululla kehitetään jatkuvasti pilotointi- ja testausmahdollisuuksia laboratorioiden kehittämisen kautta. SeAMKin Food Labs-laboratorioympäristössä pyritään mahdollisimman kattavasti tuomaan uusia kokeilumahdollisuuksia alueen toimijoille. Kokeilukynnyksen madaltaminen ja uusien innovaatioiden kehittäminen luo parhaimmassa tapauksessa Etelä-Pohjanmaan alueelle lisää elinvoimaa ja työpaikkoja. Keväällä 2024 viimeisimpänä saapunut kaksiruuviekstruusioteknologia antaa mahdollisuudet monenlaiseen testaamiseen ja koekäyttöön. Prosessilla pystytään testaamaan niin märkä- kuin kuivaekstruusiota ruuviprofiileja ja suulakemallia vaihtamalla.

Lähteet

Allen, K. E., Carpenter, C. E., & Walsh, M. K. (2007). Influence of protein level and starch type on an extrusion-expanded whey product. *International journal of food science & technology*, *42*(8), 953–960.https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01316.x

Beck, S. M. (2018). Towards pea protein and pea fibre fortified low moisture extrusion of starch for the

manufacture of expanded extrudates [Thesis, UNSW Sydney]. https://doi.org/10.26190/unsworks/3422

Boukid, F. (2021). Plant-based meat analogues: From niche to mainstream. *European food research and technology, 247*(2), 297–308. https://doi.org/10.1007/s00217-020-03630-9

Chen, F. L., Wei, Y. M., Zhang, B., & Ojokoh, A. O. (2010). System parameters and product properties response of soybean protein extruded at wide moisture range. *Journal of food engineering, 96*(2), 208–213. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.07.014

Chen, F. L., Wei, Y. M., & Zhang, B. (2011). Chemical cross-linking and molecular aggregation of soybean protein during extrusion cooking at low and high moisture content. *LWT – Food science and technology, 44*(4), 957–962. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.12.008

Choton, S., Gupta, N., Bandral, J., Anjum, N., & Choudary, A. (2020). Extrusion technology and its application in food processing: A review. *The pharma innovation, 9*, 162–168. https://doi.org/10.22271/tpi.2020.v9.i2d.4367

Dekkers, B. L., Boom, R. M., & van der Goot, A. J. (2018). Structuring processes for meat analogues. *Trends in food science & technology, 81*, 25–36. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.08.011

Dekkers, B. L., Emin, M. A., Boom, R. M., & van der Goot, A. J. (2018). The phase properties of soy protein and wheat gluten in a blend for fibrous structure formation. *Food hydrocolloids, 79*, 273–281. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.12.033

Delgado-Nieblas, C. I., Zazueta-Morales, J. J., Gallegos-Infante, J. A., Aguilar-Palazuelos, E., Camacho-Hernández, I. L., Ordorica-Falomir, C. A., Pires de Melo, M., & Carrillo-López, A. (2015). Elaboration of functional snack foods using raw materials rich in carotenoids and dietary fiber: Effects of extrusion processing. *CyTA – Journal of food, 13*(1), 69–79. https://doi.org/10.1080/19476337.2014.915892

Huang, Y., Liu, L., Sun, B., Zhu, Y., Lv, M., Li, Y., & Zhu, X. (2024). A comprehensive review on harnessing soy proteins in the manufacture of healthy foods through extrusion. *Foods, 13*(14), artikkeli 14. https://doi.org/10.3390/foods13142215

Ismail, I., Hwang, Y.-H., & Joo, S.-T. (2020). Meat analog as future food: A review. *Journal of animal science and technology, 62*(2), 111–120. https://doi.org/10.5187/jast.2020.62.2.111

Karjalainen, S. (2024). *HME eli korkean kosteuden ekstruusio eli märkäekstruusion prosessikuvaus* [kuvio].

Karjalainen, S. (2024). *Kuivaekstruusioprosessi* [kuvio].

Kyriakopoulou, K., Dekkers, B., & van der Goot, A. J. (2019). Chapter 6—Plant-Based Meat Analogues. Teoksessa C. M. Galanakis (toim.), *Sustainable meat production and processing* (s. 103–126). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814874-7.00006-7

Li, X., Hong, X., Shuai, S., Han, X., Li, C., Zhang, H., Wang, Z., Ren, M., Jin, L., & Zheng, A. (2024). A review of hot melt extrusion technology: Advantages, applications, key factors and future prospects. *Journal of drug delivery science and technology, 98*, artikkeli 105884. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2024.105884

Marcone, M. F., Wang, S., Albabish, W., Nie, S., Somnarain, D., & Hill, A. (2013). Diverse food-based applications of nuclear magnetic resonance (NMR) technology. *Food research international, 51*(2), 729–747. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.12.046

Osen, R., Toelstede, S., Eisner, P., & Schweiggert-Weisz, U. (2015). Effect of high moisture extrusion cooking on protein-protein interactions of pea (Pisum sativum L.) protein isolates. *International journal of food science & technology, 50*(6), 1390–1396. https://doi.org/10.1111/ijfs.12783

Pansawat, N., Jangchud, K., Jangchud, A., Wuttijumnong, P., Saalia, F. K., Eitenmiller, R. R., & Phillips, R. D. (2008). Effects of extrusion conditions on secondary extrusion variables and physical properties of fish, rice-based snacks. *LWT – Food science and technology, 41*(4), 632–641. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.05.010

Perisic, N., Afseth, N. K., Ofstad, R., & Kohler, A. (2011). Monitoring protein structural changes and hydration in bovine meat tissue due to salt substitutes by fourier transform infrared (FTIR) microspectroscopy. *Journal of agricultural and food chemistry, 59*(18), 10052–10061. https://doi.org/10.1021/jf201578b

Plattner, B. (2020). Extrusion techniques for meat analogues. *Cereal foods world, 65*(4). https://doi.org/10.1094/CFW-65-4-0043

Ryu, G.-H. (2020). Chapter 7—Extrusion cooking of high-moisture meat analogues. Teoksessa G. M. Ganjyal (toim.), *Extrusion cooking* (s. 205–224). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815360-4.00007-9

Samard, S., & Ryu, G.-H. (2019). Physicochemical and functional characteristics of plant protein-based meat analogs. *Journal of food processing and preservation, 43*(10), e14123. https://doi.org/10.1111/jfpp.14123

Thiébaud, M., Dumay, E., & Cheftel, J. C. (1996). Influence of Process Variables on the Characteristics of a High Moisture Fish Soy Protein Mix Texturized by Extrusion Cooking. *Food Science & Technology, 29*(5), 526–535. https://doi.org/10.1006/fstl.1996.0080

Webb, D., Dogan, H., Li, Y., & Alavi, S. (2023). Physico-chemical properties and texturization of pea, wheat and soy proteins using extrusion and their application in plant-based meat. *Foods, 12*(8), artikkeli 8. https://doi.org/10.3390/foods12081586

Zhang, J., Liu, L., Liu, H., Yoon, A., Rizvi, S. S. H., & Wang, Q. (2019). Changes in conformation and quality of vegetable protein during texturization process by extrusion. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 59*(20), 3267–3280. https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1487383

Zhang, Z., Zhang, L., He, S., Li, X., Jin, R., Liu, Q., Chen, S., & Sun, H. (2023). High-moisture extrusion technology application in the processing of textured plant protein meat analogues: A review. *Food reviews international, 39*(8), 4873–4908. https://doi.org/10.1080/87559129.2021.2024223