



Elintarviketurvallisuuden varmistaminen ja
analytiikan kehittäminen (ELTUVA) -hankkeen loppuraportti

Säilyvyyden, turvallisuuden ja laadun kehittämistä Pohjois-Savon elintarvikekehityksen vahvistamiseksi

Kaisa Raninen, Jaana Kapustamäki, Jesse Ojala, Jouko Vepsäläinen,
Sirpa Peräniemi, Ehsan Shad, Heidi Hälikkä, Kati Riekkinen ja Jenni Korhonen



**Euroopan unionin
osarahoittama**



Pohjois-Savon liitto



SAVGGROW
KEHITYSYHTIÖ



UNIVERSITY OF
EASTERN FINLAND

TIIVISTELMÄ

Pohjois-Savon elintarvikesektori rakentuu vahvalle alkutuotannolle, monipuolisille luonnonvaroille ja alueelliselle osaamiselle. Maakunnassa korostuvat erityisesti maidon, lihan, marjojen, kuten mansikan, sipulin ja järvikalan tuotanto. Keskeinen osa alueen elintarvikesektorin kehitystä on Ruokalaakso-verkosto, joka kokoaa yhteen Pohjois-Savon ruoka-alan tutkimus-, kehitys- ja koulutusorganisaatiot. Verkosto tukee yrityksiä elintarvikkeiden tuotekehityksessä ja laadun varmistamisessa, ja toimii alustana uusien innovaatioiden synnyttämiseksi.

Suomalaiset elintarvikkeet menestyvät maailmalla korkealla laadulla ja keskeinen odotusarvo on elintarvikkeiden turvallisuus. On tärkeää voida luottaa, että elintarvike on sitä, mitä luvataan, jotta se on turvallinen nauttia. Elintarvikepetokset ovat yleistyneet maailmanlaajuisesti. Muun muassa hunaja on yksi väärennetyimmistä elintarvikkeista. Väärennösten tunnistamiseksi tarvitaan analytiikan kehittämistä ja tietoa erilaisten raaka-aineiden koostumuksesta.

Elintarvikkeiden säilyvyyden pidentäminen on tärkeää kestäväälle ruokatuotannolle, huoltovarmuudelle, viennin mahdollistamiselle ja ruokahävikin vähentämiseksi. Hyllykää voidaan pidentää säilyvyyttä edistävillä prosessoinneilla kuten lämpökuivaamisella tai kuumennuskäsittelyillä. Myös suolaaminen ja sokerointi ovat perinteisiä säilyvyyden edistäjiä. Kylmäkuivaus ja korkeapaineprosessointi (HPP) tarjoavat vaihtoehtoisia menetelmiä säilyvyyden pidentämiseen mahdollistaen lämpöherkkien ravintoaineiden paremman säilymisen tuotteissa, sekä suolan ja sokerin vähentämisen. Uusien menetelmien käyttöönotto vaatii kuitenkin tuotekohtaista testausta, sekä sopivien esikäsittelymenetelmien, reseptiikan ja pakkausten hyödyntämistä.

Elintarviketurvallisuuden varmistaminen ja analytiikan kehittäminen -hankkeessa (ELTUVA 2023-2025, EAKR-rahoitus, Pohjois-Savon liitto) edistettiin alueen elintarviketoimijoiden osaamista elintarvikkeiden turvallisuudesta liittyen elintarvikkeiden säilyvyyteen ja väärennösten tunnistamiseen. Työpaketissa 1 perehdyttiin elintarvikeväärennöksiin ja niiden tunnistamiseen valiten selvityskohteiksi suomalainen mahla ja hunaja. Työpaketissa 2 tarkasteltiin korkeapaineprosessoinnin soveltuvuutta erilaisille raaka-aineille, tuotteille ja pakkauksille. Työpaketissa 3 keskityttiin kylmäkuivausprosessiin ja sen reunaehtoihin ja testattiin erityyppisten raaka-aineiden ja tuotteiden kylmäkuivausta. Työpaketissa 4 kehitettiin laboratorioanalytiikkaa elintarvikkeiden säilyvyyden ja laadun mittaamiseksi. Työpaketissa 5 viestittiin hankkeen opeista alueen elintarviketoimijoille ja vahvistettiin toimijoiden välistä yhteistyötä järjestämällä yhteisiä tilaisuuksia, tarjoamalla yhteistyövinkkejä ja nostamalla esiin yritysten tarpeita.

Hankkeen toimenpiteiden suunnittelussa ja toteutuksessa oli mukana parikymmentä elintarvikealalla toimivaa yritystä. Kehitysyhtiö SavoGrow:lla kehitettiin elintarvikkeiden tuotekehitys- ja prosessointiosaamista tukemaan alueen elintarvikeyrityksiä. Itä-Suomen yliopistolla kehitettiin analytiikkavalmiuksia elintarvikkeiden säilyvyyden, laadun ja alkuperän testaamiseksi.

Avainsanat: elintarvike, elintarvikeanalytiikka, jäljitettävyys, korkeapainekäsittely, kylmäkuivaus, ruoka, säilyvyytestaus

ESIPUHE

Pohjois-Savossa elintarvikealan yritykset ovat usein pieniä, ja monilla niistä on pääelinkeino alkutuotanto kuten viljely, kalastus tai karjankasvatus. Toimijoilla on usein tuoreita ja lupaavia ideoita uudenlaisista elintarviketuotteista, mutta harvoin riittävästi resursseja panostaa tuotekehitykseen ja laadunvarmistukseen. Myös tieto sopivimmista prosessointimenetelmistä, pakkauksista, ja sopimusvalmistajista on hajanaista ja vaikeasti saavutettavissa. Tämä hidastaa tuotekehitystä ja rajoittaa monen potentiaalisen tuotteen etene- mistä kohti markkinoita meillä ja maailmalla.

Elintarvikkeiden säilyvyyden pidentäminen on keskeinen tekijä Pohjois-Savon maakunta- strategian sekä kansallisen ruokastrategian näkökulmasta. Pidentynyt säilyvyysaika mah- dollistaa satotuotteiden tarjonnan myös satokausien ulkopuolella, vähentää tuotantohä- vikkiä ja kustannuksia sekä avaa mahdollisuuksia viennille. Yhteiskunnallisesti säilyvyyden parantaminen tukee kestävästä ruokatuotantoa, vahvistaa huoltovarmuutta ja elintarvike- turvallisuutta sekä kasvattaa suomalaisen elintarviketuotannon laatumielikuvaa kansain- välisillä markkinoilla.

Elintarvikkeen pitkä säilyvyysaika edellyttää, että sen laatu pysyy erinomaisena kaikissa valmistuksen vaiheissa. Tämä vaatii tuotekohtaisesti optimoituja käsittelyjä, jotka voivat sisältää sekä säilyvyyttä lisääviä prosessointimenetelmiä että reseptiikan hienosäätöä. Uudentyyppisten prosessointien käyttöönotto edellyttää kuitenkin aina tuotekohtaista testausta ja usein myös reseptin ja pakkausratkaisujen tarkentamista. Koska testaaminen täysin alusta asti vaatisi yrityksiltä huomattavan paljon aikaa ja resursseja, on kaikki tieto prosessointien reunaehdoista arvokasta ja nopeuttaa merkittävästi kehitystyötä.

Kehitysyhtiö SavoGrow:lla on vahvaa elintarvikekehityksen osaamista sekä asianmukaiset puitteet monenlaisten tuotepilotointien toteuttamiseen. Itä-Suomen yliopistolla on puo- lestaan asiantuntijuutta ruoan turvallisuudesta ja terveellisyydestä, sekä analytiikkaosaa- mista elintarvikkeiden laadun varmistamiseksi. ELTUVA-hankkeessa nämä resurssit suun- nattiin alueen elintarvikeyritysten tueksi, jotta niiden osaaminen vahvistuisi ja elintarvike- kehitys alueella vauhdittuisi. Oppimiamme asioita olemme pyrkineet kiteyttämään tähän loppuraporttiin.

Kiitämme hankeyrityksiä, että lähditte rohkeasti mukaan opettelemaan kanssamme ana- lytiikan ja prosessointien lainalaisuuksia ja mahdollisuuksia!

Terveisin ELTUVA-hanketiimi, Kaisa, Jaana, Jesse, Ehsan, Jouko, Sirpa, Heidi, Kati ja Jenni

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
ESIPUHE	4
Sisällysluettelo.....	5
1 ELTUVA-hanke tiivistetysti.....	6
2 Hunajan ja mahlan jäljitettävyys	7
2.1 Hunajan yleisimmät väärennystavat	7
2.2 Mahlan yleisimmät väärennystavat.....	8
2.3 Käytetyt tutkimusmenetelmät.....	9
2.3.1 NMR-spektroskopia	9
2.3.2 Röntgenfluoresenssi (XRF)	10
2.4 Hunajan ja mahlan mittaustulokset	11
3 Korkeapainekäsittely (HPP).....	20
3.1 HPP:hen soveltuvat pakkaukset.....	22
3.1.1 Tulokset pakkaustesteistä.....	23
3.2 HPP:n vaikutukset tuotteiden aistittaviin ominaisuuksiin	29
3.3 HPP:n vaikutukset mikrobiologiseen laatuun ja säilyvyyteen	41
4 Kylmäkuivaus	43
4.1 Esikäsittelyt ja pakastus	44
4.2 Kuivausvaiheet: sublimaatio + jälkikuivaus.....	52
4.3 Jälkikäsittelyt.....	56
4.4 Pakkaaminen ja laadunvarmistus	56
4.5 Markkinakartoitus kylmäkuivureista	62
4.6 Kylmäkuivaustoimijat Suomessa	63
4.7 Suomen teolliset pakastus- ja pakkaslogistiikkatoimijat	64
4.8 Elintarvikealan tuotekehitystoimijat	66
4.9 Teollinen kylmäkuivaustesti FrostDry:lla.....	67
5 Analytiikan kehittäminen säilyvyyden testaamiseksi	76
6 Tuotekehityksen tuen kehittäminen.....	78
ELTUVA-Hankkeeseen liittyvät julkaisut	79
LÄHTEET	81
Liitteet	82

1 ELTUVA-hanke tiivistetysti

Hankkeen nimi:	Elintarviketurvallisuuden varmistaminen ja analytiikan kehittäminen -ELTUVA (eng. Ensuring food safety and developing analytical methods)
Toteutusaika:	1.1.2023-31.12.2025
Hankkeen tyyppi:	Ryhmähanke, jossa mukana alueen yrityksiä
Toteuttajat:	Itä-Suomen yliopisto, Kansanterveystieteen ja kliinisen ravitsemustieteen yksikkö ja Farmasian laitos, Kuopio ja Kehitysyhtiö SavoGrow, Suonenjoki
Kokonaisbudjetti:	831 883 €, EU-rahoitus: 623 557 €
Päärahoitus:	Pohjois-Savon liitto Euroopan aluekehitysrahasto (EAKR) EU:n alue- ja rakennepolitiikan ohjelma Uudistuva ja osaava Suomi 2021–2027 Toimintalinja 1: Innovatiivinen Suomi Erityistavoite 1.1: Tutkimus- ja innovointivalmiuksien ja kehittyneiden teknologioiden käyttöönoton parantaminen

ELTUVA-hankkeen tavoitteena oli vahvistaa alueen elintarviketoimijoiden osaamista erityisesti elintarvikkeiden säilyvyyteen ja väärennösten tunnistamiseen liittyvissä kysymyksissä. Hankkeen suunnittelussa ja toteutuksessa oli mukana kaiken kaikkiaan 24 elintarvikealaaan liittyvää yritystä.

Hankkeen työpaketit:

- Työpaketti 1: Elintarvikeväärennösten tunnistaminen, esimerkkeinä kotimainen mahla ja hunaja.
- Työpaketti 2: Korkeapaineprosessoinnin soveltuvuus erilaisille raaka-aineille, tuotteille ja pakkauksille, ja sen vaikutukset säilyvyyteen.
- Työpaketti 3: Kylmäkuivausprosessointi, reunaehdot ja soveltuvuus erityyppisille raaka-aineille ja tuotteille.
- Työpaketti 4: Laboratorioanalytiikan kehittäminen elintarvikkeiden säilyvyyden ja laadun todentamiseksi.
- Työpaketti 5: Tiedon jakaminen ja alueen elintarviketoimijoiden yhteistyön vahvistaminen.

2 Hunajan ja mahlan jäljitettävyyys

Maailman eniten väärennetyt elintarvikkeet ovat usein korkean katteen tuotteita, kuten oliiviöljy, hunaja, kahvi, tee ja mausteet. Myös luomutuotteet, kalat, viinit ja lihatuotteet ovat yleisiä huijauskohteita. Väärennökset voivat olla myös terveysriski, ja niissä käytetään usein halvempia jatkeaineita tai vääriä alkuperämerkintöjä.

Hunaja on luonnontuote, joka koostuu pääosin hedelmäsokerista (fruktoosi, n. 38–41 %) ja rypälesokerista (glukoosi, n. 32–35 %) sekä vedestä (n. 17–20 %). Lisäksi se sisältää pieniä määriä (yhteensä n. 3–5 %) entsyymejä, vitamiineja (kuten C- ja B-vitamiineja), mineraaleja, aminohappoja ja antioksidantteja.

Koivunmahla on väritön ja raikas juoma, joka on koostumukseltaan 99 % vettä ja sisältää noin prosentin verran sokereita (glukoosi, fruktoosi), hedelmähappoja, mineraaleja (kalium, kalsium, magnesium, mangaani) ja hieman C-vitamiinia ja aminohappoja.

2.1 Hunajan yleisimmät väärennystavat

Hunaja on yksi maailman väärennetyimmistä elintarvikkeista. Väärentäminen tapahtuu useilla eri tavoilla, joiden tavoitteena on yleensä tuotantokustannusten laskeminen ja voittojen maksimointi. Hunajan tyypillisempiä väärennystapoja ovat:

- **Sokerisiirappien lisääminen:** Hunajaan sekoitetaan halvempia sokerisiirappeja, kuten maissi-, sokeriruoko-, riisi- tai juurikassiirappia. Nykyaikaiset siirapit on suunniteltu jäljittelemään hunajan sokerikoostumusta, jolloin niiden havaitseminen on vaikeaa ilman laboratoriotestejä.
- **Liiallinen mehiläisten ruokkiminen:** Mehiläisille syötetään sokerisiirappia sato-kauden aikana, jolloin ne varastoivat sen kennoihin hunajan sijasta.
- **Veden lisääminen ja keinotekoinen kuivaus:** Hunajaa kerätään keskeneräisenä, jolloin sen vesipitoisuus on liian korkea. Liika vesi poistetaan mekaanisesti kuivamalla, mikä poikkeaa luonnollisesta prosessista.
- **Alkuperäväärennökset:** Halpaa, usein väärennettyä hunajaa myydään kalliimpana lajihunajana (kuten Manuka-hunaja) tai sen alkuperämaa ilmoitetaan väärin.
- **Suodatus ja prosessointi:** Siitepöly saatetaan poistaa ultrafiltruimalla, jotta hunajan alkuperää ei voida jäljittää siitepölyanalyysillä.

Kuluttajan keinot välttää väärennettyä hunajaa ovat varsin rajalliset, mutta kotikonstein, lähinnä muuttamalla omia kulutustottumuksia, pystyy estämään törkeimmät väärennökset. Alla lueteltu muutama keino välttää väärennettyä hunajaa.

- **Suosi kotimaista:** Suomen Mehiläishoitajain Liitto (2026) valvoo kotimaisen hunajan laatua. Kotimainen hunaja voidaan jäljittää tuottajalle asti. Paikalliselta tarhaajalta voi yleensä ostaa hunajaa myös suoraan.
- **Tarkista pakkausmerkinnät:** Ole tarkkana "EU:n ja EU:n ulkopuolisen hunajan seos" -merkintöjen kanssa, sillä näissä erissä on havaittu eniten väärennösepäilyjä.
- **Kiteytyminen:** Useimmat aidot hunajalaadut kiteytyvät ajan myötä. Jos hunaja pysyy kuukausia täysin juoksevana ja kirkkaana, se voi olla merkki voimakkaasta prosessoinnista tai väärennöksestä.

Ruokavirasto (2026a) on koonnut yleisimpiä kysymyksiä ja vastauksia liittyen hunajan väärentämiseen verkkosivuillaan osoitteessa:

<https://www.ruokavirasto.fi/globalassets/teemat/sante-2023-00377-00-00-fi-tra-00.pdf>

2.2 Mahlan yleisimmät väärennystavat

Mahlan väärentämisellä tarkoitetaan yleensä koivunmahlan korvaamista tai jatkamista muilla nesteillä, kuten vedellä ja sokerilla, tai muiden kasvinesteiden myymistä mahlan nimellä. Koska aito mahla on arvokasta ja sen keruu-aika on lyhyt, väärennökset ovat mahdollisia erityisesti kaupallisessa toiminnassa.

Koostumus: Tuore mahla koostuu noin 98–99 % vedestä, mutta se sisältää pienen määrän (noin 1–1,5 %) sokereita (fruktoosia ja glukoosia), hedelmähappoja sekä tärkeitä mineraaleja kuten kaliumia, magnesiumia ja kalsiumia.

Maku: Aito mahla on vain hieman makeaa ja siinä on mieto, puumainen ominaismaku. Jos juoma maistuu voimakkaan sokeriselta tai siirappiselta ilman, että sitä on keittämällä tiivistetty, se on todennäköisesti jatkettua.

Säilyvyys: Mahla on erittäin herkästi pilaantuvaa, jolloin se toimii bakteerien ja hiivojen kasvualustana. Huoneenlämmössä aito mahla samentuu ja alkaa käydä jo vuorokaudessa. Jos "tuoreena" myytävä mahla säilyy kirkkaana viikkoja ilman kylmäsäilytystä tai pastörointia, se saattaa sisältää säilöntäaineita tai olla keinotekoista.

Volyymiltaan mahlan väärentäminen ei ole taloudellisesti yhtä kannattavaa kuin hunajan väärentäminen johtuen mm. pienemmästä kaupallisesta volyymistä. Tyypillisemmät väärennystavat ovat:

- **Vesitys:** Mahlaa jatketaan vedellä ja lisätään sokeria palauttamaan makeus.
- **Keinotekoinen valmistus:** Veteen sekoitetaan sokeria, aromiaineita ja happamuus säädetään mahlalle tyypilliseen arvoon pH 5,5–7,0 muistuttamaan mahlan makua.
- **Kasvilajien sekoittaminen:** Harvinaisempaa, mutta mahlan nimellä voidaan yrittää myydä muiden puiden nesteitä, joskin koivunmahla on tunnetuin ja halutuin.

Paras tapa välttää väärennetty mahla on juoksuttaa se itse maanomistajan luvalla tai ostaa mahla suoraan pientuottajalta. Mikäli mahla hankitaan muualta, kannattaa varmistaa pakkausmerkinnöistä, ettei siihen ole lisätty sokereita tai aromiaineita.

2.3 Käytetyt tutkimusmenetelmät

Työpaketin 1 tavoitteena oli kehittää menetelmiä erityisesti hunajan ja mahlan maantieteellisen alkuperän selvittämiseen sekä mahdollisten väärennösten, kuten laimentamisen tai lisätyn sokerin, tunnistamiseen. Tähän hyödynnettiin Itä-Suomen yliopiston Farmasian laitoksen analytiikkaosaamista. Näytteitä saatiin kotimaisilta hunajantuottajilta Suomen mehiläishoitajain liiton kautta, kotimaiselta mahlantuottajalta, sekä hankkimalla tutkijoiden toimesta ulkomailta (Kuva 1).



Kuva 1. Hunajanäytteitä (vasemmalla) ja mahlanäytteitä (oikealla) menossa testeihin.

2.3.1 NMR-spektroskopia

Ydinmagneettinen resonanssispektroskopia (NMR) on kemian ja materiaalitieteen keskeinen analyysimenetelmä molekyylien tunnistamiseen. NMR perustuu vahvassa

magneettikentässä olevien magneettisesti aktiivisten ydinten, kuten ^1H ja ^{13}C , resonanssiin, joka antaa tietoa atomien kemiallisesta ympäristöstä, rakenteesta, avaruudellisesta muodosta ja jopa dynamiikasta.

Hankkeen testeissä käytettiin 600 MHz (14.1 T) NMR-laitteistoa, joka on hankittu Pohjois-Savon liiton myöntämällä EU-rahoituksella noin 10 vuotta sitten. Tehdyt NMR-näytteet mitattiin 30 °C:een lämpötilassa, vaikka itse laitteiston mittapää oli jäädytettynä nestetyypen (-196 °C, 77 K) lämpötilaan, jolloin laitteen herkkyys parani nelinkertaiseksi.

NMR-spektroskopia on erinomainen menetelmä tutkia näytteitä, kuten hunaja ja mahla, joissa yksittäisten eri molekyylien pitoisuudet vaihtelevat jopa 100 000-kertaisesti ja näyte sisältää paljon erityyppisiä orgaanisia molekyyliä, kuten sokereita, happoja, aldehydejä, ketoneja, alkoholeja, aromaattisia yhdisteitä ja tietysti paljon vettä. NMR-spektroskopian rajoituksena on eri yhdisteiden signaalien päällekkäisyydet, jolloin yhdisteen tunnistaminen vaikeutuu ja toisaalta mitattavan yhdisteen pitoisuus pitää olla > 0.1 mg/l.

2.3.2 Röntgenfluoresenssi (XRF)

Röntgenfluoresenssianalyysi (XRF) on perinteinen alkuainepitoisuuksien mittaamisen tarkoitettu menetelmä. Atomeja viritetään röntgensäteilyllä tilaan, josta ne palautuvat emittoiden fluoresenssisäteilyä. Kukin alkuaine lähettää säteilyä tietyllä omalla energiatasolla, josta kukin alkuaine tunnistetaan. Mikäli näytteeseen on lisätty tunnettu määrä standardiainetta, kuten galliumia, voidaan kunkin alkuaineen pitoisuus laskea signaalien pintaalojen perusteella.

Hankkeen testeissä käytettiin TXRF-laitteistoa, joka on hankittu Pohjois-Savon liiton myöntämällä EU-rahoituksella noin 10 vuotta sitten. Laitteiston avulla voidaan tunnistaa ja mitata pitoisuus piitä raskaammille alkuaineille. Määritysraja riippuu määritettävästä alkuaineesta vaihdellen piin n. 10 mg/l -pitoisuudesta uraanin n. 0.003 mg/l-pitoisuuteen. Samanaikaisesti voidaan tyypillisesti määrittää n. 20–30 alkuainetta.

Näytteiden käsittely mittauksiin

Näytteen valmistus NMR-mittauksiin hunajanäytteistä tehtiin seuraavasti: 1) punnitaan n. 60 mg hunajaa koeputkeen, 2) liuotetaan se 600 μl D_2O , joka sisältää tunnetun määrän sisäistä standardia (trimetyylisilyyli-2,2,3,3-tetradeuteropropionihapon natriumsuolaa, TSP), 3) otetaan tätä liuosta 525 μl 5 mm NMR-putkeen ja 4) mitataan näyte käyttäen

automaatio-ohjelmaa, joka poistaa vedestä aiheutuneen signaalin. Mahlan tapauksessa näytteen käsittelyvaiheet olivat: 1) 5 mm NMR-putkeen pipetoidaan 425 μl mahlaa, 2) siihen lisätään 100 μl D_2O sisältäen tunnetun määrän TSP ja 3) mitataan näyte käyttäen automaatio-ohjelmaa, joka poistaa vedestä aiheutuneen signaalin. Tyypillisesti mittaus kestää n. 10 min/näyte.

Hunajanäytteiden valmistus TXRF-mittauksiin: 1) punnitaan n. 200 mg hunajaa koeputkeen, 2) liuotetaan hunaja 4.0 ml vettä, 3) lisätään tunnettu määrä gallium-standardia, 4) pipetoidaan 10 μl näytettä mittauslevylle (Kuva 2), 5) haihdutetaan neste pois ja 6) mitataan XRF-spektri, josta tunnistetaan alkuaineet ja lasketaan niiden pitoisuus ohjelman avulla. Tyypillisesti mittaus kestää n. 100 s/näyte. Mahlanäytteiden valmistusvaiheet olivat: 1) pipetoidaan 4,0 ml mahlaa koeputkeen, 2) lisätään tunnettu määrä gallium-standardia, 3) pipetoidaan 10 μl näytettä mittauslevylle, 4) haihdutetaan neste pois ja 5) mitataan XRF-spektri, tunnistetaan alkuaineet ja lasketaan niiden pitoisuudet.



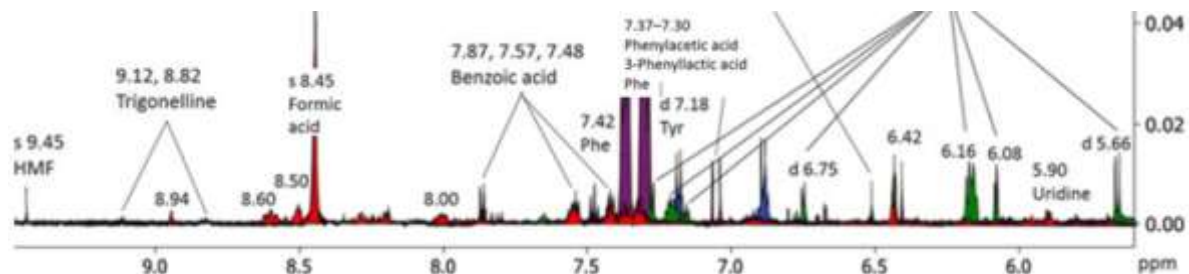
Kuva 2. Näytteen pipetointi mittauslevylle TXRF-mittauksessa. (Kuvan alkuperä: <https://www.bruker.com/en/landingpages/bna/how-does-TXRF-work.html>)

2.4 Hunajan ja mahlan mittaustulokset

Hunaja sisältää pääasiassa kolmea yhdistettä: glukoosia (n. 35 %), fruktoosia (n. 40 %) ja vettä (20 %) sekä koko joukon erilaisia orgaanisia yhdisteitä ja noin kahtakymmentä erilaista alkuainetta, joiden pitoisuus on >0.1 mg/kg. Mahla puolestaan sisältää pääasiassa vettä (99 %), glukoosia ja fruktoosia sekä hyvin pieniä määriä erilaisia alkuaineita ja orgaanisia yhdisteitä.

Alkuaineiden tunnistaminen ja pitoisuuksien määrittäminen TXRF-menetelmällä on varsin suoraviivaista. Sen sijaan yhdisteiden tunnistus (ns. assignointi) ja pitoisuuksien määrittäminen NMR-spektreistä voi olla haasteellista, johtuen eri yhdisteiden päällekkäisistä signaaleista.

Kirjallisuudessa on kuitenkin julkaistu selkeitä kuvauksia, eräänlaisia "kirjastoja", hunajan signaalien tunnistuksesta, joita voidaan hyödyntää tunnistuksessa. Kuvassa 3 on esimerkki tällaisesta julkaisusta, johon on tulkittu eräitä tärkeitä aromaattisen alueen yhdisteitä.



Kuva 3. Eräiden aromaattisen alueen signaalien identifiointia FT M. Kortesiemen julkaisusta (Kortesiemi ym. 2016).

Mitatuista TXRF-spektreistä alkuaineiden pitoisuudet saadaan mittausohjelman avulla yksikössä mg/kg. Kalsiumia kevyemmällä alkuaineilla (esim. fosfori) menetelmä voi aliarvioida pitoisuuden näytteissä, koska näytteen muut alkuaineet voivat vaieta (supressoida) niiden fluoresenssisäteilyä.

Orgaanisten yhdisteiden pitoisuudet saadaan mitatuista NMR-spektreistä standardia vastaan konsentraationa – tyypillisesti yksikössä millimoolia/litra (mmol/l, mM). Mikäli tulos halutaan muuttaa muotoon mg/kg, on pitoisuus kerrottava kyseisen yhdisteen molekyylipainolla. Käytännössä NMR:n avulla voidaan mitata myös tunnistamattomien molekyylien pitoisuuksia, jos tiedetään kyseisen NMR-signaalin protonien (vetyjen) määrä ja signaalin integraali verrattuna standardiin.

Hunajan TXRF-mittaustulokset

Edellä kuvatulla tavalla valmistetuista hunajanäytteistä mitattiin TXRF-menetelmällä n. 20 alkuaineen pitoisuudet. Taulukkoon 1 on koottu: 1) alkuaineet, joiden pitoisuus mitattiin, 2) niiden keskiarvo ja 3) minimi- ja maksimipitoisuudet. Fosforin, rikin, kloorin, kaliumin ja kalsiumin pitoisuudet olivat selkeästi suurempia kuin muiden määritettyjen alkuaineiden pitoisuudet.

Taulukko 1. Yhteenveto tyypillisimmistä hunajista löytyneistä alkuaineista.

	(mg/kg)																			
	P	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Br	Rb	Sr	Ba	Pb
Keskiarvo	43	12	136	850	56	0,2	0,2	0,2	2,1	0,7	0,0	0,0	0,0	0,5	0,1	0,5	4,7	2,6	0,8	0,1
min	22	0	27	250	26	0	0	0,1	0,2	0,1	0	0	0	0	0	0	1,6	2,0	0,3	0,0
max	71	33	476	2024	153	0,4	0,4	0,4	5,0	1,9	0,1	0,0	0,5	2,3	0,1	3,3	20,0	4,3	1,4	0,2

Tuloksista voitiin havaita varsinkin rikin, kloridin, kaliumin ja rubidiumin pitoisuuksien vaihtelevan merkittävästi, jopa 18-kertaisesti. Mitatuissa näytteissä raskasmetallien (Co, Ni, As ja Pb) pitoisuudet olivat kaikissa näytteissä hyvin pieniä. Yksittäisten alkuaineiden pitoisuuksista ei kuitenkaan voi tehdä kovin syvällisiä alueellisia johtopäätöksiä, ainoastaan rikin puuttuminen Lapin näytteistä oli selkeästi havaittavissa. Tästä syystä vertasimme kahden alkuainepitoisuuden suhteita (Taulukko 2.). Näiden arvojen perusteella koko mittausjoukosta erottuivat Lapin hunajien lisäksi Pohjois- ja Etelä-Karjalan hunajat.

Taulukko 2. Kotimaisten hunajien kahden alkuaineen suhteelliset pitoisuudet. Punaisella ja sinisellä merkityt arvot edustavat pitoisuuksien ääripäitä.

Maakunta	Ca/K	Rb/Sr	Mn/Fe	S/P	Cl/P	K/P	Ca/P	Sr/Ba	Br/Sr	Zn/Fe	Cr/Sr	Ca/Sr	K/Sr	Cl/Sr	P/Sr
Lappi	0,023	7,26	7,6	0,00	12,1	54	1,2	2,2	0,22	0,75	0,10	18,9	811	182	15
Kainuu	0,082	1,62	3,3	0,36	1,7	11	0,9	2,7	0,07	2,03	0,09	18,0	220	35	21
Pohjois-Pohjanmaa	0,077	1,30	1,5	0,33	2,2	15	1,1	3,8	0,41	0,28	0,10	20,1	261	39	18
Pohjanmaa	0,106	1,25	3,7	0,27	1,7	14	1,5	3,9	0,94	0,57	0,11	18,8	177	22	13
Keski-Pohjanmaa	0,046	2,65	10,4	0,13	7,0	42	1,9	2,5	0,10	0,39	0,10	23,4	513	86	12
Etelä-Pohjanmaa	0,083	1,98	1,1	0,39	3,2	18	1,5	5,2	0,20	0,45	0,08	29,4	353	63	20
Keski-Suomi	0,063	1,90	4,4	0,24	2,7	17	1,1	3,7	0,07	0,32	0,06	18,2	290	45	17
Pohjois-Savo	0,089	1,02	3,6	0,32	2,1	11	1,0	3,4	0,04	0,68	0,08	14,5	163	31	15
Pohjois-Karjala	0,110	0,80	3,9	0,14	1,4	8	0,9	2,8	0,06	0,47	0,11	12,0	109	19	14
Satakunta	0,083	1,31	7,8	0,20	1,9	12	1,0	2,9	0,48	1,07	0,11	17,5	210	33	18
Pirkanmaa	0,092	1,43	2,5	0,20	3,0	19	1,8	3,2	0,07	0,47	0,10	28,9	314	48	16
Päijät-Häme	0,087	1,47	5,3	0,29	2,1	13	1,1	4,1	0,04	0,71	0,08	18,6	215	34	16
Etelä-Savo	0,070	1,57	6,7	0,36	2,3	19	1,3	3,8	0,04	1,05	0,09	18,6	265	32	14
Saaristo	0,042	2,55	2,5	0,24	4,4	25	1,1	2,5	0,32	1,18	0,09	23,7	559	97	22
Varsinais-Suomi	0,073	2,65	3,0	0,45	3,3	26	1,9	3,0	0,53	0,91	0,08	28,1	385	49	15
Kanta-Häme	0,112	0,82	2,8	0,30	2,1	12	1,3	3,6	0,07	0,56	0,08	21,1	189	34	16
Uusimaa	0,075	1,39	2,0	0,31	3,1	20	1,5	2,8	0,17	0,49	0,08	28,3	376	56	18
Kymenlaakso	0,095	1,01	1,8	0,40	1,6	14	1,4	3,3	0,16	0,96	0,07	23,5	248	28	17
Etelä-Karjala	0,108	0,96	15,2	0,20	1,2	8	0,9	2,8	0,05	1,06	0,09	12,4	114	16	14

Vastaavalla tavalla vertasimme ulkomaisia hunajia suomalaisiin (Taulukko 3.). Punaisella merkityt arvot poikkeavat suomalaisten hunajien arvoista. Tarkastelemalla sekä

alkuaineille mitattuja pitoisuuksien että kahden alkuaineen välisiä suhteita, pystyttiin tutkitut ulkomaiset hunajat tunnistamaan suomalaisten hunajien joukosta. Toisaalta tutkittujen ulkomaisten hunajien lukumäärä oli pieni.

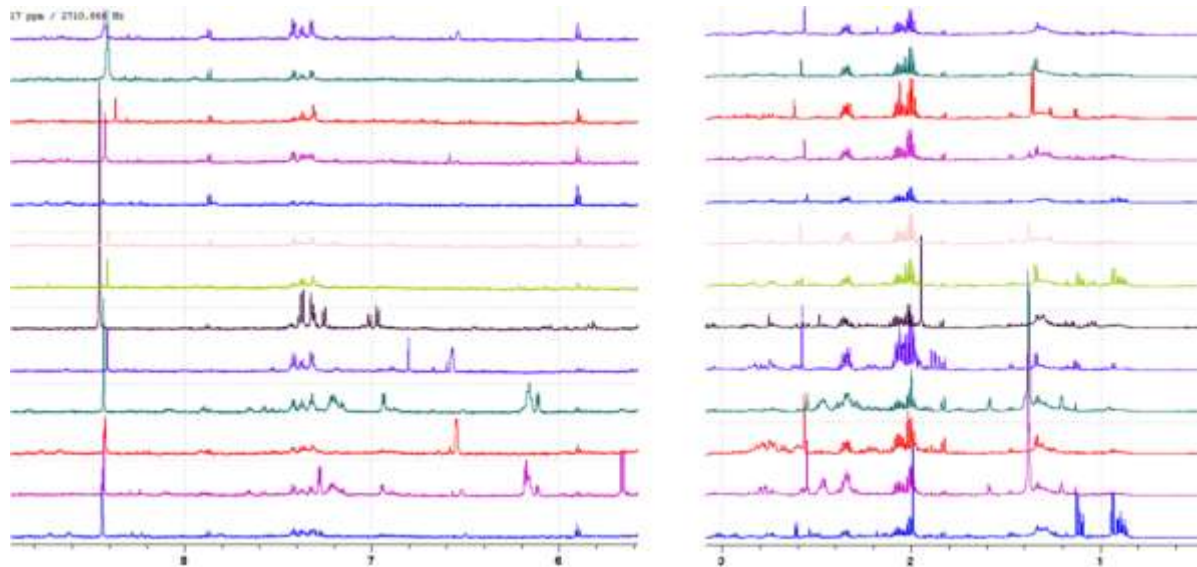
Taulukko 3. Ulkomaisten hunajien kahden alkuaineen suhteelliset pitoisuudet. Punaisella merkityt arvot poikkeavat suomalaisten hunajien pitoisuuksista.

Näyte	Ca/K	Rb/Sr	Mn/Fe	S/P	Cl/P	K/P	Ca/P	Sr/Ba	Br/Sr	Zn/Fe
Airborne Honeys										
Guardians	0,037	1,5	22,3	0,11	1,3	17	0,6	4,8	0,24	8,12
Australian Honey	0,127	0,7	3,7	0,65	6,4	20	2,6	2,3	0,34	0,54
Acacia Flower										
Honey	0,176	0,5	0,01	4,64	2,9	13	2,4	3,3	0,03	0,13
Latvia	0,058	1,0	0,8	0,31	2,7	26	1,5	5,2	0,07	0,62
Kreeta	0,073	0,6	0,1	0,74	3,5	19	1,4	3,5	0,12	0,55
Chile	0,028	0,9	1,5	0,00	2,3	54	1,5	3,2	0,04	0,25

Hunajan NMR-mittaustulokset

Hankkeen aikana mitattiin NMR-spektrit lähes sadasta eri tuottajalta tulleesta hunajasta. NMR-spektrien mittaaminen paljon vettä sisältävistä näytteistä aiheuttaa ylimääräisen haasteen, vaikka laskettuna yksiköissä mg/kg, hunajassa on suurin piirtein saman verran vettä, glukoosia ja fruktoosia. Haaste syntyy siitä, että NMR määrittää pitoisuuden aina konsentraationa, jolloin 100 mg vettä (18 g/mol) vastaa konsentraatiota 5.5 mM, mutta vastaava määrä glukoosia (180 g/mol) on vain 0,55 mM – eli kymmenen kertaa vähemmän. Tästä syystä veden signaali NMR-spektreistä kohdalta 4.8 ppm poistetaan mittaus-tekniisesti.

Emme luetteloineet ja määrittäneet pitoisuuksia yksittäisille hunajassa esiintyville molekyyleille, sillä jo NMR-spektrien visuaalinen tarkastelu antaa selkeän kuvan näytteiden erilaisuudesta, kuten Kuvasta 4. voidaan päätellä. Itse asiassa jokaiselta tuottajalta ja jopa samoilta tuottajilta eri vuosina tulleet näytteet poikkesivat merkittävästi toisistaan. Tällä perusteella, mikäli referenssispektrejä olisi saatavilla, voitaisiin spektristä mahdollisesti tunnistaa yksittäinen tuottaja ja jopa miltä vuodelta tuottajan näyte on kerätty.



Kuva 4. Tyypillisiä NMR-spektrejä mitatuista hunajaeristä.

Mahlan TXRF- mittaustulokset

Edellä kuvatulla tavalla valmistetuista hunajanäytteistä mitattiin TXRF-menetelmällä n. 20 alkuaineen pitoisuudet. Taulukkoon 4 on koottu mitattujen alkuaineiden pitoisuudet 18 kotimaisesta mahlanäytteestä. Eniten vaihtelua on mangaanin, raudan, sinkin ja rubidiumin pitoisuuksissa. Merkittävää oli mangaanin ja sinkin määrä verrattuna muihin alkuaineisiin. Mitatuissa näytteissä koboltin, arseenin ja lyijyn pitoisuudet olivat kaikissa näytteissä hyvin pieniä, mutta nikkeliä löytyi kaikista näytteistä pitoisuuden vaihdellessa välillä 6–79 µg/kg.

Taulukko 4. Kotimaisten mahlojen alkuainepitoisuudet.

Mahlanäytteet 18 kpl, saap. 22.5.23		TXRF																			
Nro	Näyte	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(µg/l)	(µg/l)	(µg/l)	(µg/l)	(µg/l)	(µg/l)	(µg/l)	(µg/l)	(µg/l)	(µg/l)	(µg/l)	(µg/l)	(µg/l)		
		P	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Br	Rb	Sr	Ba	Pb
1	982	6,1	2,0	1,4	83,6	56,0	9	<5	13	5902	164	<6	21	9	1185	<6	<5	288	244	367	<10
2	1061	6,3	1,3	2,0	83,8	46,9	6	<5	29	3760	187	<6	24	8	994	<6	<5	279	225	324	<10
3	1123	6,5	1,2	1,2	119,3	56,5	19	9	15	3097	93	<6	19	6	1060	<6	<5	369	292	409	<10
4	17111	10,2	2,8	1,3	124,2	56,2	12	<5	12	3422	104	<6	18	15	1464	<6	<5	548	334	351	<10
5	1974	9,0	2,9	4,4	106,3	54,4	7	<5	9	2972	81	<6	23	12	968	<6	7	437	457	354	<10
6	20114	5,6	0,8	2,0	73,3	40,9	<5	<5	10	2087	79	<6	7	14	679	<6	<5	294	351	253	<10
7	211145	6,1	0,7	2,0	71,6	46,4	<5	<5	6	4287	112	<6	11	10	809	<6	<5	290	400	294	<10
8	221245	8,2	1,4	1,9	98,6	71,5	7	<5	16	4301	130	<6	23	9	1443	<6	<5	418	635	502	<10
9	2312455	12,2	4,4	0,6	127,9	74,2	10	<5	16	8778	181	9	28	23	1791	<6	<5	1264	431	537	<10
10	21124P	3,5	0,7	0,6	72,4	41,4	9	<5	14	3174	41	<6	15	6	275	<6	<5	482	355	297	<10
11	5201T1	17,7	1,6	2,4	197,5	104,6	21	12	10	4930	106	<6	51	25	1194	<6	<5	715	653	800	<10
12	211134T12	14,3	2,7	0,1	149,1	94,0	18	13	18	7323	250	9	61	25	2671	<6	<5	1168	764	915	<10
13	ACS12304	6,1	2,4	0,6	102,4	66,3	19	8	17	6201	71	8	22	16	422	<6	<5	1008	374	436	<10
14	AC412307	12,0	4,2	0,5	123,6	64,7	12	9	17	7668	159	8	28	24	1609	<6	<5	1170	355	471	<10
15	AC012201	7,1	1,7	1,2	110,0	56,2	15	12	15	3573	44	<6	20	6	405	<6	<5	529	411	425	<10
16	AC612112	8,2	1,6	1,2	94,6	49,3	5	8	11	2687	45	<6	19	9	437	<6	<5	387	413	272	<10
17	AC611910	6,9	1,3	2,0	106,6	47,5	10	14	10	1472	20	<6	20	6	187	<6	<5	155	240	312	<10
18	T6122119	24,4	6,2	1,0	268,9	136,1	42	32	27	9206	238	9	79	18	3045	<6	<5	1592	927	1207	<10

Saimme mitattavaksi myös satunnaisia kotimaisia ja ulkomaisia mahlanäyteitä (taulukossa 5 näyttenumerot 1-9). Näitä verrattiin sattumalta valittuihin kotimaisiin näytteisiin (taulukossa 4, numerot 10-16). Tulosten perusteella vertaamalla kahden alkuaineen suhteita voitiin ulkomaiset mahlat erottaa kotimaisista näytteistä (Taulukko 5).

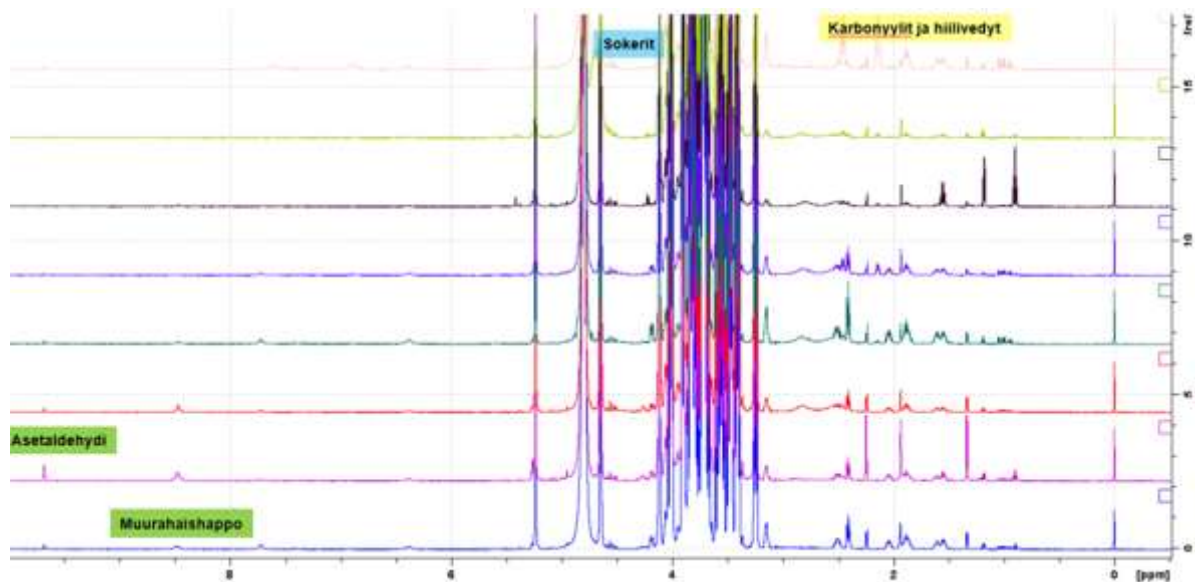
Taulukko 5. Ulkomaisten mahlojen (näytteet 3-8) ja kotimaisten mahlojen (1, 2, 9 ja 10-16) kahden alkuaineen suhteelliset pitoisuudet.

Nro	Rb/Sr	K/Ca	Mn/Fe	Mn/Zn
1	2,0	2,1	65,2	9,4
2	2,0	1,9	73,3	15,3
3	1,6	3,4	38,1	8,8
4	0,4	0,5	30,1	4,2
5	0,7	1,6	54,0	7,0
6	0,6	1,2	5,3	7,7
7	3,1	1,7	20,6	4,8
8	0,6	1,1	6,0	3,9
9	1,4	2,1	59,6	2,2
10	1,7	1,8	58,1	11,5
11	2,7	1,5	88,8	15,4
12	2,4	2,3	52,1	5,4
13	3,3	1,8	82,2	10,5
14	2,4	1,9	67,3	9,2
15	0,6	2,2	72,5	10,5
16	2,4	2,1	63,2	9,3

Mahlan NMR- mittaustulokset

NMR-mittausten kannalta vesi oli vieläkin isompi haaste mahlan kohdalla, koska näyte sisälsi vettä 99 % ja mahlan osuus näytteessä oli 85 %. Käytännössä, jos mittaus suoritetaan ilman vesisignaalin poistoa (supressiota), on vesisignaalin koko n. 10 km, kun muut signaalit ovat n. 10 cm korkuisia. Kuten Kuvasta 5 näkee, osa vesisignaalista on vielä jäljellä kohdalla 4.8 ppm, mutta sen koko ei enää estä spektrin muiden yhdisteiden analysointia. Lisäksi mittaukset piti suorittaa välittömästi näytteen teon jälkeen, ettei mahdollisesti alkava käyminen pilaa mittaustuloksia.

Kaikki kotimaisten mahlojen tuotantoeristä mitatut spektrit olivat erilaisia, samoin satunnaisesti valittujen ulkomaisten näytteiden. Lisäksi spektreistä pystyi arvioimaan, onko bakteerikäyminen näytteessä jo alkanut, vaikka aistinvaraisesti sitä ei vielä välttämättä havaittu. Eräs ulkomailta ostettu mahlajuoma osoittautui mittauksissamme etanolia sisältäväksi. Tällä perusteella, mikäli vertailuspektrejä olisi saatavilla, voidaan mahlaerän alkuperä tunnistaa jopa tuotantovuoden tarkkuudella.



Kuva 5. Tyypillisiä NMR-spektrejä mitatuista mahlaeristä.

Yhteenveto hunaja- ja mahlatesteistä

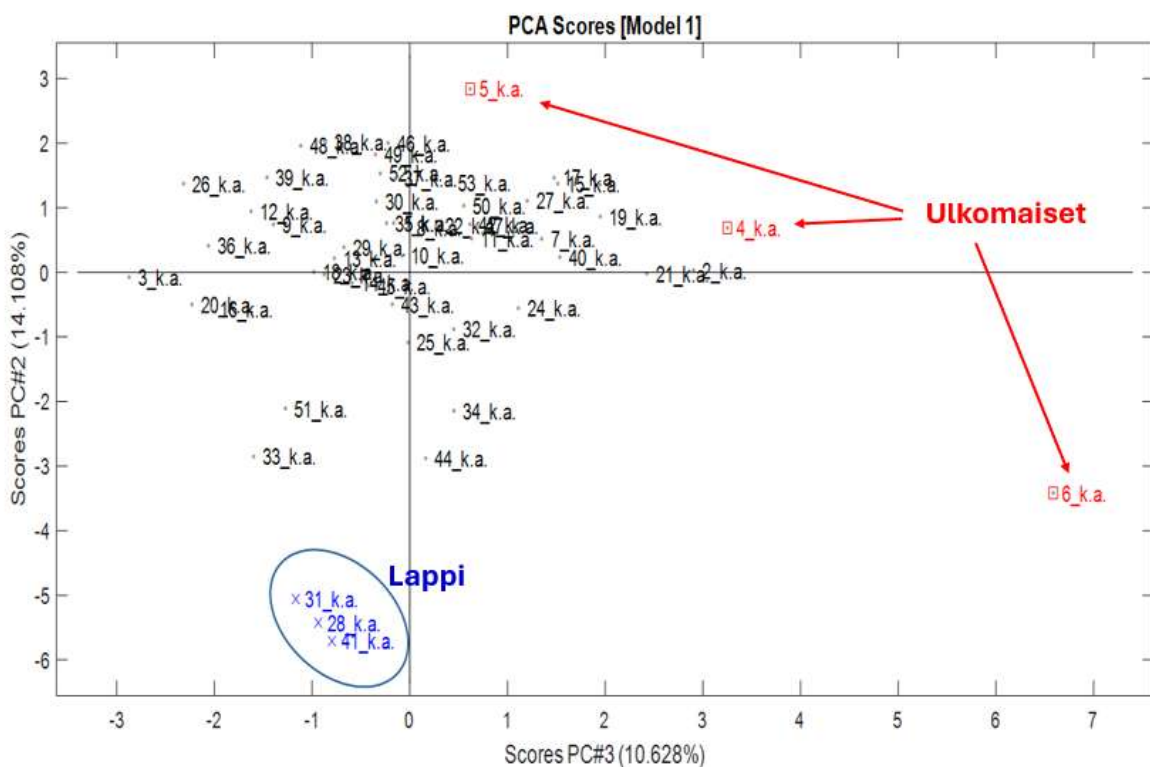
Hankkeen tavoitteeksi työpaketin 1 osalta asetettiin tutkimusmenetelmien (NMR- ja TXRF-menetelmät) kehittäminen erityisesti hunajan ja mahlan maantieteellisen alkuperän selvittämiseksi sekä paljastamaan mahdolliset väärennökset, kuten laimentamisen tai soke-
rin lisäämisen tuotteeseen. Testien perusteella TXR- ja NMR-mittaukset antavat toisiaan täydentävää monimuuttujaista mittausdataa, jota voidaan hyödyntää väärennösten tunnistamisessa.

Hunaja

TXRF-mittaukset suoritettiin kaiken kaikkiaan noin sadalle hunajanäytteelle, jotka olivat peräisin eri puolilta Suomea. Lisäksi tutkimme kolmelta eri vuodelta näytteet, jotka olivat peräisin samalta tuottajalta. Ulkomailta saimme käyttöömmme kahdeksan näytettä, jotka olivat peräisin eri puolilta maailmaa, kuten Australiasta, Chilestä ja Latviasta. Alkuainepitoisuudet vaihtelivat merkittävästi tuottajalta toiselle ja jopa saman tuottajan eri vuosina kerätyt hunajat olivat erilaisia. Eniten vaihtelua oli rikin, kloorin, kaliumin ja rubidiumin pitoisuuksissa. Lapin hunajissa ei ollut rikkiä, mutta muita selkeitä johtopäätöksiä ei ollut tehtävissä.

NMR-mittauksissa havaitsimme jokaisen eri tuottajalta saadun hunajaerän olevan muuten kuin glukoosin ja fruktoosin osalta ainutkertainen. Jopa saman tuottajan eri vuosina kerätyt hunajat olivat orgaanisten yhdisteiden koostumuksen osalta erilaiset. Tämä mahdollistaa jäljittää ei vain jokaisen eri tuottajan, mutta myös vuoden, jolloin hunaja on kerätty. Tunnistaminen tietysti edellyttää, että vertailuspektrejä olisi saatavilla. Tunnistamiseen ei välttämättä tarvitse mitään hienoja menetelmiä, vaan pelkkä spektrien visuaalinen tarkastelu on riittävä erottamaan näytteet toisistaan. Lisäksi spektreistä voitiin päätellä, mikäli hunajan säilytyslämpötila oli ollut väärä spektrin äärimmäiseen vasempaan reunaan ilmestyneestä 5-hydroksimetyylifurfuraalin (HMF) signaalista.

Kun tuloksia tarkasteltiin pääkomponenttianalyysin (PCA, Kuva 6) avulla jaotteleamalla hunajat maakuntien mukaan, ainoastaan Lapista peräisin olevat hunajat erottuivat selkeästi omaksi ryhmäkseen, kun käytimme jakoperusteina 22 alkuaineen keskinäisiä suhteita (esim. kalium/fosfori ja rubidium/strontium) ja viittä aluetta NMR-mittauksissa. Lisäksi kolme ulkomailta olevaa hunajaa erottuivat omiksi ryhmikseen PCA-kuvaajasta.



Kuva 6. Pääkomponenttianalyysi 60 eri hunajanäytteestä eri puolilta Suomea sekä kuudesta ulkomailta peräisin olevasta näytteestä.

Mahla

TXRF-mittaukset suoritettiin n. 20 mahlanäytteelle, jotka olivat peräisin kotimaiselta tuottajalta eri tuotantoeristä. Lisäksi mitattiin yhdeksän muuta aluksi sokkoutettua näytettä. Alkuainepitoisuudet vaihtelivat tuottajalta toiseen, mutta myös saman tuottajan eri vuosina kerätyt mahlat olivat erilaisia. Eniten vaihtelua oli mangaanin, raudan, sinkin ja rubidiumin pitoisuuksissa. Vertaamalla kahden alkuaineen keskinäisiä pitoisuussuhteita (Rb/Sr, K/Ca, Mn/Fe ja Mn/Zn) voitiin selkeästi erottaa kotimaiselta tuottajalta peräisin olevat näytteet muista mahloista.

NMR-mittauksissa, vastaavalla tavalla kuin hunajien kohdalla, jokainen näyte-erä oli erilainen verrattaessa orgaanisia yhdisteitä ja niiden pitoisuuksia. Tämän perusteella, mikäli vertailuspektrejä olisi saatavilla, pystyisi mahdollisesti jäljittämään tuottajan ja vuoden, jolloin mahla on kerätty. Huomioitavaa kuitenkin on, että mahlan koostumus muuttuu myös keräyskauden aikana aiheuttaen ylimääräisen muuttujan tunnistamiseen.

3 Korkeapainekäsittely (HPP)

Korkeapainekäsittely (High Pressure Processing, HPP) on elintarvikkeiden säilöntämenetelmä, jossa tuotteita käsitellään HPP-laitteistossa (Kuva 7) erittäin korkealla hydrostaattisella paineella, tyypillisesti 300 tai 600 MPa, elintarvikepatogeenien ja pilaajamikrobien tuhoamiseksi. HPP on tehokas useimpia bakteereita, hiivoja ja homeita vastaan, mutta se ei yleensä tuhoa mikrobien itiöitä. Tämän vuoksi HPP-käsittely parantaa elintarviketurvalisuutta erityisen hyvin tuotteissa, joiden olosuhteet eivät suosi mikrobien kasvua, kuten matalan pH:n elintarvikkeissa.

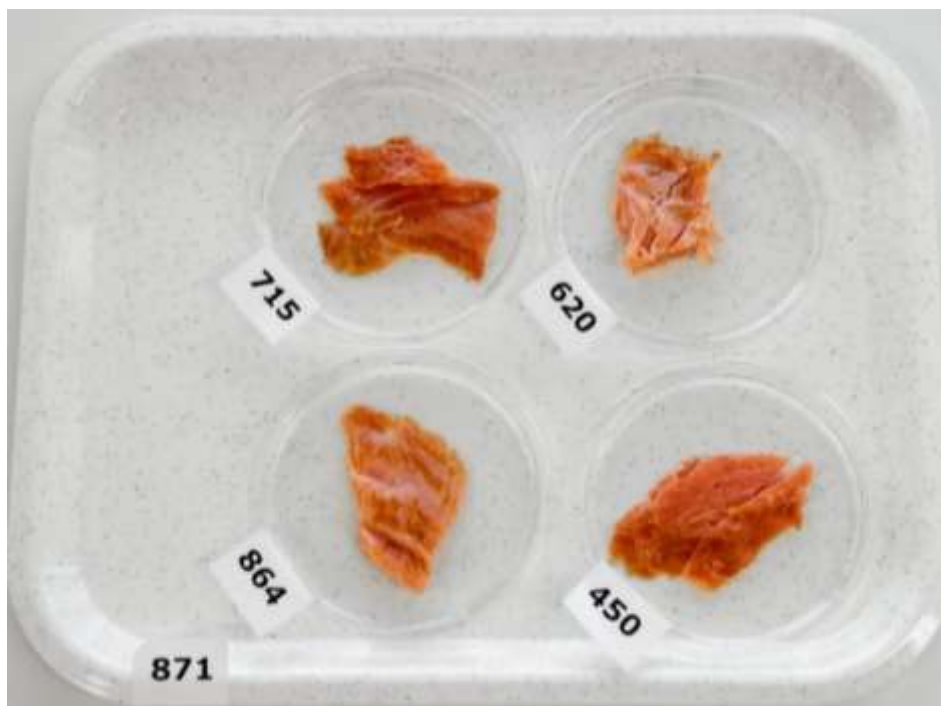
HPP-prosessin vaiheet:

1. Pakatut tuotteet lastataan käsittelykoreihin
2. Korit siirretään painekammioon
3. Kammio suljetaan ja täytetään vedellä
4. Koko kammion sisältö puristetaan haluttuun paineeseen (jopa 6000 bar)
5. Paine pidetään yllä tarkasti määritetyn ajan (tyypillisesti 3–4 minuuttia)
6. Paine lasketaan takaisin normaalipaineeseen (1 bar)
7. Korit poistetaan kammiosta ja tuotteet puretaan
– laitteisto on valmis seuraavaa sykliä varten.



Kuva 7. HPP-laitteisto Toripiha Oy:lla Suonenjoella (Kuva: Elina Välkky)

HPP:n tehokkuus mikrobeja vastaan riippuu painekäsittelyn (paine, lämpötila ja aika) lisäksi käsiteltävän tuotteen ominaisuuksista, kuten veden aktiivisuudesta ja pH:sta. Riittävä tehokkuus on testattava tuotekohteisesti. Usein käsittely tehdään varmuuden vuoksi laitekohtaisella maksimipaineella. Pienempikin paine voi kuitenkin riittää, ja sillä voi olla merkitystä tuotteen aistittavien ominaisuuksien kannalta (Kuva 8).



Kuva 8. Erilaisilla paineilla HPP-käsitellyjä kylmäsavukirjolohinäytteitä aistinvaraisessa arvioinnissa. 715: ei-HPP-käsitelty, 450: 200 MPa, 864: 400 MPa, 620: 600 MPa.

(Kuva: Raija Törrönen, Itä-Suomen yliopisto)

Tuotteen korkea vedenaktiivisuus lisää paineen jakautumista tuotteeseen tasaisesti, jolloin mikrobit tuhoutuvat tehokkaammin. Tämän vuoksi HPP:ta käytetäänkin pääasiassa nestemäisille tuotteille. Myös happamuus eli alhainen pH yleensä tukee HPP-käsittelyn vaikutusta. Tämän vuoksi HPP soveltuu hyvin tuotteille, joissa on luonnostaan alhainen pH, tai joiden pH:ta voidaan säätää esim. sitruunahappoa lisäämällä (Nykter 2021).

Suomessa teollista korkeapaineprosessointia sopimusvalmistuksena tekee tällä hetkellä ainoastaan Toripiha Oy, jolla on HPP-laitteistot Suonenjoella ja Vesannolla. Toripihan HPP-laitteistolla voidaan prosessoida yhdellä käsittelykerralla noin 350 litraa tuotetta ja tuotantokapasiteetti on noin 1 500 kg/h. (Toripiha Oy, 2026). Käytännössä tämä on noin rek-kalastillinen per vuorokausi. Lisäksi muutamilla kotimaisilla elintarvikevalmistajilla on omia HPP-laitteistoja. HPP-laitteiston hinta on varsin korkea, pilottitason laitteistot ovat

hinnaltaan n. 100 000–400 000 € ja teollisen mittakaavan 0,5-4 miljoonaa euroa. Prosessointikustannukset vaihtelevat sopimuksen ja tuotantomäärien mukaisesti.

3.1 HPP:hen soveltuvat pakkaukset

HPP-prosessissa tuote käsitellään myyntipakkauksessaan. Tuote siis valmistetaan, pakataan ja kuljetetaan lopuksi HPP-käsittelyyn. Tuotteet voidaan valmistaa myös korkeapainekäsittelyä tekevällä laitoksella, jos sillä on tuotteelle soveltuvaa prosessointi- ja pakkauslaitteistoa, ja valmiudet kyseisten raaka-aineiden käsittelyyn. Esimerkiksi Suonenjoen Toripiha toteuttaa sopimusvalmistusta.



Kuva 9. Tuotteet menevät HPP-käsittelyyn pakkauksissaan, jotka asetetaan HPP-kelkkaan (kuvassa sininen). (Kuva: Elina Välkky)

Tuotteet käsitellään HPP:ssä pakkauksineen (Kuva 9), joten pakkauksen on kestävä korkeaa painetta. Käytännössä korkea paine rutistaa tuotteen pakkauksineen kasaan, joten sekä tuotteen että pakkauksen on oltava elastisia. HPP:hen sopivat painetta kestävä muovi- tai kerrosmateriaalipakkaukset. Olennaista on, että pakkauksen kaikki materiaalit, kuten korkit tai kannet reagoivat paineeseen samalla tavalla. Pakkausmateriaalien saumausajat ja lämpötilat pitää optimoida materiaalikohtaisesti sekä testata käsittelyyn sopiva ja optimaalinen täyttöaste. Muuten voi aiheutua materiaalirikkoja ja vuotoja erityisesti pakkausmateriaalien saumakohdista. Kaikkien elintarvikkeiden kanssa suoraan tai välillisesti kosketuksissa olevien pakkausten on oltava hyväksytyjä elintarvikekontaktimateriaaleja (Ruokavirasto 2026b).

3.1.1 Tulokset pakkaustesteistä

ELTUVÄ-hankkeessa testattiin erilaisten markkinoilla olevien muovipakkausten soveltuvuutta HPP:hen (Taulukko 7). Testeissä pakkaukset täytettiin vedellä tai hernemassalla useilla eri täyttöasteilla, 80–95 %:n väliltä (Kuva 10). Tämän jälkeen pakkaukset suljettiin, punnittiin tarkasti ja niiden tiivys sekä yleinen kunto tarkastettiin silmämääräisesti ennen painekäsittelyä. HPP-käsittelyn (600 MPa, 3-4 min) jälkeen pakkaukset kuivattiin huolellisesti ja punnittiin uudelleen. Lisäksi jokainen pakkaus tarkastettiin visuaalisesti mahdollisten vaurioiden, muodonmuutosten tai tiiviyshäiriöiden havaitsemiseksi. Lopuksi verrattiin pakkausten massaa ennen ja jälkeen HPP-käsittelyn sekä kirjattiin rikkoutuneiden tai muuten vaurioituneiden pakkausten määrä. Mikäli pakkauksen paino oli muuttunut, pääteltiin, ettei se ollut kestänyt prosessia — joko prosessiveden pääsyn vuoksi pakkauksen sisään tai tuotteen menetyksen seurauksena.



Kuva 10. Erilaisia pakkauksia HPP-testissä. (Kuvat: Jaana Kapustamäki, Elina Välkky)

Taulukko 7. Elintarvikepakkausten kestävyys korkeapaineprosessissa (HPP, 600 MPa, 3-4 min).

Pakkaus	Materiaali	Kalvo / korkki materiaali	Kestävyys HPP:ssä
Pullo 50 ml	PET	PP, yhteensopiva ROPP 28/18 kauloille	hyvä
Pullo 80 ml	PET	HDPE, plug tiiviste, 3S	hyvä
Pullo 175 ml	PET	SP400, PP Homopolymer polystyreeninen tiivistysliner (PS-liner)	epävarma, toimi osittain liner kalvon kanssa
Pullo pisaranmuotoinen 250 ml	PET	SP400 PP Homopolymer, ei tiivistettä	epävarma
Pullo 250 ml	PET	HDPE, plug tiiviste, 3S	hyvä
Purkki 230 ml	PET	2 erilaista PE/PP, ilman tiivistettä 63 mm PP, SP400, boreseal 63 mm	Ei toiminut
Purkki 200 ml	PET	PP 70/400	Ei toiminut
Pikari 450 ml	PET	kalvo: WESTlid PET 406 BPAFA rakenne: PET 12 / Glue / PET-PET 50 B P AF, kireä saumautuvuus	hyvä
Doypack 150 ml	Muovi-Alumiini-Metalloitu PET		hyvä
Pullo 250 ml	PLA	2 erilaista PLA HDPE	Ei toiminut
Bag-in-box pussit	70 μ PE/EVOH/PE + 60 μ LDPE	Kaulukset: LLDPE tai LLDPE / LDPE Korkit: LLDPE tai LLDPE / LDPE	Hyvä (painettavalla korkilla) ajon ajaksi poistettu kierrekorkit
Pikari pyöreä 210 ml PP	PP	kalvo: WESTlid 406 RPAFK rakenne: PET 23 / glue / CPP P 40 AFK, kireä saumautuvuus	hyvä
Rasiapakkaus (Dyno)	PP	WESTlid 406 RPAFK (rakenne PET23 / glue / CPP P40AFK), kireä saumautuvuus	riippuu pakattavasta tuotteesta ja täyttöasteesta
Pakkaus painokannella ja sinetillä 150 ml	PP	PP	ei toiminut
Rasiapakkaus (Skin)	PP	Cryovac Darfresh® VST200P FS – Vacuum Skin Top Film (5012486241) monikerrosmateriaali, keskivahva, high barrier	hyvä, mutta riippuu pakattavasta tuotteesta ja täyttöasteesta
Pikari pyöreä 210 ml HDPE	HDPE	kalvo: WESTlid 406 RPAFK rakenne: PET 23 / glue / CPP P 40 AFK, kireä saumautuvuus	hyvä
Vakuumpussit PA/PE	PA/PE	paksuudet 120 μ m ja 140 μ m	hyvä, oikein saumatuna
Vakuumpussit OPA/PP	OPA/PP	OPA 15 μ m CPP 60 μ m	hyvä, oikein saumatuna
Vakuumpussi	Polyamide/EVOH/Polyethylene	11 kerroksinen ko-ekstruusiorakenne, ei tietoja kerrosten paksuuksista	hyvä, oikein saumatuna

HPP-pakkaustesteistä saadut keskeiset havainnot osoittivat, että kaikki prosessiin suunnitellut pakkaukset on testattava, jotta voidaan varmistua niiden soveltuvuudesta korkeapainekäsittelyyn. Muovimateriaalin laatu, paksuus ja pakkauksen geometria vaikuttavat

merkittävästi siihen, miten pakkaus käyttäytyy paineessa. Materiaalin tulee olla riittävän joustavaa, jotta se kestää sekä voimakkaan kokoonpuristumisen että palautumisen paineen purkautuessa. HPP-käsittelyssä ilmatilan määrä tuotteessa on pidettävä mahdollisimman pienenä, koska kaasu puristuu voimakkaasti ja lisää muodonmuutosten sekä pakkausvaurioiden riskiä.

Pakkaustesteissä kaikki vedellä täytetyt pikaripakkaukset kestivät HPP-prosessin, mutta kiinteämmällä raaka-aineella 80 %:n täyttöasteella osa pakkauksista rikkoutui. Testien perusteella kannattaa pyrkiä lähelle 93 %:n optimaalista täyttöastetta, jolloin pakkaukset kestävät paineen paremmin.

Erilaisten pakkaustyyppien HPP-kestävyys

200 ml:n purkkipakkaukset eivät soveltuneet HPP-käsittelyyn. Niiden jäykkä rakenne ei mahdollistanut tasaista joustoa, minkä seurauksena pakkaukset halkeilivat tai vuotivat. Laaja korkin halkaisija lisäsi vuotoriskiä, koska korkin ja rungon erilainen käyttäytyminen paineessa heikensi tiiviyyttä. HPP-pakkausohjeistuksen ja testiemme mukaan jäykät, leveäsuiset purkit ovat yleisesti riskialttiita, ellei niitä suljeta joustavalla lämpötiivistekalvolla, joten tämän pakkaustyyppin käyttöä ei suositella HPP-prosesseissa.

PP- ja HDPE-pikarit sekä kupit oikein saumattuna kestivät HPP-käsittelyn hyvin, ja erityisesti PP-pikaria hyödynnettiin useissa tuotteissa.

Joustavista monikerrosmateriaaleista valmistetut Doypack-pussit, bag-in-box -ratkaisut ja erilaiset vakuumpussit toimivat testien perusteella luotettavasti, eikä niihin syntynyt vuotoja tai rakenteellisia vaurioita, koska ne puristuvat tasaisesti ja palautuvat täysin muotoonsa. Näitä käytettäessä on kuitenkin tärkeää poistaa kierrekorkki HPP käsittelyn ajaksi, koska korkin alle jäävä ilmatila aiheuttaa mekaanista rasitusta, vuotoja ja rikkoutumisriskin. Pussin joustava monikerrosmateriaali kestää paineen hyvin, mutta jäykkä kierrekorkki ei puristu samalla tavalla, mikä heikentää tiiviyyttä ja mahdollistaa prosessiveden pääsyn pakkaukseen. Korkit tulee asentaa vasta käsittelyn jälkeen pakkauksiin.

Hanapakkausten korkit eivät sovellu HPP-käsittelyyn, koska venttiilirakenne on moniosainen, sisältää ilmataskuja ja käyttäytyy epätasaisesti paineessa. Hanamekanismin jäykkä ja monimutkainen geometria ei puristu ja palaudu tasaisesti, mikä johtaa venttiilin tiivisteiden pettämiseen ja prosessiveden pääsyyn pakkauksen sisälle. Hanan rakenne muodostaa siten pakkauksen kriittisen heikon kohdan HPP-prosesseissa.

Pullopakkausten korkkien suositellaan olevan "sinetikorkillisia". Sinetöity avausvarmistettu suljin soveltuu hyvin HPP-prosessiin, koska se parantaa korkin pysyvyyttä ja tiivyyttä erittäin korkeassa paineessa. Suljin auttaa estämään prosessiveden pääsyn tuotteeseen ja varmistaa, ettei pakkausta ole avattu tai löystynyt ennen HPP-käsittelyä. Sinetöity avausvarmistettu suljin antaa selkeän visuaalisen merkin avauksesta, joten sen avulla voidaan myös varmistua pakkauksen eheydestä käsittelyn jälkeen. Tämä tukee HPP-prosessin kriittistä tavoitetta: säilyttää sekä tuotteen turvallisuus että mikrobiologinen laatu koko käsittelyn ajan.

Rasia- ja skin-pakkauksia testattiin sekä vedellä että vedessä turvotetulla herneproteiini-massalla. Neljästätoista rasiapakkauksesta kaksi ja kahdeksastatoista skin-pakkauksesta kaksi päästi vettä sisäänsä. Kaikissa näissä tapauksissa vuoto johtui pakkauksikalvon saumauksen pettämisestä. Saumausasetuksia kehittämällä voitaisiin parantaa näiden pakkausten HPP-soveltuvuutta.

Hankkeen aikana tehtyjen testien ja käytännön kokeilujen perusteella havaittiin, että rasiapakkauksiin pakattaessa on erityisen tärkeää varmistaa kalvomateriaalin yhteensopivuus pakkauksen kanssa, oikeat saumausajat ja lämpötilat sekä saumauspintojen puhtaus täyttö- ja pakkausvaiheessa. Nämä ovat edellytyksenä prosessinkestävän ja luotettavasti sulkeutuvan pakkauksen aikaansaamiselle.

Korkkien toimivuus HPP-prosessissa

HPP-prosessi asettaa korkki-pakkaus-yhdistelmille huomattavia mekaanisia vaatimuksia. Paineenalaisessa käsittelyssä pullon ja korkin materiaalien tulee puristua tasaisesti, jotta tiiveys säilyy eikä prosessivettä pääse pakkauksen sisään. Testien perusteella havaitsimme merkittäviä eroja eri materiaalien, kierreprofiilien ja tiivisterakenteiden toimivuudessa.

Testeissä mitattiin selviä eroja korkkimateriaalien ja pullomateriaalien yhteensopivuudessa. Esimerkiksi: PLA-pullojen yhteydessä käytetty PLA-korkki päästi keskimäärin vain 2,5 g prosessivettä, kun taas PLA-pullo HDPE-korkki yhdistelmällä vastaava määrä oli keskimäärin 24 g per pullo. Erot selittyvät korkkien ja pullojen erilaisella puristumisella korkeassa paineessa. Mikäli pullon ja korkin materiaalit käyttäytyvät paineessa eri tavoin, tiivisterakenteita ei pysy tasaisena, jolloin veden pääsy pakkaukseen lisääntyy.

Tämän vuoksi HPP-käsittelyyn soveltuviissa pakkauksissa on olennaista varmistaa, että:

- kierre (pullo–korkki) on yhteensopiva
- materiaaliyhdistelmä puristuu paineessa samalla tavalla
- korkin tiivisterakenne tukee paineen aikaista muodonmuutosta

Testattujen pullo/korkki-yhdistelmien tiiviys

Kaikki testitaulukossa arvioidut pullot/ korkki yhdistelmät pääsivät jonkin verran prosessivettä sisään, kolmea poikkeusta lukuun ottamatta:

- 250 ml PET-pullo HDPE-korkilla
- 80 ml PET-pullo HDPE-korkilla
- 50 ml PET-pullo PP-korkilla

Nämä kolme pakkausta olivat testijoukon tiiveimmät, minkä vuoksi niitä käytettiin hankkeessa eniten tuotteiden pakkaamiseen.

Liner-rakenteen vaikutus

Testasimme myös pakkausta, jossa pullon ja korkin väliin lisättiin sinetöivä liner-kalvo. Liner on korkin sisällä oleva erillinen tiivistemateriaali, joka puristuu suuaukon reunaa vasten ja parantaa sulun tiiviyttä. Liner-tiivisteitä valmistetaan erilaisista materiaaleista, joiden valinta käyttöön riippuu tuotteen kemiallisista ominaisuuksista ja vaaditusta tiiveydestä.

Yleisesti liner-korkeja ei suositella HPP-käyttöön, koska korkin ja linerin erilainen puristuminen voi johtaa tiivisteiden peittämiseen. Tässä testissä liner kuitenkin vähensi prosessiveden päätymistä tuotteeseen, mikä osoittaa, että liner voi joissain rakenteissa parantaa tiiviyttä, vaikka se ei ole yleinen HPP-suositus.

Korkkimateriaalit

Testiemme ja HPP-laitteistotoimittajien ohjeistusten mukaan HDPE (High-Density Polyethylene) on suositeltu korkkimateriaali PET-pulloihin. Sen edut ovat:

- hyvä joustavuus paineessa
- tasainen puristuminen suhteessa PET-pulloon
- hyvä mekaaninen palautuvuus paineen jälkeen.

Näiden ominaisuuksien vuoksi HDPE-korkit muodostivat kokonaisuutena parhaiten tiiviitä ratkaisuja testatuista vaihtoehdoista.

Plug-tiivisteiden merkitys

Testeissämme selvästi parhaiten toimivat korkit olivat rakenteeltaan sellaisia, joissa oli sisäinen plug-tiiviste. Plug-rakenne muodostaa sisäpuolisen tiivistävän huulen, joka painuu paineessa tiiviisti pullon kaulaa vasten ja estää veden pääsyn korkin läpi. Korkeissa, joissa plug-tiivistettä ei ollut, prosessivettä pääsi useammin pakkauksiin.

Kierreprofiilin vaikutus

Osa testatuista pulloista oli varustettu SP400-korkilla, joka on yleinen standardikierre PET- ja HDPE-pulloissa. SP400-korkkien toimivuus HPP:ssä riippui selvästi käytetystä tiivisteestä ja materiaaliparista. Pelkkä SP400-kierre ei siis määritä tiiviyttä, vaan ratkaisevaa on korkin sisäinen tiivisterakenne ja materiaalien yhteistoiminta paineessa.

Testien perusteella 3S-kierteellä varustettu HDPE-korkki, jossa oli plug-tiiviste, osoittautui HPP-prosessissa selvästi luotettavimmaksi (Kuva 11). 3S-kierteen rakenteen havaittiin tukevan tasaisempaa sulkeutumismoimaa ja vähentävän korkin vääntymistä paineessa, mikä paransi tiiviyttä.



Kuva 11. Korkkeja HPP-testissä. Ylärivissä HPP-prosessissa hyvin toimineet sinettikorkilliset HDPE-korkit, jossa 35-kierre ja plug-tiiviste. Keskellä hyvin toiminut sinettikorkillinen PP-korkki ROPP 28/18-kaulaan sopivalla kierteellä. Alarivissä SP400-kierteellä oleva korkki ilman sinettiä ja tiivistettä sekä PLA-korkki, jotka eivät toimineet HPP-testissä. (Kuvat: Elina Välkky)

3.2 HPP:n vaikutukset tuotteiden aistittaviin ominaisuuksiin

HPP-testeissä arvioitiin erilaisten tuoteaihioiden soveltuvuutta korkeapainekäsittelyyn yhteistyössä hankeyritysten kanssa. Tuotteet olivat pääasiassa marjapohjaisia, kuten hilloja, smoothieitä ja mousseja, mutta testeissä oli mukana myös joitain kala- ja lihatuotteita.

Käsittelyssä käytettiin painetta 600 MPa 3–4 minuutin ajan, ja sen vaikutusta tarkasteltiin tuotteen aistinvaraisiin ominaisuuksiin – rakenteeseen, väriin ja makuun – sekä mikrobiologiseen laatuun ja säilyvyyteen. Tyypillisessä testissä valmistettiin useita versioita samasta tuotteesta (esimerkiksi marjamousse erilaisilla tärkkelyksillä), ja arvioitiin HPP:n vaikutusta eri tuoteversioihin.

HPP:n vaikutus marjatuotteiden aistittaviin ominaisuuksiin

Marjatuotteilla aistinvaraisten ominaisuuksien muutokset liittyvät väriin, rakenteeseen ja flavoriin. Suoraan HPP-käsittelystä johtuvia muutoksia ei marjatuotteilla havaittu. Tuotteiden mikrobiologinen laatu säilyi hyvänä viikkoja tai kuukausia, jolloin aistinvaraisia muutoksia alettiin havaita säilytyksen aikana. Ne liittyivät oletettavasti entsyymaattisiin muutoksiin. Väriin muutos huomattiin punaisilla marjoilla HPP-käsitellyissä tuotteissa tyypillisesti kahden - kolmen kuukauden säilytyksen jälkeen. Tummista marjoista (mustikka, mustaherukka) valmistetuissa tuotteissa ei havaittu värin muutosta.

Makuun liittyvistä muutoksista havaittiin joissain marjatuotteissa "happamuuden" lisääntymistä säilytyksen aikana. Havaittu muutos ei kuitenkaan liittynyt pH-muutoksiin. Kuukauden säilytyksen jälkeen maut olivat tuotteissa tasaantuneet ja tuoreen marjan maku oli hieman laimennut. Tyypillisesti tuotteiden maku säilyi hyvänä kolme - neljä kuukautta. Tämän jälkeen muutokset olivat huomattavampia. Tuotteiden koostumus vaikutti myös maun säilyvyyteen. Juotavien marjatuotteiden maku säilyi hyväksyttävällä tasolla kuuden kuukauden ajan. Paksumman koostumuksen omaavilla tuotteilla havaittiin maun heikentymistä jo aiemmin, vähemmän viskooseihin verrattuna. Hillomaisen rakenteen tuotteilla maku alkoi heikentyä kahden kuukauden jälkeen, sosemaisilla maun heikentyminen alkoi kolmen - viiden kuukauden kohdalla.

Tehokkaalla pakkauksella voidaan mahdollisesti pidentää tuotteiden aistinvaraisten ominaisuuksien säilymistä. Bag-in-box-pakkauksessa (70 µ PE/EVOH/PE + 60 µ LDPE) marjasose säilytti HPP-käsiteltynä aistinvaraiset ominaisuutensa yli yhdeksän kuukautta. PET-pullossa marjatuotteen aistinvaraiset ominaisuudet säilyivät kolmesta kuuteen kuukautteen. Monikerrosmateriaaleja sisältävässä doypack-pakkauksessa (seisova pussipakkaus) marjasose säilyi kolme kuukautta aistinvaraisesti erinomaisena, pidempää aistinvaraista arviointia ei tehty.

Huomattavin marjatuotteiden rakenteellinen muutos liittyy niiden ominaisuuteen muodostaa kiinteä geeli pektiinin aiheuttamana, jos tuotteita ei ole kuumennettu tai käsitelty pektiiniä hajottavilla entsyymeillä. HPP-käsittelyllä ei huomattu olevan vaikutusta geelin muodostumiseen tai sen estämiseen. Marjatuotteiden geelin muodostukseen vaikuttaa merkittävästi marja ja sen kypsyyssaste. Useat mansikasta valmistetut tuotteet muodostivat kiinteän geelin säilytyksen aikana. Geeliytyminen tapahtui joissain tuotteissa heti valmistuksesta seuraavana päivänä ja joissain hitaammin usean viikon kuluttua. Mustikasta tai mansikasta ja puolukkamehusta valmistetut juotavat tuotteet säilyttivät puolestaan rakenteensa ilman geeliytymistä. Geeliytyminen voidaan estää entsyymikäsittelyllä tai

kuumentamalla tuote. Entsyymikäsittely tosin tekee tuotteista hyvin juoksevia. Tällöin rakennetta on tuotava muilla keinoin, esim. stabilointiainein. Hillomaista rakennetta voi olla haastava saada tuotteeseen, joka on entsyymikäsitelty.

Geeliytymistesti mansikkajuomilla

Hankkeen aikana toteutettiin testi 2025 kesällä eri ajankohtina ja eri kypsyysasteisina kerätyistä mansikoista. Tavoitteena oli arvioida mansikoista valmistettujen nestemäisten tuotteiden geeliytymistä, värin muuttumista ja viskositeetin kehitystä eri poiminta-ajankohtien, kypsyysasteiden ja käsittelymenetelmien vaikutuksesta. Marjat kerättiin 7.7–5.8. välillä ja niistä valmistettiin juoma, jossa oli vain mansikkaa (36 %) ja vettä. Osa juomista pastöroitiin ja osa käsiteltiin HPP:ssa. Testin tuloksena huomattiin, että marjan kypsyysaste on merkittävin geeliytymiseen vaikuttava tekijä. 11 testatusta näytteestä kuusi muodosti geelin säilytyksen aikana.

Geeliytymisen osalta todettiin, että elokuun alussa poimitut marjat, erityisesti 5.8. kerätyt ylikypsät näytteet, muodostivat geelin kaikkein herkimmin ja nopeimmin. Ylikypsä 5.8. näyte geeliytyi jo pian HPP-käsittelyn jälkeen, ja samalta ajankohdalta kerätyt muut näytteet geeliytyivät viimeistään joulukuun lopussa. Aiemmin poimitut heinäkuun marjat pysyivät pitkään juoksevina, vaikka yksittäisissä näytteissä havaittiin myöhäistä geeliytymistä jopa helmikuussa 2026. Pastörinti esti geelin muodostumisen lähes täysin, ja vain yksi ylikypsä näyte sai osittaisen hyytelörakenteen pitkän säilytyksen aikana. Geeliytymisen ei havaittu olevan yhteydessä viskositeetin nousuun HPP-käsittelyn jälkeen.

Viskositeetin muutokset riippuivat merkittävästi marjojen kypsyysasteesta. Raakojen marjojen viskositeetti nousi HPP-käsittelyn jälkeen kaikkein voimakkaimmin, kun taas poimintakypsissä marjoissa viskositeetin muutos oli vähäisempi ja vaihteli poimintapäivän mukaan. Ylikypsissä marjoissa havaittiin suurta vaihtelua, mutta elokuun alussa poimitut marjat osoittivat suurimman viskositeetin nousun. Viskositeetin todettiin kuitenkin olevan huono indikaattori geelin muodostumiselle, sillä geeliytyneissä näytteissä viskositeetti oli joko lähes muuttumaton tai nousi vain vähäisesti, ja toisaalta eräät voimakkaasti viskositeetiltaan kehittyneet tuotteet eivät muodostaneet geeliä pitkänkään säilytyksen aikana.

Värinmuutoksissa havaittiin, että heinäkuun alussa poimitut marjat tuottivat vaaleampia tuotteita kuin myöhemmin poimitut. Säilytyksen aikana kaikkien näytteiden väri muuttui tummanpunaisesta vaaleammaksi ja osittain rusehtavammaksi, mutta muutokset olivat vähäisempiä elokuun alussa poimituissa marjoissa, joissa lähtövärikin oli tummempi.

HPP-käsittely säilytti värin selvästi paremmin kuin pastörointi, jonka vaikutukset näkyvät erityisesti ensimmäisen viikon aikana.

HPP:n vaikutukset liha- ja kalatuotteiden aistinvaraisiin ominaisuuksiin

HPP-käsittelyn huomattavin vaikutus kypsentämättömiin tai raakakypsennettyihin liha- ja kalatuotteisiin on proteiinien denaturoitumisesta johtuva värin ja rakenteen muutos. Tämä havaittiin erityisesti mätituotteilla (Kuva 12). Mädin denaturoitumista yritettiin estää vesi- ja kermapohjaisella kastikkeella siinä onnistumatta. 600 MPa:n paineessa värin muutos tapahtui kaikissa testatuissa mätituotteissa. HPP-käsitelty mäti muuttui kiinteäksi, maultaan miedommaksi ja myös sen koettu suolaisuus väheni.



Kuva 12. Mädin rakenteen muutokset ja proteiinien denaturoituminen HPP-käsittelyssä. (Kuvat: Jaana Kapustamäki, Jesse Ojala)

HPP-käsittely voikin aiheuttaa yllättäviä muutoksia tuotteessa. Mädin rakenteen suojaamiseksi testattu vesipohjainen, maissitärkkelyksellä sakeutettu, kastike muuttui HPP-käsittelyssä kirkkaasta samean vaaleaksi (Kuva 13).



Kuva 13. Kirkkaan ja kermaisen mätikastikkeen muutokset HPP-käsittelyssä. Vasemmalla ennen HPP-prosessia ja oikealla HPP-prosessin jälkeen. (Kuvat: Jaana Kapustamäki)

Raakakypsennetty vaalea kala öljyssä muuttui HPP-käsitellyn myötä entistä vaaleammaksi. Väriin muutos ei kuitenkaan ollut häiritsevää, eikä denaturoituminen vaikuttanut merkittävästi aistittavaan rakenteeseen. Väri oli vaalealle kalalle tyypillinen ja ehkä jopa miellyttävämpi kuin ennen HPP-käsittelyä. Raakakypsennetyn kalan rakenteessa ei havaittu suuria muutoksia HPP:n seurauksena, mutta maku voimistui, etenkin koetun suolaisuuden osalta.

Raa'an kalamassan (jauhettu hauki) tapauksessa värin muutos oli huomattava (Kuva 14). Myös rakenne kiinteytyi huomattavasti HPP-käsittelyssä. Kypsennettäessä rakenne kuitenkin käyttäytyi lähes samalla tavalla kuin HPP-käsittelemätön massa, ja se soveltui raaka-aineeksi muun muassa kalapihveihin. Massan värin muutokseen ja kiinteytymiseen kokeiltiin vaikuttaa suolan ja öljyn lisäyksillä, mutta 15 % öljyä ja 1,5–4 % suolapitoisuudella ei ollut merkittävää vaikutusta.



Kuva 14. Raaka kalamassa vakuumpakkauksessa ilman HPP-käsittelyä (yllä) ja käsittelyn jälkeen (alla). (Kuva: Jesse Ojala)

Jos liha- tai kalatuote oli kypsennetty ennen HPP-käsittelyä, ei käsittelyllä ole suurta vaikutusta tuotteen väriin tai rakenteeseen. Korkeapaine saattoi tosin hienontaa joitain raaka-aineita pienemmiksi.

HPP:n vaikutus makuihin

HPP-testissä havaittiin, että useiden tuotteiden maut voimistuvat käsittelyn seurauksena. Erityisesti sipulin ja voimakkaiden mausteiden aromit korostuivat, mikä voi johtua HPP-prosessin aiheuttamasta solurakenteiden rikkoutumisesta ja aromiyhdisteiden tehokkaammasta vapautumisesta. Myös aistittu suolaisuus voimistui useissa tuotteissa. Poikkeuksena mädissä suolaisuuden aistiminen kuitenkin väheni HPP-käsittelyn jälkeen. Tämä voi selittyä suolan uudelleenjakautumisella tuotteen rakenteessa. Ennen HPP:tä suola on todennäköisesti pääosin mätipallojen ulkopuolisessa nesteessä, sillä mätimunien pintakalvo on ehjä ja tiivis eikä päästä suolaa helposti sisään. HPP-käsittely voi kuitenkin rikkoa mätimunien kalvorakennetta, jolloin suola pääsee paremmin myös mädin sisälle. Suolan jakautuessa tasaisemmin koko tuotemassaan, suolaisuuden tuntu voi vähentyä, vaikka suolan kokonaismäärä ei muutu. Tulokset korostavat, että HPP-käsittely vaikuttaa makuaistimukseen raaka-ainekohtaisesti, ja siksi reseptiikan toimivuus on arvioitava aina tuotekohtaisesti prosessoinnin jälkeen.

Kasvivärien värimuutokset HPP-käsittelyn seurauksena

Vegaanisen jälkiruokatuotteen HPP-ajoissa testattiin useita kasvipohjaisia väriaineita, jotka on valmistettu hedelmistä, vihanneksista ja kasveista. Purple sweet potato (porkkanapohjainen violetti) -väri muuttui HPP-käsittelyn jälkeen harmaaksi, kun taas punajuureen perustuva vaaleanpunainen väri säilytti sävynsä (Kuva 15).



Kuva 15. Luonnollinen violetti väriaine muuttuu harmaaksi HPP-käsittelyssä (oikealla alhaalla), punajuuren väriässä ei muutosta (oikealla ylhäällä). Mustikkasoseella maustettu ja värjätty tuote ei muuttunut HPP:n jälkeen (vasemmalla). (Kuvat: Jaana Kapustamäki)

Syy värimuutokselle liittyy pigmenttien pH- ja prosessoinnin kestävyteen. Purple sweet potato ja porkkana sisältävät antosyaniinipigmenttejä, jotka ovat tunnetusti herkkiä pH:n vaihtelulle ja voivat muuttua vähemmän vakaiksi, sinertäviksi tai harmaiksi lähellä neutraalia pH:ta.

Luonnollisiin väreihin vaikuttavat myös prosessointiolosuhteet. Kasvipohjaisten värien käyttäytymiseen vaikuttavat prosessirasitus, prosessitekniikka ja stabiliteettiolosuhteet, sillä luonnolliset pigmentit reagoivat eri tavalla kuin synteettiset värit. HPP-prosessin korkea paine voi tehostaa pigmenttirakenteiden hajoamista tilanteessa, jossa pigmentti on pH:n vuoksi epästabiili. Siksi HPP-tuotteiden värisuunnittelussa on olennaista varmistaa väriaineen pH-stabiilisuus sekä testata sävyn käyttäytyminen prosessissa ennen lopullista reseptivalintaa.

HPP-käsittelyn vaikutus homogenisoituun emulsioon

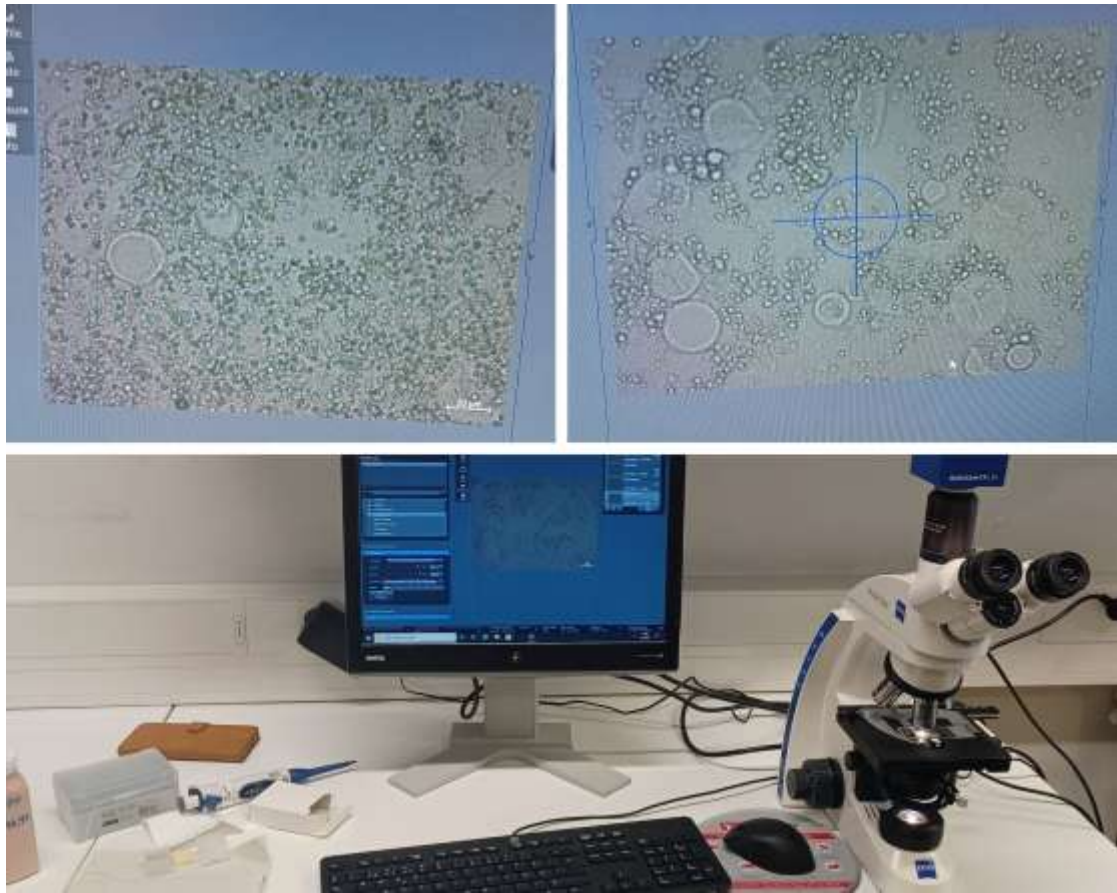
Hankkeessa tutkittiin, miten HPP-käsittely (600 MPa, 3 min) vaikuttaa korkeapainehomogenoidun emulsion pysyvyyteen. Homogenoinnissa vettä ja rasvaa sisältävän emulsion rasvapallot pilkotaan pienemmiksi, jolloin nesteestä tulee rakenteeltaan tasaisempi, eikä rasva erotu. Tätä varten valmistettiin emulsio, joka homogenoitiin korkeapainehomogenaattorilla (Panda 2000+, Gea, UEF, Kemian ja kestävän teknologian laitos, Joensuu, Kuva 16). Tämän jälkeen osa näytteistä käsiteltiin HPP:lla.



Kuva 16. Emulsion homogenointia Itä-Suomen Yliopistolla Joensuussa.
(Kuvat: Jaana Kapustamäki)

Seuraavana päivänä kuvannettiin emulsion rakennetta valomikroskoopilla (Zeis Primo Star käyttäen öljyä ja 40 x objektiivia, UEF, SIBLabs-palvelut, Kuopio).

HPP aiheutti muutoksia emulsion rakenteessa: osa pienistä rasvapisaroista hajosi ja yhdistyi suuremmiksi (Kuva 17). Samalla rakenteessa tapahtui muutoksia, jotka viittaavat siihen, että stabiloivat rakenneosat eivät enää toimineet yhtä tehokkaasti paineenkäsittelyn jälkeen. Näiden muutosten seurauksena emulsio alkoi säilytyksen aikana erottua, mikä osoittaa, että HPP heikensi emulsion fysikaalista stabiilisuutta. Tulosten perusteella HPP-käsittely ei välttämättä sovi yhteen korkeapainehomogenoinnin kanssa tilanteissa, joissa emulsion rakenne perustuu paineelle herkästi muuttuvaan stabilointimekanismiin.



Kuva 17. HPP-käsittelyn vaikutus emulsioon. Vasemmalla homogenoitu massa ilman HPP-käsittelyä ja oikealla HPP:n jälkeen. (Kuvat: Jaana Kapustamäki, Kaisa Raninen)

HPP:n aiheuttamat väliaikaiset muutokset maitopohjaisessa emulsiossa

Huomasimme, että HPP voi muuttaa maitopohjaisessa emulsiossa maitoproteiinien rakennetta, mikä lisäsi massan viskositeettia ja tehosti stabilointiaineiden veden sitomista. Tämä teki massasta hetkellisesti paksumman ja aiheutti lievää erottumista (Kuva 18). Rakenne kuitenkin palautui sekoittamalla ennalleen.



Kuva 18. Maitopohjainen tuote ennen HPP-käsittelyä (vasemmalla), käsittelyn jälkeen (keskellä) ja 1 viikon säilytyksen jälkeen (oikealla). (Kuvat: Jaana Kapustamäki, Jesse Ojala)

HPP-käsittelyn vaikutus vahtomaisiin rakenteisiin

Hankkeessa testattiin marjapohjaisten tuotteiden erilaisia rakenteita (Kuva 19) ja erityisesti ilmavan, vahtomaisen rakenteen toimivuutta HPP-käsittelyssä. HPP kohdistaa tuotteeseen tasaisen, erittäin korkean isostaattisen paineen, mikä voi litistää mekaanisesti vahtorakenteita. Testin tavoitteena oli selvittää, millaiset raaka-aineyhdistelmät tuottavat paineenkestävän rakenteen.

Rakenteen muodostamiseen käytettiin marjamassaa, syklodekstriiniä sekä eri makeutus- ja kuituvaihtoehtoja (sokeri, dekstroosi, polydekstroosi ja sitruskuitu). Tulokset osoittivat, että HPP-käsittely ei merkittävästi vaikuttanut rakenteeseen, mutta valitut raaka-aineet vaikuttivat selvästi vaahdon stabiilisuuteen. Syklodekstriinin yhdistäminen sokeriin, dekstroosiin tai polydekstroosiin tuotti mekaanisesti kestävä ja paineenkestävän ilmavan rakenteen. Sen sijaan sitruskuitu muodosti raskaan ja vettä voimakkaasti sitovan matriisin, jonka vahto romahti painekäsittelyssä. Paras rakenne saatiin syklodekstriinin ja sokerin

yhdistelmällä. Lisäksi tuotteiden väri ja aistinvaraiset ominaisuudet säilyivät hyvänä kahden kuukauden ajan.



Kuva 19. Tuotteiden valmistusta ja pakkaamista HPP-käsittelyyn. Alhaalla vasemmalla tuotteen käyttösoveltuvuudesta HPP:n jälkeen. (Kuvat: Jaana Kapustamäki, Jesse Ojala, Elina Välkky)

3.3 HPP:n vaikutukset mikrobiologiseen laatuun ja säilyvyyteen

Koska HPP ei tuhoa bakteereiden tai homesientien itiöitä eli niiden lepomuotoja, on syytä huolehtia, että HPP:hen menevät tuotteet ovat mikrobiologiseltaan laadultaan hyviä ja niissä noudatetaan kylmäketjua ennen käsittelyä, jotta tuotteeseen ei kulkeudu tai siinä olevat mikrobit eivät pääse tuottamaan itiöitä. Mikäli tuotteessa on itiöitä, ne voivat korkeapainekäsittelyn jälkeen aktivoitua säilytyksen aikana ja tuottaa elomuotoisia (vegetatiivisia) mikrobeja. Elintarvikkeissa esiintyviä itiöiviä bakteereja ovat mm. *Clostridium*- ja *Bacillus* -sukujen bakteerit ja itiöiviä homeita *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Mucor* ja *Rhizopus* -sukujen edustajat. Itiöivät bakteerit ja homeet ovat tyypillisiä kasviperäisissä tuotteissa, sillä itiöiviä mikrobeja on luonnostaan maaperässä ja mullassa.

Tuotteen alhainen pH sekä korkeat sokeri- ja suolapitoisuudet estävät mahdollisten itiöiden aktivoitumista ja kasvua, joten tästä syystä HPP on turvallisempi yhdistettynä näihin ominaisuuksiin. Tuotteille, joiden pH on puolestaan korkea tai joissa on alhainen sokeri- tai suolapitoisuus, HPP:ta voidaan hyödyntää yhdistettynä esimerkiksi lämpökäsittelyyn. Esimerkiksi kasvis- ja marjatuotteet, joissa voi olla luontaisesti paljon itiöitä, voidaan lämpökäsitellä ennen lisäämistä tuotteeseen ja valmis tuote käsitellään pakkauksineen HPP:ssä, mikä viimeistelee mikrobien tuhoutumisen valmiissa tuotteessa.

HPP:n vaikutusta tuotteiden mikrobiologiseen laatuun ja säilyvyyteen testattiin hankkeessa erilaisilla tuoteaihoilla. Mukana oli monenlaisia marjatuotteita (soseet, smoothiet, mehut, mousset), erilaisilla nestemäisillä kasvipohjaisilla tuotteilla, maitopohjaisilla tuotteilla, raa`alla, raakakypsytyllä ja kypsennetyllä kalatuotteella, sous vide -lihatuotteella. Testeissä tarkasteltiin HPP:n välitöntä vaikutusta tuotteen mikrobiologiseen laatuun ja seurattiin mikrobiologisen laadun säilymistä arvioidun tai toivotun säilymisajan mukaan.

Peston säilyvyytutkimuksesta julkaistiin tieteellinen tutkimusartikkeli (Shad ym. 2024). Tutkimuksessa selvitettiin, miten HPP toimii runsasöljyisessä pestossa ja vaikuttaako öljypitoisuus (34 tai 54 %) bakteerien selviytymiseen. Pestoihin lisättiin suuret määrät *Listeria monocytogenes*- ja *Salmonella Typhimurium* -bakteereja. Pesto käsiteltiin joko HPP-menetelmällä (600 MPa, 4 min), lämpökäsittelyllä (82 °C, 5 min) tai jätettiin käsittelemättä, ja tuotteita seurattiin 60 päivän ajan jääkaappilämpötilassa. Tulokset osoittivat, että HPP vähensi bakteerien määrää selvästi tehokkaammin kuin lämpökäsittely (Kuva 20). Lisäksi pestosta löytyneet luontaiset terpeeniyhdisteet, kuten L-linalooli, eugenoli ja 1,8-sineoli, näyttivät tukevan mikrobien hallintaa. Öljypitoisuudella ei ollut vaikutusta bakteerien määrään, eikä käsittely aiheuttanut öljyn laadun heikkenemistä; kaikki näytteet pysyivät

kemiallisesti hyvälaatuisina. Tutkimuksen perusteella HPP todettiin sopivaksi menetelmäksi runsasöljyisen peston säilyvyyden ja turvallisuuden parantamiseen.



Kuva 20. Salmonella-viljelyt pestonäytteistä (1:1000-laimennos), joihin tarkoituksella lisätty salmonellaa. Vasemmalla käsittelemätön, keskellä lämpökäsittely (82 °C, 5 min ja vasemmalla HPP-käsittely (600 MPa, 4 min). (Kuvat: Ehsan Shad)

Kaikissa ELTUVA-hankkeen testeissä HPP paransi tuotteiden mikrobiologista laatua, lukuun ottamatta sous vide -kypsennettyä lihaa ja raakakypsennettyä kalaa, joiden mikrobiologinen laatu oli erinomainen myös ilman HPP:ta. Liha oli lämpökypsennetty pakkauksessaan ennen HPP:ta, ja raakakypsytetyn kalan suolapitoisuus oli varsin korkea (9 %). Suurimmasta osasta tuotteita havaittiin mikrobeja ennen HPP-käsittelyä, mutta ei välittömästi HPP-käsittelyn jälkeen. Poikkeuksena olivat moussemaiset marjatuotteet, joiden rakenteessa on paljon ilmaa. Niissä kokonaisbakteerimäärä oli hyväksyttävä, mutta lievästi koholla jo heti HPP-prosessin jälkeen. Tämä ei kuitenkaan muuttunut kahdeksan kuukauden säilytyksen aikana, vaan tuote säilyi mikrobiologiselta laadultaan hyvänä. Moussejen pH oli alle 3,8.

Useimpien tuotteiden säilyvyysaika piteni HPP:n ansiosta verrattuna käsittelemättömään. Säilyvyysaika vaihteli tuotekohtaisesti, mutta joillakin tuotteista se oli yli vuoden. Tällöin tuotteissa saattoi kuitenkin esiintyä jo aistittavia muutoksia kuten värin tai maun haalistumista. Testeissä saatiin viitteitä siitä, että tuotteen alhainen pH ja säilöntäaineiden käyttö toivat lisäturvallisuutta HPP:n rinnalle.

4 Kylmäkuivaus

Kylmäkuivaus eli lyofilisaatio on menetelmä, jossa tuotteesta poistetaan vesi sublimoimalla. Sublimaatioissa jää muuttuu suoraan vesihöyryksi ilman välimuotoa nestemäisenä vetenä. Tämä mahdollistaa sen, että tuotteen rakenne, väri ja ravitsemukselliset ominaisuudet säilyvät huomattavasti paremmin kuin lämpökuivausmenetelmissä. Onnistuneesti kylmäkuivattu tuote muistuttaaakin ulkonäöltään ja rakenteeltaan tuoretta, mutta on huomattavasti kevyempi ja huokoisempi.

Kylmäkuivaus perustuu kahteen olosuhteeseen: alhaiseen lämpötilaan ja alhaiseen paineeseen. Kun nämä saavutetaan, jäätyneen tuotteen sisältämä vesi pystyy sublimoitumaan suoraan kiinteästä muodosta kaasuksi. Vaikka periaate on yksinkertainen, käytännön toteutus vaatii tarkkaa prosessinhallintaa ja tuotekohtaista optimointia.

Kylmäkuivauksen suurimpia haasteita on rakenteen säilyttäminen koko prosessin ajan. Sublimoituva vesihöyry on pystyttävä poistamaan tuotteesta hallitusti ilman, että se hajottaa rakenteita. Esimerkiksi marjojen ja hedelmien kuoret voivat toimia höyryä pidättävänä esteenä. Jos vesihöyry ei pääse poistumaan tasaisesti, kuoret voivat haljeta ja koko rakenne romahtaa. Tämän vuoksi kuivausparametrit – lämpötila, paine ja vaiheiden kesto on suunniteltava ja testattava tuotekohtaisesti.

Vaikka kylmäkuivauslaitteiston toiminta on teknisesti yksinkertainen, jokainen tuote vaatii erillisen prosessinsuunnittelun. Raaka-aineiden vesipitoisuus, solurakenne, kuori, sokeri- ja happopitoisuus sekä kappalekoko vaikuttavat siihen, millaisia jäätymis- ja kuivausvaiheita tarvitaan. Tämän vuoksi kylmäkuivaus edellyttää usein tuotekehitystä, jossa optimoidaan prosessin kesto, energiankulutus ja lopputuotteen laatu.

Onnistunut kylmäkuivattu tuote on kevyt, huokoinen ja rakenteeltaan hyvin säilynyt. Sen vedenaktiivisuus on hyvin alhainen, joten se ei ole otollinen kasvualusta mikrobeille ja säilyykin hyvin ilman kylmäsäilytystä. Kylmäkuivatut tuotteet on useimmiten mahdollista myös rehydratoida eli ennallistaa lähes alkuperäiseen muotoonsa palauttamalla niihin vesi. Nämä ominaisuudet tekevät kylmäkuivauksesta erityisen arvokkaan pitkää säilyvyyttä vaativissa tuotteissa, kuten retkiruoat tai huoltovarmat elintarvikkeet.

Kylmäkuivausprosessi voidaan jakaa seuraaviin vaiheisiin:

- esikäsitteilyt ja pakastus
- kuivaus: sublimaatio + jälkikuivaus
- jälkikäsitteilyt
- pakkaaminen ja laadunvarmistus.

Onnistunut lopputulos yleensä vaatii, että kaikki vaiheet on suunniteltu ja optimoitu tuotekohtaisesti. ELTUVAn hanke teetti oppaan asioista, jotka olisi huomioitava laadukkaassa pakastekuivauksessa (Helanto 2026). Opas on luettavissa tämän raportin liitteenä 1.

4.1 Esikäsitteilyt ja pakastus

Esikäsitteilyvaiheet pitkälti ratkaisevat kylmäkuivauksen lopputuloksen, sillä kuivauksessa tuotteesta poistetaan enää ainoastaan vesi. Onnistuneesti kuivattu tuote vastaa siis ulkonäöltään pitkälle sitä, mitä se on ollut kuivaukseen laitettaessa. Toisin sanoen kylmäkuivattavien tuotteiden on oltava laadultaan erinomaisia, mikäli tätä toivotaan kuivatulta tuotteelta. Esikäsitteilyt on aina suunniteltava lopputuotteen mukaisesti ja usein optimaaliset esikäsitteilyt vaativat etukäteistestausta.

Pakastus

Laadukas kylmäkuivaus perustuu onnistuneeseen pakastukseen. Tuote on jäähdytettävä nopeasti ja riittävän matalaan lämpötilaan, jotta muodostuvat jääkiteet pysyvät pieninä. Mikäli tuote ehtii sulaa ja jää kiteytyy uudelleen, syntyy suuria jääkiteitä, jotka rikkovat solurakenteita ja heikentävät valmiin tuotteen rakennetta. Pakastusvaiheen hallinta on siten edellytys onnistuneelle lopputulokselle.

Riittävä ja optimaalinen pakastus on tuotekohtaista, mutta se on keskeisin asia rakenteen säilyttämiseksi. Yleensä pakastuksen tulisi tapahtua nopeasti ja tehokkaasti, tyypillisesti alle -30 °C :ssa. Raaka-aineen tulisi myös pysyä irtonaisena pakastamisen aikana. IQF (individual quick freeze) tai vastaava sopii useimmille kylmäkuivaukseen tarkoitetuille tuotteille. Tehokas pakastaminen riittävän alhaisessa lämpötilassa johtaa pienempien jääkiteiden muodostumiseen. Jääkiteiden koolla on merkitystä erityisesti tuotteen rakenteen ehjänä säilymiseen kylmäkuivauksen aikana. Toisaalta, jos rakenteen säilyminen ei ole keskeistä, hitaammalla pakastusprosessilla on mahdollista saada suurempia jääkiteitä, joka voi tehostaa kylmäkuivausta, sillä solurakenteiden hajotessa vesi sublimoituu tehokkaammin.

Irtonaisena pakastetut tuotteet on helppo annostella kuivuriin (Kuva 21). Nestemäiset tuotteet voi puolestaan pakastaa ohuiksi levyiksi (Kuva 22).



Kuva 21. Tuotteiden esikäsittelyä ja pakastusta ennen kylmäkuivausta.
(Kuvat: Jaana Kapustamäki, Jesse Ojala)



Kuva 22. Nestemäiset tuotteet kuten juuresmehun voi pakastaa ja kylmäkuivata ohuina levyinä. (Kuvat: Kaisa Raninen)

Optimaalisinta olisi, jos pakastus ja tuotteen varastointi voitaisiin tehdä samoissa tiloissa kylmäkuivauksen kanssa, jolloin vältettäisiin tuotteiden kuljettelu eri olosuhteissa. Pakasteiden kuljetus ja siirtäminen kylmäkuivuriin tulee tehdä niin, että tuotteet eivät pääse lämpenemään ja sulamaan välillä.

Tuotteita voidaan pakastaa myös muotteihin (Kuva 23). Muotteja kannattaa hyödyntää erityisesti tuotteiden esipakastuksessa, kun tuote on rakenteeltaan pehmeä, kerroksellinen, nestepitoinen tai muotoaan helposti menettävä. Esipakastus muotissa auttaa säilyttämään tuotteen ulkomuodon ja estää massaa leviämästä tai muuttamasta muotoaan ennen varsinaista pakastekuivausprosessia. Muotti vakauttaa rakennetta jäätymisen aikana, jolloin jääkiteiden muodostuminen tapahtuu tasaisemmin ja tuote pysyy suunnitellussa muodossaan. Tämä on erityisen hyödyllistä esimerkiksi mousse ja hyydyketyyppisille tuotteille, kerroksellisille jälkiruoille, rahka ja vanukasrakenteille sekä tuotteille, joiden ulkonäkö ja toistettavuus ovat tärkeitä. Muotin käyttö esipakastuksessa tekee tuotteiden käsittelystä helpompaa, vähentää rikkoutumisriskiä ja varmistaa, että tuote siirtyy kuivausvaiheeseen tasarakenteisena ja rakenteellisesti vakaana, mikä tukee tasalaatuisen lopputuotteen saavuttamista.



Kuva 23. Muottien käyttö moussemaisen tuotteen esipakastuksessa. Kuvissa tuote muottiin laitettuna, pakastettuna ja kylmäkuivattuna. (Kuvat: Jaana Kapustamäki)

Fysikaaliset käsittelyt

Lopputuotteen käyttötarkoituksen mukaan raaka-aineelle voi olla tarpeen tehdä fysikaalisia esikäsittelyitä. Fyysisiä käsittelyitä ovat esimerkiksi pilkkominen, soseutus, pinnan rei'itys tai konsentrointi. Fysikaalisia käsittelyjä ovat muun muassa kuumavesikäsitely, osmoottinen käsittely sokeriliuoksessa tai pH:n säätö.

Rakenteen säilymisen kannalta haastavia kuivattavia ovat kokonaiset marjat. Kuivauksen onnistumiseen vaikuttavat olennaisesti marjan kuoren paksuus ja vahamaisuus sekä marjan malon eli hedelmälihan koostumus. Marjat, joiden vesi on sidottuna solurakenteisiin ja joilla on korkea sokeripitoisuus (esim. vadelma) kuivuvat tasaisemmin säilyttäen paremmin muotonsa. Sen sijaan marjat, joissa on ohut (esim. tyrni) tai pehmeä ja geelimäinen malto (esim. hunajamarja), menettävät herkästi muotonsa veden poistuessa. Tyrnillä kuivumishaastetta voi aiheuttaa myös sen korkea öljypitoisuus (Zhang ym. 2023). Kokonaisena kuivattavien marjojen tulisi olla mahdollisimman tasalaatuisia ja kokoisia. Tämä mahdollistaa, että valitut olosuhteet ovat optimaaliset koko tuote-erälle. Hankkeessa kuivattiin onnistuneesti muun muassa hyvälaatuisia kokonaisia mansikoita ja vadelmia (Kuva 24).



Kuva 24. Kylmäkuivattuja mansikoita ja vadelmia eri muodoissa.
(Kuvat: Ida Tikkanen ja Kaisa Raninen)

Paksu- ja vahakuoriset marjat hyötyvät pinnan rakenteen rikkomisesta, joko reiättämällä tai ryöppäämällä kuumassa vedessä (Kuva 25). Pinnan rakenteen rikkominen tehostaa veden haihtumista tuotteen sisältä, joka puolestaan tehostaa kuivumista ja rakenteen kassassa pysymistä.



Kuva 25. Kylmäkuivattuja mustikoita ilman ryöppäystä (vasemmalla) ja ryöppätynä (keskellä ja oikealla). (Kuvat: Jesse Ojala)

Juuresten, kiinteiden hedelmien ja esimerkiksi mansikan, tapauksessa esikäsittely voi olla kuutiointi tai viipalointi, pienemmät, esimerkiksi mustikat, soveltuvat rouhimiseen, paseeraukseen tai soseutukseen. Kosteilla tuotteilla, kuten mansikalla, viipalointi tai kuutiointi on tehtävä kohmeisena. Mikäli tavoitteena on jauhemainen tuote, esikäsittelyn tarkoituksena on hajottaa tuotteen rakenne mahdollisimman tehokkaasti. Jauhaminen onnistuu kylmäkuivatuille tuotteille kuitenkin yleensä paremmin kuivauksen jälkeen, jolloin rakenne on hauras. Esikäsittelyvaiheessa hienontaminen voi aktivoida entsyymitoimintaa, mikä saattaa näkyä muun muassa värimuutoksena (Kuvat 26 ja 27). Mikäli halutaan siemenetön jauhe, voi soseutetun massan paseerata ennen kuivausta. Toisaalta siemenet voidaan myös jauhaa kuivattuna ja siivilöidä tarvittaessa kuivauksen jälkeen.



Kuva 26. Maa-artisokkajauheita (oikea yläkulma), jotka valmistettu kylmäkuivatusta soseesta (vasemmalla), kuutiosta (keskellä) tai lastusta (oikea alakulma). Soseesta valmistettu jauhe oli sävyltään hieman tummempi (oikea ylhäällä), mikä näkyi tuotteista jo ennen pakastamista. (Kuvat: Kaisa Raninen)



Kuva 27. Mansikkajauheita eri tavoin käsitellyistä kylmäkuivatusta mansikoista. Vaaleimmat jauheet (keskellä) hieman raaoista mansikoista, tummimmat (yläreunassa) pitkään kotipakastimessa olleista mansikoista. (Kuva: Kaisa Raninen)

Omenien kylmäkuivauksessa rakenne säilyy eri tavalla pilkotuissa tuotteissa hyvin, mutta haasteena on hedelmälihan entsyymaattinen tummuminen jo esikäsittelyvaiheessa (Kuva 28). Tätä pyrittiin estämään erilaisilla käsittelyillä.



Kuva 28. Omenoiden esikäsittelyä ennen kylmäkuivausta. (Kuvat: Jaana Kapustamäki)

Sokeriliuos ja sitruunahappoliuos vaikuttivat selvästi lopputuotteen väriin, rakenteeseen, makuun ja rehydraatioon (Kuva 29). Sokeriliuoksessa liottaminen makeutti omenaa ja tasoitti väriä, mutta tiivisti solurakennetta, mikä hidasti veden imeytymistä myöhemmin ja myös pidensi kuivumista, koska osmoottinen vaikutus jätti tuotteeseen enemmän sidottua kosteutta.

Sitruunahappokäsittely taas ehkäisi tummumista ja säilytti rakenteen, ja lyhensi kuivausaikaa, sillä happokäsittelyissä näytteissä kosteuden poistuminen oli tehokkaampaa ja niiden kuivumisaika jäi lyhyemmäksi kuin käsittelemättömillä tai muilla esikäsittelyillä.

Muodoltaan viipaleet kuivuivat tasaisemmin kuin kuutiot, mutta esikäsittelyjen vaikutusten suunnat olivat samat: sokeriliuos hidasti ja sitruunahappo nopeutti kuivumista. Kokonaisuutena sitruunahappo tuotti vaalean, rakenteeltaan tasaisen ja nopeammin kuivuvan

lopputuotteen, kun taas sokeriliuos toi makeutta mutta hidasti sekä kuivausta että myöhempää rehydraatiota.



Kuva 29. Kylmäkuivattuja omenoita eri esikäsittelyillä. Vasemmalla sitruunahappo-, keskeällä sokeriliemikäsitelty ja oikealla käsittelemätön (Kuva: Jaana Kapustamäki)

Emulgointi- ja stabilointiaineiden vaikutus kylmäkuivattujen tuotteiden rakenteeseen

Testasimme erilaisten emulgointi- ja stabilointiaineiden vaikutusta kylmäkuivattujen tuotteiden rakenteeseen. Testejä tehtiin jäätelöllä, marjavaahdolla sekä erilaisilla sorbeteilla. Tuotteet sisälsivät erilaisia seoksia mm. agar agaria, karrageenia, guarkumia, karboksyyli-*limetyyliselluloosaa*, *alfasyklodekstriiniä* ja emulgointiaineita kuten kananmunaa, rasvahappojen mono- ja diglyseridejä ja lesitiiniä.

Huomasimme, että varsinkin vaahtomaisista tuotteista tulee hyvin hauraita ja vaikeasti käsiteltäviä ilman stabilointiaineita. Emulgointi- ja stabilointiaineet vaikuttavat kylmäkuivattujen tuotteiden rakenteeseen muuttamalla jäätyksen aikana muodostuvien jääkiteiden kokoa, tuotteen viskositeettia sekä kuivatun rakenteen mekaanista kestävyyttä. Stabilointiaineiden käyttö johti pääasiassa tasaisempaan ja hienojakoisempaan huokosrakenteeseen sekä vähensi rakenteen romahtamista kuivauksen aikana.

Emulgointiaineet, kuten lesitiini sekä mono- ja diglyseridit, vaikuttavat erityisesti rasvaa sisältävissä tuotteissa stabiloimalla rasvapisaroida ja parantamalla rasvan jakautumista kuivatusmatriisissa. Tämä parantaa lopputuotteen rakennetta ja rehydraatio-ominaisuuksia.

Lisäaineiden käyttö vaikuttaa myös huokoisuuteen ja veden imeytymiseen. Kohtuulliset pitoisuudet parantavat rakenteen vakautta ja muodon säilymistä, mutta liian suuret määrät voivat tehdä rakenteesta liian tiiviin, mikä voi heikentää rehydraatiota.

Tuotekehityksessä lisäaineiden määrää onkin optimoitava, jotta saavutetaan hyvä rakenteellinen kestävyys, huokoisuus ja rehydraatio.

Lihan valinta, esikypsennys ja marinointi kylmäkuivauksessa

Lihojen kylmäkuivaustesteissä havaitsimme, että onnistuneen lopputuotteen kannalta keskeistä on valita raaka-aineeksi vähärasvainen ja tasarakenteinen liha. Vähärasvainen liha kuivuu tasaisemmin, sillä niissä rasva ei estä veden poistumista tuotteesta. Rasvaisemmillä lihoilla myös säilyvyysaika voi jäädä rasvan hapettumisen eli härskiintymisen takia lyhyemmäksi. Rasvan hapettumista voidaan hidastaa muun muassa käyttämällä hapeta läpäisemätöntä pakkausta, suojakaasuja ja hapenpoistajia.

Ennen kylmäkuivausta tehtävä esikypsennys parantaa tuotteen laatua monella tasolla. Kypsennys lisää elintarviketurvallisuutta tuhoamalla mahdollisia patogeeneja sekä vähentämällä tuotteen mikrobikuormaa ennen kuivausvaihetta. Lisäksi lämpökäsittely tasaa rakennetta, tiivistää proteiineja ja vahvistaa makuprofiilia esimerkiksi Maillard-reaktioiden kautta. Käytännön etuna on myös se, että esikypsennetty liha voidaan rehydroinnin jälkeen käyttää suoraan ilman lisäkypsennystä.

Marinointi osoittautui toimivaksi menetelmäksi maun ja rakenteen parantamiseen. Marinadin tulee kuitenkin olla selvästi vähärasvainen, jotta se ei heikennä kuivumista tai tuotteen säilyvyyttä. Suola edistää maun imeytymistä ja tukee osaltaan säilyvyyttä. Marinointi tehdään yleensä ennen kypsennystä, koska tällöin mausteet ehtivät imeytyä tehokkaammin lihaskudokseen.

Testeissä käytimme paistia ja filettä, jotka marinoitiin (olut-, siideri- ja soijamarinadi) ja kypsennettiin lämminsavustimessa. Tämän jälkeen liha viipaloitiin ja esipakastettiin ennen kylmäkuivausta. Menetelmä tuotti tasalaatuisen ja hyvin rehydroituvan lopputuotteen, mikä vahvistaa vähärasvaisen ja esikypsennetyn lihan soveltuvuuden kylmäkuivaukseen.

4.2 Kuivausvaiheet: sublimaatio + jälkikuivaus

Kylmäkuivauksessa varsinainen kuivaus tapahtuu kahdessa vaiheessa. Primaarisessa kuivausvaiheessa tuotteesta sublimoituu siinä vapaana oleva vesi (n. 90–95 % vedestä) ja

sekundaarisessa kuivausvaiheessa desorptoituu tuotteeseen adsorboitunut vesi (n. 5–10 %).

Sublimaatioissa eli primaarisessa kuivausvaiheessa tuotteen sisältämä jäätyneet vesi sublimoituu alipaineen vaikutuksesta vesihöyryksi, joka tiivistyy edelleen kylmemmälle pinnalle kylmäkuivurin kylmäloukkuun. Sublimaatiovaihe on pitkä, tyypillisesti 1–3 vuorokautta. Sublimaatiota tehostetaan lämmittämällä kuivaushyllyjä (Kuva 30) ja esikäsittelemällä tuotteita huokoisemmaksi. Sopiva hyllylämpötila ja sublimaatioaika on testattava tuote- ja kuivurikohtaisesti. Tyypillinen sublimaatiovaiheen lämpötila on 20–40 °C. Myös kuivattavien tuotteiden määrä, kappaleiden koko ja muoto, sekä esikäsitteletyt vaikuttavat. Siksi suositeltavia kuivausparametrejä on haastavaa määritellä.

Jälkikuivauksessa eli sekundaarisessa kuivausvaiheessa nostetaan kuivaushyllyjen lämpötilaa yleensä parikymmentä astetta sublimaatiovaiheen hyllylämpötilasta vesimolekyylien ja muun materiaalin välisten kemiallisten sidosten katkaisemiseksi. Jälkikuivaus vähentää tuotteen hygroskooppisuutta eli alttiutta kosteuden imeytymiselle kuivauksen jälkeen. Toisaalta korkeampi lämpötila tai liian nopea lämpötilan nousu voi joissain tuotteissa aiheuttaa laadullisia muutoksia.

Useimmissa teollisissa kylmäkuivausprosesseissa tuotteen kosteus pyritään saamaan mahdollisimman alhaiseksi. Kuivausprosessin etenemistä voidaan seurata hyllykohtaisilla antureilla ja tekoälypohjaisilla ohjelmistoilla optimoiden kuivauslaatu. Tällöin hyllylämpötilaa on usein myös mahdollista nostaa hitaasti porrastaen. Kotikäyttöön soveltuvilla pienemmillä ja edullisemman hintaluokan kylmäkuivureilla sopivat kuivausparametrit on testattava. ELTUVA-hankkeen testit tehtiin Itä-Suomen yliopistolla ja Kehitysyhtiö Savogrow:lla Leosmakin kylmäkuivureilla, joissa on mahdollista asettaa hyllylämpötila ja kuivausvaiheen kesto kahdessa vaiheessa, mutta automaattinen lämpötilan porrastaminen ei ole mahdollista. Testeissä havaittiin, että kuivaustuloksissa oli toisinaan eroa hyllyjen välillä. Myös samalla laitteella kuivatussa tuotteessa saattoi esiintyä eroja loppukosteuden suhteen riippuen mm. käytetystä kuivaushyllystä tai näytteen sijainnista hyllyllä, joten myöskään lämpötilan säätö ei ole edullisimmissa laitteissa välttämättä kovin tarkka. Kylmäkuivauslaitteissa saattaa siis olla eroa kuivaustehokkuudessa. Kylmäkuivauslaitteissa olisi laadun tasaisuuden varmistamiseksi tärkeää voida mitata ja säätää prosessiolosuhteita mahdollisimman tarkasti. Toisaalta pienet ja kompaktit kylmäkuivurit ovat varsin helppokäyttöisiä, soveltuvat hyvin pienempien erien kuivaamiseen, ja mahdollistavat laitteiden hankinnan myös pienemmän budjetin toimijoille.

Hyvin kuivaksi kuivattujen tuotteiden rakenne on rapea ja herkästi särkyvä. Tällaisten tuotteiden pakkaaminen ja kuljettaminen ehjänä voi olla haasteellista. Tietyt tuotteet esim. marjat voivat myös takertua suuhun niitä syötäessä. Tietyn kosteuspitoisuuden ylittyessä tuotteen rakenne pehmenee, jolloin se ei ole niin hauras tai suuhun takertuva. Tämän vuoksi joidenkin tuotteiden kohdalla hieman korkeampi kosteuspitoisuus voi olla toivottavaa. Optimaalinen tuotteen kosteus on suunniteltava ja testattava tuotekohtaisesti.



Kuva 30. Kylmäkuivauksessa tuotteet asetellaan kuivuriin tarjottimilla, jotka sijoitetaan kuivaushyllyille. Vasemmalla Harvest Right:n kuivuri Kajaanissa Kainuun ammattiopistolla ja oikealla Leosmakin kuivuri Itä-Suomen yliopistolla Kuopiossa. (Kuvat: Kaisa Rani-

Kokonaisten mansikoiden kylmäkuivaus

Kokonaiset mansikat käyttäytyivät kylmäkuivauksessa eri tavoin, koska yksittäisten marjojen koko, rakenne, sisäinen kosteus ja lämpötilakäyttäytyminen vaihtelivat. Samaan kuivauserään on siksi tärkeää valita mahdollisimman tasakokoisia ja tasalaatuisesti jäätyneitä marjoja, jotta kuivuminen etenee yhtenäisesti.

Osalla mansikoista rakenne romahti, kun todennäköisesti niiden sisälämpötila nousi yli marjan kriittisen lämpötilan, jolloin jäätynyt tukirakenne pehmeni ja menetti

kantokykynsä. Suuret tai tiiviit mansikat kuivuvat taas huomattavasti hitaammin, jolloin kuivaus saattoi jäädä kesken, mikä havaittiin kylmänä ja kosteana sisuksena kuivauksen jälkeen. Tätä ei välttämättä huomaa heti kuivauksen jälkeen, jos marjojen pinta vaikuttaa kuivalta. Tämän vuoksi kuivaustulos on varmistettava esim. mittaamalla tuotteiden jää-nöskosteus tai tarkastelemalla nimenomaan suurimpia kuivaustuotteita tarkemmin.

Osalla marjoista kosteus ei poistunut tasaisesti siksi, että pintaan muodostui kuiva kerros, joka toimi esteenä sisäosan kosteuden poistumiselle. Tämä ilmiö liittyy tuotteen pinnan kuivumiseen liian nopeasti suhteessa sisäosiin, jolloin muodostuva kuori hidastaa kosteuden siirtymistä ja voi johtaa sisäiseen kosteuden kertymiseen ja epätäydelliseen kuivumiseen. Runsaasti sokeria sisältävät marjat ovat erityisen alttiita tälle, sillä sokerit voivat tehdä pinnasta tahmean ja hygroskooppisen, mikä edelleen estää kosteuden poistumista tehokkaasti.

Parhaiten onnistuivat marjat, jotka olivat sopivan kokoisia, tasaisesti jäätyneitä ja rakenteeltaan vahvoja, jolloin kuivaus eteni ilman sisäisen kosteuden kertymistä tai rakenteen pettämistä (Kuva 31).



Kuva 31. Koolla on kylmäkuivauksessa väliä. Epätasalaatuisten (ylhäällä) ja tasalaatuisten mansikoiden kuivaustulos (alhaalla). (Kuvat: Elina Välkky)

4.3 Jälkikäsittelyt

Kylmäkuivatut tuotteet ovat yleensä huokoisia ja hauraita, joten niitä on käsiteltävä varoen, mikäli rakenne halutaan säilyttää ehjänä. Lisäksi ne absorboivat herkästi itseensä huoneilman kosteutta, joten jälkikäsittelyvaiheet ja pakkaaminen on tehtävä nopeasti ja mielellään kuivassa tilassa. Näissä asioissa on kuitenkin suuri ero erilaisten tuotteiden välillä.

Kylmäkuivatut tuotteet voi jauhaa jauheeksi jauhatuskoneella (Kuva 32). Jauhatukseen on olemassa erikseen kuiville tuotteille tarkoitettuja jauhatusmyllyjä. Olennaista myllyssä on sen puhdistettavuus. Hienojakoinen jauhatuspöly pääsee herkästi myllyn pie-niin rakosiin, joista se voi olla haastavaa puhdistaa ilman huuhtelua. Kuiva hienojakoi-nen jauhe pölisee myös herkästi, joten sen käsittelyssä on suositeltavaa käyttää hengi-tyssuojainta.



Kuva 32. Mansikkajauheen valmistus. Kylmäkuivatut mansikkakuutiot jauhettiin, siivilöitiin tasalaatuiseksi ja pakattiin. (Kuvat: Kaisa Raninen)

4.4 Pakkaaminen ja laadunvarmistus

Kylmäkuivatuille tuotteille tärkeää on tehokas pakkausprosessi (Kuva 33). Pakkaustilan kosteuden hallinnalla voidaan päästä laadukkaampaan lopputulokseen. Testeissä havaittiin, että erityisesti raaka-aineet, joissa oli korkea sokeripitoisuus, kuten kuivattu mahla tai marjajauheet, alkoivat adsorboimaan hyvin nopeasti huoneilman kosteutta. Tämä näkyi tuotteiden kovettumisena ja irtonaisen rakenteen menettämisenä. Esimerkiksi kylmäkuivattu mansikkajauhe absorboi kosteutta itseensä huomattavasti voimakkaammin kuin maa-artisokkajauhe.

Hygroσκοoppisuuden eli vedensitomiskykyyn vaikuttaa moni muukin tekijä kuin sokeripitoisuus. Esimerkiksi orgaaniset hapot, proteiinien sisältämät hydrofiiliset aminohapot ja mineraalit (suolat) sitovat herkästi itseensä vettä. Myös raaka-aineen huokoisuus ja jauhamisen seurauksena lisääntynyt pinta-ala edistävät kosteuden imeytymistä.



Kuva 33. Kylmäkuivattujen tuotteiden jauhamista, laadunvarmistusta ja pakkaamista.
(Kuvat: Elina Vätkky)

Kylmäkuivattujen tuotteiden pakkaustesti

Hankkeessa testattiin eri pakkausmateriaalien toimivuutta mansikkajauheella, joka on herkkä imemään ympäristön kosteutta itseensä. Pakkausten toimivuutta seurattiin mittaamalla pakkausten paino ja sisällön kosteuspitoisuus säännöllisin väliajoin viiden kuukauden ajan.

Testeissä käytimme pääasiassa uudelleensuljettavia, kuumasinetöitäviä doystack-pusseja (Kuvat 34 ja 35). Kuumasinetöitävä pakkaus ei ainoastaan paranna kuluttajaturvallisuutta, vaan myös tehostaa kylmäkuivattujen tuotteiden kosteuden- ja hapensietoa, pidentää säilyvyyttä ja ylläpitää aromien laatua. Lisäksi se vähentää pölyvuotoja, parantaa pakkausten käsittelyvarmuutta ja tukee tuotantolinjan tehokasta toimintaa.



Kuva 34. Kylmäkuivattujen tuotteiden pakkaustestausta. Kuvissa erilaisia pakkauksia, kuumasaumain sekä pakkauksiin laitettavia kosteuden ja hapenpoistajia. (Kuvat: Jaana Kapustamäki)

Osassa testejä käytimme tyhjiopakattuja lasipurkkeja, koska ne soveltuvat myös hyvin kylmäkuivatuille tuotteille, tarjoten vahvan hapen- ja kosteudeneristykseen sekä vakaan säilyvyyden, mutta koska lasi läpäisee valoa ja on altis rikkoutumiselle, tuotteet tulee suojata valolta vyötteillä tai muilla pintaratkaisuilla ja käsitellä varoen. Osaa pakkauksista verrattiin kosteudenpoistajalla ja ilman, osaa vakuamalla ja ilman (taulukko 8).

Taulukko 8. Testattujen pakkausten toimittaja, laatu, materiaalin paksuus ja testatut kappalemäärät kustakin pakkaustyypistä.

Toimittaja	Laatu	Materiaalin paksuus*	Testattujen pakkausten määrät (kpl)			
			1. testi	2. testi	1. testi (kosteudenpoistajilla)	1. testi (vakuumissa)
PAKKA.FI	PET/ALU/PE	PET 12/ALU 8/PE 80	6			
NAPAKKA	PAP/PET/PP	KP 50/PET 12/PP 60	4	3	3	3
NAPAKKA	PAP/ALU/RUSK	KP 50/AL 7/PE 60	5	3		3
NAPAKKA	PAPERI/PLA	valmistus lopetettu, ei tietoja	5			
JOUCO	PET/ALU/PE	PET 12/ALU 8/PE 75	5			
JOUCO	PAP/PETMET/PE	valmistus lopetettu, ei tietoja	5			
NAPAKKA	PP/PP	OPP 40/PP 25	3		3	
JOUCO	PET/PE	valmistus lopetettu, ei tietoja	5			3
-	Lasipurkki		4			

*KP50 = paksuus 50 g/m², Muovilaadun perässä oleva numero = paksuus mikroneissa eli mikrometreinä.



Kuva 35. Testatut doypack-pakkaukset. Pusseissa lukee niiden saamaamiseen käytetty lämpötila ja aika, PET/PE-pussista se puuttuu, sen saamaislämpö ja -aika oli 120 C°, 5 s. (Kuva: Jesse Ojala)

Tuotteiden laatu kosteuden suhteen säilyi parhaiten alumiinikerroksen sisältävissä pusseissa sekä vakumoidussa lasipurkissa. Taulukossa 9 on esitetty kosteuspitoisuuksien ja painon muutokset testatuista pakkauksista seurannan ajalta järjestyksessä alimmasta korkeimpaan painon muutoksen suhteen. Toisin sanoen, mitä ylempänä pakkaus on taulukossa, sitä paremmin se menestyi testissä.

Parhaiten tuotteen rakenne säilyi kaikissa alumiinikerroksen sisältävissä pakkauksissa sekä lasipurkissa. Myös metalloitu PET toimi teknisesti kohtuullisesti. Heikoimmin testissä pärjäsivät pakkaukset, joissa ei ollut alumiini- tai metalloitua materiaalia. Biohajoava PLA-muovia sisältänyt pakkaus säilytti tuotteen ominaisuudet huonoiten. Pakkaus päästi mansikan aromin läpi viikon säilytyksen jälkeen. Vastaavaa ei huomattu muissa pakkauksissa.

Taulukko 9. Testattujen pakkausten toimittaja, laatu, materiaalin paksuus ja kappalemäärät kustakin pakkaustyypistä.

Toimittaja	Laatu	Painon muutos (g), ka	Kosteus %, ka
NAPAKKA	PAP/ALU/RUSK	-0,02	1,0
JOUCO	PET/ALU/PE	0,00	1,0
PAKKA.FI	PET/ALU/PE	0,01	1,1
JOUCO	PAP/PETMET/PE	0,02	1,6
NAPAKKA	PP/PP	0,11	2,7
-	Lasipurkki	0,14	1,1
JOUCO	PET/PE	0,21	3,2
NAPAKKA	PAP/PET/PP	0,22	3,4
NAPAKKA	PAPERI/PLA	0,46	3,8

Osassa pakkauksista mansikkajauhe paakkuuntui ja kovettui. Nopeimmin muutokset havaittiin PLA-pakkauksessa jo viikon jälkeen. Pap/PET/PP- ja PET/PE-pakkauksissa paakkuuntumista ilmeni noin kuukauden kohdalla, ja niissä mitattiin myös suurin kosteuden nousu. Vakuumointi ei parantanut näiden pakkausten toimivuutta, vaan lisäsi paakkuuntumista. Kosteudenpoistajat vähensivät jonkin verran kovettumista, mutta eivät estäneet sitä.

PP/PP-pakkaus säilytti rakenteen hyvänä noin kolme kuukautta, minkä jälkeen paakkuuntumista alkoi esiintyä. Kosteudenpoistajilla oli vain vähäinen vaikutus.

PET/ALU/PE ja PAP/ALU/RUSK-pakkaukset säilyttivät sekä kosteuden että rakenteen hyvänä koko viiden kuukauden ajan ilman vakuumointia. Yhdessä kolmesta vakumoidusta PAP/ALU/RUSK-pakkauksessa rakenne oli paakkuuntunut.

Viiden kuukauden säilytyksen jälkeen tehtiin aistinvarainen arviointi kaikille pakkauksille. Aistinvaraisesti PAP/PETMET/PE-pakkaus toimi huonoiten. Sen jäljellä olevista pakkauksista havaittiin maiston yhteydessä muovista hajua ja makua. On mahdollista, että pakkauksen saumaustemperatuurin tai aika, olivat väärät, joka aiheutti materiaalin heikkene- mistä.

Maut olivat miedontuneet kaikissa ilman metallikerrosta olevissa pakkauksissa. Vakuumointi ja kosteudenpoistajat auttoivat maun säilymisessä, mutta nekään eivät yksin riitä kompensoimaan heikkoa pakkausmateriaalia.

Testissä kaikki alumiinikerroksen sisältäneet pakkaukset toimivat aistinvaraisen laadun säilyttämiseen hyvin viiden kuukauden testin aikana. Alumiinikerroksen puuttumista ei voida korvata vakuumoinnilla tai kosteudenpoistajilla. Vakuumointi tai kosteudenpoistajien käyttö alumiinikerroksen sisältävissä pakkauksissa voi parantaa aistinvaraisen laadun säilymistä. On kuitenkin mahdollista, että vakuumointi tehostaa rakenteen paakkuuntumista myös alumiinikerroksen sisältävissä pakkauksissa. Vakumoitu lasipurkki säilyttää kosteuden hyvänä, mutta aistinvaraisesti laatu ei säily yhtä hyvänä alumiinipakkauksiin verrattuna. Kosteudenpoistajilla voidaan mahdollisesti parantaa lasipakkauksenkin toimivuutta.

Lopuksi, jos halutaan pakkauksen ulkonäöltä muuta kuin alumiinipintaa, niin toimivalta vaihtoehdolta vaikuttaa alumiinikerroksen sisältämä paperipinnoitettu pakkaus. Metalloitu PET-kerros voi myös toimia riittävänä barrierina pakkauksessa, vaikka aistinvaraisesti PAP/PETMET/PE-pakkaus ei tässä testissä toiminut. Olennaista pakkausta suunniteltaessa on testata sen toimivuus teknisen ja aistinvaraisen laadun säilyttämisen kannalta tapauskohtaisesti.

4.5 Markkinakartoitus kylmäkuivureista

Hankkeessa tehtiin markkinakartoitus elintarvikkeiden kylmäkuivureita tarjoavista toimijoista sekä kaksi hankintakilpailutusta (Itä-Suomen yliopisto ja SavoGrow) pienille tutkimus- ja tuotekehityspilotointiin soveltuville kylmäkuivureille. Pieniä kylmäkuivauslaitteita on saatavilla seuraavilta toimittajilta:

- Cryovit (Ukraina)
- Exeat d.o.o. (Slovenia)
- Frozen in Time Ltd (Englanti)
- FrostX Sp. z o.o. (Puola)
- Harvest Right (USA)
- Kalstein (Ranska)
- Leosmak Sp. z o.o. (Puola)
- ZIRBUS technology GmbH (Saksa)
- Wave (Itävalta), Suomessa edustus Nordic Freeze Dry Oy

Saatavilla olevien pienten laitteiden lastauskapasiteetit ovat 2–50 kg välillä. Hankintakilpailutuksen tuloksena Savogrown käyttöön hankittiin tuotekehityspilotointikäyttöön Leosmakin 10 kg:n lastauskapasiteetin kuivuri LEO-010. Itä-Suomen yliopistolle hankittiin tutkimus- ja opetuskäyttöön osaksi Foodnutri-tutkimusympäristöä Leosmakin vastaava, mutta pienempi LEO-004.

4.6 Kylmäkuivaustoimijat Suomessa

Suomessa kylmäkuivausala on kehittymässä tutkimusympäristöistä kohti teollista prosessointia, ja markkinoille on noussut kotimaisia toimijoita.

Nordic Freeze Dry Oy toimii Kiteen Puhoksella ja Tampereella. Yritys aloitti toimintansa vuonna 2022 ja tarjoaa tällä hetkellä kylmäkuivauspalvelua muutamien satojen kilojen viikkokapasiteetilla. Kylmäkuivauksen ohella se tekee rajatusti myös tuotteiden esikäsitelyä ja jälkikäsitelyä. Yrityksen pitkän aikavälin tavoitteena on kasvaa täyden palvelun teolliseksi kylmäkuivauslaitokseksi.

Frost Dry Oy Hirvensalmella kehittää kotimaisia teollisen mittakaavan kylmäkuivauslaitteita. Yrityksen teknologiakehitystiimi rakentaa kuivauskapasiteetiltaan suuria, yli 2 000 kg:n laitteita, joissa hyödynnetään tekoälypohjaista kuivausteknologiaa. Frost Dry tarjoaa myös pienimuotoista kylmäkuivauspalvelua yrityksille laitekehityksen rinnalla.

Helsinkiläinen *Lyogix Oy* on uusi kotimainen toimija, joka kehittää algoritmipohjaista ohjausalustaa pakastekuivausprosesseihin. Yritys on käynnistämässä oman prototyyppilaitteensa rakentamista, ja sen tavoitteena on tuoda markkinoille käyttäjäystävällisiä ja energiatehokkaita kuivureita.

Tällä hetkellä kuitenkin moni suomalainen yritys teettää kylmäkuivauksen Virossa, jossa työn kustannukset ovat edullisempia. Freezedry OÜ on kehittänyt palvelukonseptiaan vuodesta 2011 lähtien, ja sillä on palveluvalikoima, joka kattaa tuotekohtaiset esikäsitteilyt, pakastuksen, jälkikäsitteilyt ja pakkaamisen.

4.7 Suomen teolliset pakastus- ja pakkaslogistiikkatoimijat

Suomessa toimii useita elintarvikealan pakkaslogistiikkaan ja rahtipakastukseen erikoistuneita yrityksiä, jotka tarjoavat sekä pakastusta, pakkasvarastointia että laajempia logistiikkapalveluja elintarviketeollisuuden tarpeisiin. Alla on esitetty viiden keskeisen toimijan palvelukokonaisuudet ja verkkosivut lisätietoa varten:

KWH Freeze – Suomen suurin pakkasvarastointipalveluiden tarjoaja

KWH Freeze on maan merkittävin pakastevarastoinnin toimija, joka palvelee erilaisia elintarviketeollisuuden yrityksiä tarjoamalla laajan valikoiman palveluja. Yrityksen palveluihin kuuluu laajamittainen pakkasvarastointi, tuotteiden pakastus sekä lavakäsittely, keräily, etiketöinti ja uudelleenpakkaus. Lisäksi KWH Freeze tarjoaa kuljetuksia ja logistiikkaan integroitua reaaliaikaista raportointia ja tiedonvaihtoa, joka mahdollistaa tarkan varastohallinnan ja sujuvat toimitukset. Lisätietoa: <https://www.kwhfreeze.fi/palvelut/>

Toripiha Oy – Marjojen teollinen käsittely ja pakastevarastointi

Toripiha Oy on erikoistunut marjojen teolliseen käsittelyyn ja pakastamiseen. Yritys tarjoaa laajan palveluvalikoiman, johon kuuluvat marjojen puhdistus, värierottelu, HPP-käsittely sekä pakastus Vesannon tuotantolaitoksessa. Toripihan pakastevarastot käsittelevät vuosittain jopa 15 miljoonaa kiloa marjoja, ja moderni tietojärjestelmä varmistaa tarkan varastovalvonnan. Vesannossa sijaitsee 3 800 m² pakastevarasto pakastuskapasiteetilla 70 000 kg/vrk, kun taas Suonenjoen toimipiste tarjoaa lämpösäädelyä varastointia. Yritys palvelee merkittäviä elintarviketeollisuuden toimijoita, kuten Valio Oy ja Pakkasmarja Oy. Lisätietoa: <https://toripiha.fi/>

Saukko Group – Täyden palvelun kylmä- ja pakkaslogistiikan toimittaja

Saukko Group tarjoaa monipuolisia pakkas- ja kylmälogistiikan palveluja eri puolilla Suomea. Yrityksen palveluihin kuuluvat pakastus, pakkasvarastointi sekä viileä- ja kuivavarastointi. Varastointipalvelut ovat käytettävissä Vantaalla, Lempäälässä, Maskussa ja Tallinassa. Saukko Group tarjoaa myös terminaalipalveluja, uudelleenreitityksiä sekä lämpötilaseurannan sisältävää omavalvontaa. Vantaan yksikölle on myönnetty FSSC 22000 -elintarviketurvallisuussertifikaatti, mikä vahvistaa palvelujen laadun ja turvallisuuden. Yritys

tukee sekä suuria että pieniä toimijoita ja tarjoaa joustavaa palvelua koko toimitusketjuun. Lisätietoa: <https://www.saukko.fi/varastointipalvelut>

Pakkasvakka Oy – Elintarviketeollisuuden pakastevarastoinnin erikoisosaaja

Pakkasvakka Oy on pitkään toiminut suomalainen perheyritys, joka tarjoaa pakastevarastointia elintarviketeollisuuden tarpeisiin. Yritys palvelee koko Suomea ja tarjoaa pitkä- ja lyhytaikaisia pakastesäilytyspalveluja sekä logistiikkatoimintoja, kuten konttien purkua, lastausta ja lähetysten käsittelyä. Pakkasvakka hyödyntää ympäristöystävällistä CO₂-kylmätekniikkaa, mikä vähentää energiankulutusta ja ympäristövaikutuksia. Yrityksen asiakuntaan kuuluu useita suuria elintarviketeollisuuden toimijoita, ja palveluja tarjotaan myös kansainvälisille markkinoille, sillä yritys vastaanottaa ja lähettää tuotteita useisiin maihin eri mantereille. Lisätietoa: <https://www.pakkasvakka.fi/>

Marja Carelia Oy

Marja Carelia tarjoaa puutarha- ja metsämarjojen hankintaa sekä marjojen pakastus- ja varastointipalveluja. Yritys toimii Joensuun Heinävaarassa ja on erikoistunut pakastemarjoihin sekä niiden tukkukauppaan. Yrityksen pakastustunnelien kapasiteetti on 30 000 kg vuorokaudessa Lisätietoa: <https://www.marjacarelia.fi/>

4.8 Elintarvikealan tuotekehitystoimijat

Tämä lyhyt kooste on tehty hankkeen aikana tehtyjen vierailujen ja palveluntarjoajien verkkosivuilla saatavilla olevaa tietoa hyödyntäen (Taulukko 10).

Taulukko 10. Elintarvikealan tuotekehitystoimijoita

Toimija	Kategoria	Palvelut
Kehitysyhtiö SavoGrow Oy https://www.savogrow.fi/elintarvikkeet/	Kehitysyhtiö	Tuotekehityksen konsultointi, resepti- ja tuotekonseptien kehitys, raaka-ainekartoitukset; koe-erien valmistus, prosessitestaukset, laboratorio-analyysit (pH, kosteus, Aw, Brix), vuokrattavat tuotekehitystilat ja koeleipomo.
LAB Food Pilot / LAB Food Lab https://lab.fi/en/services/food-pilot-plant	AMK/TKI	Pilot-mittakaavan tuotekehitystuki erityisesti juoma- ja viljatuotteille (koeleipomo, juomien valmistuslaitteisto sekä lämpö- ja säilyvyydestaukset). Palveluihin sisältyvät myös laboratorioanalyysit, tekstuuri- ja aistinvaraiset mittaukset sekä uuttolaitteiston käyttö LUT-yhteistyössä.
Frami Food Lab / SeAMK https://foodlabs.seamk.fi/	AMK/TK	Yhteiset tuotekehitysprojektit yritysten kanssa. Pilot-mittakaavan ympäristön tuotteiden ja valmistusprosessien testaukseen sekä reseptiikan kehittämiseen. Lisäksi käytettävissä on kattava analytiikka tuotteiden ominaisuuksien arviointiin.
Foodwest https://foodwest.fi	Yritys	Tuotekehitys, kuluttaja- ja markkinatutkimukset sekä ideoinnin ja konseptoinnin tuki. Lisäksi sopimusvalmistusta, laadun ja elintarviketurvallisuuden asiantuntijapalveluja sekä ravitsemus- ja tuotetietopalveluja.
Raseko FoodLaboratory https://raseko.fi/foodlaboratory	Ammatillinen oppilaitos Koulutuslaboratorio	Elintarvikealan kurssit, tuotekehitystuki; tuotteistaminen; brändäys; yrittäjyysvalmennus; tuotekehitysprojektit.
Tuotekehitystila Leevi https://esedu.fi/palvelut/leevi-tuotekehitystila	Ammatillinen oppilaitos/ Tuotekehityskeittiö	Vuokrattavat tuotekehitystilat prosessi ja reseptitestaukseen, ammattikeittiötason laitteet; asiantuntijatuki laitteiden käyttöön.
Lapin AMK https://lapinsilva.fi	AMK/TK	Asiantuntija- ja tuotekehityspalveluita mm. luonnonvara-alan yrityksille. Biolabran luonnontuotteiden jatkojalostukseen suunnitellut tilat ja laitteet mahdollistavat tuotekehitysprosessin eri vaiheita.
Hämeen ammattikorkeakoulu HAMK https://www.hamk.fi/tutkimuspalvelut/elintarviketutkimus-ja-analytiikkapalvelut/	AMK/TK	Tutkimus-, kehitys- ja analytiikkapalvelut, jotka kattavat tuotekehityksen, prosessien optimoinnin ja laadunvarmistuksen. Palveluihin sisältyy kemiallinen, mikrobiologinen ja fysikaalinen analytiikka sekä säilyvyyttä ja prosessitutkimukset.
Xamk Food lab https://www.xamk.fi/xamk-foodlab/	AMK/TK	Tuotekehitys-, testaus- ja prosessointipalveluja modernissa ympäristössä, johon kuuluu tuotekehityskeittiö, pilot-mittakaavan prosessihalli sekä elintarvikekemian ja mikrobiologian laboratoriot.
Luke FoodPilot https://www.luke.fi/fi/palvelut/jokioinen-foodpilot-uudet-elintarviketeknologiat-tuotekehityksen-tukena	Tutkimuslaitos	Pilot-mittakaavan tuotekehitys- ja prosessointipalveluja, joiden avulla uusia elintarviketeknologioita voidaan testata joustavasti ennen teolliseen tuotantoon siirtymistä mm. lämpökäsittely, säilyvyysskoheet, prosessien optimointi, bioaktiivisten yhdisteiden erotus, laboratorioanalyysit sekä aistinvarainen arviointi.
Turku AMK https://www.turkuamk.fi/palvelu/labriikki/	AMK/TK	Elintarvikkeiden prosessointi ja elintarvikeanalytiikka lämpökäsittely, UHT/HTST –laitteistot, elintarvikkeiden lämpökäsittely ja sumutuskuivaus sekä hiivakantojen tuotto ja analyysit.

Näiden toimijoiden lisäksi osa elintarvikealan yrityksistä tarjoaa tuotekehityspalveluita rahtivalmistuksen yhteydessä, ja myös kansainvälisillä raaka-aine- sekä laitetoimittajilla on tuotekehityspalveluita tarjolla osana hankintoja.

Tuotekehitykseen erikoistuneita palveluyrityksiä ovat muun muassa Food and Plan Oy, <https://foodandplan.fi/> Idea Nature Oy <https://www.ideanature.fi/>, Juha Lehtonen <https://lehtonenjuha.fi/> sekä Aktivios Oy <https://www.aktivios.fi/>.

4.9 Teollinen kylmäkuivaustesti FrostDry:lla

Hankkeessa testattiin teollista kylmäkuivausprosessia FrostDryn uudentyypisellä kylmäkuivauslaitteistolla (Kuva 36). Laitteisto koostuu erillisistä vaunuista, joissa jokaisen vaunun ja hyllyn kuivausasetuksia ja lämpötilaprofiilia voidaan säätää erikseen. Tekoälypohjaisen ohjausjärjestelmän ansiosta laitteisto pystyy käsittelemään noin 90 % erilaisista tuotteista, mikä mahdollistaa erityyppisten raaka-aineiden kuivauksen samassa vaunussa. Yhteen vaunuun mahtuu 35 tarjotinta, joiden koko on 450 × 650 mm. Hyllykohtainen maksimikapasiteetti on noin 7 litraa, ja tuotteiden enimmäiskorkeutta voidaan säädellä vaunun hyllyvälin korkeutta muuttamalla.



Kuva 36. FrostDry:n tekoälypohjainen kylmäkuivauslaitteisto Hirvensalmella.
(Kuva: Kaisa Raninen)

Testauksen toteutus

Testauksen tavoitteena oli arvioida prosessin toimivuutta useilla erilaisilla raaka-aineilla ja tuotteilla ilman varsinaisia esikäsittelyjä. Toimitimme testiajoihin erilaisia tuotenäytettä, kuten valmisruokia, leivonnaisia, välipalatuotteita, proteiinituotteita, marjoja ja hedelmiä.

Kuivausprosessissa tuotteet annosteltiin ohueksi kerrokseksi pelleille, pakastettiin ja siirrettiin tämän jälkeen kuivausvaunuun ja kylmäkuivuriin (Kuvat 37-42). Tuotteita pakastettiin 2 vuorokauden ajan jäätyksen stabiloimiseksi. Annostelumäärä oli 2–5 kg tuotteen tyyppin mukaan.

Kuivaus suoritettiin kaikille tuotteille samassa alle 30 °C lämpötilassa käyttäen 15/29 °C:n lämpöprofiileja. Kuivauslämpötila pyrittiin pitämään tuotteiden lasittumispisteen alapuolella. Nämä asetukset eivät ole optimaalisia kaikille tuotteille, mutta ne soveltuivat hyvin tilanteeseen, jossa testattiin runsaasti uusia ja toisistaan poikkeavia raaka-aineita.

Pakkaus ja laadun arviointi

Kuivatut tuotteet pakattiin kuljetusta varten kannellisiin Dyno-rasioihin sekä 120 mikronin muovisäkkeihin. SavoGrowlla näytteille tehtiin aistinvarainen arviointi sekä kosteusmittaus halogeenimittarilla. Lopputuotteet pakattiin Doypack-pusseihin (PET/AL/PE) ja suljettiin 13 mm:n saumalla AUDION LAMINO 302 LM -saumauslaitteella.

Kylmäkuivaustestin tulokset

Vaikka kuivaustesti oli poikkeuksellisen haastava samanaikaisesti käsiteltävien, koostumukseltaan erilaisten ja kuivauksessa eri tavoin käyttäytyvien raaka-aineiden vuoksi, valtaosa tuotteista onnistui erinomaisesti. Tämän raportin liitteenä on kuvakooste testissä mukana olleista kylmäkuivatuista tuotteista, jotka olivat esillä myös ELTUVA-hankkeen päätösseminaarissa 26.11.2025 Itä-Suomen yliopistolla (liite 2.)

Lopputulos oli erittäin hyvä erityisesti homogeenisen rakenteen omaavien tuotteiden kuten keittojen, puuron, sienien, välipalatuotteiden, raejuuston, rouhittujen marjojen, hedelmäsalaatin, leipäjuuston, kanafileen sekä pulled porkin osalta.

Näiden tuotteiden rehydratoituvuus oli poikkeuksellisen hyvä, ja monet niistä palautuivat rakenteeltaan ja suutuntumaltaan niin lähelle tuoretuotetta, että niitä oli vaikea erottaa alkuperäisestä. Tämä osoittaa, että monipuolinenkin tuotevalikoima voidaan kylmäkuivata kerralla onnistuneesti, kunhan tuotteet valitaan oikein ja prosessin valmistelu ja esikäsittelyt ovat kunnossa.



Kuva 37. Kylmäkuivattujen tuotteiden testausta; kanafile, pullet pork, linsseikitto. Kuvissa vasemmalla tuote ennen kuivausta ja oikealla kuivauksen jälkeen.
(Kuvat: Arlo Roström)



Kuva 38. Kylmäkuivattujen tuotteiden testausta; proteiinivälipala, raejuusto, leipäjuusto. Kuvissa vasemmalla tuote ennen kuivausta ja oikealla kuivauksen jälkeen.
(Kuvat: Arlo Roström)



Kuva 39. Kylmäkuivattujen tuotteiden testausta; valkoherukka, puolukkapyre, vadelma. Kuvissa vasemmalla tuote ennen kuivausta ja oikealla kuivauksen jälkeen.
(Kuvat: Arlo Roström)

Kinkkukiusauksen kylmäkuivaus (Kuva 40) osoittautui haastavaksi muiden tuotteiden seassa, koska se sisältää runsaasti rasvaa, tärkkelystä ja proteiineja, jotka kuivuvat eri nopeuksilla ja käyttäytyvät myös jäädytyksessä eri tavoin. Lisäksi ruoan heterogeeninen rakenne aiheuttaa epätasaista kuivumista ja vaikeuttaa sekä kosteuden poistumista että tasalaatuista rehydroitumista. Rasva hidastaa veden poistumista ja heikentää säilyvyyttä, perunan tärkkelys hajoaa herkästi jäädytyksen ja kuivauksen aikana, ja eri komponenttien vuorovaikutus tekee prosessista kokonaisuutena vaikeasti hallittavan.

Kun kinkkukiusaus kuivataan omana eränään, prosessi voidaan optimoida raaka-aineiden, rakenteen ja prosessiparametrien mukaan, jolloin lopputuote voidaan saada erittäin laadukkaaksi. Tämä osoittaa, että oikeilla esikäsitteilyillä ja huolellisella reseptisuunnittelulla on mahdollista tuottaa korkealaatuisia ja hyvin rehydroituvia kylmäkuivattuja valmisruokia.

Kylmäkuivauksen onnistumista parannetaan vähentämällä annoksen rasvapitoisuutta ja estämällä rasvakalvon muodostuminen, mikä edistää tasaisempaa kuivumista. Komponentit kannattaa pilkkoa samankokoisiksi, ja käyttää ainesosia, joiden kosteuspitoisuudet ovat mahdollisimman yhtenäiset, jotta kuivumiskinetiikka pysyy tasaisena. Esikypsenetty peruna kannattaa jättää hieman alikypsäksi, koska kypsyminen jatkuu hieman kuivausprosessin aikana. Kastike on hyvä suunnitella rehydratoituvaksi vähentämällä kermaa ja lisäämällä vettä sekä tarvittaessa sakeuttajaa. Annoksen rakenne tulisi pitää ilmavana, ja sen on jäädyttävä tasaisesti ennen kuivausta. Lisäksi suolan ja tärkkelyksen määrän optimointi on tärkeää, sillä liiallinen suola tai liian tiivis tärkkelyspinta hidastavat kosteuden poistumista kuivauksen aikana.



Kuva 40. Kylmäkuivattujen tuotteiden testausta; kinkkukiusaus, sienikuutio, mustaheikkupuuro. Kuvissa vasemmalla tuote ennen kuivausta ja oikealla kuivauksen jälkeen.
(Kuvat: Arlo Roström)

Tyrnin, hunajamarjan ja herukoiden kuivauksen haasteet ja prosessin optimointi

Tyrni osoittautui kuivauksessa poikkeuksellisen haastavaksi marjaksi sen paksun kuoren ja korkean öljypitoisuuden (omega-3, -6 ja -7) vuoksi. Nämä ominaisuudet hidastavat kosteuden poistumista ja heikentävät tasaisen kuivumistuloksen saavuttamista. Kokonaisen tyrnin onnistunut kuivaus edellyttäisi jatkokehitystä, erityisesti kuoren käsittelyä sekä prosessin herkkien vaiheiden tarkkaa optimointia.

Kuivauksen onnistumiseksi tyrnin kuori vaatii esikäsittelyn, joko mekaanisen rikkomisen tai kemiallisen avauksen, jotta kosteuden poistuminen tehostuu ja jäänyt rakenne avautuu sublimaatiota varten. Sen sijaan murskattu tyrnirouhe kuivui selvästi paremmin ja tuotti onnistuneen lopputuloksen toisessa kuivuserässä, mikä osoittaa rakenteen rikkoutumisen olennaisen merkityksen.

Prosessin kriittisiä vaiheita ovat:

- IQF-pakastus, joka varmistaa marjan rakenteen säilymisen ja sublimaation tasaisuuden
- Varovaisesti ohjattu sublimaatiovaihe, joka suojaa tyrnin herkkiä bioaktiivisia yhdisteitä, kuten C-vitamiinia ja karotenoideja
- Loppulämmön maltillinen nosto, jonka maksimi arvioitiin tyrnin kohdalla olevan noin max. 35 °C, jotta ravinteet ja väri säilyvät ilman hapettumis- tai lämpövaurioita

Hunajamarjan sekä herukoiden kuivaus osoittautui myös haastavaksi marjojen vettä huonosti läpäisevän kuorirakenteen vuoksi. Testiin toimitetut marjat eivät olleet IQF-pakastettuja, mikä saattoi vaikuttaa kuivauksen epäonnistumiseen. FrostDry:n aiemmat onnistuneet kuivauserät kuitenkin osoittavat, että oikealla esipakastusmenetelmällä – erityisesti riittävän nopealla ja tasaisella IQF-pakastuksella sekä oikealla lämpötilaprofiililla – nämäkin marjat voidaan kuivata laadukkaasti ja saavuttaa hyvä lopputuote.

Haastavien tuotteiden kohdalla on tärkeää kiinnittää erityistä huomiota laadukkaaseen esipakastukseen, sopivien kuivausparametrien valintaan sekä prosessin tarkkaan seurantaan. Tällaiset tuotteet olisivat suositeltavaa kuivata omissa kuivauserissä, jolloin kuivausasetuksia voidaan hallita täsmällisesti ja prosessin etenemistä voidaan valvoa keskeytyksettä. Tuotteen sokeripitoisuus tulee huomioida kuivausparametrien valinnassa. Tämä parantaa merkittävästi onnistumisen todennäköisyyttä ja lopputuotteen laatua.

Erittäin herkille tuotteille suositeltu lämpötilaprofiili on FrostDry:n mukaan -20 °C / -5 °C / +20 °C. Tässä mallissa kuivaus tapahtuu lähes kokonaan pakkaslämpötiloissa, ja tuotteelle annetaan vasta lopussa korkeampi lämpö, kun rakenteen romahtamisen riski on poistunut.

Monikomponenttisten tuotteiden kylmäkuivaus

Monikomponenttisten tuotteiden onnistunut kylmäkuivaus edellyttää, että kaikki ainesosat jäätyvät, kuivuvat ja käyttäytyvät prosessien eri vaiheissa mahdollisimman samankaltaisesti. Tämä tarkoittaa rasvan minimointia, tasakokoisia ja rakenteeltaan yhtenäisiä komponentteja, kerros- ja kastikerakenteiden optimointia sekä ilmavaa, tasaisesti jäätyvää kokonaisuutta. Jos komponenttien kosteuspitoisuus tai rakenne poikkeaa liikaa

toisistaan, lopputuloksena on epätasainen kuivuminen, kerrosten irtoaminen tai rakenteen pettäminen.

Käytännössä tämä näkyi esimerkiksi vadelmajuustokakussa (Kuva 42), jossa eri kerrokset kuivuivat eri tahtiin ja reagoivat jäädytykseen eri tavalla. Rasvaa ja gelatiinia sisältävät kerrokset muodostivat heikon tartuntapinnan, ja päällimmäisen kerroksen korkea sokeri- ja nestepitoisuus teki siitä hygroskooppisen ja tahmean, mikä lisäsi kerrosten irtoamista. Vadelmaleivos osoitti selvästi, että monikerrosrakenteet ovat haasteellisia, koska kerrosten käyttäytyminen ei ole yhtenäistä kuivauksen aikana.

Toisena esimerkkinä mochi-jäätelöt (Kuva 41) korostivat samaa ilmiötä eri näkökulmasta: tärkkelyspitoinen, elastinen mochi-kuori ja ilmava, rasvaa ja sokeria sisältävä jäätelötäyte käyttäytyivät kylmäkuivauksessa täysin eri tavoin. Kuori kiristyi ja halkeili samalla kun täyte laajeni ja "vaahtosi" ulos tyhjiön vaikutuksesta. Tätä olisi voitu ehkäistä käyttämällä erittäin herkille tuotteille suositeltua lämpötilaprofiilia (-20 °C / -5 °C / +20 °C). Tässäkin ongelma oli komponenttien erilaisissa jäätymis- ja kuivumisominaisuuksissa.

Nämä esimerkit osoittavat, että monirakenteisten tuotteiden kylmäkuivaus onnistuu vain, jos komponentit suunnitellaan toimimaan kuivauksessa yhtenä kokonaisuutena – ei vain maukkaana annoksena ennen kuivausta. Tämä periaate on olennainen kaikkien monikomponenttisten tuotteiden kehityksessä.

Kylmäkuivattu korvapuusti (Kuva 41) oli ulkonäöltään lähes muuttumaton, mutta jäi hyvin kovaksi ja heikosti rehydratoituvaksi, koska paiston muodostama gluteeniverkko ja kuori kuivuivat tiiviiksi rakenteeksi, johon vesi ei enää imeydy tasaisesti. Lisäksi sokeri-kanelitäyte kristallisoitui ja rasva jäi tuotteeseen, mikä hylkii vettä ja estää kosteuden palautumista koko massaansa. Yleisesti osa leivonnaisista ei palaudu rakenteellisesti hyvin kylmäkuivauksesta ilman tarkasti hallittua menetelmää ja vesimäärää, minkä vuoksi lopputulos jää keksimäisen kovaksi ja epätasaisesti kostuvaksi.

Hiivaleivonnaiset kannattaa rehydratoida lämpimällä vedellä, suihkuttamalla tai kevyesti kostuttamalla, useissa vaiheissa ja riittävän vetäytymisajan kanssa. Menetelmä antaa tiiville, kuivuneelle taikinarakenteelle aikaa imeä kosteutta sisäänsä, jolloin lopputuloksesta tulee tasaisempi ja pehmeämpi.



Kuva 41. Kylmäkuivattujen tuotteiden testausta; korvapuusti, puolukkaleivos, mochi. Kuvissa vasemmalla tuote ennen kuivausta ja oikealla kuivauksen jälkeen. (Kuvat: Arlo Roström)



Kuva 42. Kylmäkuivattujen tuotteiden testausta; piiras, vadelmaleivos, hedelmäsalatti. Kuvissa vasemmalla tuote ennen kuivausta ja oikealla kuivauksen jälkeen. (Kuvat: Arlo Roström)

5 Analytiikan kehittäminen säilyvyyden testaamiseksi

ELTUVAn hankkeessa kehitettiin hanketoimijoiden eli Itä-Suomen yliopiston ja SavoGrow:n tutkimus-, kehitys- ja innovaatiotoimintaa (TKI) vastaamaan entistä paremmin alueen yritysten tarpeisiin. Itä-Suomen yliopiston elintarviketutkimuslaboratoriota kehitettiin rakentamalla testausympäristöä, joka yhdistää mikrobiologisia, fysikaalisia ja kemiallisia menetelmiä elintarvikkeiden säilyvyyden optimoimiseksi. SavoGrow:lla analytiikkaa kehitettiin puolestaan pääasiassa yritysten tuotekehitysprosessien tukemiseksi.

Elintarvikemikrobiologian analytiikan kehittäminen oli keskeisessä roolissa, sillä hankkeen tavoitteet liittyivät ensisijaisesti elintarviketurvallisuuden varmistamiseen. Hankkeessa toteutettiin elintarvikkeiden säilyvyydestestejä, joissa testattiin muun muassa HPP-käsittelyn vaikutuksia tuotteen mikrobiologiseen laatuun ja säilyvyyteen erilaisilla raaka-aineilla ja tuotteilla. Testeissä hyödynnettiin sekä perinteisiä viljelymenetelmiä että moderneja analytiikkalaitteistoja (Biomerieux:n TEMPO-*automated quality indicator solution* ja miniVIDAS-*automated pathogen detection*-laitteistot, Kuva 43), testaten niiden soveltuvuutta erilaisille näytetyypeille (mm. erilaisia marjatuotteita, kalatuotteita, lihatuotteita, yrtti- ja kasvituotteita). Säilyvyydestesteissä tuotteista määritettiin elintarvikkeiden pilaajamikrobeja ja elintarvikepatogeenia, muun muassa aerobiset kokonaisbakteerit, koliformiset ja gramnegatiiviset bakteerit, hiivat ja homeet, *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, Salmonella-suvun bakteerit ja *Bacillus*-suvun bakteerit. Testeissä ei havaittu raaka-aineita tai tuotteita, jolle Tempo- tai miniVidas-menetelmät eivät olisi soveltuneet, vaikka kyseiset menetelmät voivat tiettävästi joskus antaa vääriä positiivisia tuloksia esimerkiksi hyvin värikkäille yhdisteille. Tarvittaessa epäselvät tulokset voidaan kuitenkin varmistaa muilla menetelmillä.

Mikrobiologian menetelmien kehittämisessä testattiin myös bakteerien antibioottiherkkyksiä nestelaimennusmenetelmällä. Testaukset suoritettiin kahden laboratorion välisellä vertailulla. Testeissä käytettiin maitohappobakteereilta ja pediokokkeja. Tarkkojen laboratoriomäärityksen luotettavuuden kannalta on erityisen merkityksellistä, että testimenetelmät on validoitu ja samoihin tuloksiin päästään eri laboratorioympäristöissä. Antibioottiresistenttiys on kasvava ongelma elintarvikeketjussa ja elinympäristössämme, joten resistenttiyksien testaamisen tarve ei tulevaisuudessakaan ole vähenemässä. Päin vastoin, erilaisten testimenetelmien ja resistenttiyksien torjumisen tarve tulevaisuudessa lisääntyy.

Säilyvyytsteissä havaittiin, että joidenkin tuotteiden kohdalla on mielekästä tarkastella myös tuotteiden fysikaalisia tai kemiallisia ominaisuuksia. Niinpä hankkeessa kehitettiin pienimuotoisesti myös tällaista analytiikkaa. Fysikaalisia ominaisuuksia, kuten viskositeettia, veden aktiivisuutta ja kosteuspitoisuutta, mitattiin tuotteiden rakenteen, stabiilisuuden ja koostumuksen arvioimiseksi. Kemiallista laatua tarkasteltiin muun muassa peroksidi- ja anisidiiniarvojen (rasvojen hapettuminen), fenolipitoisuuden, pH:n ja suolapitoisuuden avulla tuotteen tuoreuden ja ravitsemuksellisen stabiilisuuden arvioimiseksi. Esimerkiksi pH ja vedenaktiivisuus ovat keskeisiä tekijöitä, joilla on vaikutusta HPP:n tehokkuuteen säilyvyyden lisäämisessä.

Itä-Suomen yliopiston elintarviketutkimuslaboratoriossa on käytössä fysikaalisia ja kemiallisia analyysimenetelmiä, joita voidaan hyödyntää elintarvikkeiden laadun ja säilyvyyden arviointiin:

- suolapitoisuuden mittaus (pikamenetelmä)
- vedenaktiivisuuden mittaus (pikamenetelmä)
- jäännöskosteuden mittaus kuivatusta tuotteista (pikamenetelmä)
- pH:n mittaus
- rasvojen hapettumisen arviointi (peroksidi- ja anisidiiniarvot)
- kokonaisfenolipitoisuuden määrittäminen spektrofotometrisesti
- viskositeetin mittaus.



Kuva 43. Mikrobiologian menetelmiä. Ylhäällä perinteisiä malja- ja nesteviljelyvälineistöä, alhaalla vasemmalla miniVidas- ja oikealla Tempo-laitteistot.

(Kuvat: Ehsan Shad ja Kaisa Raninen)

6 Tuotekehityksen tuen kehittäminen

Hankkeen aikana SavoGrow:lla kehitettiin elintarvikkeiden tuotekehitysprosessiin liittyvää osaamista ja palveluja useilla osa-alueilla, jotka mahdollistavat jatkossa alueen yritysten laaja-alaisemman tukemisen tuotekehityksessä. Ensisijaisesti vahvistettiin ymmärrystä HPP- ja kylmäkuivausprosesseista ja niiden soveltuvuuden arvioinnista erilaisille raaka-aineille, tuotteille ja pakkauksille.

Testasimme monia erilaisia raaka-aineita, tuoteaihioita ja niiden versioita, sekä pakkaustyyppisiä ja -materiaaleja HPP-prosessissa. Tietoa voidaan jatkossa hyödyntää alueen yritysten neuvonnassa ja tuotekehitystuessa. Testit antoivat myös tietoa SavoGrow:lla käytössä olevien pakkauslaitteiden soveltuvuudesta HPP-prosessiin menevien tuotteiden pakkaamisessa.

Myös tuotteiden kylmäkuivaukseen liittyvää testausprosessia kehitettiin merkittävästi. Sekä SavoGrow:lle että UEF:lle rakennettiin valmiudet testata kylmäkuivausta jatkossakin yhteistyössä alueen toimijoiden kanssa. Testeissä tarkasteltiin erilaisten raaka-aineiden ja tuotteiden käyttäytymistä kylmäkuivausprosessin eri vaiheissa, mukaan lukien pakastus, erilaisille tuotteille soveltuvat esikäsitteilyt sekä niiden vaikutus kuivausaikaan ja lopputuotteen laatuun. Lisäksi selvitettiin sopivia jälkikäsitteilymenetelmiä ja -laitteita sekä kehitettiin tuotteiden pakkausprosessia ja pakkausolosuhteita. Osana tätä kokonaisuutta arvioitiin myös tuotteiden säilyvyyden parantamiseen liittyviä menetelmiä, kuten happiabsorboidien käyttöä ja vakuumpakkausta. Tätä varten testattiin monia erilaisia pakkaustyyppisiä, materiaaleja ja pakkauksen suljentalaitteita.

Laboratoriotoimintoja ja analyysiprosesseja kehitettiin myös SavoGrow:lla tukemaan tuotekehitystä entistä systemaattisemmin. Hankkeessa otettiin käyttöön ja vahvistettiin menetelmiä, jotka liittyvät tuotteiden kosteuden ja vedenaktiivisuuden mittaukseen, pH-mittaukseen sekä mikrobiologisiin määrittämiin perinteisillä maljausmenetelmillä. Näiden osa-alueiden kehittämisellä luotiin pohja luotettavalle ja toistettavalle laadunvalvonnalle sekä tuotekehityksen päätöksenteolle.

ELTUVA-HANKKEESEEN LIITTYVÄT JULKAISUT

ELINTARVIKKEIDEN JÄLJITETTÄVYYS JA ELINTARVIKEVÄÄRENNÖSTEN TUNNISTAMINEN:

- Sirpa Peräniemi, Anneli Salonen, Kaisa Raninen, Jouko Vepsäläinen, 2024. [Tracing down of honeys from different areas in Finland utilizing combination of NMR and mineral analysis](#). Poster. Esitetty EurBee10-konferenssissa Tallinnassa 16–19. syyskuuta 2024.
- Sirpa Peräniemi, 2024. [Koivumahlan sisältämät yhdisteet](#). ELTUVA-hankkeen kirjallisuusselvitys. Itä-Suomen yliopisto.
- Jouko Vepsäläinen, 2025. [Jäljitettävyyks: hunajat ja mahalat](#). Esitys ELTUVA-hankkeen päätösseminaarista 26.11.2025.

KORKEAPAINEKÄSITTELYN (HPP) VAIKUTUKSET ELINTARVIKKEIDEN SÄILYVYYTEEN JA LAATUUN:

- Ehsan Shad, Kaisa Raninen, Svetlana Podergina, Lok In Chan, Kam Pui Tong, Heidi Hälikkä, Marjo Huovinen, Jenni Korhonen, 2024. [Impact of High-Pressure Processing on Quality and Safety of High-Oil-Content Pesto Sauce a comparative study with thermal processing \(PDF\)](#). Applied Sciences 14, 9425.
- Svetlana Podergina, Ehsan Shad, Kaisa Raninen, Ida Tikkanen, Kristiina Kinnunen, Heidi Hälikkä, Marjo Huovinen, Jenni Korhonen, 2024. [Inactivation of Salmonella Typhimurium in pesto with high-pressure processing \(HPP\)](#) Poster. Esitetty Ravitsemusopetus 40-vuotta juhlaseminaarissa Kuopiossa 24.5.2024.
- Kaisa Raninen, Jaana Kapustamäki, Jesse Ojala, Jenni Korhonen, 2025. [ELTUVA-hankkeessa haetaan ratkaisuja elintarvikkeiden säilyvyyden parantamiseksi](#). Elintarvike ja Terveys -lehti 4:2025, 39. vsk. (luettavissa s. 28-32.)
- Ehsan Shad & Jesse Ojala, 2025. [Korkeapainekäsittely](#). Esitys ELTUVA-hankkeen päätösseminaarista 26.11.2025.
- Kati Riekkinen, Kati Martikainen, Jenni Korhonen, 2023. [Effectiveness of High-Pressure Processing Treatment for Inactivation of Listeria monocytogenes in Cold-Smoked and Warm-Smoked Rainbow Trout](#). Applied sciences, 13, 6, 3735.
- Anna Kårlund, Katarina Sulkula, Kati Väkeväinen, Jenni Korhonen, 2023. [High Pressure Processing Has Variable Effects on Protein-Related and Sensory Properties of Cold and Hot Smoked Rainbow Trout](#). Applied sciences, 13, 7, 4193.

KYLMÄKUIVAUS:

- Jaana Kapustamäki & Kaisa Raninen, 2025. [ELTUVA-hankkeen oppeja kylmäkuivauksesta](#). Esitys ELTUVA-hankkeen päätösseminaarista 26.11.2025.
- Kaisa Raninen & Jaana Kapustamäki, 2025. [Lupaava mutta alihyödynnetty kylmäkuivaus kiinnostaa](#). Kehittyvä Elintarvike-lehti 1/2026: s. 24–25.

UUDET TEKNOLOGIAT SÄILYVYYDEN EDISTÄMISESSÄ:

- Ehsan Shad & Jenni Korhonen, 2025. [Kapseloitu kuminaöljy hillitsee patogeenien kasvua](#). Kehittyvä Elintarvike-lehti 1/2026: s. 34–35.

LÄHTEET

- Kortesniemi M, Slupsky CM, Ollikka T, Kauko L, Spevacek AR, Sjövall O, Yang B, Kallio H, 2016. NMR profiling clarifies the characterization of Finnish honeys of different botanical origins. *Food Research International* 86: 83-92. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.05.014>.
- Nykter, Merja, 2021. High pressure processing -käsittelyn hyödyntäminen kasvistuotteiden kehityksessä. Opinnäytetyö - ylempi ammattikorkeakoulututkinto, Tekniikan ja liikenteen ala, Savonia. Saatavilla: <https://www.theseus.fi/handle/10024/508121>.
- Ruokavirasto, 2026a. Kysymyksiä ja vastauksia hunajan väärentämisestä. Saatavilla: <https://www.ruokavirasto.fi/globalassets/teemat/sante-2023-00377-00-00-fi-tra-00.pdf>. Viitattu 30.3.2026
- Ruokavirasto, 2026b. Pakkaukset ja kontaktimateriaalit. Saatavilla: <https://www.ruokavirasto.fi/elintarvikkeet/elintarvikeala/pakkaukset-ja-kontaktimateriaalit/>. Viitattu 17.3.2026.
- Shad E, Raninen K, Podergina S, Chan LI, Tong KP, Hälikkä H, Huovinen M, Korhonen J, 2024. Impact of High-Pressure Processing on Quality and Safety of High-Oil-Content Pesto Sauce: A Comparative Study with Thermal Processing. *Applied Sciences* 14(20):9425. Saatavilla: <https://doi.org/10.3390/app14209425>
- Suomen mehiläishoitajain liitto, 2026. Hunajaväärennökset. Saatavilla: <https://hunaja.net/hunaja-tietoa/hunaja/hunajavaarennokset/>. Viitattu 25.3.2026.
- Toripiha Oy. 2026. HPP-käsittely parantaa elintarvikkeiden säilyvyyttä. Saatavilla: <https://toripiha.fi/palvelut/hpp-kasittely/>. Viitattu 2.2.2026.
- Zhang X, Li M, Zhu L, Geng Z, Liu X, Cheng Z, Zhao M, Zhang Q, Yang X, 2023. Sea Buckthorn Pre-treatment, Drying, and Processing of High-Quality Products: Current Status and Trends. *Foods* 12(23):4255. Saatavilla: <https://doi.org/10.3390/foods12234255>

LIITTEET

LIITE 1.

Elintarvikkeiden laadukas pakastekuivaus - opas käytännön toteutukseen
Laadun varmistaminen ja tyypillisten virheiden välttäminen. Miia Helanto. Joulukuu 2025

LIITE 2.

Kylmäkuivattujen tuotteiden kuvakooste.

Elintarvikkeiden laadukas pakastekuivaus - opas käytännön toteutukseen

Laadun varmistaminen ja tyypillisten virheiden välttäminen

TkT Miia Helanto, Joulukuu 2025



Euroopan unionin
osarahoittama



Pohjois-Savon liitto



UNIVERSITY OF
EASTERN FINLAND

SAVGGROW
KEHITYSYHTIÖ



Sisällysluettelo

Johdanto.....	4
Pakastekuivaus menetelmänä.....	4
Pakastekuivattujen elintarvikkeiden laatuattribuutit.....	6
Maku ja aromi.....	6
Rakenteelliset ominaisuudet.....	7
Visuaaliset ominaisuudet.....	10
Ravintoaineiden säilyvyys.....	11
Jäännöskosteus ja stabiilisuus.....	12
Rehydratoituvuus.....	14
Kriittiset virheet pakastekuivauksessa.....	15
Lämpötilan hallinta primäärikuivauksen aikana.....	15
Sekundäärikuivauksen laiminlyönti.....	19
Jäädätysmenetelmän merkityksen aliarviointi.....	22
Tuotekerroksen paksuus.....	24
Pakkauksen merkitys.....	26
Kammio paineen optimointi.....	28
Kondensoijan lämpötila ja kylmäaineen valinta.....	30
Tuotteiden ominaisuuksien vaikutus pakastekuivaukseen.....	34
Esikäsitteilyn laiminlyönti.....	34
Vahakerroksen aiheuttamat ongelmat.....	34
Korkea sokeripitoisuus.....	35
pH:n vaikutus.....	35
Rasvan määrä ja laatu.....	36
Proteiinipitoisuuden vaikutus.....	37
Vesipitoisuuden vaikutus.....	37
Tuotteen rakenteen vaikutus.....	37
Osmootisesti aktiiviset aineet.....	38
Aromien säilyttäminen.....	38
Värin säilyttäminen.....	39
Rehydratoituvuuteen vaikuttavat tekijät.....	39
Ei-entsymaattinen ruskistuminen.....	40
Tuotteen muodon vaikutus.....	41
Satokausivaihtelut.....	41
Kalsiumin ja muiden mineraalien vaikutus.....	43
Probiootit ja starterit.....	43
Laadunvalvonta.....	45
Laadunvalvonnan puute.....	45
Perusparametrit jokaisesta erästä.....	45
Jäännöskosteuden mittaus.....	46
Rakenteen arviointi.....	46
Rehydratoituvuuden testaus.....	47
Mikrobiologinen testaus.....	47
Ravintosisällön testaus.....	48
Prosessiparametrien dokumentointi.....	48
Säilyvyytestaus.....	49
Poikkeamien käsittely ja juurisyyanalyysi.....	49
Dokumentointi ja jäljitettävyys.....	50
HACCP-järjestelmä pakastekuivauksessa.....	50
Kalibrointi ja laitteiden huolto.....	51
Validointi uusille tuotteille.....	51
Yhteenveto.....	52
Prosessin perusteet ja laatuattribuutit.....	52

Jäädytyksen ensisijainen merkitys.....	52
Primäärikuivaus: lämpötilan hallinta.....	53
Kammiopaineen ja kondensoijan optimointi.....	53
Sekundäärikuivaus: sitoutuneen veden poisto.....	54
Tuotekerroksen paksuus.....	54
Pakkaus ja säilytys.....	55
Tuotteiden erityisominaisuudet.....	55
Laadunvalvonta.....	56
Yhteenveto tärkeimmistä opeista.....	57
Lähteet.....	58
Liitteet.....	62

Johdanto

Pakastekuivaus on teknologisesti kehittynyt menetelmä elintarvikkeiden säilömiseen, joka tarjoaa merkittäviä etuja perinteisiin kuivausmenetelmiin verrattuna. Menetelmän suurin vahvuus on kyky säilyttää tuotteen alkuperäiset ominaisuudet lähes muuttumattomina – rakenteesta ja väristä ravintoaineisiin ja makuun. Tämä edellyttää kuitenkin, että prosessi suoritetaan oikein ja että prosessin kriittiset kohdat tunnistetaan.

Pakastekuivauksen laatu ei ole yhden tekijän summa, vaan monimutkainen kokonaisuus, jossa useat fyysiset, kemialliset ja biologiset prosessit vaikuttavat samanaikaisesti lopputulokseen. Pienikin virhe yhdessä prosessin vaiheessa voi heikentää merkittävästi tuotteen laatua tai jopa tehdä koko erän käyttökelvottomaksi. Erityisesti aloittelijoiden on tärkeää ymmärtää, mitkä tekijät vaikuttavat laatuun ja miten yleisimmät virheet voidaan välttää.

Tämä raportti käsittelee pakastekuivattujen elintarvikkeiden, erityisesti marjojen ja vihannesten, kriittisiä laatuattributteja ja niiden arviointia. Tavoitteena on tarjota käytännönläheinen katsaus siihen, mitkä tekijät määrittävät laadukkaan lopputuloksen ja miten prosessia voidaan optimoida parhaan mahdollisen laadun saavuttamiseksi. Erityistä huomiota kiinnitetään yleisimpiin virheisiin, jotka voivat vaarantaa tuotteen laadun.

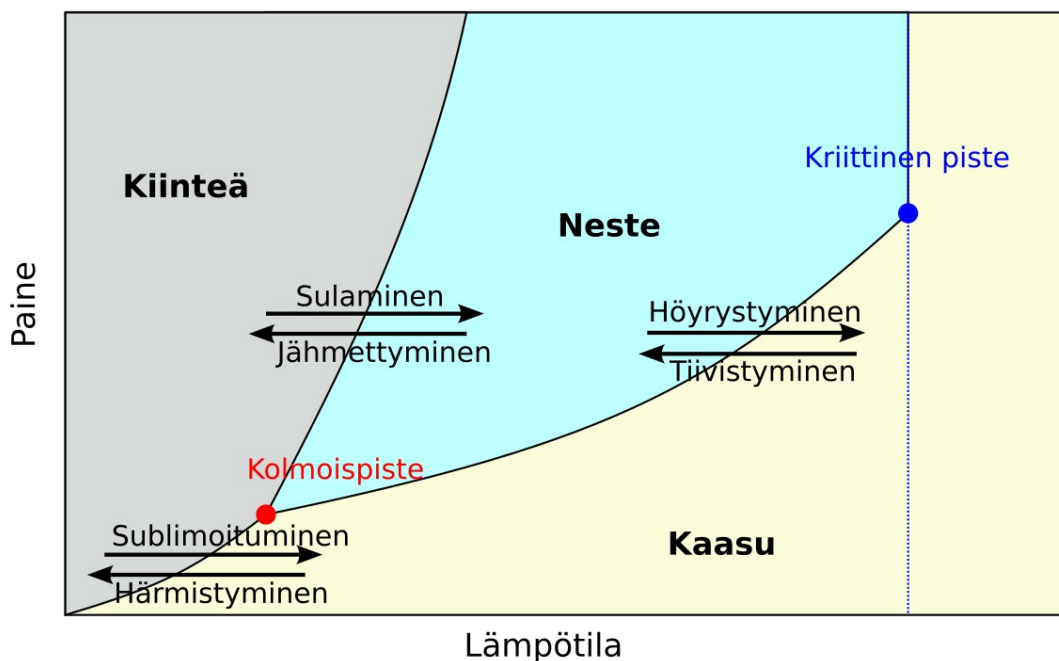
Pakastekuivaus menetelmänä

Pakastekuivaus, eli lyofilisaatio, on säilöntämenetelmä, jossa vesi poistetaan tuotteesta sublimoimalla, jolloin vesi siirtyy suoraan kiinteästä olomuodosta kaasumaiseen ohittaen nestemäisen vaiheen. Prosessi tapahtuu hyvin alhaisessa paineessa ja lämpötilassa, mikä erottaa sen perinteisistä kuivausmenetelmistä ja mahdollistaa tuotteen alkuperäisten ominaisuuksien poikkeuksellisen hyvän säilymisen.

Pakastekuivausprosessi koostuu kolmesta päävaiheesta. Ensimmäisessä vaiheessa tuote jäädytetään, tyypillisesti -20°C - -40°C tai jopa alhaisempaan lämpötilaan riippuen kuivattavan tuotteen ominaisuuksista. Jäädytyksen aikana tuotteen sisältämä vesi muuttuu jääkiteiksi. Jäädytysnopeus vaikuttaa merkittävästi kiteiden kokoon ja sijaintiin solupohjaissa tuotteissa, joita elintarvikkeetkin ovat. Jäädytysnopeudella ja -tekniikalla on hyvin suuri vaikutus tuotteen myöhempään rakenteeseen mm. lääketieteellisuuden pakastekuivauksissa käytetään temperointia osana jäädytystä molekyylien stabiloimiseen (Searles *et al.*, 2001). Jäädytysvaiheeseen kiinnitetään varsinkin elintarvikkeiden pakastekuivauksessa aivan liian vähän huomiota. Se on usein vaihe, jossa tuotteen ominaisuudet muuttuvat niin, että

pakastekuivaaminen ei välttämättä ole enää mahdollista. Toisessa vaiheessa, primäärikuivauksessa, kammion painetta lasketaan huomattavasti (tyypillisesti 0,1-1 mbar) ja hyllyjä lämmitetään varovaisesti. Näissä olosuhteissa vesi ei esiinny ollenkaan nesteenä, vaan jää sublimoituu suoraan vesihöyryksi, mikä säästää tuotteen rakenteen ja arat yhdisteet lämpöaurioilta (Kuva 1). Sublimaatio on endoterminen reaktio, jolloin tuotteen lämpötila laskee jään sublimoituessa siitä. Jotta sublimoituminen saadaan pysymään halutulla tasolla, siihen täytyy tuoda lämpöenergiaa hyllyjen lämmityksen kautta. Kolmannessa vaiheessa, sekundäärikuivauksessa, lämpötilaa nostetaan asteittain ja poistetaan tuotteeseen sitoutunut vesi, kunnes saavutetaan haluttu jäännöskosteus, tyypillisesti 1-5%.

Aineen olomuodot



Kuva 1. Aineen faasidiagrammi, josta ilmenee aineen olomuotojen muutokset tietyssä lämpötilassa ja paineessa. (<https://fi.wikipedia.org/wiki/Faasimuutos>)

Pakastekuivauksen suurimmat edut verrattuna muihin kuivausmenetelmiin liittyvät alhaisiin prosessilämpötiloihin. Ravintoaineet, kuten vitamiinit ja antioksidantit, säilyvät lähes täydellisesti, kun taas perinteisissä kuivausmenetelmissä ne usein hajoavat merkittävästi korkeiden lämpötilojen vaikutuksesta. Värit, aromit ja maku säilyvät luonnollisina ensisijaisesti siksi, että alhainen lämpötila hidastaa merkittävästi kaikkia kemiallisia reaktioita, mukaan lukien hapettumisreaktiot. Tyhjiöolosuhteet vähentävät lisäksi hapen saatavuutta, mikä osaltaan hidastaa hapettumista, mutta pääasiallinen suojaava vaikutus perustuu alhaiseen lämpötilaan. Tuotteen rakenne säilyy huokoisena ja kevyenä, mikä tekee

siitä helposti jauhattavan ja nopeasti rehydratoituvan. Lisäksi pakastekuivatut tuotteet ovat hyvin kevyitä ja säilyvät huoneenlämmössä, joten niiden logistiikka on helppoa. (Ratti, 2001)

Menetelmän haasteita ovat korkeat investointikustannukset, suhteellisen pitkä prosessiaika sekä prosessin tekninen vaativuus. Pakastekuivaus ei ole pelkkä mekaaninen prosessi, vaan se vaatii ymmärrystä tuotteen fysikokemiallisista ominaisuuksista, kuten lasittumislämpötiloista ja romahtamislämpötiloista, sekä kykyä optimoida prosessiparametrit kullekin tuotteelle erikseen. Virheet prosessin aikana voivat johtaa vakaviin laatuongelmiin, kuten rakenteen luhistumiseen, maun muutoksiin sekä ravintoaineiden ja muiden tärkeiden komponenttien menetykseen. Näistä haasteista huolimatta pakastekuivaus on osoittautunut erinomaiseksi menetelmäksi erityisesti marjojen, hedelmien, lihojen, kahvin ja lääkeaineiden säilymisessä, missä laadun säilyminen on ensiarvoisen tärkeää.

Pakastekuivattujen elintarvikkeiden laatuattribuutit

Pakastekuivatun elintarvikkeen laatu voidaan arvioida kuuden keskeisen attribuutin perusteella. Nämä attribuutit ovat toisiinsa kytkeytyneitä, ja muutokset yhdessä niistä vaikuttavat usein myös muihin. Kokonaisvaltainen laadunhallinta edellyttää kaikkien näiden tekijöiden huomioimista prosessin suunnittelussa ja toteutuksessa.

Maku ja aromi

Elintarvikkeen maku ja aromi ovat kiistatta sen tärkein aistinvarainen ominaisuus (Lawless ja Heymann, 2010). Kuluttaja arvioi tuotteen laadun ensisijaisesti sen perusteella, maistuuko se hyvältä. Pakastekuivauksessa tavoitteena on säilyttää tuotteen alkuperäinen, luonnollinen maku ja aromi mahdollisimman muuttumattomina. Tämä on kuitenkin haastavaa, sillä prosessin aikana tapahtuu useita kemiallisia ja fysikaalisia muutoksia, jotka voivat vaikuttaa niihin negatiivisesti.

Suurin yksittäinen tekijä, joka vaikuttaa maun ja aromin säilymiseen, on lämpö. Liiallinen lämmönkäyttö pakastekuivauksen aikana aiheuttaa epätoivottujen aromiyhteisteiden syntymistä. Maillardin reaktio, joka on aminohappojen ja pelkistävien sokereiden välinen kemiallinen reaktio, saa aikaan ruskistumisen ja palaneen maun (Martins *et al.*, 2000). Vastaavasti karamellisaatio eli sokereiden terminen hajoaminen, voi muuttaa tuotteen makuprofiilia ei-toivotulla tavalla (Kroh, 1994). Lisäksi korkeat lämpötilat voivat johtaa haihtuvien orgaanisten yhdisteiden eli VOC-yhdisteiden muodostumiseen, jotka antavat tuotteelle vieraan maun (Mottram, 1998).

Toinen merkittävä haaste on se, että monet aromiyhdisteet ovat haihtuvia. Primäärikuivauksen aikana, jolloin jää sublimoituu suoraan vesihöyryksi, aromiyhdisteet voivat sublimoitua samalla tai kulkeutua vesihöyryn mukana pois tuotteesta (Flink ja Karel, 1970). Vastaavasti sekundäärikuivauksen aikana, kun sitoutunut vesi poistetaan korkeammassa lämpötilassa, aromit voivat haihtua. Tämä voi olla erityisen kriittistä tuotteissa, joiden aromi perustuu pitkälti haihtuviin yhdisteisiin (Oetjen ja Haseley, 2004) Aromikatoa voidaan minimoida pitämällä prosessilämpötilat alhaisina ja optimoimalla kuivausaika niin, että se on riittävän lyhyt mutta silti täydellinen.

On myös syytä huomioida, että raaka-aineen alkuperäisellä laadulla ja käytettävällä lajikkeella on suuri merkitys. Vaikka pakastekuivausprosessi olisi täydellisesti optimoitu, heikkolaatuisesta tai aromiköyhästä raaka-aineesta ei saada laadukasta lopputuotetta. Makua ja aromia voidaan arvioida subjektiivisesti aistinvaraisella arvioinnilla, mutta myös objektiivisesti mittaamalla aromiyhdisteiden pitoisuuksia uutteen tai tisleestä analyttisillä menetelmillä kuten kaasukromatografiolla.

Rakenteelliset ominaisuudet

Pakastekuivatun tuotteen rakenteelliset ominaisuudet määräytyvät pitkälti jo jäädytysvaiheessa. Jäädytysmenetelmä vaikuttaa ratkaisevasti siihen, millainen mikrorakenne tuotteeseen muodostuu, ja tämä rakenne puolestaan määrittää tuotteen monet muut ominaisuudet kuten ulkonäön, kuivumisnopeuden, jauhatusominaisuudet ja rehydratoitavuuden.(Kasper ja Friess, 2011)

Jäädytetyssä tuotteessa on kaksi erillistä faasia: jääkiteet ja amorfinen jäätymätön matriisi. Jääkiteet koostuvat puhtaasta vedestä, kun taas amorfinen matriisi on jäätymiskonsentroitunut liuos, joka sisältää jäätymättömiä vesimolekyylejä, sokereita, suoloja ja muita liuennneita aineita. Jäädytysnopeus vaikuttaa suoraan jääkiteiden kokoon: hidas jäädyttäminen tuottaa suuria jääkiteitä, kun taas nopea jäädyttäminen muodostaa pieniä kiteitä (Searles *et al.*, 2001). Suuret jääkiteet voivat rikkoa solujen rakenteita, mikä voi olla haitallista tuotteen tekstuurille. Toisaalta suuret jääkiteet muodostavat myös suurempia kapillaareja, jotka helpottavat vesihöyryn poistumista primäärikuivauksen aikana ja siten nopeuttavat kuivumista (Hottot *et al.*, 2004).

Hitaan jäädytyksen erityinen ongelma liittyy osmoottisen paineen vaikutukseen solupohjaisissa tuotteissa. Kun jäädytys tapahtuu liian hitaasti, puhdas vesi jäätyy ensin solun ulkopuolelle, sillä vesimolekyyleillä on korkeampi jäätymispiste kuin liuoksilla. Tämä jään muodostuminen solun ulkopuolelle nostaa solunulkoisen nesteen osmoottista painetta

merkittävästi. Osmoottisen gradientin vaikutuksesta vesi siirtyy solusta ulos kohti korkeampaa osmoottista painetta. Seurauksena solun sisäisten komponenttien, kuten sokereiden ja suolojen, konsentraatio kasvaa huomattavasti (Kasper ja Friess, 2011) Tämä konsentroituminen laskee solun sisäisen liuoksen lasittumislämpötilaa (T_g'), mikä tekee tuotteesta erittäin herkän rakenteen luhistumiselle pakastekuivauksen aikana (Roos ja Karel, 1991). Näin ollen hitaan jäädytyksen haitat eivät rajoitu pelkästään suuriin jääkiteisiin ja solujen fyysiseen vaurioitumiseen, vaan se myös heikentää tuotteen termodynaamista stabiilisuutta kriittisellä tavalla.

Amorfinen jäätymiskonsentroitunut matriisi on pakastekuivauksen kannalta kriittinen tekijä. Sillä on oma lasittumislämpötilansa (T_g'), joka riippuu sen koostumuksesta ja voidaan laskea komponenttien yksittäisten lasittumislämpötilojen summana (Roos ja Karel, 1991) Kun tuote saavuttaa tämän lämpötilan pakastekuivauksen aikana, sen amorfinen rakenne muuttuu lasimaisesta siirappimaiseksi. Tämä on vaarallinen tilanne, sillä se lisää merkittävästi riskiä rakenteen luhistumiselle. Tuotteissa, joissa on korkea sokeripitoisuus, lasittumislämpötila on luonnostaan alhainen. Tällaisissa tapauksissa voidaan harkita apuaineiden, kuten maltodekstriinin, käyttöä, mikä nostaa kokonais- T_g' -arvoa ja parantaa rakenteen stabiilisuutta pakastekuivauksen aikana (Roos ja Karel, 1991). Vastaavasti sokeriliuosten laimentaminen nostaa niiden lasittumislämpötilaa ja helpottaa kuivausta (Roos, 1993).

Romahtamislämpötila (T_c) on yleensä muutaman asteen korkeampi kuin T_g' . Kun tuote saavuttaa tämän lämpötilan, sen rakenne luhistuu. Käytännössä tämä tarkoittaa, että huokoinen rakenne tiivistyy, kapillaarit sulkeutuvat ja tuote menettää kevyen, avoimen rakenteensa (Pikal ja Shah, 1990). Kammion paine määrittää sublimoituvan jään lämpötilan pakastekuivauksen aikana. Jos hyllyt lämmitetään liian nopeasti tai paine on liian korkea, jään lämpötila nousee yli romahtamislämpötilan ja rakenne luhistuu. Eutektisilla liuoksilla käytetään vastaavaa eutektista lämpötilaa (T_{eu}) rakenteen stabiilisuuden rajana.

Kasvipohjaisissa materiaaleissa rakenteeseen vaikuttavat myös kasvien omat ominaisuudet. Kasvisoluissa on vahva, pääosin polysakkarideista koostuva soluseinä, joka ylläpitää solun rakennetta ja voi auttaa säilyttämään muodon pakastekuivauksen aikana (Lewicki ja Pawlak, 2003). Monilla kasveilla on myös vahamainen ulkokuori, joka suojaa niitä luonnossa kuivumiselta. Pakastekuivauksessa tämä vahakerros voi kuitenkin olla haitallinen, sillä se hidastaa merkittävästi sublimaatiota (Sablani, 2006). Vahakerrosongelman ratkaisemiseksi on käytössä sekä mekaanisia että kemiallisia menetelmiä. Yksinkertaisin ratkaisu on marjojen viipalointi, mikä paljastaa sisäosan ja mahdollistaa vesihöyryn vapaamman kulun. Lämpökäsittely, kuten lyhyt blanseeraus, vahingoittaa vahakerroksen eheyttä parantaen samalla myös rehydratoitavuutta ja inaktivoiden entsyymejä (Xiao *et al.*, 2017).

Erikoisempia esikäsitteilymenetelmiä ovat entsyymaattiset käsittelyt, joiden soveltuvuus ja käyttö kaupallisessa mittakaavassa vaihtelee. Lipaasit, jotka katalysoivat lipidien hydrolyysireaktioita, voivat teoriassa hajottaa vahakerroksen lipidikomponentteja parantaen siten vesihöyryn läpäisyä (Sharma *et al.*, 2001). Endoproteaasit puolestaan voivat vaikuttaa solujen proteiinirakenteisiin ja siten helpottaa solujen avautumista (Tavano *et al.*, 2018). Joissain sovelluksissa on tutkittu myös kananmunan valkuaisen käyttöä vaahdotusaineena, joka voi parantaa rakenteen stabiilisuutta ja muodostaa huokoisen matriisin (Raharitsifa *et al.*, 2006).

Käytännön kokeissa on kuitenkin havaittu, että jäädytysmenetelmän merkitys ylittää usein muiden esikäsitteilyjen vaikutuksen. Nature Lyotech Oy:n ja VTT:n yhteistyössä tehdyissä tutkimuksissa testattiin lipaasikäsitteilyä kotimaisille karpaloille, jotka ovat erittäin haastavia kuivattavia niiden vahakerroksen, suuren sokeripitoisuuden ja pienen alkoholipitoisuuden takia. Karpalot poimitaan hyvin myöhään, niin sanottuina pakkasen puremina, mikä entisestään monimutkaistaa niiden käsittelyä. Testissä havaittiin, että vaikka lipaasikäsitteily oli teoriassa lupaava, suuremman ongelman aiheutti hidas jäädytys. Kun jäädytysolosuhteet optimoitiin, lopputulos parani merkittävästi riippumatta entsyymaattisesta esikäsitteilystä. Vastaavasti Nature Lyotech Oy selvitti kypsyyssasteen vaikutusta mustaherukan kuivumiseen. Raat marjat kuivuivat hieman paremmin kuin täysin kypsät, mutta tässäkin tapauksessa oikealla jäädytysmenetelmällä todettiin olevan suurin yksittäinen vaikutus lopputulokseen. Nämä havainnot korostavat sitä, että vaikka entsyymaattiset ja muut esikäsitteilyt voivat olla hyödyllisiä apuvälineitä, perustan muodostaa aina oikea jäädytysmenetelmä. (Nature Lyotech Oy, 2025)

On myös huomattava, että osa entsyymaattisista menetelmistä on edelleen tutkimusasteella, ja niiden käytännön sovellettavuus kaupallisessa pakastekuivauksessa vaihtelee tuotteen ja prosessin mukaan. Perinteiset menetelmät, kuten viipalointi ja blanseeraus, ovat yleisimmin käytettyjä niiden yksinkertaisuuden ja kustannustehokkuuden vuoksi. Tulevaisuudessa entsyymaattiset menetelmät voivat kuitenkin tarjota lisäarvoa erityisen haastavien tuotteiden kohdalla, kun niiden käyttöä on optimoitu ja kaupallistettu.

Rakenteen luhistuessa tuote ei ainoastaan tiivisty ja menetä huokoista rakennetta, vaan lopputuloksena voi olla myös täysin amorfinen, tahmea massa (Roos, 1995). Tällä on vakavia seurauksia tuotteen jatkokäsittelylle. Luhistunut tuote on vaikea jauhaa, se ei rehydatoidu kunnolla vedessä, ja sen visuaalinen laatu on heikko. Lisäksi luhistuminen voi tapahtua epätasaisesti, jolloin samassa erässä on sekä hyvin että huonosti kuivunutta materiaalia, mikä tekee tasalaatuisen jauheen valmistamisesta mahdotonta.

Visuaaliset ominaisuudet

Tuotteen visuaaliset ominaisuudet ovat ensimmäinen asia, jonka kuluttaja havaitsee, ja ne vaikuttavat ratkaisevasti ostopäätökseen. Vaikka visuaalisia ominaisuuksia arvioidaan pääosin subjektiivisesti, on olemassa selkeitä kriteerejä, jotka erottavat laadukkaan ja huonolaatuisen pakastekuivatun tuotteen toisistaan.

Laadukkaasti pakastekuivatun tuotteen tulisi muistuttaa ulkonäöltään mahdollisimman paljon tuoretta tuotetta. Värin tulisi säilyä kirkkaana ja luonnollisena, muodon tulisi olla säilynyt ja rakenteen tulisi näyttää kevyeltä ja huokoiselta. Jos pakastekuivauksen aikana ylitetään tuotteen romahtamislämpötila, se näkyy välittömästi visuaalisissa ominaisuuksissa: tuote rypistyy, painuu kasaan tai muuttuu tahmeaksi ja usein myös tummenee.

Värimuutokset ovat yksi yleisimmistä laatuongelmista pakastekuivauksessa. Liiallinen lämmön käyttö aiheuttaa tuotteen ruskistumista useiden kemiallisten mekanismien kautta. Maillardin reaktio tuottaa ruskeita pigmenttejä aminohappojen ja sokereiden välisessä reaktiossa (Martins *et al.*, 2000). Fenoliset yhdisteet, jotka ovat vastuussa monien marjojen värikkäistä pigmenteistä, hapettuvat helposti lämmön vaikutuksesta, erityisesti jos tuotteessa on aktiivisia entsyymejä kuten peroksidaasia. Peroksidaasin katalysoima fenolisten yhdisteiden hapettuminen on erityisen voimakasta happamissa olosuhteissa, mikä tekee happamista tuotteista tai etikkakäsittelyn ja marinoinnin läpikäyneistä tuotteista erityisen alttiita entsyymaattiselle ruskistumiselle (Vámos-Vigyázó, 1981). Tämä on tärkeää huomioida esikäsiteltyjen tuotteiden kohdalla, sillä hapan ympäristö voi merkittävästi nopeuttaa ei-toivottuja värimuutoksia. Hapettuminen johtaa ruskeaan, epämiellyttävään väriin ja voi olla erityisen ongelma tuotteissa, joissa väri on keskeinen laatutekijä.

Karotenoidit, kuten β -karoteeni ja lykopeeni, ovat tärkeitä väripigmentejä monissa elintarvikkeissa. Nämä yhdisteet ovat kuitenkin valon ja lämmön vaikutuksesta herkkiä hajoamaan, ja ne usein vaalenevat pakastekuivauksen aikana (Harnkarnsujarit ja Charoenrein, 2011). Tämä on erityisen näkyvää punaisissa ja oransseissa marjoissa, porkkanassa ja tomaatissa. Vaikka karotenoidien hajoaminen ei välttämättä vaikuta makuun yhtä voimakkaasti kuin ruskistuminen, se heikentää tuotteen visuaalista vetovoimaa merkittävästi.

Visuaalisten ominaisuuksien säilyttäminen edellyttää ennen kaikkea lämpötilan huolellista hallintaa koko prosessin ajan. Lisäksi on tärkeää minimoida tuotteen altistuminen hapelle ja valolle sekä prosessin aikana että säilytyksen aikana. Joillekin tuotteille, erityisesti niille, jotka sisältävät paljon fenolisia yhdisteitä tai aktiivisia entsyymejä, voi olla hyödyllistä tehdä esikäsitely kuten blanseeraus ennen pakastamista ja pakastekuivaamista. Blanseeraus

inaktivoi entsyymit ja voi siten ehkäistä entsyymattista ruskistumista ja värimuutoksia. Tämä on erityisen tärkeää happamien tuotteiden kohdalla, joissa peroksidaasin aktiivisuus on suurimmillaan.

Ravintoaineiden säilyvyys

Yksi pakastekuivauksen keskeisistä eduista on sen kyky säilyttää ravintoaineet paremmin, kuin useimmat muut kuivausmenetelmät. Tämä perustuu ensisijaisesti alhaisiin prosessilämpötiloihin, jotka hidastavat merkittävästi kaikkia kemiallisia hajoamisreaktioita. Tyhjiöolosuhteet vähentävät lisäksi hapen saatavuutta, mikä osaltaan hidastaa hapettumisreaktioita. Laadukkaan pakastekuivauksen tulisi olla niin hellävarainen, että tärkeiden ravintoaineiden määrä tai niiden biologinen aktiivisuus eivät laske merkittävästi kuivauksen aikana.

Ravintoaineiden säilyvyys ei kuitenkaan ole itsestäänselvyys, ja virheellisesti toteutettu prosessi voi johtaa merkittäviin tappioihin. Suurin yksittäinen ravintoainetta uhkaava tekijä on lämpö. Vesiliukoiset vitamiinit ovat erityisen herkkiä lämpöhajoamiselle. C-vitamiini (askorbiinihappo) on yksi herkimmistä vitamiineista ja hajoaa nopeasti korotetuissa lämpötiloissa. B-ryhmän vitamiineista erityisesti B1-vitamiini (tiamiini) ja B5-vitamiini (pantoteenihappo) ovat lämpöherkkiä ja voivat menettää aktiivisuuttaan pakastekuivauksen aikana, jos lämpötilat nousevat liian korkeiksi. (Sablani, 2006)

Fenoliset yhdisteet, kuten antosyaanit, ovat tärkeitä bioaktiivisia yhdisteitä, jotka toimivat antioksidanteina ja antavat marjoille niiden tyyppillisen värin. Nämä yhdisteet ovat lämpöherkkiä ja lisäksi alttiita hapettumiselle lämpöaktiivisten entsyymien, erityisesti peroksidaasin, vaikutuksesta. Peroksidaasin katalysoima fenolisten yhdisteiden hapettuminen on erityisen voimakasta happamissa olosuhteissa, mikä on merkittävä haaste marjojen pakastekuivauksessa, sillä useimmat marjat ovat luonnostaan happamia (Vámos-Vigyázó, 1981). Hapettuminen johtaa sekä värin menetykseen että ravintoarvon laskuun. Teoriassa blanseeraus ennen pakastekuivauksen aloittamista inaktivoisi nämä entsyymit ja estäisi entsyymattisen hapettumisen. Käytännössä marjoja ei kuitenkaan yleensä haluta blanseerata, sillä lämpökäsittely muuttaa niiden rakennetta, tekstuuria ja makua tavalla, joka ei ole toivottavaa. Marjat halutaan tyyppillisesti kuivata sellaisenaan säilyttäen niiden alkuperäiset ominaisuudet. Tämä asettaa erityisiä vaatimuksia prosessiparametrien hallinnalle: lämpötilat on pidettävä riittävän alhaisina ja prosessiaika mahdollisimman lyhyenä, jotta entsyymattinen hapettuminen ei ehdi aiheuttaa merkittävää laadun heikkenemistä.

Proteiinit ovat toinen ravintoaineryhmä, joka on altis lämpövaurioille. Proteiinit voivat denaturoitua, eli menettää tertiäärin rakenteensa, lämmön vaikutuksesta. Vaikka proteiinin aminohappokoostumus säilyy, denaturaatio voi vaikuttaa sen biologiseen aktiivisuuteen, sulavuuteen ja toiminnallisiin ominaisuuksiin. Tämä on erityisen tärkeää huomioida proteiinipitoisissa elintarvikkeissa tai tuotteissa, joissa proteiinien toiminnalliset ominaisuudet ovat keskeisiä. (Chang ja Pikal, 2009)

On myös huomioitava, että jotkut ravintoaineet voivat sublimoitua primäärikuivauksen aikana tai haihtua sekundäärikuivauksen aikana. Tämä koskee erityisesti pieniä, haihtuvia molekyylejä. Vaikka tämä ei ole yhtä merkittävä ongelma kuin lämpöhajoaminen, se voi silti vaikuttaa tuotteen kokonaisravintoarvoon. Ravintoaineiden säilyttäminen edellyttää siis huolellista lämpötilan hallintaa, mahdollisimman lyhyttä prosessiaikaa ja tarvittaessa esikäsitteilyä entsyymaattisen hajoamisen estämiseksi.

Jäännöskosteus ja stabiilisuus

Jäännöskosteus on yksi kriittisimmistä laatuparametreista, sillä se vaikuttaa suoraan tuotteen säilyvyyteen ja stabiilisuuteen. Pakastekuivattujen elintarvikkeiden jäännöskosteus on tyypillisesti 1-5 prosenttia, mikä on huomattavasti alhaisempi kuin useimmissa muissa kuivatuissa elintarvikkeissa. Tämä alhainen kosteuspitoisuus on keskeinen tekijä tuotteen pitkän säilyvyysajan taustalla.

Jäännöskosteuden merkitys liittyy läheisesti veden aktiivisuuteen (a_w), joka kuvaa tuotteessa vapaan, biologisille ja kemiallisille reaktioille käytettävissä olevan veden määrää. Pakastekuivatuilla elintarvikkeilla veden aktiivisuus on tyypillisesti 0,08-0,3, mikä on alle sen tason, jossa mikrobiologinen pilaantuminen on mahdollista (Labuza, 1980). Näin alhaisissa veden aktiivisuuksissa myös entsyymaattiset reaktiot hidastuvat merkittävästi, jolloin laatuvirheitä ei synny (Eriksson, 1978).

On tärkeää ymmärtää, että vaikka mikro-organismit eivät voi kasvaa pakastekuivattujen tuotteiden alhaisessa veden aktiivisuudessa, ne voivat silti säilyä elinkykyisinä. Kun tuote rehydratoidaan eli siihen palautetaan vesi, voivat mikrobit aktivoitua ja aloittaa kasvun (Beuchat, 1981). Tämän vuoksi alkuperäisen raaka-aineen mikrobiologisen laatuun on kiinnitettävä erityistä huomiota sekä huomioitava myös hygieenisten työtapojen noudattamisen tärkeyttä koko prosessin ajan.

Vaikka entsyymaattinen aktiivisuus hidastuu merkittävästi alhaisessa veden aktiivisuudessa, se ei pysähdy kokonaan (Labuza, 1980). Tämä on erityisen tärkeää ymmärtää pitkäaikaisen säilytyksen kannalta. Nature Lyotech Oy:n ja Turun yliopiston In-Mushroom tutkimushankkeessa havaittiin, että pakastekuivatuissa sienissä säilyy entsyymiaktiivisuutta, joka vaikuttaa niiden makuun ei-toivotulla tavalla pitkäaikaisessa säilytyksessä (Nature Lyotech Oy, 2025). Vaikka tarkat mekanismit ja vastuulliset entsyymit vaativat lisäselvitystä, ilmiö on käytännössä tunnistettu ongelma. Teoriassa blanseeraus ennen pakastekuivausta inaktivoisi nämä entsyymit ja parantaisi säilyvyyttä. Kuitenkin, kuten marjojen kohdalla, myös sienten tapauksessa lämpökäsittely voi muuttaa tuotteen rakennetta ja makua tavalla, joka ei aina ole toivottava, erityisesti kun tavoitteena on säilyttää tuotteen alkuperäiset ominaisuudet. Hapettoman pakkauksen käyttö, kuten suojakaasupakkaus tai hapenpoistajat, saattaa hidastaa hapetusreaktioita ja siten osaltaan vähentää ei-toivottuja makumuutoksia, vaikka entsyymaattinen aktiivisuus sinänsä ei vaadi happea (Labuza ja Breene, 1989). Tämä korostaa sitä, että pakastekuivauksen laadunhallinta ei pääty kuivausprosessin loppuessa, vaan jatkuu koko säilytysajan.

Jäädäytysmenetelmä vaikuttaa myös sekundäärikuivauksen tehokkuuteen. Pienet jääkiteet, jotka muodostuvat nopeassa jäädäytöksessä, jättävät jälkeensä enemmän huokoista pinta-alaa ja siten enemmän desorptiopinta-alaa. Tämä tarkoittaa, että sidottu vesi vapautuu helpommin ja sekundäärikuivaus vaatii vähemmän energiaa ja aikaa (Kasper ja Friess, 2011). Epätäydellinen sekundäärikuivaus on yksi yleisimmistä virheistä pakastekuivauksessa. Jos sekundäärikuivaus keskeytetään liian aikaisin, tuotteeseen jää ylimääräistä kosteutta, mikä lyhentää säilyvyysaikaa merkittävästi. Suurempi vesipitoisuus tarkoittaa myös kuivatun tuotteen alhaisempaa lasittumislämpötilaa (T_g), mikä tekee tuotteesta herkemman rakenteen muutoksille säilytyksen aikana, joka yleensä havaitaan tuotteen pehmenemisenä (Roos ja Karel, 1991).

Pakkaus on toinen kriittinen tekijä jäännöskosteuden hallinnassa. Vaikka tuote olisi kuivattu täydellisesti, huonolaatuinen pakkausmateriaali voi päästää kosteutta takaisin tuotteeseen säilytyksen aikana. Tämän estämiseksi on käytettävä pakkausmateriaaleja, joilla on hyvät barrier-ominaisuudet eli materiaaleja, jotka eivät läpäise vesihöyryä ja happea. Huokoinen rakenne altistaa tuotteen myös hapen vaikutukselle pitkäaikaisessa säilytyksessä. Happi voi hapettaa ravintoaineita, erityisesti C-vitamiinia, rasvoja ja fenolisia yhdisteitä, mikä heikentää tuotteen laatua ajan myötä (Labuza ja Breene, 1989).

Erityisen haasteellisia ovat rasvat ja öljyt, jotka eivät kuivu pakastekuivauksen aikana (Ratti, 2001). Rasvat voivat hapettua säilytyksen aikana, mikä johtaa eltaantumiseen ja

epämiellyttävän maun kehittymiseen. Tämän estämiseksi happi täytyy poistaa pakkausteknologisesti, esimerkiksi suojakaasupakkaamalla tai käyttämällä hapenpoistajia.

Joillekin elintarvikkeille voi myös olla hyödyllistä tehdä esikäsittely ennen pakastamista ja pakastekuivaamista, jotta saavutetaan pidempi säilyvyysaika ja parempi stabiilisuus. Tyypillisiä esikäsittelyjä ovat blanseeraus entsyymättömyyden vähentämiseksi, pH:n säätö värien stabiloimiseksi, apuaineiden kuten maltodekstriinin lisäys lasittumislämpötilan nostamiseksi ja rakenteen vahvistamiseksi, sekä mikrobituotteiden tapauksessa kryoprotektanttien lisäys solujen suojaamiseksi.

Rehydratoituvuus

Pakastekuivattuja tuotteita voidaan käyttää joko sellaisenaan tai rehydratoituina, eli palauttamalla vesi takaisin tuotteeseen. Monet sovellukset, kuten smoothiet, jogurtit, keitot ja juomat, edellyttävät hyvää rehydratoituvuutta. Tuotteen kyky imeä vesi takaisin nopeasti ja tasaisesti on tärkeä laatuksiteeri näissä käyttötarkoituksissa.

Rehydratoituvuus riippuu ensisijaisesti tuotteen rakenteellisista ominaisuuksista. Huokoinen, avoin rakenne, jossa on paljon kapillaareja, mahdollistaa veden nopean imeytymisen. Jos tuotteen rakenne on päässyt luhistumaan edes osittain pakastekuivauksen aikana, kapillaarit sulkeutuvat ja vesi ei pääse enää tunkeutumaan tuotteen sisäosiin. Tämä johtaa siihen, että tuotetta ei voida rehydratoida kunnolla, vaan se jää osittain kuivaksi ja kovaksi, kun taas ulkopinta voi olla aivan liian märkä. (Krokida ja Marinos-Kouris, 2003)

Kasvipohjaisissa materiaaleissa rehydratoituvuutta hidastaa usein kasvien oma kuori. Vahamainen tai muuten vettä hylkivä ulkokuori estää veden imeytymisen, vaikka tuotteen sisäinen rakenne olisi huokoinen (Lewicki ja Pawlak, 2003). Tämä on erityisen tyypillistä monille marjoille, joilla on luonnollinen suojakerros. Esikäsittely, kuten blanseeraus, voi pehmentää tätä kuorta ja parantaa rehydratoituvuutta. Vaihtoehtoisesti tuote voidaan pilkkoa, rouhia tai jauhaa, jolloin kuoren vaikutus vähenee.

Jauhaminen on usein tarpeen, jos tuotetta käytetään jauheen muodossa. Luhistunut rakenne ei ainoastaan rehydratoidu huonosti, vaan siitä on myös mahdoton saada tasalaatuista jauhetta. Tuote murskautuu epätasaisesti, jolloin jauheessa on sekä hienoja että karkeita partikkeleita (Adhikari *et al.*, 2001). Tämä vaikuttaa negatiivisesti sekä tuotteen käyttökokemukseen että visuaaliseen laatuun. Rehydratoituvuuden varmistaminen edellyttää siis ennen kaikkea huokoisen rakenteen säilyttämistä koko pakastekuivausprosessin ajan, minkä lisäksi voi olla tarpeen optimoida tuotteen partikkelikokoa ja esikäsittelymenetelmiä riippuen käyttötarkoituksesta.

Kriittiset virheet pakastekuivauksessa

Pakastekuivaus on monivaiheinen prosessi, jossa jokainen vaihe vaikuttaa lopputuotteen laatuun. Tietyt virheet toistuvat kuitenkin erityisen usein, ja ne voivat pilata muuten hyvin suunnitellun prosessin. Seuraavassa käsitellään näitä kriittisiä virheitä ja niiden välttämistä yksityiskohtaisemmin.

Lämpötilan hallinta primäärikuivauksen aikana

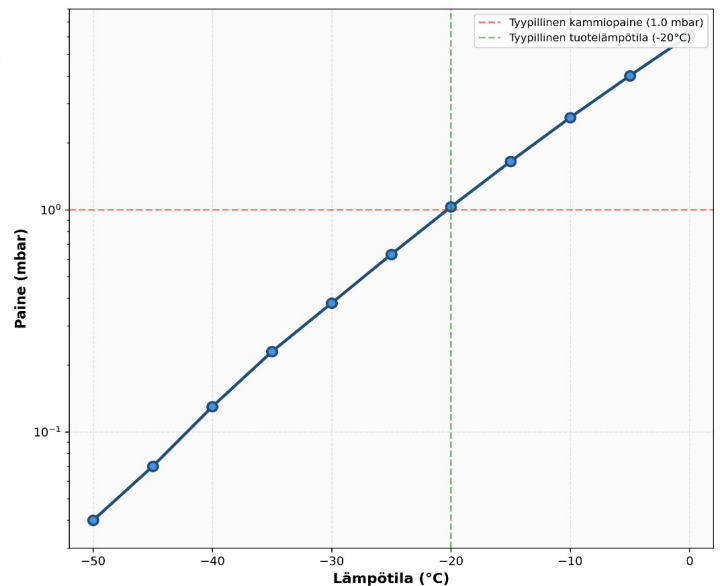
Yleisin ja vakavimmista seurauksista kärsivä virhe pakastekuivauksessa on liian nopea lämmitys primäärikuivauksen aikana. Monelle aloittelevalle pakastekuivaajalle on houkuttelevaa nostaa hyllyjen lämpötilaa nopeasti prosessin nopeuttamiseksi, mutta kun hyllyt lämmitetään liian aikaisin tai liian nopeasti, tuotteen lämpötila nousee yli sen romahtamislämpötilan. Tämä johtaa rakenteen romahtamiseen, maun muutoksiin ja ravintoaineiden hajoamiseen.

Oikea lähestymistapa alkaa stabilointivaiheella. Kun kammion paine on laskettu ja alipaine saavutettu, hyllyjä ei lämmitetä lainkaan ensimmäiseen tuntiin. Tämä varmistaa, että koko tuotematriisi on täysin jäässä ja riittävän alhaisessa lämpötilassa. Stabiloinnin aikana tuotteen lämpötila laskee kammion paineen määrittämään tasapainolämpötilaan, jonka voi tarkistaa vesihöyryn paineen ja lämpötilan välisestä taulukosta (Kuva 2). Stabiloinnin onnistumisen voi havaita siitä, että kammiopaine ei enää laske. Jos pakastekuivurissa on jäädytysominaisuus ja jäädytys tapahtuu itse kuivurissa, on erityisen tärkeää varmistaa tuotteen täydellinen jäätyminen ennen paineen laskemista.

Vesihöyryn kyllästyspaine eri lämpötiloissa (sublimaatio)

Sublimaatiopaine vs. lämpötila

Lämpötila	Paine (mbar)	Paine (Pa)
0°C	6.11	611
-5°C	4.01	401
-10°C	2.60	260
-15°C	1.65	165
-20°C	1.03	103
-25°C	0.63	63
-30°C	0.38	38
-35°C	0.23	23
-40°C	0.13	13
-45°C	0.07	7
-50°C	0.04	4



Kuva 2. Vesihöyryn paine eri lämpötiloissa. Sublimaatiopinnan jään lämpötila määräytyy kammion paineen mukaan ja se nousee kammion paineen noustessa.

Stabiloinnin jälkeen hyllyjen lämpötilaa voidaan nostaa suhteellisen nopeasti. Tämä johtuu siitä, että sublimaatio on endoterminen reaktio, joka tarvitsee tapahtuakseen energiaa. Kun energia tuodaan hyllyjen lämmityksen kautta, jään sublimaatio kuluttaa tämän energian ja pitää tuotteen lämpötilan alhaisena. Sublomaation aikana jään lämpötila määräytyy kammion paineen mukaan, eikä riskiä liian korkealle lämpötilalle yleensä ole niin kauan kuin runsaasti jäätä on läsnä. Tästä syystä paineen jatkuva seuranta on kriittistä koko kuivauksen ajan. Joissain pakastekuivureissa kuivausta voidaan ohjata myös painerajojen avulla, jolloin järjestelmä automaattisesti estää kriittisten lämpötilojen ylittämisen.

On tärkeää ymmärtää, että hyllyjen lämpötila ei ole sama kuin tuotteen lämpötila. Hylly voi olla merkittävästi lämpimämpi kuin sen päällä oleva tuote, sillä endoterminen sublimaatio pitää tuotteen viileänä. Luotettavin tapa varmistaa turvallinen kuivaus on mitata tuotteen todellista lämpötilaa käyttämällä termoparin tai muun lämpötila-anturin avulla, jotka on sijoitettu suoraan tuotteeseen. Tällöin voidaan varmistaa, että tuotteen lämpötila pysyy turvallisesti alle romahtamislämpötilan koko prosessin ajan. Ilman tuotelämpötilan suoraa mittausta prosessia on ajettava huomattavasti varovaisemmin, mikä pidentää kuivausaikoja.

Lämpötilaa ei voi nostaa rajattomasti, vaan se on tehtävä hallitusti. Lämpötilaramppi, eli nopeus jolla hyllyjen lämpötilaa nostetaan, on kriittinen parametri. Liian jyrkkä lämpötilaramppi voi johtaa siihen, että paine kammiossa nousee liian nopeasti, jolloin tuotteen lämpötila nousee yli romahtamislämpötilan ennen kuin sublimaatio ehtii kuluttaa tuotua lämpöenergiaa. Turvallinen lämpötilaramppi riippuu tuotteen ominaisuuksista, mutta

tyypillisesti 5-10°C tunnissa on turvallinen nopeus primäärikuivauksen alkuvaiheessa. Prosessin edetessä ja jään määrän vähentyessä ramppeja voidaan loiventaa entisestään. Älykkäät pakastekuivausjärjestelmät voivat säätää lämpötilaramppia automaattisesti prosessin tilan mukaan, mutta manuaalisesti ohjattavissa laitteissa tämä vaatii kokemusta ja huolellista seuranta.

On myös tärkeää ymmärtää, että kaikki pakastekuivurit eivät ole rakenteeltaan yhtä tehokkaita lämmönsiirron kannalta. Joissakin laitteissa, erityisesti pienemmissä malleissa, lämmitys toteutetaan säteilylämmittäjillä, jotka sijaitsevat ainoastaan kammion sivuseinillä ilman varsinaista hyllyjen lämmitysjärjestelmää. Tällaisissa laitteissa lämpöenergiaa ei saada johdettua riittävästi kuivattavaan tuotteeseen, sillä lämpösäteily on huomattavasti vähemmän tehokas lämmönsiirtomuoto kuin suora johtuminen lämmitetyistä hyllyistä. Lisäksi säteilylämmittäjien säätäminen on erittäin haastavaa, sillä lämpötilajakauma tuotteessa on epätasainen ja vaikea ennakoida. Seurauksena sublimaatio hidastuu merkittävästi, prosessiajat pitenevät ja lopputuotteen laatu voi kärsiä epätasaisesta kuivumisesta. Ammattimaisessa pakastekuivauksessa tulisikin aina suosia laitteita, joissa on koko pinta-alaltaan nestekierolla tai sähköisesti lämmitettävät hyllyt, jotka mahdollistavat tehokkaan ja tasaisen lämmönsiirron tuotteeseen koko kuivauksen ajan.

Lämmitetyissä hyllyissä lämmönsiirto tuotteeseen tapahtuu kahdella tavalla: johtumalla hyllyn kautta ja lämpösäteilynä yläpuolella olevalta lämmitetyltä hyllyltä. Ylempi hylly toimii tehokkaana säteilylämmittäjänä alemmalla hyllyllä olevalle tuotteelle, lisäten merkittävästi kokonaislämmönsiirtoa. Tästä seuraa kuitenkin käytännön ongelma: ylimmällä hyllyllä oleva tuote ei saa tätä ylhäältä tulevaa lämpösäteilyä, koska sen yläpuolella ei ole toista lämmitettyä hyllyä. Seurauksena ylimmällä hyllyllä kuivuminen on hitaampaa kuin alemmilla hyllyillä, ja ylimmän hyllyn tuotteet voivat jäädä alikuivuneiksi, vaikka alemmat hyllyt olisivat jo täysin kuivia. Tämä epätasainen kuivuminen on erityisen ongelmallista suurissa eräkoissa, ja se tulisi ottaa huomioon prosessiajan määrittämisessä. Ylimmälle hyllylle kannattaa aina pakata kuivattavaa tuotetta vähemmän kuin muille, kun taas muiden hyllyjen tuotemäärä kannattaa pitää mahdollisimman tasaisena, jotta kuivuminen onnistuisi mahdollisimman tasaisesti. Joissakin pakastekuivureissa tämä ylimmän hyllyn ongelma on ratkaistu asentamalla kammion kattoon erillinen säteilylämmittäjä ylimmän hyllyn yläpuolelle.

Epätasainen kuivuminen ei rajoitu pelkästään eri hyllyjen välille, vaan sitä esiintyy myös yksittäisellä hyllyllä. Hyllyn reunoilla olevat tuotteet saavat enemmän lämpösäteilyä kammion lämpimiltä seiniltä kuin keskellä olevat tuotteet. Tämä niin sanottu reunavaikutus johtaa siihen, että reunalla olevat tuotteet kuivuvat nopeammin kuin keskellä olevat. Ilmiö on erityisen voimakas laitteissa, joissa kammion seinät ovat huoneenlämpöisiä tai lämmitettyjä.

Reunavaikutus on otettava huomioon prosessiaikaa määritettäessä: kuivausaika on mitoitettava keskellä olevien, hitaimmin kuivuvien tuotteiden mukaan. Vaihtoehtoisesti hyllyjä voidaan kiertää tai vaihtaa keskenään prosessin aikana, jotta kuivuminen tasaantuu, mutta tämä vaatii prosessin keskeytystä ja kammion avaamista, mikä ei aina ole mahdollista tai suotavaa.

Myös hyllyjen ja tarjottimien materiaalivalinnoilla on merkittävä vaikutus lämmönsiirron tehokkuuteen. Alumiini on erinomainen lämmönjohde, jonka lämmönjohtavuus on noin $205 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, kun taas ruostumattoman teräksen lämmönjohtavuus on vain noin $16 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Silikoni on vielä huonompi lämmönjohde, jonka lämmönjohtavuus on tyypillisesti vain $0,2\text{-}0,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (Incropera ja DeWitt, 2002) Nämä merkittävät erot näkyvät suoraan kuivauksen tehokkuudessa ja tasaisuudessa. Alumiinia kartetaan joskus turhaan muissa sovelluksissa, vaikka tieteellinen näyttö on kiistanalaista. Pakastekuivauksessa oikea materiaalivalinta on niin kriittinen tekijä, ettei vaihtoehdoille ole varaa.

Pakastekuivureiden hyllyt ovat tyypillisesti alumiinia tai alumiinilevyllä päällystettyä terästä, mikä mahdollistaa tehokkaan lämmönsiirron hyllyjen lämmitysjärjestelmästä tuotteeseen. Ongelmia syntyy kuitenkin, jos tuote asetetaan ruostumattomasta teräksestä valmistettuihin tarjottimiin, astioihin tai silikonisille matoille. Erityisesti silikoninen matto tai levy toimii erittäin tehokkaana eristeenä hyllyn ja tuotteen välillä, estäen lähes kokonaan lämmönsiirron johtumalla. Terästarjottimetkin heikentävät merkittävästi lämmönsiirtoa. Seurauksena tuotteeseen ei saada johdettua riittävästi lämpöenergiaa sublimaation ylläpitämiseksi, mikä pidentää prosessiaikoja huomattavasti ja voi johtaa epätasaiseen kuivumiseen.

Optimaalisessa tilanteessa tuote asetetaan suoraan alumiinisille hyllyille tai ohuisiin alumiinisiin tarjottimiin, jotka eivät merkittävästi heikennä lämmönsiirtoa. Jos tarjottimien käyttö on välttämätöntä esimerkiksi nestemäisten tuotteiden tai pienten partikkelien vuoksi, tulisi aina valita alumiinisia tarjottimia ruostumattoman teräksen sijaan. Silikonisia mattoja tai levyjä tulisi välttää kokonaan ammattimaisessa pakastekuivauksessa, vaan käyttää esim. leivinpaperia tai vastaavaa erittäin tarttuvien tuotteiden kanssa. Nämä yksinkertaiset materiaalivalinnat voivat lyhentää kuivausaikoja merkittävästi ja parantaa lopputuotteen tasalaatuisuutta.

Primäärikuivauksen loppuvaihe tunnistetaan paineen muutoksesta. Kun jää on sublimoitunut, vesihöyryä ei enää vapaudu yhtä nopeasti ja kammion paine alkaa laskea. Vasta tämän jälkeen on turvallista nostaa lämpötilaa asteittain siirryttäessä sekundäärikuivaukseen.

Sekundäärikuivauksen laiminlyönti

Toinen erittäin yleinen virhe pakastekuivauksessa on epätäydellinen sekundäärikuivaus. Monelle aloittelevalle pakastekuivaajalle prosessi näyttää olevan valmis primäärikuivauksen päätyttyä, kun kaikki näkyvä jää on sublimoitunut. Todellisuudessa tuotteessa on kuitenkin vielä merkittäviä määriä sitoutunutta vettä, joka täytyy poistaa sekundäärikuivauksen aikana ennen kuin tuote saavuttaa halutun jäännöskosteuden ja stabiilisuuden.

Sekundäärikuivaus eroaa perustavanlaatuisesti primäärikuivauksesta sekä fysikaalisesti että prosessiteknisin perustein. Primäärikuivauksessa poistetaan vapaa vesi sublimaation kautta, jolloin jää muuttuu suoraan vesihöyryksi. Sekundäärikuivauksessa poistetaan sitoutunutta vettä desorption kautta, mikä eroaa sublimaatiosta täysin. Sitoutunut vesi on fysikaalisesti ja kemiallisesti kiinnittynyt tuotteen rakenteeseen, esimerkiksi vetysidosten kautta proteiineihin, sokereihin ja muihin aineisiin. Tämän veden irrottaminen vaatii huomattavasti enemmän energiaa ja siten korkeampia lämpötiloja kuin primäärikuivaus. Tuotteen lämpötila sekundäärikuivauksessa on elintarvikkeilla tyypillisesti 28-42°C, mutta voi olla korkeampikin. Sekundäärikuivaus kestää usein jopa kauemmin kuin primäärikuivaus, mikä on monelle aloittelevalle pakastekuivaajalle yllätys.

Siirtymä primäärikuivauksesta sekundäärikuivaukseen tapahtuu asteittain. Kun primäärikuivaus lähestyy loppuaan ja jään määrä vähenee, kammion paine alkaa laskea, koska jään sublimaatio hidastuu. Tämä on merkki siitä, että voidaan aloittaa lämpötilan nostaminen kohti sekundäärikuivauksen lämpötiloja. Lämpötilan nosto on tehtävä hallitusti ja asteittain, tyypillisesti 5-10°C tunnissa, jotta vältytään mahdollisilta rakenneongelmilta. Vaikka jää on jo sublimoitunut, tuote sisältää edelleen sitoutunutta vettä, joka alentaa sen lasittumislämpötilaa (T_g'). Liian nopea lämmitys voi johtaa tuotteen pehmittymiseen tai rakenteen muutoksiin, vaikka varsinaista romahtamista ei enää tapahtuisikaan.

Sekundäärikuivauksen aikana paineen käyttäytyminen on erilaista kuin primäärikuivauksessa. Koska desorptio on hitaampi prosessi kuin sublimaatio, vesihöyryn vapautuminen on vähäisempää. Paine voi pysyä suhteellisen vakaana tai laskea hyvin hitaasti sekundäärikuivauksen aikana. Tämä voi antaa harhaanjohtavan kuvan prosessin etenemisestä - vakaa paine ei välttämättä tarkoita että kuivaus on valmis, vaan että desorptio tapahtuu tasaisella nopeudella. Sekundäärikuivauksen päättymistä ei voida luotettavasti arvioida pelkän paineen perusteella, vaan tarvitaan muita menetelmiä.

Luotettavin tapa varmistaa sekundäärikuivauksen täydellisyys on mitata tuotteen jäännöskosteus. Tähän on olemassa useita menetelmiä, joista yleisin ja yksinkertaisin on Karl Fischer -titraus, joka mittaa tarkasti veden määrän näytteessä (May *et al.*, 1992).

Menetelmä vaatii kuitenkin laboratoriovälineitä ja osaamista, joten se ei ole aina käytännöllinen tuotantotilanteessa. Toinen yleinen menetelmä on kuivata näyte tunnetussa lämpötilassa ja mitata painonmuutos, josta voidaan laskea kosteuspitoisuus (Oetjen ja Haseley, 2004). Tämä niin sanottu LOD-menetelmä (Loss on Drying) on yksinkertainen mutta aikaa vievä. Kaupallisesti on saatavilla myös tähän menetelmään perustuvia nopeita kosteusanalysointilaitteita. Kosteuspitoisuuden määrittämiseen voi käyttää myös infrapunakosteusmittaria, joka antaa nopean arvion kosteuspitoisuudesta, mutta se ei ole yhtä tarkka kuin laboratoriotestit tai kosteusanalysointilaitteiden antamat tulokset.

Kokeneemmat käyttäjät oppivat tunnistamaan sekundäärikuivauksen päättymisen tuotteen ulkonäön ja tuntuman perusteella. Täysin kuivattu tuote on kevyt, rapea ja helposti murtuva tai jauhattava. Jos tuote tuntuu joustavalta, pehmeältä tai tahmealta, se on todennäköisesti alikuivunut. Visuaalisesti täysin kuivattu tuote näyttää matalalta ja huokoiselta, kun taas alikuivunut tuote voi näyttää hieman painuneelta tai tiivistyneeltä. Nämä havainnot vaativat kuitenkin kokemusta, ja erityisesti aloittelevien pakastekuivaajien tulisi aina varmistaa jäännöskosteus mittaamalla.

Yksi yleisimmistä virheistä sekundäärikuivauksessa on prosessin keskeyttäminen liian aikaisin sen perusteella, että primäärikuivaus on päättynyt ja paine on vakiintunut. Toinen yleinen virhe on käyttää liian matalia lämpötiloja sekundäärikuivauksessa, mikä tekee desorptiosta erittäin hidasta. Kolmas virhe on olla nostamatta lämpötilaa tarpeeksi asteittain, mikä voi johtaa tuotteen pehmenemiseen. Neljäs virhe on olla tekemättä jäännöskosteuden mittausta lainkaan ja luottaa pelkkään ajastukseen tai paineen käyttäytymiseen. Viides virhe on mitata jäännöskosteus liian pienestä näytteestä tai vain yhdestä kohdasta erää, jolloin epätasainen kuivuminen jää huomaamatta.

Epätäydellinen sekundäärikuivaus johtaa useisiin vakaviin ongelmiin. Ensinnäkin tuotteen säilyvyysaika lyhenee merkittävästi, sillä mikrobiologinen kasvu ja entsyymaattiset reaktiot ovat mahdollisia korkeammassa kosteuspitoisuudessa. Toiseksi tuote voi pehmetä tai muuttua tahmeaksi säilytyksen aikana, erityisesti jos se altistuu lämpötilavaihteluille. Korkeampi jäännöskosteus tarkoittaa alhaisempaa lasittumislämpötilaa, mikä tekee tuotteesta herkemman rakennemuutoksille. Liian kostea tuote voi homehtua, mikä tekee sen täysin käyttökelvottomaksi. Alikuivunut tuote ei jauhaudu kunnolla, vaan takertuu jauhinlaitteisiin ja muodostaa epätasaisia kappaleita. Rehydratoitavuus voi myös heikentyä, sillä osittain kostea rakenne ei ime vettä yhtä tehokkaasti kuin täysin kuivattu huokoinen rakenne.

Sekundäärikuivauksen kestoan vaikuttavat monet tekijät. Jäädäytysmenetelmä on tärkeä: nopeasti jäädäytetty tuote, jossa on pienet jääkiteet, jättää jälkeensä enemmän huokoista

desorptiopinta-alaa, mikä nopeuttaa sekundäärikuivausta. Tuotteen koostumus vaikuttaa myös merkittävästi: proteiinit ja sokerit sitovat vettä voimakkaasti, mikä tekee niiden kuivaamisesta hidasta. Tuotekerroksen paksuus on kriittinen tekijä myös sekundäärikuivauksessa: paksuissa kerroksissa sisäosista irtoavan veden täytyy diffundoitua pintaa kohti, mikä on hidas prosessi. Lopuksi käytetyt lämpötilat määrittävät desorptionopeuden: korkeammat lämpötilat nopeuttavat prosessia, mutta ne on nostettava asteittain ja turvallisesti.

Tavoiteltava jäännöskosteus vaihtelee merkittävästi tuotteen koostumuksen ja käyttötarkoituksen mukaan. Seuraavat arvot ovat suuntaa-antavia, ja tarkkaa tavoitearvoa määritettäessä tulee ottaa huomioon tuotteen käyttötarkoitus, pakkausmenetelmä ja haluttu säilyvyysaika. Marjat säilyvät parhaiten jäännöskosteudessa 2-5%, jossa herkäät marjat kuten mansikat ja vadelmat sietävät 3-5% murenematta, kun taas kovemmat marjat kuten mustikat ja karpalot voivat olla kuivempia, 2-4%. Vihannekset vaativat tyypillisesti 2-4% jäännöskosteutta, jossa lehtivihannekset ovat alhaisemman pään ja juurekset korkeamman pään arvoissa. Sienet voivat sietää hieman korkeampaa kosteutta, 3-5%, sillä liian kuivina ne murenevat ja menettävät halutun tekstuurinsa. (Oetjen ja Haseley, 2004)

Proteiinituotteissa suositellaan yleisesti alhaisempia jäännöskosteusarvoja. Liha säilyy parhaiten 1-3% jäännöskosteudessa, mutta rasvainen liha vaatii alhaisempia arvoja (1-2%) hapettumisriskin minimoimiseksi, kun taas vähärasvainen liha sietää 2-3%. Kala on erityisen herkkä hapettumiselle, ja erityisesti rasvainen kala kuten lohi ja siika tulisi kuivata 1-2% jäännöskosteuteen, kun taas vähärasvainen kala voi olla 2-3%. On tärkeää muistaa, että rasvat eivät kuivu pakastekuivauksen aikana, mikä tekee niistä erityisen alttiita hapettumiselle säilytyksen aikana. Mikrobiologiset tuotteet, kuten probiootit ja starterit, vaativat erittäin matalan jäännöskosteuden, tyypillisesti 1-2%. Elävien mikrobien säilyvyys ja aktiivisuus riippuvat kriittisesti alhaisesta veden aktiivisuudesta, ja alle 2% jäännöskosteus on optimaalinen pitkälle säilyvyydelle ja aktiivisuuden säilyttämiselle. (Oetjen ja Haseley, 2004)

Sekundäärikuivauksen täydellisyys tulisi varmistaa mittaamalla jäännöskosteus ennen tuotteen pakkaamista. Mittaus tulisi tehdä useammasta kohdasta erää, erityisesti ylimmältä ja alimmalta hyllyltä sekä keskeltä ja reunoilta, jotta varmistetaan tasainen kuivuminen. Vain systemaattinen loppumittaus varmistaa, että tuote täyttää laatukriteerit ja saavuttaa halutun säilyvyyden.

Jäädäytysmenetelmän merkityksen aliarviointi

Jäädäytysvaihe määrittää monin tavoin koko jatkoprosessin onnistumisen, mutta sen merkitystä aliarvioidaan usein. Jäädäytysmenetelmä vaikuttaa ratkaisevasti muodostuvan mikrorakenteen laatuun, ja tämä rakenne puolestaan määrittää pakastekuivauksen onnistumisen. Hidas jäädäyttäminen, esimerkiksi tavallisessa pakastimessa -18°C , tuottaa suuria jääkiteitä. Nämä voivat rikkoa solujen rakenteita, mikä näkyy tuotteen tekstuurissa. Lisäksi suuret jääkiteet jättävät jälkeensä suuria onteloita, joiden ympärillä amorfinen matriisi on erittäin konsentroitunutta. Tämä johtaa alhaiseen lasittumislämpötilaan (T_g') ja lisää rakenteen romahtamisen riskiä.

Hitaan jäädäytymisen ongelma ei rajoitu pelkästään suuriin jääkiteisiin. Kun jäädäytys tapahtuu liian hitaasti, puhdas vesi jäädäytyy ensin solun ulkopuolelle, mikä nostaa solunulkokaisen nesteen osmoottista painetta. Osmoottisen gradientin vaikutuksesta vesi siirtyy ja jäädäytyy solun ulkopuolelle, jolloin solun sisäisten komponenttien konsentraatio kasvaa merkittävästi (Mazur, 1984). Tämä konsentroituminen laskee solun sisäisen liuoksen lasittumislämpötilaa (T_g'), mikä tekee tuotteesta erittäin herkän rakenteen romahtamiselle pakastekuivauksen aikana. Lisäksi voimakas konsentroituminen laskee liuoksen jäädäytymispistettä siinä määrin, että muodostuu alueita, jotka eivät jäädä ollenkaan käytetyssä jäädäytyslämpötilassa. Nämä jäädäytymättömät, erittäin konsentroituneet alueet aiheuttavat merkittäviä ongelmia pakastekuivauksen aikana (Roos, 1995). Näin ollen hitaan jäädäytymisen haitat ovat sekä mekaanisia että termodynaamisia. Pahimmissa tapauksissa nämä yhdistyneet ongelmat voivat johtaa siihen, että tuote ei ole enää lainkaan pakastekuivattavissa.

Nopea jäädäyttäminen tuottaa pieniä jääkiteitä, jotka säilyttävät solurakenteen paremmin ja jättävät jälkeensä hienomman, huokoisemman rakenteen. Lisäksi ne tarjoavat suuremman pinta-alan sekundäärikuivaukselle, mikä nopeuttaa sitoutuneen veden poistumista. Vaikka nopea jäädäyttäminen vaatii investointeja parempiin jäädäytyslaitteisiin, se maksaa itsensä takaisin paremmassa lopputuotteen laadussa.

Teollisessa mittakaavassa on käytössä useita erilaisia pakastusmenetelmiä, joiden soveltuvuus ja tehokkuus vaihtelevat tuotteen mukaan. Kaappipakastus on yksinkertaisin menetelmä, jossa tuotteet asetetaan pakastuskaappiin tai -huoneeseen. Tämä menetelmä on hidas ja tuottaa suuria jääkiteitä, joten se ei ole optimaalinen pakastekuivaukseen menevän raaka-aineen valmistukseen. Kaappipakastus soveltuu lähinnä pienimuotoiseen toimintaan tai tilanteisiin, joissa jäädäytysnopeus ei ole kriittinen.

Kontaktipakastus, jossa tuote asetetaan suoraan kylmien levyjen väliin, tarjoaa tehokkaan lämmönsiirron johtamalla. Menetelmässä käytetään tyypillisesti hydraulisesti puristettavia

levypakastimia, joissa tuote pakataan ohuisiin pakkauksiin tai rutiläkoreihin ja puristetaan kylmien metallilevyjen väliin. Kontaktipakastus on erityisen tehokas tasaisille, ohuille tuotteille, sillä suora kosketus kylmään pintaan mahdollistaa nopean lämmönsiirron ilman ilmavirtauksen rajoituksia. Menetelmä soveltuu hyvin esimerkiksi marjoille, jotka on levitetty ohueksi kerrokseksi rutiläkoriin. Kontaktipakastus on energiatehokas ja tuottaa tasaisen jäädytyksen, mikä tekee siitä hyvän vaihtoehdon pakastekuivaukseen menevän raaka-aineen valmistukseen.

IQF-pakastus (Individual Quick Freezing) on erityisen tehokas menetelmä yksittäisten marjojen ja hedelmien pakastamiseen. Menetelmässä tuotteet pakastetaan erillään toisistaan liikkuvalla hihnalla tai tärisevällä alustalla, jolloin ne eivät takerry toisiinsa. Kylmä ilmavirta kulkee vapaasti jokaisen yksikön ympäri, mikä mahdollistaa nopean ja tasaisen jäädytyksen. IQF-pakastus on erinomainen vaihtoehto pakastekuivaukseen menevän raaka-aineen valmistukseen, sillä se tuottaa vapaasti virtaavia, tasalaatuisia kappaleita joiden mikrorakenne on optimaalinen.

Tunnelipakastus, joka perustuu tuulitunnelipakastukseen (air blast freezing), on yleisesti käytetty teollinen menetelmä, jossa tuotteet kulkevat läpi jäädytystunnelin hihnalla tai vaunuilla. Tunnelissa käytetään hyvin alhaisia lämpötiloja ja voimakasta ilmakiertoa, mikä mahdollistaa nopean jäädytyksen. Tunnelipakastuksessa tuotekerroksen paksuudella ja pakkaustavalla on merkittävä vaikutus jäädytyksen nopeuteen ja tasaisuuteen. Rutiläkorit, joissa ilma pääsee virtaamaan tuotteen ympäri kaikista suunnista, ovat merkittävästi tehokkaampia kuin umpinaiset laatikot. Laatikossa ilmavirta pääsee vaikuttamaan ainoastaan pintakerrokseen, kun taas rutiläkorissa kylmä ilma kulkee myös tuotekerroksen läpi. Tämä johtaa nopeampaan ja tasaisempaan jäädytykseen, mikä on kriittistä pakastekuivauksen lopputuotteen laadun kannalta. Tuotekerroksen paksuus tulisi pitää rutiläkoreissakin maksimissaan 5-10 senttimetrissä parhaan tuloksen saavuttamiseksi.

Spiraalipakastus on kompakti tunnelipakastuksen muunnelma, jossa kuljettimen hihna kiertää spiraalimaisesti ylös- tai alaspäin säästäen lattiatilaa. Menetelmä soveltuu hyvin jatkuvaan tuotantoon ja mahdollistaa pitkän pakastusajan kompaktissa tilassa. Spiraalipakastimissa käytetään samoja periaatteita kuin tunnelipakastuksessa, mutta niiden tilatarve on pienempi, mikä tekee niistä houkuttelevia teolliseen käyttöön.

Kryopakastus, jossa käytetään nestemäistä typpeä (-196°C) tai hiilidioksidia (-78°C), tarjoaa nopeimman mahdollisen jäädytyksen. Kryogeeninen jäädytys tuottaa erittäin pieniä jääkiteitä ja aiheuttaa minimaalisen rakenneaurion soluille. Menetelmä on kuitenkin kallis käyttökustannuksiltaan, sillä kryogeeniset nesteet ovat hinnakkaita ja haihtuvat käytössä. Kryopakastus soveltuu parhaiten korkean arvon tuotteisiin, kuten mätiin ja kaviaariin,

premium-kaloihin ja -äyriäisiin, erikoislihan tuotteisiin sekä herkille premium-marjoille ja -sienille, joissa korkea laatu oikeuttaa korkeammat tuotantokustannukset.

Akustinen pakastus on kehittyvä teknologia, jossa jääkiteiden kokoa ja muodostumista säädellään ääniaaltojen ja magneettikentän avulla. Menetelmä perustuu siihen, että ultraääniaalto ja magneettikenttä vaikuttavat veden molekyylien järjestäytymiseen jäädytyksen aikana, mikä mahdollistaa paremman kontrollin syntyvien jääkiteiden koosta ja jakaumasta. Teknologia on jo kaupallisesti saatavilla, ja sen potentiaali pakastekuivauksen laadun parantamisessa on merkittävä. Teknologia tarjoaa tavan tuottaa optimaalisen mikrorakenteen ilman kryogeenisten nesteiden korkeita käyttökustannuksia, mikä tekee siitä houkuttelevan vaihtoehdon laajemmalle yritysjoukolle. Käytännön sovelluksissa Nature Lyotech Oy ja Frostdry Oy ovat arvioineet AEF (Acoustic Extra Freezing) -menetelmällä pakastettujen marjojen soveltuvuutta pakastekuivaukseen, ja lopputuotteen laatu on osoittautunut erinomaiseksi (Nature Lyotech Oy, 2025).

Käytännön tutkimukset ovat osoittaneet jäädytysmenetelmän ensisijaisen merkityksen. Nature Lyotech Oy:n ja VTT:n yhteistyössä tehdyissä tutkimuksissa testattiin erilaisia esikäsittelemenetelmiä kotimaisille karpaloille, jotka ovat erittäin haastavia kuivattavia. Testissä havaittiin, että vaikka entsyymaattiset esikäsitteilyt olivat teoriassa lupaavia, suuremman ongelman aiheutti hidas jäädytys. Kun jäädytysolosuhteet optimoitiin, lopputulos parani merkittävästi riippumatta muista esikäsitteilyistä. Vastaavasti mustaherukan kuivumisessa todettiin, että vaikka raat marjat kuivuivat hieman paremmin kuin täysin kypsät, oikealla jäädytysmenetelmällä oli suurin yksittäinen vaikutus lopputulokseen. Nämä havainnot korostavat sitä, että investointi oikeaan jäädytysteknologiaan on ensimmäinen ja tärkein askel kohti laadukasta pakastekuivausta. (Nature Lyotech Oy, 2025)

Tuotekerroksen paksuus

Tuotteen levittäminen hyllyille liian paksuina kerroksina on tekninen virhe, joka hidastaa kuivumista merkittävästi ja voi johtaa epätasaiseen kuivumiseen. Sublimaatio etenee aina pinnalta kohti keskustaa, jolloin vesihöyry joutuu kulkemaan kuivan tuotekerroksen läpi päästäkseen kammion tyhjiöön. Mitä paksumpi kerros, sitä pidempi matka vesihöyryllä on ja sitä suurempi vastus sen liikkeelle. Tämä ei ainoastaan pidennä prosessiaikaa vaan voi myös johtaa siihen, että tuotteen pintaosat kuivuvat liikaa samalla kun sisäosat jäävät alikuivuneiksi. Lisäksi riski rakenteen romahtamiselle kasvaa paksuissa kerroksissa, sillä kuiva pintakerros hidastaa lämmönsiirtoa sisäosiin. Jos hyllyjen lämpötilaa nostetaan kompensoimaan tätä, pintakerros voi nousta yli romahtamislämpötilan ennen kuin sisäosat ovat ehtineet kuivua.

Optimaalinen tuotekerroksen paksuus riippuu tuotteen ominaisuuksista ja muodosta. Isommat marjat ja hedelmäpalat tulisi asettaa yhdeksi kerrokseksi ilman päällekkäisyyksiä, sillä ne ovat suhteellisen suuria yksittäisiä kappaleita. Pienemmät marjat, kuten mustikat ja puolukat, sekä viipaloidut ja rouhitut tuotteet voidaan kuivata tehokkaasti jopa yli 2 cm kerroksina, jos yläpuolella on koko pinta-alaltaan lämmitetty hylly tarpeeksi lähellä tuotetta. Tällöin ylhäältä tuleva lämpösäteily lämmittää tehokkaasti myös syvemmissä kerroksissa olevia tuotteita, ja pienten marjojen sekä viipaleiden ja rouheiden suuri pinta-ala suhteessa tilavuuteen mahdollistaa nopean sublimaation. On kuitenkin tärkeää huomioida, että pyöreät marjat ja hedelmät ovat kosketuksissa hyllyn kanssa vain hyvin pieneltä alueelta, jolloin lämmönsiirto johtumalla on rajallista. Suurin osa sublimaatioon tarvittavasta lämpöenergiasta tulee tällöin lämpösäteilynä, mikä tekee prosessista hitaamman kuin tasaisilla, laajasti tarjottimeen ja siten hyllyyn kosketuksissa olevilla tuotteilla. Pakastekuivureissa, joissa on erilliset säteilylämmittäjät kammion sivuseinillä tai katossa ilman varsinaista hyllyjen lämmitysjärjestelmää, lämpösäteily on ainoa merkittävä lämmönsiirtotapa. Tällaisissa laitteissa pyöreät tuotteet ovat erityisen haastavia kuivattavia, sillä niiden pieni kosketuspinta-ala estää tehokkaan lämmönsiirron lähes kokonaan.

Nestemäiset tuotteet tulisi levittää maksimissaan 5-10 mm paksuiseksi kerrokseksi. Nestemäisten tuotteiden kanssa on kuitenkin oltava varovainen: liian ohut kerros saattaa jäätyessään muodostaa kuplan, joka irtoaa tarjottimesta, jolloin lämmönjohtuminen estyy merkittävästi. Lisäksi nestemäiset tuotteet taipuvat levittymään epätasaisesti tarjottimelle, jolloin reunat ovat usein ohuempia kuin keskusta, mikä johtaa epätasaiseen kuivumiseen. Tasaisen levityksen varmistaminen on kriittistä hyvän lopputuloksen saavuttamiseksi. Jauhetut tuotteet ja pienet partikkelit voidaan levittää maksimissaan 1 cm paksuiseksi kerrokseksi. Vihannekset ja vastaavat tuotteet sietävät 1-2 cm kerroksen, mutta ohuempi on aina parempi.

Paksu tuotekerros hidastaa myös sekundäärikuivausta merkittävästi, sillä sisäosista irtoavan sitoutuneen veden täytyy diffundoitua läpi kuivan pintakerroksen, mikä on erittäin hidas prosessi. Vaikka primäärikuivaus saattaa näyttää päättyneen, kun jää on sublimoitunut, paksu kerros voi sisältää huomattavia määriä sitoutunutta vettä keskiosissa. Tämä pidentää sekundäärikuivausta merkittävästi ja lisää riskiä epätäydelliseen kuivaukseen, jos prosessi keskeytetään liian aikaisin.

Yleinen virhe on ajatella että mitä enemmän tuotetta hyllylle laitetaan, sitä tehokkaampi prosessi on. Todellisuudessa ohuemmat kerrokset kuivuvat niin paljon nopeammin, että kokonaistuottavuus paranee, vaikka yksittäisen erän koko pienenee. Esimerkiksi 2 cm kerros ei kuivu kahdessa yksikössä ajasta verrattuna 1 cm kerrokseen, vaan se voi kestää kolme

tai neljä kertaa kauemmin epätasaisen kuivumisen ja hitaan sekundäärikuivauksen vuoksi (Liapis ja Bruttini,1995) . Lisäksi energiankulutus kasvaa merkittävästi, kun vesihöyryn on pakko kulkea pitkä matka kuivan kerroksen läpi. Ohuempi kerros tarkoittaa tasaisempaa ja nopeampaa kuivumista, parempaa energiatehokkuutta ja yhtenäisempää lopputuotteen laatua.

Vaikka ohuet tuotekerrokset saattavat rajoittaa yksittäisen erän kokoa, laadussa ja kokonaistuottavuudessa saavutettava hyöty on huomattava. Tasaisesti kuivunut tuote on yhtenäislaatuista ja täyttää paremmin laatukriteerit. Lisäksi lyhyemmät kuivausajat mahdollistavat useampien erien ajamisen samassa ajassa, mikä kompensoi pienemmän yksittäisen erän koon. Pitkällä aikavälillä ohuet tuotekerrokset johtavat parempiin tuloksiin sekä kuivatun tuotteen määrässä, laadussa että energiatehokkuudessa.

Pakkauksen merkitys

Vaikka tuote olisi pakastekuivattu täydellisesti, huono pakkausmateriaali voi tuhota lopputuloksen säilytyksen aikana. Pakastekuivattu tuote on erittäin hygroskooppinen, eli se imee kosteutta ympäristöstä tehokkaasti. Samoin sen huokoinen rakenne altistaa sen hapen vaikutukselle. Jos pakkausmateriaali ei suojaa riittävästi kosteudelta ja hapelta, tuotteen laatu alkaa heikentyä nopeasti.

Korkealaatuiset pakkausmateriaalit, joilla on hyvät barrier-ominaisuudet, ovat välttämättömiä pitkän säilyvyysajan takaamiseksi. Lämpösaumatut alumiinilaminaattipussit ja muut laminoituneet materiaalit ovat parhaita vaihtoehtoja pitkäaikaiseen säilytykseen (Labuza ja Breene, 1989). Vakuumpakkaaminen on myös hyvä vaihtoehto, mutta kannattaa huomioida joidenkin pakastekuivattujen tuotteiden hauras rakenne, jolloin ne hajoavat helposti vakuumin vaikutuksesta. Vakuumpakkaaminen soveltuu parhaiten pakastekuivatuille jauheille. Perinteisen vakuumpussimateriaalin barrier-ominaisuudet eivät ole yhtä hyvät kuin alumiinilaminaatin, mikä kannattaa huomioida säilyvyysaikaa arvioidessa. Myös vakuumirasiapakkaus on hyvä vaihtoehto HoReCa-tuotteille, jotka eivät tarvitse niin pitkää säilytysaikaa kuin kuluttajatuotteet. Pakkaamiseen voidaan käyttää myös, mielellään lasisia, tyhjiörasioita tai -purkkeja.

Suojakaasupakkaminen (Modified Atmosphere Packaging, MAP), jossa pakkauksen ilma korvataan tyypellä tai muulla inertillä kaasulla, voi olla hyödyllinen tapa pakata rasvaa sisältäviä tuotteita, jotka härskiintyvät hapen vaikutuksesta. Pienemmissä pakkauksissa voidaan käyttää myös hapenpoistajia, jotka sitovat pakkauksen sisällä olevan hapen ja suojaavat tuotetta hapettumiselta. Suojakaasupakkaminen ja hapenpoistajat ovat erityisen

tärkeitä rasvaisten tuotteiden, kuten pakastekuivatun lihan ja kalan, pitkäaikaisessa säilytyksessä.

Valon vaikutus pakastekuivattuihin tuotteisiin on usein aliarvioitu tekijä. Valo, erityisesti UV-säteily, hajottaa ravintoaineita ja väripigmenttejä säilytyksen aikana. C-vitamiini on erityisen herkkä valolle, ja sen pitoisuus voi laskea merkittävästi jos tuote säilytetään läpinäkyvässä pakkauksessa. Myös tuotteen väri voi haalistua ja muuttua epämiellyttäväksi valon vaikutuksesta (Labuza ja Breene, 1989). Tämän vuoksi on suositeltavaa käyttää tummia tai läpinäkymättömiä pakkausmateriaaleja, erityisesti tuotteille joiden väri ja ravintoainepitoisuus ovat keskeisiä laatutekijöitä. Alumiinilaminaatti tarjoaa parhaan suojan valoa vastaan, kun taas läpinäkyvät tai vaaleat muovipakkaukset tarjoavat heikon suojan.

On myös tärkeää tietää, mitä pakkausmateriaaleja tulee välttää. Tavalliset ohuet muovipussit, joita käytetään esimerkiksi elintarvikkeiden pakastamiseen, eivät suojaa riittävästi kosteudelta eivätkä hapelta. Ne läpäisevät vesihöyryä ja happea merkittäviä määriä, mikä johtaa tuotteen laadun nopeaan heikkenemiseen. Paperipussit ja kartonkipakkaukset ovat vielä huonompia vaihtoehtoja, sillä ne läpäisevät kosteutta erittäin tehokkaasti ja voivat jopa itse sisältää kosteutta. Myös zip lock -tyyppiset uudelleensuljettavat tavalliset muovipussit eivät ole riittävän tiiviitä pitkäaikaiseen säilytykseen, vaikka ne voivatkin toimia lyhytaikaisessa käytössä. Ainoa hyväksyttävä ratkaisu on käyttää nimenomaan pakastekuivattuja tuotteita varten suunniteltuja pakkausmateriaaleja, joilla on hyvät barrier-ominaisuudet. Pakastekuivatuille elintarvikkeille suositellaan materiaaleja, joiden kosteuden läpäisyarvo (WVTR) on alle $1 \text{ g/m}^2/\text{vrk}$ ja hapen läpäisyarvo (OTR) alle $5 \text{ cm}^3/\text{m}^2/\text{vrk}$. Alumiinilaminaatit (esim. PET/Al/PE) tarjoavat parhaat barrier-ominaisuudet ja mahdollistavat 18-24+ kuukauden säilyvyyden, kun taas metalloidut kalvot (AlOx-pinnoitettu PET) soveltuvat lyhyemmän säilyvyyden tuotteille (6-12 kuukautta) (Labuza ja Breene, 1989)

Pakkausajankohta ja tuotteen lämpötila pakkaamisen aikana ovat myös tärkeitä huomioita. Tuote tulisi pakkaa välittömästi kuivauksen jälkeen, jotta se altistuu ilman kosteudelle mahdollisimman vähän. Tuotteen tulisi kuitenkin antaa jäähtyä lähelle huoneenlämpötilaa ennen pakkausta, sillä lämmin tuote voi aiheuttaa kondensoitumista pakkauksen sisälle. Jos tuote pakataan liian lämpimänä, vesihöyry voi tiivistyä pakkauksen kylmempiin osiin, mikä johtaa paikalliseen kosteuden nousuun ja mahdolliseen homehtumiseen. Optimaalisesti pakkaus tehdään kun tuote on jäähtynyt $20\text{-}25^\circ\text{C}$, mutta ei vielä ehtinyt altistua huoneilman kosteudelle pitkään. Tarvittaessa pakkaus voidaan tehdä tilassa, jossa ilman kosteutta pystytään kontrolloimaan, esimerkiksi käyttämällä ilmankuivainta tai tekemällä pakkaus kuivassa varastotilassa.

Kuluttajille myytäviin pakkauksiin tulisi aina sisällyttää selkeät ohjeet avauksen jälkeisestä säilytyksestä. Pakastekuivatut tuotteet alkavat imeä kosteutta heti kun pakkaus avataan, ja tämä prosessi kiihtyy kosteissa olosuhteissa. Kuluttajaa tulisi ohjeistaa sulkemaan pakkaus huolellisesti jokaisen käyttökerran jälkeen ja säilyttämään tuotetta kuivassa ja viileässä paikassa. Uudelleensuljettavat pakkaukset ovat kuluttajatuotteissa suositeltavia, mutta on tärkeää korostaa, että suljinta on käytettävä oikein. Avauksen jälkeinen säilyvyysaika on tyypillisesti huomattavasti lyhyempi kuin alkuperäisen pakkauksen säilyvyysaika, ja tämä tulisi mainita pakkauksessa. Tyypillisesti avauksen jälkeen tuote tulisi käyttää 1-3 kuukauden kuluessa, riippuen tuotteesta ja säilytysolosuhteista.

Asianmukaiset pakkausmerkinnät ovat sekä lakisääteinen vaatimus että tärkeä laatutekijä. Pakkauksessa tulisi olla selkeästi merkittynä valmistuspäivämäärä, eränumero, parasta ennen -päivämäärä ja säilytysohjeet. Valmistuspäivämäärä ja eränumero ovat erityisen tärkeä jäljitettävyyden kannalta, jos tuotteessa ilmenee laatuongelmia. Parasta ennen -päivämäärä tulisi määrittää realistisesti todellisen säilyvyysajan perusteella, ottaen huomioon käytetty pakkausmateriaali ja tuotteen ominaisuudet. Liian optimistinen parasta ennen -päivämäärä voi johtaa kuluttajien pettymykseen, kun tuotteen laatu on heikentynyt ennen ilmoitettua päivämäärää. Säilytysohjeissa tulisi mainita suositeltu säilytyslämpötila, valolta suojaamisen tarve ja avauksen jälkeiset ohjeet. Myös tuotteen käyttötarkoitus ja mahdolliset rehydraatio-ohjeet ovat hyödyllisiä merkintöjä, jotka parantavat kuluttajakokemusta.

Kammion paineen optimointi

Kammion paine on yksi tärkeimmistä prosessiparametreista pakastekuivauksessa, mutta sen merkitystä ja oikeaa säätöä ei aina ymmärretä täysin. Paine määrittää suoraan sen lämpötilan, jossa jää sublimoituu. Tämä yhteys perustuu veden faasikaavion ominaisuuksiin: alhaisemmassa paineessa jää sublimoituu alhaisemmassa lämpötilassa, ja korkeammassa paineessa vastaavasti korkeammassa lämpötilassa. Tämä yhteys on kriittinen ymmärtää paineen optimoinnissa, sillä tuotteen lämpötilan on pysyttävä koko ajan alle sen romahtamislämpötilan prosessin onnistumiseksi.

Primäärikuivauksen aikana kammion paine tulisi optimoida tuotteen romahtamislämpötilan (T_c) mukaan. Tyypillinen paineväli on 0,1-1,5 mbar, mutta suurin osa pakastekuivattavista elintarvikkeista sietää hyvin 1 mbar tai jopa sen yli olevan kammion paineen primäärikuivauksen aikana. Alemmat paineet, kuten 0,1-0,3 mbar, ovat tarpeen vain tuotteille, joilla on erittäin alhainen romahtamislämpötila, kuten hyvin sokeripitoisille tuotteille tai tietyille proteiinipitoisille materiaaleille. Useimmille marjoille, vihanneksille ja tavallisille elintarvikkeille 0,8-1,2 mbar paine on täysin riittävä ja jopa optimaalinen.

Paineen valinnassa on tärkeää ymmärtää lasittumislämpötilan (T_g') ja romahtamislämpötilan (T_c) käsite. Lasittumislämpötila on se lämpötila, jossa tuotteen amorfinen matriisi pehmenee ja romahtamislämpötila (yleensä 2-3°C korkeampi kuin lasittumislämpötila) on se lämpötila, jossa rakenne romahtaa. Nämä lämpötilat riippuvat tuotteen koostumuksesta, erityisesti sokereiden, proteiinien ja muiden liuenneiden aineiden konsentraatiosta (Roos, 1995). Korkeasokeriset tuotteet, kuten mehut tai tietyt hedelmät, voivat vaatia jopa -40°C lämpötilan, mikä edellyttää hyvin alhaista painetta, tyypillisesti 0,1-0,3 mbaria. Vastaavasti monet vihannekset ja marjat, joilla on korkeampi vesipitoisuus ja alhaisempi sokeripitoisuus, sietävät -10 tai -15°C lämpötiloja, mikä mahdollistaa 1-1,5 mbarin paineet. Näissä lämpötiloissa viitataan tuotteen lämpötilaan primäärikuivauksen aikana, ei hyllyn lämpötilaan. Hylly voidaan asettaa huomattavasti lämpimämmäksi kuin haluttu tuotteen lämpötila, jotta lämpöenergia siirtyy tuotteeseen ja sublimaatio etenee. Paineen valinta tulisikin aina perustua tuotteen tunnettuun tai arvioituun romahtamislämpötilaan.

Liian alhainen paine ei automaattisesti ole parempi vaihtoehto, vaikka se mahdollistaakin alhaisemman sublimaatiolämpötilan. Erittäin alhaisissa paineissa, alle 0,2 mbarin, kaasumolekyylien tiheys on niin alhainen, että lämmönsiirto kaasun kautta heikentyy merkittävästi. Vaikka lämmönsiirto tapahtuu pääasiassa johtamalla hyllyjen kautta ja säteilynä, kaasumolekyylien läsnäolo parantaa lämmönsiirtoa tuotteen sisällä ja erityisesti kuivan pintakerroksen läpi. Liian alhainen paine voi siis itse asiassa hidastaa kuivumista pidentämällä prosessiaikaa, vaikka se teoriassa tarjoaisikin suuremman turvamarginaalin romahdusta vastaan. Lisäksi erittäin alhaisten paineiden ylläpito vaatii tehokkaamman tyhjiöpumpun ja kondensoijan, mikä nostaa sekä investointi- että käyttökustannuksia.

Toisaalta liian korkea paine nostaa sublimaatiolämpötilan vaarallisen korkeaksi. Jos paine on esimerkiksi 2-3 mbar, jään sublimaatiolämpötila nousee noin -10 tai -5 celsiusasteeseen. Jos tuotteen romahtamislämpötila on -10°C, tämä jättää hyvin pienen turvamarginaalin, ja pienetkin vaihtelut hyllyjen lämpötilassa tai tuotteen lämmönsiirrossa voivat johtaa rakenteen romahdukseen. Liian korkea paine voi johtua monista syistä: kondensoija ei ole riittävän kylmä, tyhjiöpumppu ei ole riittävän tehokas, laitteessa on vuotoja, tuotetta on liikaa, tai tuotteesta vapautuu niin paljon vesihöyryä että kondensoija ei ehdi käsitellä sitä. Paineen nousu primäärikuivauksen aikana on aina varoitusmerkki, johon tulee reagoida joko alentamalla hyllyjen lämpötilaa tai tarkistamalla laitteen kunto.

Paineen optimointi vaihtelee prosessin eri vaiheissa. Stabilointivaiheen aikana, heti alipaineen saavuttamisen jälkeen, tavoitellaan painetta 0,2-0,3 mbaria, kun tuote jäähtyy ja tasapainottaa lämpötilansa. Varsinaisen primäärikuivauksen aikana paine pidetään optimaalisella tasolla tuotteen mukaan, useimmiten 0,8-1,5 mbaria. Primäärikuivauksen

loppuvaiheessa, kun jään määrä vähenee, paine alkaa luonnostaan laskea, koska vesihöyryn tuotanto hidastuu. Tämä on merkki siitä, että voidaan siirtyä sekundäärikuivaukseen. Sekundäärikuivauksen aikana paine voi olla hieman alhaisempi, tyypillisesti 0,05-0,2 mbaria, sillä tässä vaiheessa romahdusriski on vähentynyt merkittävästi jään sublimoituttua.

Kondensoijan rooli paineen hallinnassa on keskeinen. Kondensoija kerää ja jäädyttää tuotteesta sublimoituvan vesihöyryn, ja sen tehokkuus määrittää suoraan kammion paineen. Jos kondensoija ei ole riittävän kylmä tai sen pinta on liian pieni, vesihöyry ei kondensoidu tehokkaasti, ja paine nousee. Tämän vuoksi kondensoijan lämpötilan ja jääkerroksen paksuuden seuranta on tärkeää. Paksu jääkerros heikentää lämmönsiirtoa ja vähentää kondensoinnin tehokkuutta, mikä voi nostaa painetta. Kondensoijan säännöllinen sulatus erien välillä on välttämätöntä tasaisen paineen ylläpitämiseksi.

Vuodot pakastekuivauslaitteessa ovat yleinen ongelma, joka nostaa kammion painetta ja tekee paineen hallinnan vaikeaksi. Pienetkin vuodot, jotka päästävät huoneilmaa kammioon, voivat nostaa paineen merkittävästi. Vuotoja voi esiintyä tiivisteissä, läpivienneissä, venttiileissä tai liitoksissa. Vuotojen tunnistaminen onnistuu sulkemalla tyhjiöpumppu hetkeksi ja tarkkailemalla paineen nousua. Jos paine nousee nopeasti, laitteessa on vuoto. Vuotojen korjaaminen on ensiarvoisen tärkeää, sillä ne eivät ainoastaan pidennä prosessiaikoja vaan voivat myös johtaa laatuongelmiin paineen nousun myötä.

Paineen mittaus ja seuranta ovat kriittisiä onnistuneen pakastekuivauksen kannalta. Useimmissa pakastekuivureissa on kaksi eri tyyppistä painemittaria: Pirani-mittari ja kapasitanssimittari. Pirani-mittari on herkkä vesihöyrylle ja antaa korkeamman lukeman vesihöyryn läsnä ollessa, kun taas kapasitanssimittari mittaa absoluuttista painetta riippumatta kaasun koostumuksesta. Näiden kahden mittarin lukemien vertailu voi antaa arvokasta tietoa prosessin etenemisestä. Kun primäärikuivaus on käynnissä ja vesihöyryä vapautuu runsaasti, Pirani-mittari näyttää korkeampaa lukemaa kuin kapasitanssimittari. Kun primäärikuivaus päättyy ja vesihöyryn tuotanto vähenee, mittarien lukemat lähestyvät toisiaan (Tang ja Pikal 2004). Tämä niin sanottu vertaileva paine-analyysi (Comparative Pressure Analysis, CPA) on hyödyllinen työkalu prosessin päättymisen arvioimisessa ilman tuotteen lämpötilan suoraa mittausta.

Kondensoijan lämpötila ja kylmäaineen valinta

Kondensoija on pakastekuivauslaitteen kriittinen komponentti, jonka tehtävä on kerätä ja jäädyttää tuotteesta sublimoituva vesihöyry. Kondensoijan lämpötilalla on suora vaikutus

kammion paineeseen ja sitä kautta koko kuivausprosessin tehokkuuteen. Tämä yhteys jätetään usein liian vähälle huomiolle, vaikka se on yksi prosessin peruspilareista.

Kondensoijan on oltava riittävän kylmä, jotta se pystyy tehokkaasti sitomaan tuotteesta vapautuvan vesihöyryn. Tyypillisesti kondensoijan lämpötila on -50°C ja -80°C välillä, riippuen laitteen koosta ja tyypistä. Jos kondensoijan lämpötila ei ole riittävän alhainen, vesihöyry ei kondensoidu tehokkaasti, mikä johtaa kammion paineen nousuun. Kohonnut paine puolestaan nostaa jään sublimaatiolämpötilaa, mikä voi johtaa siihen, että tuotteen lämpötila nousee yli romahtamislämpötilan, vaikka hyllyjen lämpötilat olisivat muuten asianmukaiset.

Kondensoijan saavutettava lämpötila riippuu kriittisesti käytetystä kylmäaineesta. Perinteisesti pakastekuivureissa on käytetty tehokkaita kylmäaineita kuten R404A ja R507, jotka pystyvät saavuttamaan erittäin matalia lämpötiloja, tyypillisesti -70°C ja -80°C välillä (Oetjen ja Haseley, 2004). Nämä kylmäaineet mahdollistavat lähes kaikkien elintarvikkeiden tehokkaan pakastekuivauksen. EU:n F-kaasusäädökset ovat kuitenkin asettaneet merkittäviä rajoituksia korkean lämmityspotentiaalain (GWP, Global Warming Potential) omaavien kylmäaineiden käytölle. R404A:n GWP-arvo on noin 3922 ja R507:n noin 3985, mikä tekee niistä erittäin haitallisia ilmastonmuutoksen kannalta (IPCC, 2007). Säädökset rajoittavat näiden kylmäaineiden käyttöä vaiheittain, ja vuoden 2030 jälkeen niiden käyttö tulee olemaan erittäin rajoitettua tai kokonaan kielletty uusissa laitteissa.

Tämän seurauksena uudemmat pakastekuivurit käyttävät ympäristöystävällisempiä kylmäaineita, kuten R449A (GWP 1397), R513A (GWP 631) tai R290 eli propaania (GWP 3) (EU Regulation No 517/2014). Nämä vaihtoehtoiset kylmäaineet ovat huomattavasti parempia ympäristön kannalta, mutta ne eivät yleensä saavuta yhtä matalia lämpötiloja kuin perinteiset kylmäaineet. Tyypillisesti uudemmilla kylmäaineilla varustetut kondensoijat saavuttavat -50°C ja -60°C välisiä lämpötiloja. Tämä korkeampi kondensoijan lämpötila johtaa korkeampaan kammiossa vallitsevaan paineeseen, mikä puolestaan rajoittaa tuotteiden valikoimaa, joita kyseisellä laitteella voidaan tehokkaasti kuivata.

Myös ammoniakkia (NH_3 , R717) ja hiilidioksidia (CO_2 , R704) käytetään yleisesti kylmäaineina pakastekuivureissa, ja molemmilla on erittäin alhainen GWP-arvo, mikä tekee niistä ympäristöystävällisiä vaihtoehtoja (Oetjen ja Haseley, 2004). Ammoniakilla on kuitenkin merkittäviä käytännön ongelmia: se saavuttaa suhteellisen korkean kondensoijan lämpötilan -33°C , mikä rajoittaa sen soveltuvuutta tuotteisiin, jotka vaativat matalia lämpötiloja. Lisäksi ammoniakki on myrkyllistä, mikä asettaa tiukkoja turvallisuusvaatimuksia laitteiston suunnittelulle ja sijoittelulle. Vuotojen riski on otettava vakavasti, sillä ammoniakki voi olla vaarallista henkilöstölle. Hiilidioksidi puolestaan vaatii korkean paineen

jäähdytysjärjestelmän, mikä tekee laitteistosta monimutkaisempaa ja kalliimpaa. Lisäksi lämpimissä olosuhteissa, joissa ympäristön lämpötila on korkea, hiilidioksidijärjestelmä vaatii sekundäärijäähdytyksen primäärijäähdytysjärjestelmän jäähdyttämiseen, mikä lisää järjestelmän monimutkaisuutta ja energiankulutusta. Näistä syistä ammoniakki- ja hiilidioksidijärjestelmät ovat yleisempiä suurissa teollisissa laitoksissa, joissa niiden erityisvaatimukset voidaan hallita paremmin.

Kylmäaineiden energiatehokkuus eroaa merkittävästi, mikä vaikuttaa suoraan pakastekuivurin käyttökustannuksiin. Energiatehokkuutta mitataan tehokkuuskertoimella (COP, Coefficient of Performance), joka ilmaisee kuinka paljon jäähdytystehoa saadaan suhteessa käytettyyn energiaan. Korkeampi COP-arvo tarkoittaa parempaa energiatehokkuutta ja alhaisempia käyttökustannuksia. Perinteiset kylmäaineet R404A ja R507 saavuttavat matalissa lämpötiloissa kohtuullisen tehokkuuskertoimen, tyypillisesti 1,5-2,5 välillä. Uudemmat syneettiset kylmäaineet, kuten R449A ja R513A, tarjoavat hieman paremman tehokkuuskertoimen, mikä osittain kompensoi niiden hieman korkeampaa kondensoijan lämpötilaa. Propani (R290) on tunnettu hyvästä tehokkuuskertoimestaan, joka on usein parempi kuin synteettisillä kylmäaineilla. Ammoniakki (R717) puolestaan tarjoaa erinomaisen tehokkuuskertoimen ja on yksi energiatehokkaimmista kylmäaineista, mikä tekee siitä houkuttelevan vaihtoehdon suurissa laitoksissa, joissa sen turvallisuusvaatimukset voidaan hallita. Hiilidioksidilla (R704) on kylmissä olosuhteissa hyvin korkea tehokkuuskerroin, jopa yli 4, mutta korkeissa ympäristön lämpötiloissa hiilidioksidijärjestelmä vaatii sekundäärijäähdytyksen, mikä johtaa korkeampaan energiankulutukseen. Kylmäainetta valittaessa tulisi ottaa huomioon paitsi saavutettava lämpötila ja ympäristövaikutukset, myös pitkän aikavälin energiakustannukset, jotka voivat olla merkittävä osa laitoksen kokonaiskustannuksista. (Oetjen ja Haseley, 2004)

Pakastekuivauksen energiatehokkuutta voidaan parantaa merkittävästi hyödyntämällä prosessissa syntyvää hukkalämpöä. Jäähdytysjärjestelmä poistaa suuria määriä lämpöä tuotteesta ja kondensoijasta, ja tämä lämpö johdetaan tyypillisesti ulos laitteistosta jäähdytysjärjestelmän lauhduttimien kautta. Sen sijaan että lämpö hukattaisiin ulkoilmaan, se voidaan ottaa talteen ja hyödyntää rakennuksen tai teollisuuslaitoksen lämmitykseen. Lämmön talteenotto on erityisen tehokasta ja kannattavaa pohjoisissa olosuhteissa, joissa lämmityskausi on pitkä ja lämmitysenergian tarve merkittävä. Talviaikana pakastekuivurin tuottama hukkalämpö voidaan kierrättää suoraan rakennuksen lämmitysjärjestelmään, mikä vähentää erillisen lämmityksen tarvetta ja alentaa kokonaisenergiankulutusta huomattavasti.

Käytännössä tämä tarkoittaa, että uudemmilla, ympäristöystävällisemmillä kylmäaineilla varustetuilla laitteilla voi olla vaikeuksia kuivata tuotteita, joilla on erittäin alhainen

romahtamislämpötila. Esimerkiksi sokeripitoiset tuotteet, jotka vaativat hyvin alhaisia prosessilämpötiloja, saattavat olla haastavia tai jopa mahdottomia kuivata tehokkaasti. Vastaavasti proteiinerikkaat tuotteet ja tietyt herkkärakenteiset marjat voivat vaatia niin matalia lämpötiloja, että vain perinteisillä kylmäaineilla varustetut laitteet pystyvät käsittelemään niitä optimaalisesti. Tämä on tärkeä huomioida laitetta hankittaessa: laitetoimittajalta tulisi kysyä, millainen kylmäaine laitteessa on ja mihin lämpötilaan kondensoija todella pääsee. Pelkkä valmistajan ilmoittama -60°C ei välttämättä kerro koko totuutta, sillä kyseinen lämpötila saattaa olla saavutettavissa vain tyhjässä kammioissa ilman kuormitusta.

Kondensoijan lämpötilan riittämättömyys voi johtua myös useista muista syistä. Laitteen jäähdytysjärjestelmä ei välttämättä ole mitoitettu riittävän tehokkaaksi, tai se voi olla osittain viallinen. Kondensoijan pinta voi olla liian pieni käsiteltävän vesihöyrymäärän suhteen, mikä on erityinen ongelma suurissa erissä. Kondensoijan jääkerros voi myös kasvaa liian paksuksi, mikä heikentää lämmönsiirtoa ja näin ollen alentaa kondensoinnin tehokkuutta. Joissakin laitteissa kondensoija on sijoitettu huonosti, jolloin vesihöyryn virtaus sinne ei ole optimaalinen.

Kondensoijan lämpötilaa tulisi seurata jatkuvasti koko prosessin ajan. Jos lämpötila alkaa nousta merkittävästi primäärikuivauksen aikana, se on varoitusmerkki siitä, että kondensoija on ylikuormittunut tai jäähdytysjärjestelmässä on ongelma. Tässä tilanteessa prosessia tulisi hidastaa alentamalla hyllyjen lämpötilaa, jotta vesihöyryn tuotanto vähenee ja kondensoija ehtii käsitellä sen. Vastaavasti, jos kondensoijan lämpötila pysyy hyvin alhaisena koko prosessin ajan, se voi olla merkki siitä, että hyllyjen lämpötilaa voitaisiin nostaa nopeammin prosessin tehostamiseksi.

Kondensoijan huoltoon on myös kiinnitettävä huomiota. Jääkerros tulee poistaa säännöllisesti erien välillä, sillä paksu jääkerros heikentää merkittävästi kondensoijan tehokkuutta. Jäähdytysjärjestelmän kunto tulee tarkistaa säännöllisesti, ja mahdolliset vuodot tai kylmäaineen puutteet korjata välittömästi. Vuototarkastuksen tiheys riippuu useista tekijöistä, kuten käytetyn kylmäaineen määrästä, laitteen iästä, käytöstä ja kylmäaineen ilmasto-olosuhteista. Yleisesti ottaen suositellaan, että tarkastus tehdään vähintään kerran vuodessa ja isoimmissa laitteistoissa jopa 3 kk välein. Tämä varmistaa, että mahdolliset vuodot havaitaan ja korjataan ajoissa. Kondensoijan lämpötilan seuranta ja ylläpito ovat yksinkertaisia toimenpiteitä, mutta niiden laiminlyönti voi johtaa vakaviin laatuongelmiin ja merkittävästi pidennettyihin prosessiaikoihin.

Tuotteiden ominaisuuksien vaikutus pakastekuivaukseen

Esikäsitteilyn laiminlyönti

Monet aloittelevat pakastekuivaajat jättävät esikäsitteilyvaiheen väliin olettaen, että pakastekuivaus itsessään on riittävä säilöntämenetelmä. Vaikka tämä on totta mikrobiologisen säilyvyyden kannalta, esikäsitteily voi olla välttämätön laadun säilyttämiseksi.

Blanseeraus, jossa marjat, vihannekset tai juurekset kastetaan hetkellisesti kuumaan veteen tai höyrytetään lyhyesti ja jäädytetään nopeasti, inaktivoi nämä entsyymit. Jos blanseerausta käytetään, se tulee tehdä tuoreista raaka-aineista ennen pakastussäilytystä. Tämä voi merkittävästi parantaa värin säilymistä ja vähentää hapettumista. Blanseeraus voi myös pehmentää kuivattavien tuotteiden kuorta, mikä parantaa sekä kuivumista että myöhempää rehydratoituvuutta. On kuitenkin tärkeää huomioida, että usein varsinkin marjoja halutaan kuivata tuoreina ilman lämpökäsittelyä, sillä blanseeraus voi vaikuttaa makuun ja ravintosisältöön. Tuoreiden marjojen kuivaus säilyttää paremmin alkuperäisen maun ja raikkauden, mutta vaatii nopeamman prosessoinnin ja huolellisemman pakkaamisen entsyymaattisen ruskistumisen minimoimiseksi.

Blanseeraus on kuitenkin erityisen hyödyllistä joillekin vihanneksille värin säilyttämisessä. Esimerkiksi kukkakaali ruskistuu helposti ilman blanseerausta entsyymaattisen reaktion seurauksena, ja lyhyt blanseeraus varmistaa että se säilyttää valkoisen värinsä pakastekuivauksen aikana. Blanseeraus poistaa myös ei-toivottuja makuja, mikä on erityisen tärkeää kaalien ja muiden ristikukkaisten vihannesten (kuten lanttu, nauris, retikka ja rucola) kohdalla, sillä pakastekuivaus voi korostaa karvasta makua varsinkin jos kuivatut tuotteet käytetään sellaisenaan. Lyhyt lämpökäsittely inaktivoi entsyymejä, jotka muuten muodostaisivat karvaita makuyhdisteitä kuivauksen aikana (Xiao *et al.*, 2017). Myös sienille blanseeraus on usein suositeltavaa entsyymiaktiivisuuden vähentämiseksi ennen pakastekuivausta, mikä parantaa värin ja maun säilymistä varsinkin pitkäaikasessa säilytyksessä (Xiao *et al.*, 2017). Esikäsitteilyn tarve riippuu tuotteesta ja halutusta lopputuloksesta, mutta sen mahdollisuutta ei tulisi jättää harkitsematta.

Vahakerroksen aiheuttamat ongelmat

Monet marjat, erityisesti puolukat ja karpalot, ovat luonnollisesti päällystetty ohuella vahakerroksella. Tämä kerros suojaa marjaa luonnossa kuivumiselta, mutta pakastekuivauksessa se toimii esteenä vesihöyryn poistumiselle. Vahakerros hidastaa

sublimaatiota merkittävästi ja voi johtaa epätasaiseen kuivumiseen, jossa marjan pinta kuivuu mutta sisäosat jäävät kosteiksi.

Tämän ongelman ratkaisemiseksi on useita vaihtoehtoja. Marjat voidaan viipaloida, mikä paljastaa sisäosan ja mahdollistaa vesihöyryn vapaan poistumisen. Vaihtoehtoisesti niitä voidaan esikäsitellä esimerkiksi kastamalla nopeasti kuumaan veteen, mikä vaurioittaa vahakerroksen rakenteen, tai rei'ittää. Puolukalla on todettu toimivaksi poikkeuksellinen menetelmä, jossa lämpötilaa nostetaan nopeasti primäärikuivauksen alussa. Nopea lämpötilan nosto kuivaa marjan pinnan nopeasti, jolloin pinnasta tulee kovempi ja sokereita ei ehdi vuotaa ulos marjasta. Tämä nopea lämpötilan nosto muuttaa myös vahakerrosta läpäisevämmäksi ja mahdollistaa marjan täydellisen kuivumisen ilman tahmean pintakerroksen muodostumista, joka muuten estäisi vesihöyryn poistumisen (Nature Lyotech Oy, 2025). Joillekin tuotteille on myös mahdollista käyttää apuaineita, kuten maltodekstriiniä, joka voi auttaa kuivumisessa muodostamalla huokoisen matriisin vahakerroksen ympärille. Maltodekstriinin käyttö soveltuu käytännössä vain nestemäisille tuotteille (mehut, sosepalat), joihin se voidaan sekoittaa tasaisesti. Kokonaisille marjoille blanseeraus, pilkkominen tai rei'itys on tehokkaampi ratkaisu.

Korkea sokeripitoisuus

Sokeri laskee merkittävästi amorfisen faasiin lasittumislämpötilaa (T_g'), mikä tekee tuotteesta herkemman rakenteen romahdukselle (Roos, 1993). Hyvin sokeripitoiset kypsät marjat sekä sokeriliuokset ovat tästä syystä haastavia pakastekuivattavia. Mitä korkeampi sokeripitoisuus, sitä alhaisempi lasittumislämpötila ja sitä varovaisemmin prosessia täytyy ajaa välttääkseen rakenteen romahtamisen.

Sokeripitoisuuden vaikutusta voidaan lieventää useilla tavoilla. Sokeriliuoksia voidaan laimentaa, mikä nostaa lasittumislämpötilaa. Vaihtoehtoisesti voidaan lisätä apuaineita, kuten maltodekstriiniä, jotka nostavat seoksen kokonais- T_g' -arvoa. Maltodekstriini on yleisesti käytetty apuaine pakastekuivauksessa juuri tämän ominaisuuden vuoksi. Se muodostaa amorfisen matriisin, jolla on korkeampi lasittumislämpötila kuin sokerilla, ja näin se stabiloi rakennetta pakastekuivauksen aikana (Roos ja Karel, 1991).

pH:n vaikutus

Tuotteen pH-arvo vaikuttaa merkittävästi entsyymaattisten reaktioiden nopeuteen ja värin säilymiseen pakastekuivauksen aikana. Entsyymit, jotka aiheuttavat ruskistumista ja värimuutoksia, ovat yleensä aktiivisimpia neutraalissa tai lievästi emäksisessä ympäristössä.

Happamat olosuhteet hidastavat entsyymaattista toimintaa, mikä on yksi syy siihen, miksi happamat marjat, kuten mustikat ja puolukat, säilyttävät värinsä paremmin kuin vähemmän happamat tuotteet.

pH vaikuttaa myös tuotteen väripigmenttien stabiilisuuteen. Antosyaanit, jotka antavat monille marjoille niiden punaisen, sinisen tai violettiin värin, ovat stabiileja happamissa olosuhteissa mutta voivat haalistua tai muuttua emäksisissä olosuhteissa (Giusti ja Wrolstad, 2003). Tämän vuoksi pH:n säätäminen sitruunahapon tai muiden elintarvikehappojen avulla voi parantaa värin säilymistä merkittävästi. Liian alhainen pH voi kuitenkin aiheuttaa muita ongelmia. Erittäin matala pH, kuten etikkapesussa, lisää reaktiivisuutta pelkistävien hiilihydraattien karbonyyliryhmien kanssa ja suosii furfuraalien muodostumista sekä happokatalysoitua sokerin hajoamista. Puhdas tislattu furfuraali on väritön, mutta altistuessaan ilmalle se muuttuu keltaisen ja ruskean kautta mustaksi, aiheuttaen ei-toivottua ruskehtumista (Ajandouz *et al.*, 2001). Tämän vuoksi optimaalinen pH on kompromissi entsyymaattisen ruskistumisen estämisen, värin säilymisen ja kemiallisen stabiilisuuden välillä. Liian alhainen pH voi myös vaikuttaa makuun negatiivisesti, tehden tuotteesta liian happaman.

Rasvan määrä ja laatu

Rasvat eivät kuivu pakastekuivauksen aikana, mikä tekee rasvaisista tuotteista erityisen haastavia säilytettävyydelle. Rasvat ovat alttiita hapettumiselle, erityisesti tyydyttymättömät rasvat, jotka sisältävät kaksoissidoksia. Hapettuminen johtaa härskiintymiseen, mikä ilmenee epämiellyttävänä makuna ja hajuna. Mitä korkeampi rasvan tyydyttymättömien rasvahappojen osuus, sitä nopeammin tuote härskiintyy säilytyksen aikana. Tämän vuoksi rasvaiset kalat, kuten lohi ja siika, sekä pähkinät ja siemenet vaativat erityisen huolellista pakkaamista ja säilytystä. (Labuza ja Breene, 1989)

Rasvaisissa liuksissa, kuten liha- ja kalaliemissä, smoothieissa tai kermapitoisissa tuotteissa, on kriittisen tärkeää sekoittaa rasva kunnolla ennen jäädytystä. Jos rasva ei ole tasaisesti sekoittunut, se voi erottua ja muodostaa kerroksen tuotteen pinnalle jäädytyksen aikana. Tämä rasvakerros toimii eristeenä, joka estää vesihöyryn poistumisen sublimaation aikana ja johtaa epätasaiseen kuivumiseen. Tuotteen pintakerros voi kuivua, mutta rasvakerroksella päällystetyn alueen alapuolella oleva tuote jää kosteaksi. Huolellinen sekoitus ennen jäädytystä, ja tarvittaessa emulgointiaineiden käyttö, varmistaa tasaisen kuivumisen. Lisäksi hapenpoistajien käyttö pakkauksessa on suositeltavaa rasvapitoisille tuotteille hapettumisen minimoimiseksi.

Proteiinipitoisuuden vaikutus

Proteiinit sitovat vettä erittäin voimakkaasti, mikä tekee proteiinirikkaista tuotteista hitaasti kuivuvia. Proteiinimolekyylit muodostavat vetysidoksia vesimolekyylien kanssa, ja tämä sitoutunut vesi on vaikeampi poistaa kuin vapaa jäänyt vesi. Liha, kala, maitotuotteet ja palkokasvit ovat esimerkkejä proteiinirikkaista tuotteista, jotka vaativat pitkän sekundäärikuivausvaiheen sitoutuneen veden poistamiseksi.

Proteiinit voivat myös denaturoitua pakastekuivauksen aikana, erityisesti jos lämpötilaa nostetaan liian nopeasti tai liian korkealle. Denaturoituminen muuttaa proteiinien rakennetta ja voi johtaa tekstuurin muutokseen sekä heikompaan rehydratoituvuuteen. Joillakin proteiineilla, kuten maidon valkoproteiineilla, denaturoituminen voi myös aiheuttaa ei-toivottuja makumuutoksia. Tämän vuoksi proteiinirikkaiden tuotteiden pakastekuivaus vaatii huolellista lämpötilan hallintaa ja riittävän alhaiset kuivauslämpötilat.

Vesipitoisuuden vaikutus

Tuotteen alkuperäinen vesipitoisuus vaikuttaa suoraan kuivumisaikaan ja prosessin tehokkuuteen. Korkean vesipitoisuuden tuotteet, kuten tomaatit ja kurkku, vaativat pitkän kuivausajan suuren vesimäärän poistamiseksi. Vastaavasti matalan vesipitoisuuden tuotteet, kuten juurekset, kuivuvat nopeammin. Vesipitoisuus vaikuttaa myös tuotteen jäädytykseen: korkean vesipitoisuuden tuotteet muodostavat enemmän jääkiteitä, mikä voi aiheuttaa solujen rikkoutumista jos jäädytys tapahtuu liian hitaasti.

Mielenkiintoinen paradoksi on, että vesipitoisuuden lisääminen voi itse asiassa auttaa hyvin sokeripitoisten tuotteiden kuivaamisessa. Lisäämällä vettä tai maitoa erittäin sokeripitoisiin tuotteisiin, kuten mehuihin tai hunajaan, voidaan nostaa seoksen lasittumislämpötilaa (T_g). Tämä johtuu siitä, että vesi laimentaa sokeripitoisuutta, mikä nostaa T_g -arvoa ja tekee tuotteesta vähemmän herkkää romahdukselle. Vaikka tämä pidentää kuivausaikaa lisääntyneen vesimäärän vuoksi, se mahdollistaa korkeampien kuivauslämpötilojen käytön ilman romahdusriskiä, mikä lopulta voi johtaa tehokkaampaan prosessiin ja parempaan lopputuotteen laatuun. Tämä tekniikka on erityisen hyödyllinen puhtaiden mehujen ja hunajan pakastekuivauksessa.

Tuotteen rakenteen vaikutus

Tuotteen fyysinen rakenne vaikuttaa merkittävästi kuivumiseen ja lopputuotteen laatuun. Kuitupitoinen rakenne, kuten sellerissä tai parsakaalissa, säilyttää yleensä muotonsa hyvin

pakastekuivauksen aikana, sillä kuidut muodostavat vahvan kehikon joka tukee rakennetta. Nestemäiset tai geelimäiset tuotteet, kuten hedelmämehu tai jogurtti, sen sijaan eivät muodosta vakaata rakennetta pakastekuivauksen aikana ja voivat romahtaa helposti. Näille tuotteille on usein välttämätöntä lisätä rakenteen tukiaineita, kuten maltodekstriiniä tai muita stabilointiaineita, jotka muodostavat amorfisen matriisin ja estävät romahduksen.

Kiinteät tuotteet, joilla on luonnollisesti vahva solurakenne, kuten monet juukset ja vihannekset, kuivuvat yleensä hyvin ja säilyttävät muotonsa. Pesäkkeiden ja rakenteen aukot mahdollistavat vesihöyryn tehokkaan poistumisen sublimaation aikana. Tiiviit, homogeeniset tuotteet sen sijaan voivat olla haastavia, sillä vesihöyryn on kuljettava pitkä matka tuotteen keskustasta pintaan. Tämän vuoksi tiiviit tuotteet, mm kovat juustot, hyötyvät viipaloimisesta, rouhmisesta, raastamisesta ennen pakastekuivausta.

Osmoottisesti aktiiviset aineet

Osmoottisesti aktiiviset aineet, kuten suolat ja hapot, vaikuttavat tuotteen jäädytykseen ja pakastekuivauksen onnistumiseen. Nämä aineet laskevat jäätymispistettä ja voivat johtaa siihen, että osa tuotteesta ei jäädy lainkaan käytetyissä jäädystylämpötiloissa. Tämä on erityisen ongelmallista suolapitoisille tuotteille, kuten suolaliemille tai marinadeille. Jos osa tuotteesta jää nestemäiseksi, se ei voi sublimoitua ja tuote jää osittain märäksi pakastekuivauksen jälkeen.

Osmoottisesti aktiiviset aineet vaikuttavat myös veden siirtymiseen jäädytyksen aikana. Korkea suola- tai happopitoisuus voi johtaa veden siirtymiseen soluista ulos osmoottisen paineen vaikutuksesta, mikä konsentroi solun sisäisiä komponentteja ja laskee niiden lasittumislämpötilaa (T_g'). Tämä tekee tuotteesta herkemman rakenteen romahtamiselle. Suolapitoisten tuotteiden pakastekuivaus vaatii yleensä alhaisempia jäädystylämpötiloja ja varovaisempaa prosessin ajoa kuin vähäsuolaisten tuotteiden.

Aromien säilyttäminen

Aromiyhdisteet ovat usein haihtuvia ja voivat kadota merkittävästi pakastekuivauksen aikana, erityisesti jos prosessia ajetaan liian korkeissa lämpötiloissa tai liian pitkään. Monet aromiyhdisteet ovat kevyitä orgaanisia molekyylejä, jotka voivat sublimoitua veden mukana tai haihtua sekundäärikuivauksen korkeammassa lämpötiloissa. Tämä johtaa aromin heikkenemiseen ja lopputuotteen laadun laskuun.

Aromin häviöitä voidaan minimoida useilla tavoilla. Nopea jäädytys on kriittistä, sillä se vangitsee aromiyhdisteet jäärakenteeseen ennen kuin ne ehtivät haihtua.

Primäärikuivauksen aikana alhaiset lämpötilat ja paine pitävät aromiyhdisteet tuotteessa. Sekundäärikuivauksen lämpötilan nostaminen tulisi tehdä asteittain ja varovaisesti, välttämällä liian korkeita lämpötiloja. Liian pitkä sekundäärikuivaus voi myös aiheuttaa aromiyhdisteiden desorptiota eli irtoamista tuotteesta korkeampien lämpötilojen ja pidemmän altistusajan vuoksi. Esimerkiksi puolukan kuivauksessa on havaittu, että liian pitkä sekundäärikuivaus voi johtaa bentsoehapon ja muiden aromaattisten yhdisteiden häviämiseen, mikä heikentää lopputuotteen karakteristista makua (Nature Lyotech Oy, 2025). Sekundäärikuivauksen keston ja lämpötilan optimointi on siten kriittistä paitsi riittävän jäännöskosteuden saavuttamiseksi, myös aromin säilyttämiseksi. Joillakin tuotteilla aromiöljyjen tai aromiuutteiden lisääminen ennen kuivausta voi kompensoida luonnollista häviötä. Lisäksi nopea pakkaaminen heti kuivauksen jälkeen estää jäljellä olevien aromien haihtumisen.

Väriin säilyttäminen

Väriin säilyttäminen on yksi tärkeimmistä laatutekijöistä pakastekuivatuissa elintarvikkeissa, sillä väri vaikuttaa suoraan kuluttajan käsitykseen tuotteen laadusta ja raikkaudesta. Eri väripigmentit käyttäytyvät eri tavalla pakastekuivauksen aikana. Antosyaanit, jotka antavat marjoille niiden punaisen, sinisen tai violettiin värin, ovat suhteellisen stabiileja happamissa olosuhteissa mutta voivat haalistua emäksisissä olosuhteissa tai korkeissa lämpötiloissa. Klorofylli, joka antaa vihreille vihanneksille niiden värin, on hyvin herkkä lämmölle ja hapoille ja voi muuttua ruskehtavaksi jos pH laskee tai lämpötila nousee liian korkeaksi.

Karotenoidit, kuten betakaroteeni ja lykopeeni, jotka antavat porkkanoille, kurpitsuille ja tomaateille niiden oranssin tai punaisen värin, ovat yleensä stabiilimpia kuin antosyaanit tai klorofylli, mutta ne voivat hapettua valossa tai korkeissa lämpötiloissa. Väriin säilyttämiseksi on tärkeää minimoida hapen ja valon altistus sekä pakastekuivauksen aikana että säilytyksen aikana. Blanseeraus ennen pakastekuivausta voi inaktivoida entsyymejä, jotka muuten aiheuttaisivat värimuutoksia. pH:n säätäminen sopivalle tasolle voi myös auttaa värin säilymistä, erityisesti antosyaanipitoisilla tuotteilla. Pakkausmateriaalin valinta on myös kriittinen: läpinäkymättömät materiaalit suojaavat väriä valolta paremmin kuin läpinäkyvät.

Rehydratoituvuuteen vaikuttavat tekijät

Pakastekuivatun tuotteen kyky imeä vettä takaisin ja palauttaa alkuperäinen rakenne on tärkeä laatutekijä monille sovelluksille. Rehydratoituvuuteen vaikuttavat useat tekijät, joista ensimmäinen on jäädytysnopeus. Nopea jäädytys tuottaa pieniä jääkiteitä, jotka jättävät jälkeensä hienon, huokoisen rakenteen. Tämä huokoinen rakenne mahdollistaa veden nopean imeytymisen rehydratoinnin aikana. Hidas jäädytys tuottaa suuria jääkiteitä, jotka

voivat rikkoa solurakenteet ja johtaa tiivistyneeseen, vähemmän huokoiseen rakenteeseen, joka imee vettä huonosti.

Kuivausolosuhteet vaikuttavat myös rehydratoituvuuteen. Jos tuote romahtaa pakastekuivauksen aikana, sen huokoinen rakenne tiivistyy ja rehydratoituvuus heikkenee merkittävästi. Tämän vuoksi oikean lämpötilan valinta ja paineen seuranta on kriittistä. Liian korkea lämpötila sekundäärikuivauksen aikana voi myös johtaa pinnan kovettumiseen, mikä hidastaa veden imeytymistä. Lisäksi tuotteen koostumus vaikuttaa: proteiinien denaturoituminen tai tärkkelyksen gelatinoituminen voi heikentää rehydratoituvuutta. Blanseeraus ennen pakastekuivausta voi parantaa rehydratoituvuutta pehmentämällä rakenteita, mutta liian pitkä blanseeraus voi vahingoittaa rakennetta ja heikentää tulosta.

Ei-entsymaattinen ruskistuminen

Ei-entsymaattinen ruskistuminen on kemiallinen reaktio, joka voi tapahtua pakastekuivauksen aikana ja erityisesti säilytyksen aikana, johtaen tuotteen värin tummumiseen ja maun muutoksiin. Kaksi päätyyppiä ei-entsymaattista ruskistumista ovat Maillard-reaktio ja karamellisoituminen. Maillard-reaktio tapahtuu pelkistävien sokereiden ja aminohappojen välillä, ja se on nopeampaa korkeammassa lämpötiloissa ja neutraalissa tai lievästi emäksisessä pH:ssa. Karamellisoituminen on sokereiden lämpöhajoamista, joka tapahtuu erityisesti korkeissa lämpötiloissa ilman aminohappojen läsnäoloa.

Ei-entsymaattista ruskistumista voidaan minimoida useilla tavoilla. Alhaiset kuivauslämpötilat hidastavat reaktioita merkittävästi, minkä vuoksi lämpötilan hallinta on kriittistä. Riski syntyy sekundäärikuivauksessa, kun lämpötila nostetaan 25-40°C:een. Maillard-reaktiot ja karamellisaatio kiihtyvät merkittävästi yli 30-40°C:ssa, joten sokeripitoisille tuotteille suositellaan maksimissaan 25-30°C sekundäärikuivauslämpötilaa. Alhainen jäännöskosteus tuotteessa vähentää myös ruskistumista säilytyksen aikana, sillä reaktiot vaativat vettä tapahtuakseen. Happaman pH:n ylläpitäminen hidastaa Maillard-reaktiota, mikä on yksi syy miksi happamat tuotteet säilyttävät värinsä paremmin. Pakkauksen hapen poistaminen ja tuotteen säilyttäminen viileässä ja kuivassa paikassa minimoivat ruskistumisen säilytyksen aikana. Erityisesti hyvin sokeripitoiset ja proteiinerikkaat tuotteet ovat alttiita ei-entsymaattiselle ruskistumiselle, joten niiden prosessoinnissa ja säilytyksessä tulee olla erityisen huolellinen.

Tuotteen muodon vaikutus

Tuotteen muoto vaikuttaa merkittävästi sekä kuivumisen tehokkuuteen että lopputuotteen käsittelyyn. Levymäiset tai ohutkerroksiset tuotteet kuivuvat nopeasti, sillä vesihöyryn kulkumatka tuotteen sisältä pintaan on lyhyt. Tämä tekee levymäisten tuotteiden kuivaamisesta tehokasta, ja monet nestemäiset tuotteet, kuten hedelmämehu tai jogurtti, kuivataan juuri ohuina kerroksina tarjottimilla. Levymäinen tuote on myös helppo jauhaa jauheeksi kuivauksen jälkeen, mikä on toivottavaa monille sovelluksille.

Palaset, kuten viipaloidut, raastetut ja rouhitut hedelmät tai vihannekset, ovat käytännöllisiä kun halutaan säilyttää tuotteen tunnistettavuus ja rakenne. Palojen koko vaikuttaa kuivumisaikaan: pienet palat kuivuvat nopeammin kuin suuret. Jauheet, jotka usein valmistetaan jauhamalla pakastekuivattua tuotetta, tarjoavat nopean rehydratoinnin ja helpon käsiteltävyyden. Jauheiden pakastekuivaus voi kuitenkin olla haastavaa, sillä hienot partikkelit voivat lentää pois sublimaation aikana syntyvän ilmavirran vaikutuksesta. Tämän vuoksi jauheet usein kuivataan ensin levyinä tai suurempina partikkeleina ja jauhetaan vasta kuivauksen jälkeen. Jauheiden paakkuuntumisen estämiseksi voidaan lisätä paakkuuntumisenestoaineita, kuten piidioksidia (1-2%) tai trikalsiumfosfaattia (1-2%), jotka sitovat kosteutta ja estävät partikkelien tarttumisen toisiinsa säilytyksen aikana (Adhikari *et al.*, 2001). Nestemäiset tuotteet vaativat tarjottimia tai muita tukirakenteita, ja niiden käsittely on monimutkaisempaa kuin kiinteiden tuotteiden. Nestemäisille tuotteille lisätään usein apuaineita kuten maltodekstriiniä (5-15%), joka nostaa lasittumislämpötilaa ja mahdollistaa vapaa-valuisen jauheen muodostumisen (Bhandari ja Howes, 1999).

Satokausivaihtelut

Luonnontuotteiden, erityisesti marjojen, hedelmien ja vihannesten, laatu ja koostumus vaihtelevat merkittävästi satokausien ja jopa yksittäisten satojen välillä. Nämä vaihtelut vaikuttavat suoraan pakastekuivausprosessiin ja lopputuotteen laatuun, ja niiden huomioimatta jättäminen on yleinen virhe erityisesti aloittelevilla pakastekuivaajilla. Kokemus ja dokumentoitu historia auttavat tunnistamaan ja hallitsemaan näitä vaihteluita, mutta jopa kokeneilla toimijoilla voi olla haasteita erityisen poikkeuksellisten satojen kanssa.

Sääolosuhteet kasvukauden aikana vaikuttavat voimakkaasti tuotteen ominaisuuksiin. Runsas sade nostaa marjojen vesipitoisuutta ja laskee sokeripitoisuutta, mikä voi nostaa lasittumislämpötilaa ja muuttaa tarvittavia kuivausparametreja. Kuiva ja aurinkoinen kesä puolestaan tuottaa sokeririkkaampia marjoja, jotka vaativat alhaisempia kuivauslämpötiloja romahduksen välttämiseksi. Viileä kasvukausi hidastaa kypsymistä ja voi johtaa

happamampiin marjoihin, kun taas lämmin kausi tuottaa makeampia mutta mahdollisesti pehmeämpiä marjoja (Wang ja Lin, 2000). Nämä erot eivät ole pieniä: sokeripitoisuus voi vaihdella jopa 30-50% eri satokausien välillä samalla marjalajilla ja viljelyalueella.

Kypsyysaste sadonkorjuun aikana on toinen merkittävä vaihtelun lähde. Aikainen sadonkorjuu tuottaa happamampia, kiinteämpiä marjoja, jotka säilyttävät rakenteensa paremmin mutta saattavat olla vähemmän aromikkaat. Täysin kypsät marjat ovat makeampia ja aromikkaampia, mutta myös pehmeämpiä ja herkempiä käsittelylle. Ylikypsät marjat voivat olla niin pehmeitä että niiden rakenne romahtaa helposti pakastekuivauksen aikana. Käytännössä sadonkorjuuajankohta on kompromissi maun, rakenteen ja käsiteltävyyden välillä, ja optimaalinen ajankohta vaihtelee lajikkeen, käyttötarkoituksen ja sääolosuhteiden mukaan.

Lajike- ja alkuperävaihtelut tuovat lisää monimutkaisuutta. Eri marjalajikkeet voivat käyttäytyä hyvin eri tavalla pakastekuivauksessa, vaikka ne olisivatkin kypsyysasteeltaan ja koostumukseltaan samanlaisia. Jotkin lajikkeet säilyttävät väriä paremmin, toiset aromia, ja jotkut ovat rakenteeltaan tukevampia. Viljelymenetelmät, kuten luomu vs. tavanomainen viljely, lannoitus ja kastelukäytännöt, vaikuttavat myös tuotteen ominaisuuksiin. Villit marjat eroavat usein merkittävästi viljellyistä: ne ovat tyypillisesti pienempiä, aromikkaampia ja usein happamampia, mikä vaikuttaa kuivausparametreihin.

Näiden vaihteluiden hallinta vaatii joustavuutta ja mukautumiskykyä. Kiinteisiin, muuttumattomiin prosessiparametreihin lukkiutuminen johtaa väistämättä laatuongelmiin, kun raaka-aine vaihtelee. Sen sijaan prosessiparametreja tulisi säätää kunkin erän ominaisuuksien mukaan. Tämä edellyttää raaka-aineen systemaattista arviointia ennen kuivausta: sokeripitoisuuden (Brix-mittaus), vesipitoisuuden, pH:n ja rakenteen nopea arviointi auttaa määrittämään optimaaliset kuivausparametrit. Kokemus rakentuu ajan myötä, ja hyvin dokumentoitu historia eri raaka-aine-eristä ja käytetyistä parametreista on korvaamaton työkalu.

Joissakin tapauksissa eri satojen tai lajikkeiden sekoittaminen ennen kuivausta voi tasoittaa vaihtelua ja tuottaa yhtenäisempää lopputuotetta. Tämä on erityisen hyödyllistä jos yksittäiset erät ovat pieniä tai jos tavoitellaan tasalaatuista tuotetta ympäri vuoden. Sekoituksen riskinä on kuitenkin, että heikkolaatuinen raaka-aine laimentaa korkealaatuisen raaka-aineen, joten sekoitettavien partioiden laadun tulee olla riittävän lähellä toisiaan. Parhaassa tapauksessa satokausivaihtelut voidaan kääntää eduksi tarjoamalla kausiluonteisia tuotteita, jotka korostavat kunkin satokauden ainutlaatuisia ominaisuuksia sen sijaan että yritetään väkisin standardoida tuotetta ympäri vuoden.

Kalsiumin ja muiden mineraalien vaikutus

Mineraalit, erityisesti kalsium, voivat vaikuttaa tuotteen rakenteeseen ja pakastekuivauksen onnistumiseen. Kalsium muodostaa ristosilloituksia pektiinien kanssa kasvisolujen seinämissä, mikä vahvistaa rakennetta ja voi parantaa tuotteen kykyä säilyttää muotonsa pakastekuivauksen aikana. Tämän vuoksi kalsiumkloridin tai kalsiumlaktaatin lisääminen liuokseen, johon hedelmät tai vihannekset kastetaan ennen pakastekuivausta, voi parantaa lopputuotteen tekstuuria ja vähentää romahduksen riskiä. (Lewicki ja Pawlak, 2003)

Muut mineraalit voivat myös vaikuttaa prosessiin. Magnesium ja kalium ovat osmoottisesti aktiivisia ja voivat vaikuttaa veden jäätymispisteeseen ja jakautumiseen tuotteessa (Her *et al.*, 1995). Rauta ja kupari voivat toimia katalyytteinä hapettumisreaktioissa, mikä voi johtaa värimuutoksiin ja maun heikkenemiseen (Labuza ja Breene, 1989). Tämän vuoksi tuotteet, joissa on luonnostaan korkea rauta- tai kuparipitoisuus, voivat vaatia antioksidanttien, kuten askorbiinihapon, lisäämistä hapettumisen estämiseksi. Mineraalien vaikutus on usein hienovarainen, mutta niiden huomioiminen voi olla ratkaisevaa erityisesti herkillä tuotteilla, joissa rakenne tai väri on kriittinen laatutekijä.

Probiotit ja starterit

Probiotit ja starterit ovat eläviä mikrobeja sisältäviä valmisteita joiden pakastekuivaus vaatii erityistä huolellisuutta ja asiantuntemusta. Näiden tuotteiden kriittinen laatutekijä on elävien mikrobien säilyminen ja aktiivisuuden säilyttäminen koko kuivaus- ja säilytysprosessin ajan. Toisin kuin tavallisissa elintarvikkeissa, joissa mikrobiologinen aktiivisuus halutaan minimoida, probioottien ja starterien tavoitteena on säilyttää mahdollisimman korkea elinkykyisten mikrobien määrä ja niiden kyky aktivoitua rehydratoinnin jälkeen.

Kryoprotektantit ovat välttämättömiä mikrobien suojaamiseksi jäädytyksen ja kuivauksen aiheuttamilta vaurioilta. Yleiset elintarvikkeisiin soveltuvat kryoprotektantit sisältävät maltodekstriinin, trehaloosin, rasvattoman maitojauheen (joka sisältää maitoproteiineja) ja erilaisia sokerien yhdistelmiä. Nämä aineet suojaavat solukalvoja jäädytyksen aikana estäen jääkiteiden muodostumisen solunsisällä ja vähentäen osmoottista stressiä. Kryoprotektanttien valinta riippuu mikrobikannasta: jotkin kannat sietävät paremmin trehaloosia, toiset maltodekstriiniä tai maitoproteiineja. Optimaalinen kryoprotektantti ja sen pitoisuus määritetään tyyppillisesti kokeellisesti kullekin kannalle erikseen. (Morgan *et al.*, 2006)

Jäädytysnopeus on kriittinen tekijä mikrobien selviytymiselle. Liian hidas jäädytys aiheuttaa suurten jääkiteiden muodostumisen, jotka voivat rikkoa solukalvoja mekaanisesti. Lisäksi

hidas jäädytys johtaa solunulkoisen jään muodostumiseen, mikä nostaa solun ympärillä olevan liuoksen osmoottista painetta ja voi aiheuttaa solujen kutistumisen ja kalvovaurioita. Nopea jäädytys tuottaa pieniä jääkiteitä ja minimoi osmoottisen stressin, mikä parantaa mikrobien selviytymistä merkittävästi. Kryogeeninen jäädytys nestemäisellä tyypellä tai akustiset menetelmät ovat ihanteellisia menetelmiä mikrobiologisille tuotteille.

Lämpötilan hallinta pakastekuivauksen aikana on äärimmäisen tärkeää. Primäärikuivauksen lämpötilat on pidettävä matalina, tyypillisesti -30°C ja -20°C välillä, jotta vältetään mikrobien kuolemalla. Lämpötilan nostaminen sekundäärikuivaukseen on tehtävä erittäin varovaisesti ja asteittain. Monet probioottiset bakteerit ja hiivat kestävät korkeintaan 20°C - 30°C sekundäärikuivauksen aikana, ja lämpimämpiä lämpötiloja herkkien kantojen kanssa tulee välttää kokonaan. Tämä rajoittaa sekundäärikuivauksen tehokkuutta ja pidentää prosessiaikoja, mutta on välttämätöntä elinkykyisyyden säilyttämiseksi.

Hapelle altistuminen on toinen kriittinen tekijä, erityisesti anaerobisille bakteereille. Monet maitohappobakteerit ja bifidobakteerit ovat herkkiä hapelle, ja niiden altistuminen hapen ympäristössä voi johtaa nopeaan elinkykyisyyden laskuun. Pakastekuivauksen aikana happialtistus on minimoitava, ja pakkaus tulisi tehdä inertin kaasun, kuten typen tai argonin, alla. Pakkauksen hapen poistaminen hapenpoistajilla on myös suositeltavaa. Joissakin tapauksissa mikrobeja voidaan kasvattaa anaerobisissa olosuhteissa ennen pakastekuivausta, mikä parantaa niiden kykyä sietää myöhempää happialtistusta.

Jäännöskosteuden on oltava erittäin matala, tyypillisesti 1-2%, mikrobien pitkäaikaisen säilyvyyden varmistamiseksi (Morgan *et al.*, 2006). Korkea jäännöskosteus mahdollistaa aineenvaihduntareaktioita ja DNA-vaurioita säilytyksen aikana, mikä johtaa elinkykyisyyden laskuun. Liian matala jäännöskosteus voi kuitenkin myös vahingoittaa soluja, joten optimaalinen jäännöskosteus on löydettävä kokeellisesti. Säilytyksen aikana lämpötilan tulisi olla alhainen, mieluiten jääkaappilämpötilassa tai jopa pakastettuna, elinkykyisyyden maksimoimiseksi.

Stabilaattorit ja suoja-aineet voivat merkittävästi parantaa mikrobien säilyvyyttä. Rasvaton maitojauhe sisältää maitoproteiineja, kuten kaseiinia ja heraproteiinia, jotka muodostavat suojaavan kerroksen mikrobien ympärille. Inuliini ja muut prebioottikuidut voivat toimia sekä kryoprotektanteina että stabilaattoreina. Antioksidantit, kuten askorbiinihappo, voivat suojata mikrobeja hapettumiselta. Maltodekstriini toimii sekä kryoprotektanttina että kuivan matriisin muodostajana.

Elinakykyisyystestaus on välttämätöntä prosessin validoimiseksi. Mikrobien määrä ja aktiivisuus tulisi mitata sekä ennen pakastekuivausta että sen jälkeen, jotta voidaan arvioida

prosessin vaikutus. Tyypillisesti tavoitellaan yli 90% elinkykyisyyttä, vaikka joillakin herkkillä kannoilla tämä voi olla haastava tavoite. Säilyvyystestit eri lämpötiloissa ja olosuhteissa ovat myös tärkeitä tuotteen säilyvyysajan määrittämiseksi. Aktiivisuustestit, joissa mitataan mikrobien kykyä kasvaa ja tuottaa aineenvaihduntatuotteita rehydratoinnin jälkeen, antavat tärkeää tietoa tuotteen toiminnallisuudesta käytännön sovelluksissa.

Laadunvalvonta

Laadunvalvonnan puute

Ehkä perustavin virhe pakastekuivauksessa on se, ettei tehdä systemaattista laadunvalvontaa. Ilman säännöllistä testaamista ja dokumentointia on mahdotonta tietää, onko prosessi optimaalinen tai huomata ongelmia ennen kuin koko erä on jo pilalla. Monet yritykset ja tuottajat luottavat pelkästään silmämääräiseen arviointiin ja oletukseen, että prosessi toimii jos tuote näyttää kuivalta. Tämä lähestymistapa on riittämätön ammattimaiselle tuotannolle ja johtaa väistämättä laatuongelmiin, asiakasvalituksiin ja taloudellisiin menetyksiin. Laadunvalvonta ei ole valinnainen lisä vaan välttämätön osa ammattimaisesti hoidettua pakastekuivausprosessia.

Systemaattinen laadunvalvonta mahdollistaa useiden kriittisten tavoitteiden saavuttamisen. Se varmistaa että jokainen erä täyttää asetetut laatuksiteerit ennen kuin tuote päätyy asiakkaalle. Se paljastaa prosessiongelmia varhaisessa vaiheessa, jolloin niitä voidaan korjata ennen kuin ne aiheuttavat merkittäviä menetyksiä. Dokumentoitu laadunvalvonta tarjoaa myös jäljitettävyyden, joka on välttämätön sekä lakisääteisten vaatimusten täyttämiseksi että mahdollisten ongelmien selvittämiseksi jälkikäteen. Lisäksi säännöllinen testaus kerää arvokasta dataa, jota voidaan käyttää prosessin optimointiin ja kehittämiseen.

Perusparametrit jokaisesta erästä

Jokaisesta tuotantoerästä tulisi ottaa edustava näyte ja testata vähintään seuraavat perusparametrit ennen tuotteen hyväksymistä ja pakkausta. Näytteenoton tulee olla systemaattista: näytteitä otetaan useista kohdista erää, sekä eri hyllyiltä että hyllyjen eri kohdista, jotta saadaan todellinen kuva koko erän laadusta. Pelkkä yhden näytteen ottaminen yhdestä kohdasta ei kerro riittävästi koko erän tilasta, sillä kuivuminen voi olla epätasaista.

Visuaalinen laatu on ensimmäinen ja helpoin tarkistettava parametri. Tuotteen värin tulisi olla yhtenäinen ja vastata odotettua: voimakas ruskistuminen, haalistuminen tai epätasainen väri viittaavat ongelmiin prosessissa. Rakenteen tulisi olla ehyt ja huokoinen, ei romahtanut tai tiivistynyt. Tuotteen pinnan tulisi olla kuiva, ei tahmeahko tai kostea tuntuvaltaan. Myös tuotteen koko ja muoto tulisi tarkistaa: liiallinen kutistuminen tai epätasainen kuivuminen ovat merkkejä prosessiongelmista.

Maku ja aromi arvioidaan aistinvaraisesti koulutetun paneelin tai kokeneen arvioijan toimesta. Pakastekuivatun tuotteen tulisi säilyttää alkuperäinen maku ja aromi mahdollisimman hyvin. Vieraiden makujen, kuten karvaan, hapanta tai härskiintyneen maun, esiintyminen on merkki ongelmista. Aromin heikkous tai puuttuminen voi viitata liian korkeisiin kuivauslämpötiloihin tai liian pitkään prosessiin. Säännöllinen aistinvarainen arviointi auttaa havaitsemaan hienovaraisia muutoksia, jotka eivät välttämättä näy muissa testeissä.

Jäännöskosteuden mittaus

Jäännöskosteus on ehkä kriittisin yksittäinen laatuparametri pakastekuivatuille tuotteille, sillä se vaikuttaa suoraan säilyvyyteen, rakenteeseen ja mikrobiologiseen stabiilisuuteen. Liian korkea jäännöskosteus johtaa lyhyeen säilyvyysaikaan, homehtumisriskiin ja rakenteen pehmenemiseen säilytyksen aikana. Jäännöskosteuden mittaaminen on siten välttämätöntä jokaisesta erästä ennen pakkaamista, ja että käytetty mittausmenetelmä on validoitu ja kaliberoitu säännöllisesti.

Rakenteen arviointi

Tuotteen rakenne kertoo paljon kuivauksen onnistumisesta ja lopputuotteen laadusta. Hyvin pakastekuivattu tuote on kevyt, huokoinen ja hauras. Se murskaantuu helposti sormien välissä ja jauhautuu tasaiseksi jauheeksi. Jos tuote on sitkeä, tahmea tai vaikea murskata, se viittaa epätäydelliseen kuivaukseen tai rakenteen romahdukseen prosessin aikana.

Rakenteen arviointi voidaan tehdä useilla tavoilla. Yksinkertaisin on manuaalinen testaus, jossa tuotetta puristetaan ja murskataan sormien välissä. Kokenut arvioija tunnistaa helposti erot hyvin ja huonosti kuivatun tuotteen välillä. Tarkempi arviointi voidaan tehdä tekstuurianalysaattorilla, joka mittaa tuotteen kovuutta, murtolujuutta ja muita mekaanisia ominaisuuksia kvantitatiivisesti. Tällaiset mittaukset ovat erityisen hyödyllisiä tutkimus- ja kehitystyössä sekä prosessin validoinnissa, mutta voivat olla liian hitaita ja kalliita rutiininomaiseen laadunvalvontaan. Jauhautuvuustesti, jossa tuote jauhetaan

standardoiduissa olosuhteissa ja jauheen partikkelikokojakauma määritetään, antaa objektiivista tietoa rakenteen yhtenäisyydestä ja laadusta.

Rehydratoituvuuden testaus

Rehydratoituvuus on tärkeä laatuparametri monille pakastekuivatuille tuotteille, erityisesti niille jotka on tarkoitettu rehydratoitaviksi ennen käyttöä. Hyvin pakastekuivattu tuote imee vettä nopeasti ja palauttaa lähes alkuperäisen rakenteensa, tekstuurinsa ja ulkonäkönsä. Huonosti kuivattu tai romahtanut tuote imee vettä hitaasti ja jää märäksi ja vetiseksi ilman että rakenne palautuu.

Rehydratoituvuustesti suoritetaan standardoiduissa olosuhteissa: tietty määrä tuotetta lisätään tiettyyn määrään vettä määrättyssä lämpötilassa, ja ajan funktiona mitataan veden imeytymistä. Yksinkertaisimmillaan tämä voidaan tehdä punnitsemalla tuote ennen ja jälkeen rehydraation ja laskemalla vedensidontakapasiteetti. Tarkempi arviointi sisältää myös rehydraatoidun tuotteen rakenteen, tekstuurin ja ulkonäön arvioinnin. Vertailu alkuperäiseen tuoreeseen tuotteeseen antaa käsityksen siitä, kuinka hyvin pakastekuivaus ja rehydraatio ovat säilyttäneet tuotteen ominaisuudet. Rehydraatioaika, eli aika joka kuluu täydelliseen veden imeytymiseen, on myös tärkeä parametri erityisesti kuluttajatuotteille, joissa nopea valmistuminen on toivottavaa.

Mikrobiologinen testaus

Vaikka pakastekuivaus itsessään ei ole sterilointimenetelmä, matala jäännöskosteus estää mikrobien kasvun tehokkaasti. Mikrobiologisen turvallisuuden varmistaminen on kuitenkin välttämätöntä, erityisesti elintarviketuotteille. Mikrobiologinen testaus tulisi suorittaa säännöllisesti, vaikka ei välttämättä jokaisesta erästä, jotta varmistetaan että prosessi pysyy mikrobiologisesti hallinnassa.

Perusmikrobiologinen testaus sisältää aerobisten mikrobien kokonaismäärän (TPC, Total Plate Count), hiivat ja homeet, koliformit sekä patogeenien, kuten Salmonellan ja Listerián, poissaolon. Testausfrekvenssi riippuu tuotteesta, tuotantomäärästä ja riskinarvioinnista. Uusille tuotteille ja prosesseille tiheämpi testaus on tarpeen validoinnin aikana. Vakiintuneille tuotteille harvempi testaus, esimerkiksi kerran kuukaudessa tai neljännesvuosittain, voi olla riittävä jos prosessi on hyvin dokumentoitu ja hallinnassa. Lisäksi ympäristön mikrobiologinen seuranta, mukaan lukien ilman, pintojen ja henkilökunnan testaus, on tärkeää kontaminaatoriskin minimoimiseksi.

Probioottisten ja starterikulturettien tapauksessa mikrobiologinen testaus on erityisen kriittinen, mutta tavoite on päinvastainen: varmistaa että halutut mikrobit ovat elossa ja aktiivisia. Tämä vaatii spesifisiä viljelymenetelmiä ja elinkykyisyystestejä, jotka osoittavat mikrobien määrän (CFU, Colony Forming Units) ja niiden kyvyn kasvaa ja toimia rehydratoinnin jälkeen.

Ravintosisällön testaus

Ravintosisällön testaus on tärkeää tuotteille, joiden markkinoinnissa korostetaan ravintoarvoa tai jotka on tarkoitettu erityisryhmille, kuten urheilijoille tai terveyksestään huolehtiville kuluttajille. Pakastekuivaus säilyttää ravintosisällön yleensä hyvin, mutta jotkut vitamiinit ja antioksidantit voivat heikentyä prosessin aikana, erityisesti jos lämpötiloja ei hallita oikein tai jos tuote altistuu valolle ja hapelle.

Täydellinen ravitsemuksellinen analyysi, joka sisältää proteiinit, rasvat, hiilihydraatit, kuidut, vitamiinit ja mineraalit, on kallista ja aikaa vievää. Se on tyypillisesti tarpeen vain tuotekehityksen alkuvaiheessa ja säännöllisesti tietyin väliajoin vakiintuneille tuotteille pakkasmerkintöjen tarkistamiseksi. Kriittisiin ravintoaineisiin, kuten C-vitamiiniin marjatuotteissa tai proteiiniin proteiinijauheissa, voidaan keskittyä useammin. Jos tuotetta markkinoidaan tietyn ravintoaineen lähteenä, kyseisen ravintoaineen säännöllinen testaus on lain mukaan välttämätöntä väitteiden tukemiseksi ja kuluttajansuojan varmistamiseksi.

Prosessiparametrien dokumentointi

Systemaattinen prosessiparametrien dokumentointi on yhtä tärkeää kuin lopputuotteen testaus. Jokaisen erän käsittelystä tulisi kirjata ylös kaikki keskeiset parametrit: jäädytysmenetelmä ja -aika, alkupainon jälkeinen paino, hyllyjen lämpötilat eri vaiheissa, kammion paine eri vaiheissa, kondensoijan lämpötila, prosessin kokonaiskesto mukaan lukien primääri- ja sekundäärikuivauksen kestot, sekä mahdolliset poikkeamat tai ongelmat prosessin aikana.

Moderni pakastekuivauslaitteet tallentavat monet näistä parametreista automaattisesti, mikä tekee dokumentoinnista helpompaa ja luotettavampaa. Manuaalisesti dokumentoiduissa prosesseissa on tärkeää käyttää standardoituja lomakkeita tai tarkistuslistoja, jotta kaikki tarvittava tieto kirjataan systemaattisesti. Prosessiparametrien ja lopputuotteen laadun välinen korrelaatio voidaan analysoida ajan mittaan, mikä auttaa tunnistamaan kriittiset parametrit ja optimoimaan prosessia. Jos tuotteessa havaitaan laatuongelma, prosessidatan

tarkastelu auttaa tunnistamaan ongelman juurisyyn ja estämään sen toistumisen tulevaisuudessa.

Säilyvyytestaus

Säilyvyytestaus on välttämätöntä määritettäessä tuotteen parasta ennen -päivämäärää ja varmistettaessa että tuote säilyttää laatunsa koko ilmoitetun säilyvyysajan. Säilyvyytestaus on erityisen tärkeää uusille tuotteille, mutta myös vakiintuneilta tuotteilta tulisi ottaa satunnaisesti näytteitä säilyvyysseurantaan prosessin vakauden varmistamiseksi.

Reaaliaikainen säilyvyytestaus, jossa tuotetta säilytetään suunnitelluissa olosuhteissa ja testataan säännöllisin väliajoin koko säilyvyysajan, on tarkin mutta aikaa vievin menetelmä. Tuotetta tulisi säilyttää useissa eri lämpötiloissa, mukaan lukien huoneenlämpötila ja korotettu lämpötila, jotta saadaan käsitys säilyvyydestä eri olosuhteissa. Testattavia parametreja ovat jäännöskosteus, väri, maku, aromi, rakenne, mikrobiologinen laatu ja tarvittaessa ravintosisältö. Nopeutetut säilyvyytestit, joissa tuotetta säilytetään korotettujen lämpötilojen tai kosteuksien olosuhteissa, voivat antaa nopeammin käsityksen tuotteen säilyvyydestä. Näiden tulosten tulkinta vaatii kuitenkin varovaisuutta, ja ne tulisi aina validoida reaaliaikaisilla testeillä ennen lopullisten väitteiden tekemistä.

Poikkeamien käsittely ja juurisyyanalyysi

Kun laadunvalvonnassa havaitaan poikkeama, pelkkä virheellisen erän hylkääminen ei riitä. On välttämätöntä suorittaa juurisyyanalyysi selvittääkseen miksi poikkeama tapahtui ja miten se voidaan estää tulevaisuudessa. Juurisyyanalyysi voi paljastaa systemaattisia ongelmia prosessissa, laitteissa tai materiaaleissa, jotka muuten jäisivät huomaamatta ja johtaisivat toistuviin laatuongelmiin.

Juurisyyanalyysi alkaa kaikkien saatavilla olevien tietojen keräämisellä: prosessiparametrit, raaka-aineiden laatu, laitteiston kunto, henkilöstön toimenpiteet ja ympäristöolosuhteet. Syyseurauskaaviot, kuten kalanruotodiagrammi, voivat auttaa systematisoimaan mahdollisten syiden kartoituksen. Kun juurisyy on tunnistettu, korjaavat toimenpiteet suunnitellaan ja toteutetaan, ja niiden tehokkuus varmennetaan seurannalla. Dokumentointi koko prosessista on tärkeää sekä oppimisen että laadunhallintajärjestelmän vaatimusten täyttämisen kannalta. Säännöllinen poikkeamien tarkastelu ja trendien analysointi auttaa tunnistamaan toistuvia ongelmia ja kehittämiskohteita.

Dokumentointi ja jäljitettävyys

Kattava dokumentointi ja jäljitettävyys ovat modernin elintarviketuotannon kulmakiviä. Jokaiselle tuotantoerällä tulisi olla yksilöllinen eränumero, johon liittyy kaikki kyseistä erää koskeva tieto: käytetyt raaka-aineet ja niiden eränumerot, prosessiparametrit, laadunvalvonnan tulokset, pakkauspäivämäärä ja -olosuhteet sekä tieto mihin lopputuotteet on toimitettu. Tämä tieto mahdollistaa nopean ja täydellisen jäljitettävyyden sekä eteenpäin että taaksepäin toimitusketjussa.

Jäljitettävyysjärjestelmä on kriittinen takaisinvetojen hallinnassa. Jos tuotteessa havaitaan ongelma markkinoilla, hyvä jäljitettävyysjärjestelmä mahdollistaa tarkan ongelman lähdekohdan tunnistamisen ja vain ongelman sisältävien erien takaisinvedon, sen sijaan että jouduttaisiin vetämään takaisin kaikki tuotteet varovaisuussyistä. Jäljitettävyysjärjestelmä on myös tärkeä työkalu prosessin kehittämisessä ja ongelmien ratkomisessa, sillä se mahdollistaa historiallisen datan analysoinnin ja korrelaatioiden tunnistamisen eri parametrien välillä. Nykyaikaiset digitaaliset järjestelmät tekevät dokumentoinnista ja jäljitettävyydestä helpompaa ja luotettavampaa kuin perinteiset paperijärjestelmät.

HACCP-järjestelmä pakastekuivauksessa

HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Points) -järjestelmä on elintarviketurvallisuuden hallintajärjestelmä, joka tunnistaa, arvioi ja hallitsee merkittäviä vaaroja. Pakastekuivauksessa HACCP:n soveltaminen on erityisen tärkeää, koska prosessi sisältää useita kriittisiä valvontapisteitä (CCP), joissa virheet voivat johtaa vakaviin laatuongelmiin tai turvallisuusriskeihin.

Pakastekuivauksen keskeiset kriittiset valvontapisteet ovat tyypillisesti: raaka-aineen lämpötila vastaanotossa, jäädytyksen nopeus ja loppulämpötila, primäärikuivauksen tuotelämpötila (romahtamisen esto), sekundäärikuivauksen jäännöskosteus (mikrobiologinen turvallisuus) ja pakkausympäristön hygienia. Jokaiselle CCP:lle on määriteltävä kriittiset rajat, seurantamenetelmät, korjaavat toimenpiteet ja dokumentointivaatimukset.

HACCP-järjestelmä edellyttää myös PRP:tä (Prerequisite Programs) eli esiohjelmia, kuten puhdistus- ja desinfektio-ohjeet, henkilökunnan hygieniakoulutus, tuholaiistorjunta ja laitteiden kunnossapito-ohjelma. Nämä luovat pohjan, jonka päälle kriittisten valvontapisteiden hallinta rakentuu. Dokumentointi on HACCP:n ydin - ilman systemaattista kirjaamista järjestelmä ei toimi. Modernit pakastekuivauslaitteet helpottavat tätä tallentamalla prosessiparametrit automaattisesti, mutta manuaaliset tarkistukset ja validoinnit on silti dokumentoitava huolellisesti.

Kalibrointi ja laitteiden huolto

Laadunvalvonnan luotettavuus riippuu käytettyjen mittauslaitteiden tarkkuudesta. Kaikki mittauslaitteet, mukaan lukien lämpötila-anturit, painemittarit, kosteusmittarit ja vaa'at, tulee kalibroida säännöllisesti jäljitettäviä standardeja vasten. Kalibroinnin frekvenssi riippuu laitteesta, käyttöfrekvenssistä ja valmistajan suosituksista, mutta tyypillisesti vuosittainen kalibrointi on vähimmäisvaatimus kriittisille mittauslaitteille.

Kalibrointidokumentaatio tulee säilyttää ja sen tulee osoittaa milloin kalibrointi tehtiin, kuka sen teki, mitä standardeja käytettiin ja mitkä olivat tulokset. Jos laite ei täytä hyväksyttävyyksärajoja, se on korjattava tai vaihdettava, ja kaikki sen jälkeen tehdyt mittaukset kun laite oli kalibroimatta tulee arvioida uudelleen. Ennaltaehkäisevä huolto-ohjelma pakastekuivauslaitteille ja muille prosessilaitteille on myös tärkeä osa laatuohjelmaa. Säännöllinen huolto, mukaan lukien tiivisteiden tarkistus, tyhjiöpumpun kunnon seuranta, kondensoijan puhdistus ja jäähdytysjärjestelmän tarkistus, estää odottamattomia vikoja ja varmistaa että laitteet toimivat luotettavasti.

Kylmäjärjestelmän huolto ja korjaustyöt saa suorittaa vain pätevyitynyt kylmälaiteasentaja. Kylmäaineet ovat säänneltyjä aineita, joiden käsittely vaatii asianmukaisen koulutuksen ja sertifiointin. F-kaasusäädökset edellyttävät myös vuotovalvontaa ja dokumentointia kylmäainemäärästä. Luvaton tai epäpätevä kylmäjärjestelmän käsittely on sekä laitonta että vaarallista - se voi johtaa vakaviin vaurioihin laitteistolle, ympäristölle ja käyttäjälle.

Validointi uusille tuotteille

Kun uusi tuote otetaan tuotantoon, pelkkä yhden onnistuneen erän tekeminen ei riitä. Prosessi tulee validoida, eli osoittaa toistettavasti että se tuottaa toivotun laatuksen lopputuotteen. Validointi sisältää useita peräkkäisiä eriä, joissa prosessiparametrit pidetään vakioina ja jokaisen erän laatua seurataan tarkasti. Tyypillisesti kolme peräkkäistä onnistunutta erää katsotaan riittäväksi validoinniksi, mutta monimutkaisemmille tuotteille tai prosesseille voidaan vaatia enemmän.

Validoinnin aikana tulisi testata myös prosessin kestävyyttä vaihteluille. Mitä tapahtuu jos raaka-aine vaihtelee hieman laadultaan? Entä jos lämpötila vaihtelee muutaman asteen? Näiden ns. robustness-testien avulla voidaan määrittää prosessin hyväksyttävät vaihteluvälit ja varmistaa että tuote pysyy laadukkaana myös normaalin vaihtelun puitteissa. Validointidokumentaatio muodostaa perustan prosessin hallinnalle ja tarjoaa viitearvot tuleville erille. Se on myös tärkeä osa laadunhallintajärjestelmää ja voi olla vaatimus tietyille markkinoille tai asiakkaille.

Yhteenveto

Pakastekuivaus on teknisesti vaativa prosessi, jonka menestyksekkäästi toteutus edellyttää syvällistä ymmärrystä prosessin fysikaalisista ja kemiallisista perusteista. Tämä opas on tarkoitettu sekä aloitteleville pakastekuivaajille että kokeneemmille toimijoille, jotka haluavat syventää osaamistaan ja välttää yleisimmät laatuongelmat.

Prosessin perusteet ja laatuattribuutit

Pakastekuivaus perustuu sublimaatioon, jossa jää muuttuu suoraan vesihöyryksi alhaisessa paineessa ja lämpötilassa. Prosessin suurin etu on kyky säilyttää tuotteen alkuperäiset ominaisuudet - maku, aromi, väri, rakenne ja ravintoaineet - lähes muuttumattomina. Tämä edellyttää kuitenkin, että jokainen prosessin vaihe toteutetaan oikein.

Laadukas pakastekuivattu tuote määrittyy kuuden keskeisen attribuutin kautta: maku ja aromi, rakenteelliset ominaisuudet, visuaalinen laatu, ravintoaineiden säilyvyys, jäännöskosteus ja rehydratoituvuus. Nämä ovat toisiinsa kytkeytyneitä - virhe yhdessä vaikuttaa usein myös muihin. Lämpö on kriittisin yksittäinen uhka: liiallinen lämpö aiheuttaa makuvirheitä (Maillard-reaktio, karamellisoituminen), rakenteen romahtamista, värin tummumista ja ravintoaineiden hajoamista.

Jäädytyksen ensisijainen merkitys

Jäädytysvaihe määrittää koko jatkoprosessin onnistumisen tavalla, jota usein aliarvioidaan. Hidas jäädytys tuottaa suuria jääkiteitä, jotka rikkovat solurakenteita mekaanisesti. Vakavampi ongelma on osmoottinen: kun vesi jäätyy ensin solun ulkopuolelle, osmoottinen paine nostaa merkittävästi solun sisäisten komponenttien konsentraatiota. Tämä laskee lasittumislämpötilaa (T_g) ja voi muodostaa alueita, jotka eivät jäädy ollenkaan käytetyssä lämpötilassa. Seurauksena tuote voi olla romahdusherkkä tai pahimmillaan mahdoton pakastekuivata.

Nopea jäädytys tuottaa pieniä jääkiteitä, säilyttää solurakenteen ja jättää huokoisen matriisin. Teollisessa mittakaavassa kontaktipakastus ritaläkoreissa, IQF-pakastus, tunneli- ja spiraalipakastus toimivat hyvin, kun tuotekerros pidetään ohuena (max 5-10 cm) ja ilmavirta pääsee kiertämään. Kryogeeninen jäädytys ja akustinen pakastus (AEF) tarjoavat erinomaisia tuloksia premium-tuotteille. Käytännön tutkimukset ovat toistuvasti osoittaneet, että oikea jäädytysmenetelmä on tärkein yksittäinen tekijä - sen vaikutus ylittää usein kaikkien muiden esikäsitelyjen yhteenlasketun vaikutuksen.

Primäärikuivaus: lämpötilan hallinta

Primäärikuivauksen aikaiset virheet ovat yleisimpiä ja vakavimmista seurauksista kärsiviä. Liian nopea lämmitys nostaa tuotteen lämpötilan yli romahtamislämpötilan (T_c), mikä johtaa rakenteen tiivistymiseen, aromin menetykseen ja ravintoaineiden hajoamiseen.

Oikea lähestymistapa alkaa stabilointivaiheella: kammion paineen laskemisen jälkeen hyllyjä ei lämmitetä ensimmäiseen tuntiin. Tämä antaa tuotteen lämpötilan laskea kammion paineen määrittämään sublimointilämpötilaan. Stabiloinnin onnistumisen tunnistaa siitä, että paine ei enää laske. Vasta tämän jälkeen lämpötilaa voidaan nostaa.

Sublimaatio on endoterminen - se kuluttaa hyllyiltä tulevan lämpöenergian pitäen tuotteen viileänä. Siksi lämpötilaa voidaan nostaa suhteellisen nopeasti primäärin alussa, kun jäätä on runsaasti. Lämpötilaramppi $5-10^{\circ}\text{C}/\text{h}$ on turvallinen alkuvaiheessa. Tuotteen todellinen lämpötila on aina merkittävästi alhaisempi kuin hyllyjen lämpötila, ja sen suora mittaus termopareilla on luotettavin tapa varmistaa turvallinen prosessi.

Lämmitetyissä hyllyissä on kaksi kriittistä epätasaisuuskohtaa. Ylimmällä hyllyllä ei ole lämmitettyä hyllyä yläpuolella antamassa lämpösäteilyä, joten se kuivuu hitaammin - sinne kannattaa laittaa vähemmän tuotetta. Reunoilla tuote kuivuu nopeammin kuin keskellä kammion seinistä tulevan lämpösäteilyn vuoksi. Materiaalivalinnat ovat myös kriittisiä: alumiini johtaa lämpöä yli 10-kertaa paremmin kuin ruostumaton teräs, ja silikoni on käytännössä eriste. Alumiinia kartetaan joskus turhaan muissa sovelluksissa, vaikka tieteellinen näyttö on kiistanalaista. Pakastekuivauksessa oikea materiaalivalinta on niin kriittinen tekijä, ettei vaihtoehdoille ole varaa. Tuote tulisi aina asettaa suoraan alumiinisille hyllyille tai ohuisiin alumiinisiin tarjottimiin.

Kammiopaineen ja kondensoijan optimointi

Paine määrittää sublimointilämpötilan. Useimmat elintarvikkeet sietävät hyvin $0,8-1,5$ mbar primäärikuivauksen aikana. Vain erittäin korkeasokerisille tuotteille tai proteiinirikkailla materiaaleilla tarvitaan alhaisempia paineita ($0,1-0,3$ mbar). Liian alhainen paine ei ole parempi - alle $0,2$ mbar:ssa lämmönsiirto heikkenee kaasumolekyylien vähyyden vuoksi, mikä hidastaa prosessia.

Kondensoijan lämpötila vaikuttaa suoraan paineeseen. Perinteiset kylmäaineet (R404A, R507) saavuttavat -70°C - -80°C , mutta niiden GWP-arvot ovat erittäin korkeat (noin 4000). EU:n F-kaasusäädökset rajoittavat näiden käyttöä. Uudemmat ympäristöystävälliset

kylmäaineet (R449A, R513A, R290) saavuttavat tyypillisesti -50°C - -60°C , mikä voi rajoittaa tuotevalikoimaa. Ammoniakki ja hiilidioksidi ovat vaihtoehtoja suurille laitoksille, mutta niillä on käytännön haasteitaan.

Kylmäaineiden energiatehokkuus (COP) vaihtelee merkittävästi. Ammoniakki tarjoaa parhaan tehokkuuskertoimen, ja pitkän aikavälin energiakustannukset voivat olla merkittävä osa kokonaiskustannuksia. Lämmön talteenotto on erityisen kannattavaa pohjoisissa olosuhteissa, jossa se voi vähentää kokonaisenergiankulutusta 20-40%.

Sekundäärikuivaus: sitoutuneen veden poisto

Sekundäärikuivaus on fysikaalisesti erilainen prosessi kuin primääri. Kun primääri poistaa vapaata vettä sublimaation kautta, sekundääri poistaa sitoutunutta vettä desorption kautta. Sitoutunut vesi on kiinnittynyt vetysidoksin tuotteen rakenteeseen, ja sen irrottaminen vaatii korkeampia lämpötiloja (tyypillisesti $28-42^{\circ}\text{C}$ elintarvikkeilla, mikrobiologisille tuotteille $20-30^{\circ}\text{C}$).

Sekundäärikuivaus kestää usein yhtä kauan tai kauemmin kuin primääri, mikä on monelle aloittelijalle yllätys. Epätäydellinen sekundäärikuivaus on erittäin yleinen virhe, joka johtaa lyhyeen säilyvyysaikaan, homehtumisriskiin ja rakenteen pehmenemiseen säilytyksen aikana.

Lämpötilan nosto primaarista sekundaariin on tehtävä asteittain, tyypillisesti $5-10^{\circ}\text{C}/\text{h}$. Paineen käyttäytyminen muuttuu: kun primäärissä paine laskee jään sublimoituessa, sekundäärissä paine pysyy vakaampana desorption ollessa hitaampaa. Vakaa paine ei tarkoita että prosessi on valmis - se tarkoittaa että desorptio tapahtuu tasaisella nopeudella.

Tavoiteltava jäännöskosteus vaihtelee tuotteen mukaan: marjat 2-5%, vihannekset 2-4%, sienet 3-5%, liha 1-3%, rasvainen kala 1-2%, probiootit ja startterit 1-2%. Jäännöskosteus on mitattava ennen pakkausta, ja mittaus tulisi tehdä useista kohdista erää tasaisen kuivumisen varmistamiseksi.

Tuotekerroksen paksuus

Tuotteen levittäminen liian paksuina kerroksina on tekninen virhe, joka hidastaa kuivumista merkittävästi. Sublimaatio etenee pinnalta kohti keskustaa, ja vesihöyryn on kuljettava kuivan kerroksen läpi. Ohjeet:

- Isot marjat ja hedelmäpalat: yksi kerros ilman päällekkäisyyksiä
- Pienet marjat, viipaleet, rouheet: max 2 cm, jos ylhäällä lämmitetty hylly

- Nestemäiset tuotteet: 5-10 mm (varoitusta: liian ohut kerros voi muodostaa kuplan)
- Jauhetut tuotteet ja pienet partikkelit: max 1 cm
- Vihannekset: 1-2 cm

Pyöreät marjat ovat kosketuksessa hyllyyn vain pieneltä alueelta, joten lämmönsiirto tapahtuu pääosin säteilynä ylhäältä. Tämä tekee niiden kuivaamisesta hitaampaa kuin tasaisten tuotteiden. Ohuemmat kerrokset kuivuvat niin paljon nopeammin, että kokonaistuottavuus paranee huolimatta pienemmästä yksittäisen erän koosta.

Pakkaus ja säilytys

Vaikka tuote olisi pakastekuivattu täydellisesti, huono pakkaus tuhoaa lopputuloksen. Pakastekuivattu tuote on hygroskooppinen ja huokoinen rakenne altistaa sen hapelle. Parhaat vaihtoehdot ovat lämpösaumatut alumiinilaminaattipussit, jotka tarjoavat erinomaiset barrier-ominaisuudet sekä kosteudelle että hapelle.

Välttämättömät pakkausmateriaalit: alumiinilaminaatti (paras), vakuumpakkaus (hyvä jauheille, mutta vaatii huomion hauraista tuotteista), suojakaasupakkaus (rasvaisille tuotteille), hapenpoistajat (lisäsuojaa).

Vältettävät materiaalit: tavalliset ohuet muovipussit, paperipussit, kartonkipakkaukset, tavalliset zip lock -pussit.

Valon vaikutus on aliarvioitu - UV-säteily hajottaa C-vitamiinia ja väripigmenttejä. Läpinäkymättömät pakkausmateriaalit ovat välttämättömiä pitkäaikaiseen säilytykseen. Tuote tulisi pakkaa välittömästi kuivauksen jälkeen mutta vasta kun se on jäähtynyt 20-25°C:een - lämpimän tuotteen pakkaaminen aiheuttaa kondensaatiota.

Pakkauksissa tulee olla: ainesosaluettelo, ravintosisältö, allergeenit, mahdollisesti myös alkuperämerkinnät, valmistuspäivämäärä, eränumero, parasta ennen -päivämäärä, säilytysohjeet ja avauksen jälkeiset ohjeet. Avauksen jälkeinen säilyvyys on tyypillisesti 1-3 kuukautta riippuen tuotteesta ja säilytysolosuhteista.

Tuotteiden erityisominaisuudet

Eri tuotteet vaativat erilaisia lähestymistapoja. Tässä oppaassa käsitellään 16 erilaista tuoteominaisuutta, jotka vaikuttavat pakastekuivaukseen:

Esikäsittely on usein välttämätön. Blanseeraus inaktivoi entsyymit ja parantaa värin säilymistä - erityisen tärkeää vihanneksille (kukkakaali ruskistuu helposti) ja kaalien kaltaisille ristikkukkaisille (estää karvaita makuja). Sienet hyötyvät blanseerauksesta

pitkäaikasessa säilytyksessä. Marjat halutaan usein kuivata tuoreina maun säilyttämiseksi, mutta tämä vaatii nopeamman prosessoinnin.

Vahakerros (puolukka, karpalo) estää vesihöyryn poistumisen. Ratkaisuja: viipalointi, reikäily, nopea lämpökäsittely tai - puolukan erityistekniikka - nopea lämpötilan nosto primäärin alussa, joka kuivaa pinnan nopeasti kovaksi ja tekee vahakerroksesta läpäisevämmän.

Korkea sokeripitoisuus laskee T_g -arvoa → lisää romahdusriskiä. Ratkaisut: laimentaminen, maltodekstriinin lisäys tai paradoksaalinen tapa: veden lisääminen nostaakseen T_g -arvoa (laimentaa sokeripitoisuutta).

pH vaikuttaa entsyymien aktiivisuuteen ja värin stabiilisuuteen. Liian alhainen pH (etikapesut) lisää furfuraalien muodostumista ja sokerin hajoamista - optimaalinen pH on kompromissi.

Rasvat eivät kuivu ja härskiintyvät helposti. Kriittistä: sekoita rasvat kunnolla ennen jäädytystä tai ne muodostavat eristävän kerroksen. Hapenpoistajat suositeltavia.

Proteiinit sitovat vettä voimakkaasti → hidas sekundäärikuivaus. Denaturaatio voi muuttaa tekstuuria ja heikentää rehydratoitavuutta.

Vesipitoisuuden vaikutus: paradoksaalinen havainto - veden lisääminen hyvin sokeripitoisiin tuotteisiin voi auttaa nostamalla T_g -arvoa.

Aromien säilyttäminen: nopea jäädytys vangitsee aromit. Liian pitkä sekundääri aiheuttaa desorptiota (esim. puolukan bentsoehappo).

Satokausivaihtelut ovat merkittäviä: sokeripitoisuus voi vaihdella 30-50% eri satokausien välillä. Prosessiparametreja on säädettävä kunkin erän mukaan - kiinteät parametrit johtavat laatuongelmiin.

Probiotit ja startterit vaativat erityishuomiota: kryoprotektantit (maltodekstriini, trehaloosi, rasvaton maitojauhe), nopea jäädytys, alhaiset primäärilämpötilat (-30°C - -20°C), matala sekundäärilämpötila ($20-30^{\circ}\text{C}$), erittäin matala jäännöskosteus (1-2%), happisuojaus.

Laadunvalvonta

Systemaattinen laadunvalvonta ei ole valinnainen lisä vaan välttämätön osa ammattimaista pakastekuivausta. Jokaisesta erästä tulisi testata vähintään: visuaalinen laatu, maku ja aromi, jäännöskosteus, rakenne ja rehydratoituvuus.

Jäännöskosteuden mittaaminen on kriittinen parametri. Menetelmiä: Karl Fischer -titraus (tarkin, referenssi), LOD (yksinkertainen, hidas), pikakosteusmittarit (infrapuna-lämmitys, hyvä kompromissi), infrapunakosteusmittari (nopea seulonta).

Prosessiparametrien dokumentointi on yhtä tärkeää kuin lopputuotteen testaus. Kun laatuongelma ilmenee, dokumentoitu historia mahdollistaa juurisyyanalyysin ja ongelman korjaamisen. Modernit laitteet tallentavat parametrit automaattisesti.

Mikrobiologinen testaus säännöllisesti (ei joka erästä, mutta riittävän usein): TPC, hiivat/homeetit, koliformit, patogeenit. Probiooteille testataan elinkykyisyys (CFU).

Validointi uusille tuotteille: 3+ peräkkäistä onnistunutta erää sekä robustness-testit prosessin kestävyuden varmistamiseksi.

Yhteenveto tärkeimmistä opeista

Menestyksekkään pakastekuivauksen perusta on:

- 1. Jäädä ensin** - nopea jäädä on tärkein yksittäinen tekijä, tärkeämpi kuin mikään muu esikäsittely
- 2. Stabiili aina** - älä lämmitä ensimmäiseen tuntiin paineen laskun jälkeen
- 3. Hallitse lämpöä** - liian nopea lämmitys on yleisin ja vakavin virhe
- 4. Älä unohda sekundääriä** - se kestää usein yhtä kauan kuin primääri
- 5. Mittaa jäännöskosteus** - älä luota silmämääräiseen arviointiin
- 6. Pakkaa oikein** - alumiinilaminaatti, ei tavalliset muovipussit
- 7. Dokumentoi kaikki** - vain systemaattinen seuranta mahdollistaa kehityksen
- 8. Säädä jokaiselle tuotteelle** - ei ole yhtä oikeaa reseptiä kaikille

Pakastekuivaus tarjoaa merkittäviä mahdollisuuksia luoda korkeanlaatuisia, arvokkaita tuotteita. Menestyminen edellyttää sitoutumista laatuun, prosessin ymmärtämistä ja jatkuvaa oppimista. Tämä opas tarjoaa työkalut aloittaa matka kohti ammattimaista pakastekuivausta - mutta todellinen osaaminen syntyy käytännön kokemuksesta, huolellisesta dokumentoinnista ja halusta oppia jokaisesta erästä.

Lähteet

Adhikari, B., Howes, T., Bhandari, B.R. & Truong, V. (2001). Stickiness in foods: a review of mechanisms and test methods. *International Journal of Food Properties*, 4(1), 1-33.

Ajandouz, E.H., Tchiakpe, L.S., Ore, F.D., Benajiba, A. & Puigserver, A. (2001). Effects of pH on Caramelization and Maillard Reaction Kinetics in Fructose-Lysine Model Systems. *Journal of Food Science*, 66(7), 926-931.

Beuchat, L.R. (1981). Microbial stability as affected by water activity. *Cereal Foods World*, 26(7), 345-349.

Bhandari, B.R. & Howes, T. (1999). Implication of glass transition for the drying and stability of dried foods. *Journal of Food Engineering*, 40(1-2), 71-79.

Chang, L.L. & Pikal, M.J. (2009). Mechanisms of protein stabilization in the solid state. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 98(9), 2886-2908.

Eriksson, C. (1978). Influence of water activity on enzymic reactions in foods. In: *Dry Biological Systems*, edited by J.H. Crowe & J.S. Clegg. Academic Press, pp. 327-339.

EU Regulation No 517/2014. Regulation on fluorinated greenhouse gases (F-gas Regulation). Official Journal of the European Union.

Flink, J. & Karel, M. (1970). Retention of organic volatiles in freeze-dried solutions of carbohydrates. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 18(2), 295-297.

Giusti, M.M. & Wrolstad, R.E. (2003). Acylated anthocyanins from edible sources and their applications in food systems. *Biochemical Engineering Journal*, 14(3), 217-225.

Harnkarnsujarit, N. & Charoenrein, S. (2011). Influence of collapsed structure on stability of β -carotene in freeze-dried mangoes. *Food Research International*, 44(9), 3188-3194.

Her, L.-M., Deras, M. & Nail, S.L. (1995). Electrolyte-induced changes in glass transition temperatures of freeze-concentrated solutes. *Pharmaceutical Research*, 12(5), 768-772.

Hottot, A., Vessot, S. & Andrieu, J. (2004). A Direct Characterization Method of the Ice Morphology. Relationship Between Mean Crystals Size and Primary Drying Times of Freeze-Drying Processes. *Drying Technology*, 22(8), 2009-2021.

Incropera, F.P. & DeWitt, D.P. (2002). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (5th edition). John Wiley & Sons, Appendix A: Thermophysical Properties of Matter.

IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Appendix on GWP values.

Kasper, J.C. & Friess, W. (2011). The freezing step in lyophilization: Physico-chemical fundamentals, freezing methods and consequences on process performance and quality attributes of biopharmaceuticals. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 78(2), 248-263.

Kroh, L.W. (1994). Caramelisation in food and beverages. *Food Chemistry*, 51(4), 373-379.

Krokida, M.K. & Marinos-Kouris, D. (2003). Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal of Food Engineering*, 57(1), 1-7.

Labuza, T.P. (1980). The effect of water activity on reaction kinetics of food deterioration. *Food Technology*, 34(4), 36-41, 59.

Labuza, T.P. & Breene, W.M. (1989). Applications of "active packaging" for improvement of shelf-life and nutritional quality of fresh and extended shelf-life foods. *Journal of Food Processing and Preservation*, 13(1), 1-69.

Lawless, H.T. & Heymann, H. (2010). *Sensory Evaluation of Food: Principles and Practices* (2nd edition). Springer.

Lewicki, P.P. & Pawlak, G. (2003). Effect of drying on microstructure of plant tissue. *Drying Technology*, 21(4), 657-683.

Liapis, A.I. & Bruttini, R. (1995). Freeze-drying. In: *Handbook of Industrial Drying* (2nd edition), edited by A.S. Mujumdar. Marcel Dekker, pp. 309-343.

Martins, S.I.F.S., Jongen, W.M.F. & van Boekel, M.A.J.S. (2000). A review of Maillard reaction in food and implications to kinetic modelling. *Trends in Food Science & Technology*, 11(9-10), 364-373.

May, J.C., Wheeler, R.M. & Del Grosso, A. (1992). Measurement of final moisture in lyophilized protein products by Karl Fischer titration. *PDA Journal of Pharmaceutical Science and Technology*, 46(4), 109-112.

Mazur, P. (1984). Freezing of living cells: mechanisms and implications. *American Journal of Physiology*, 247(3), C125-C142.

Morgan, C.A., Herman, N., White, P.A. & Vesey, G. (2006). Preservation of micro-organisms by drying; a review. *Journal of Microbiological Methods*, 66(2), 183-193.

Mottram, D.S. (1998). Flavour formation in meat and meat products: a review. *Food Chemistry*, 62(4), 415-424.

Nature Lyotech Oy (2025). Suullinen tiedonanto 20.12.2025.

Oetjen, G.-W. & Haseley, P. (2004). *Freeze-Drying* (2nd edition). Wiley-VCH.

Pikal, M.J. & Shah, S. (1990). The collapse temperature in freeze drying: Dependence on measurement methodology and rate of water removal from the glassy phase. *International Journal of Pharmaceutics*, 62(2-3), 165-186.

Raharitsifa, N., Genovese, D.B. & Ratti, C. (2006). Characterization of apple juice foams for foam-mat drying prepared with egg white protein and methylcellulose. *Journal of Food Science*, 71(3), E142-E151.

Ratti, C. (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. *Journal of Food Engineering*, 49(4), 311-319.

Roos, Y. (1993). Water activity and physical state effects on amorphous food stability. *Journal of Food Processing and Preservation*, 16(6), 433-447.

Roos, Y. (1995). *Phase Transitions in Foods*. Academic Press.

Roos, Y. & Karel, M. (1991). Phase transitions of mixtures of amorphous polysaccharides and sugars. *Biotechnology Progress*, 7(1), 49-53.

Sablani, S.S. (2006). Drying of fruits and vegetables: retention of nutritional/functional quality. *Drying Technology*, 24(2), 123-135.

Searles, J.A., Carpenter, J.F. & Randolph, T.W. (2001). Annealing to optimize the primary drying rate, reduce freezing-induced drying rate heterogeneity, and determine Tg' in pharmaceutical freeze-drying. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 90(7), 872-887.

Sharma, R., Chisti, Y. & Banerjee, U.C. (2001). Production, purification, characterization, and applications of lipases. *Biotechnology Advances*, 19(8), 627-662.

Tang, X. & Pikal, M.J. (2004). Design of Freeze-Drying Processes for Pharmaceuticals: Practical Advice. *Pharmaceutical Research*, 21(2), 191-200.

Tavano, O.L., Berenguer-Murcia, A., Secundo, F. & Fernandez-Lafuente, R. (2018). Biotechnological Applications of Proteases in Food Technology. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(2), 412-436.

Vámos-Vigyázó, L. (1981). Polyphenol oxidase and peroxidase in fruits and vegetables. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 15(1), 49-127.

Wang, S.Y. & Lin, H.S. (2000). Antioxidant activity in fruits and leaves of blackberry, raspberry, and strawberry varies with cultivar and developmental stage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(2), 140-146.

Xiao, H.-W., Pan, Z., Deng, L.-Z., El-Mashad, H.M., Yang, X.-H., Mujumdar, A.S., Gao, Z.-J. & Zhang, Q. (2017). Recent developments and trends in thermal blanching – A comprehensive review. *Information Processing in Agriculture*, 4(2), 101-127.

Liitteet

Taulukko 1. Tyypillisen pakastekuivausohjelman rakenne elintarvikkeille. Arvot ovat suuntaa-antavia ja vaihtelevat merkittävästi tuotteen koostumuksen, kerroksen paksuuden ja halutun lopputuloksen ja käytetyn pakastekuivauslaitteiston mukaan.

Vaihe	Hyllylämpötila	Kammion paine	Kesto	Huomioita
Jäädytys	-40 - -35°C	Normaali ilmanpaine	6-12 h	Riippuu tuotteen kerrospaksuudesta ja massasta. Tuotteen sisälämpötilan tulee saavuttaa vähintään -20 °C.
Stabilointi	-40 - -35°C	0,1-0,3 mbar	30-60 min	Paine lasketaan hitaasti, hyllyä ei lämmitetä.
Primäärikuivaus	Tuotteen lämpötila -30 - -10°C, hyllyn lämpötila voi olla huomattavasti korkeampi esim. 20 - 30°C	0,3-1,2 mbar	12-36 h	Pisin vaihe. Voidaan myös tehdä nostamalla lämpötilaa portaittain tai lämpötilaramppina. Jään sublimaatio.
Sekundäärikuivaus	28 °C - 40°C, tuotteen lämpötila on tässä sama kuin hyllyn lämpötila	0,05-0,2 mbar	6-12 h	Sitoutuneen veden poisto. Lämpötila nostetaan asteittain. Paine voidaan laskea matalammaksi.

Taulukko 2. Tuotekohtaisia eroja pakastekuivausparametreissa.

Tuoteryhmä	Primäärikuivaus lämpötila	Sekundäärikuivaus lämpötila	Tavoite jäännöskosteus	Erityispiirteet
Marjat	-25 - -15°C	20 - 38°C	2-5%	Sokereiden vuoksi matala Tc. Väriaineiden säilyminen tärkeää.
Vihannekset	-20 - -10°C	25 - 38°C	2-4%	Kuitupitoisuus tukee rakennetta. Blanseeraus suositeltavaa.
Liha ja kala	-25 - -15°C	20 - 40°C	1-3%	Rasvaiset vaativat alhaisemman jäännöskosteuden (1-2%). Hapettumisherkkiä.
Sienet	-20 - -10°C	25 - 36°C	3-5%	Sietävät hieman korkeampaa kosteutta. Liian kuivina murenevät.
Probiootit ja startterit	-30 - -20°C	15 - 25°C	1-2%	Matala lämpötila ja jäännöskosteus kriittisiä. Kryoprotektantit välttämättömiä.
Hedelmät (mehu, sose)	-30 - -20°C	20 - 38°C	2-4%	Korkea sokeripitoisuus → matala Tc. Usein lisätään maltodekstriiniä.

Taulukko 3. Yleisiä ongelmia pakastekuivauksessa ja niiden ratkaisuja.

Ongelma	Mahdollinen syy	Ratkaisu
Rakenne romahtaa	Hyllylämpötila liian korkea primäärikuivauksessa	Laske lämpötilaa 5-10 °C. Määritä Tc laboratoriossa.
Kuivuminen kestää liian kauan	Kerros liian paksu tai paine liian korkea	Ohuempi kerros (max 10-15 mm). Laske painetta 0,1-0,2 mbar:iin.
Tuote harsoittuu	Sekundäärikuivaus keskeytetty liian aikaisin	Pidennä sekundäärikuivausaikaa. Mittaa jäännöskosteus.
Epätasainen kuivuminen	Lämmönsiirto epätasaista tai jäädytys epätasaista	Varmista hyvä kontakti hyllyyn (alumiiniset alustat). Kiinnitä huomiota jäädytysmenetelmään.
Väri muuttuu ruskeaksi	Maillard-reaktiot tai karamellisaatio	Laske lämpötilaa sekundäärikuivauksessa. Blanseeraa ennen kuivausta.
Tuote ei rehydratoidu	Rakenne romahtanut tai vahva vahakerros	Laske primäärikuivauksen lämpötilaa. Blanseeraa marjat ennen kuivausta.

Huomautukset: Arvot ovat suuntaa-antavia ja vaihtelevat tuotteen mukaan. Kerroksen paksuus vaikuttaa merkittävästi kuivausaikaan (suositus 5-20 mm). Tuotteen romahtamislämpötila (Tc) ja lasittumislämpötila (Tg') määrittävät maksimilämpötilan primäärikuivauksessa.

Kylmäkuivattujen tuotteiden kuvakooste

Kooste kylmäkuivatuista tuotteista ennen kylmäkuivausta (alkuperäinen tuote) ja kylmäkuivauksen jälkeen (kuivattu tuote).



Mustikka — Kuva: Ida Tikkanen



Valkoherukka — Kuva: Ida Tikkanen



Mochi — Kuva: Ida Tikkanen



Pullet Pork — Kuva: Ida Tikkanen



Euroopan unionin
osarahoittama



UNIVERSITY OF
EASTERN FINLAND



Linssekeitto — Kuva: Ida Tikkanen



Kanelipuusti — Kuva: Ida Tikkanen



Sekasienikuutiot — Kuva: Ida Tikkanen



Kanan fileesuikale kypsä — Kuva: Ida Tikkanen



**Euroopan unionin
osarahoittama**



Pohjois-Savon liitto



UNIVERSITY OF
EASTERN FINLAND



Lihaton proteiinituote — Kuva: Ida Tikkanen



Mansikkaa eri muodoissa; jauhettuna, rouhittuna, viipaleena ja kokonaisena — Kuva: Ida Tikkanen



Mansikkaa eri muodoissa; jauhettuna, rouhittuna, viipaleena ja kokonaisena — Kuva: Ida Tikkanen



Mustaherukka — Kuva: Ida Tikkanen



**Euroopan unionin
osarahoittama**



Pohjois-Savon liitto



UNIVERSITY OF
EASTERN FINLAND



Suolainen piiras — Kuva: Ida Tikkanen



Hedelmäsalaatti — Kuva: Ida Tikkanen



Vadelmaleivos — Kuva: Ida Tikkanen



Vadelmaleivos — Kuva: Ida Tikkanen



**Euroopan unionin
osarahoittama**



UNIVERSITY OF
EASTERN FINLAND



Puolukkaleivos — Kuva: Ida Tikkanen



Pensasmustikka — Kuva: Ida Tikkanen



Hunajamarja — Kuva: Ida Tikkanen



Vadelma — Kuva: Ida Tikkanen



Euroopan unionin
osarahoittama



UNIVERSITY OF
EASTERN FINLAND



Raejuusto — Kuva: Ida Tikkanen



Mustaherukkapuuro — Kuva: Ida Tikkanen



Proteiinirahka — Kuva: Ida Tikkanen



Leipäjuustokuutio — Kuva: Ida Tikkanen



Euroopan unionin
osarahoittama



Pohjois-Savon liitto



UNIVERSITY OF
EASTERN FINLAND

Kuivattuja tuotteita



Puolukkarouhe — Kuva: Jesse Ojala



Maa-artisokka kuutio — Kuva: Jesse Ojala



Vadelmarouhe — Kuva: Jesse Ojala



Haskaprouhe — Kuva: Jesse Ojala



**Euroopan unionin
osarahoittama**





Puolukkajauhe — Kuva: Jesse Ojala



Tyrnirouhe — Kuva: Jesse Ojala



Omena sitruunahappokäsittely

Kuva: Jaana Kapustamäki



Omena sokerivesikäsitely

Kuva: Jaana Kapustamäki



**Euroopan unionin
osarahoittama**



Pohjois-Savon liitto



SAVGGROW
KEHITYSYHTIÖ



UNIVERSITY OF
EASTERN FINLAND