

# 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
Kammionpaineen optimointi.....	28
Kondensoijan lämpötila ja kylmäaineen valinta.....	30
Tuotteiden ominaisuuksien vaikutus pakastekuivaukseen.....	34
Esikäsitteilyn laiminlyönti.....	34
Vahakerroksen aiheuttamat ongelmat.....	34
Korkea sokkeripitoisuus.....	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.

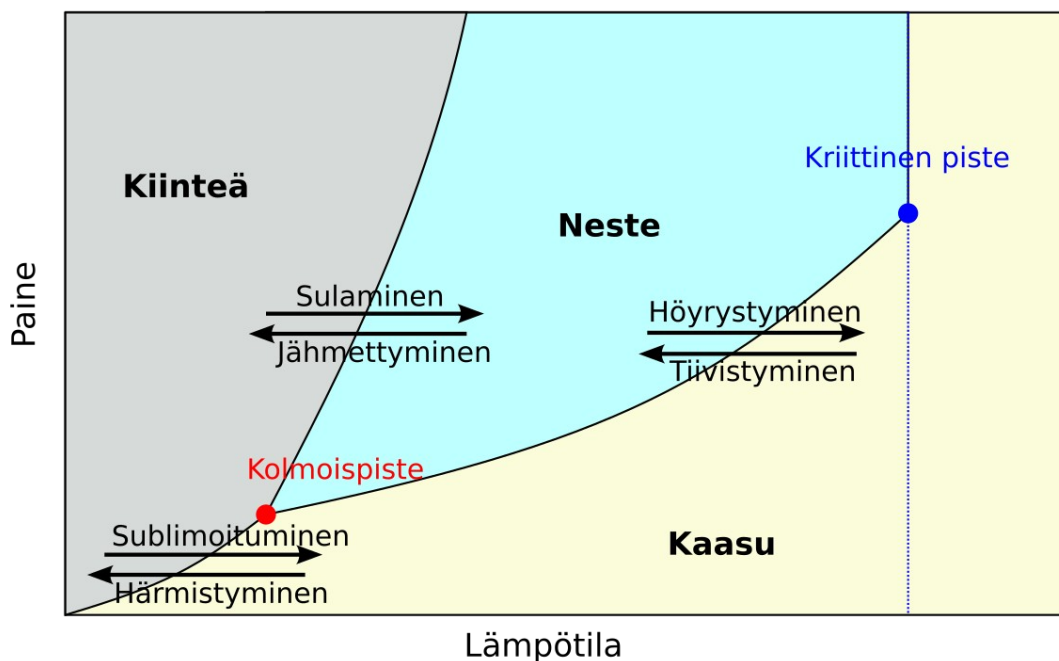
## Pakastekuivaus menetelmänä

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  $-20^{\circ}\text{C}$  -  $-40^{\circ}\text{C}$  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 rehydratoidu 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  $\beta$ -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 esikäsitteily kuten blanseeraus ennen pakastamista ja pakastekuivaamista. Blanseeraus

inaktivoi entsyymit ja voi siten ehkäistä entsyymaattista 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 (pantoteeni-happo) 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 entsyymaattisen 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 entsyymaattinen 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 molekyyliä. 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 pintaa 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

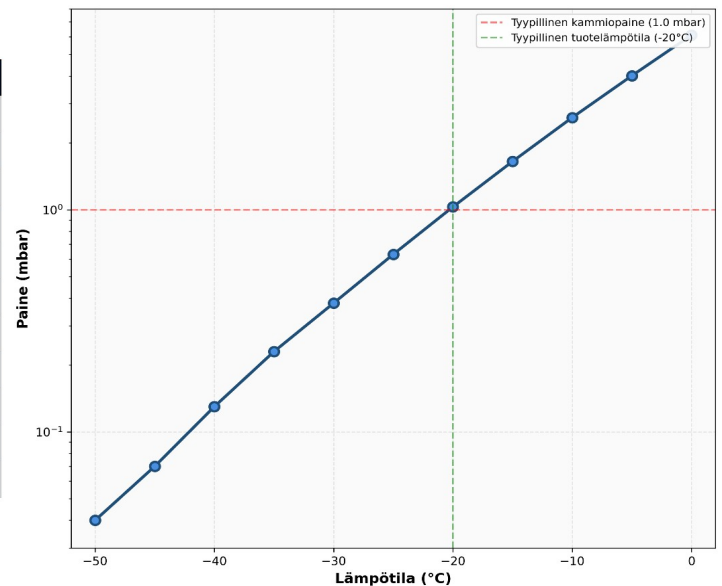
Yleisin ja vakavimmista seurauksista kärsivä virhe pakastekuivauksessa on liian nopea lämmitys primäärikuivauksen aikana. Monelle aloittelevalle pakastekuivaajalle on houkuttelevaa nostaa hyllyjen lämpötilaa nopeasti prosessin nopeuttamiseksi, mutta kun hyllyt lämmitetään liian aikaisin tai liian nopeasti, 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 W/(m·K), kun taas ruostumattoman teräksen lämmönjohtavuus on vain noin 16 W/(m·K). Silikoni on vielä huonompi lämmönjohde, jonka lämmönjohtavuus on tyypillisesti vain 0,2-0,5 W/(m·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 kosteusanalyysiaattoreita. Kosteuspitoisuuden määrittämiseen voi käyttää myös infrapunakosteusmittaria, joka antaa nopean arvion kosteuspitoisuudesta, mutta se ei ole yhtä tarkka kuin laboratoriotestit tai kosteusanalyysiaattoreiden antamat tulokset.

Kokeneemmat käyttäjät oppivat tunnistamaan sekundäärikuivauksen päättymisen tuotteen ulkonäön ja tuntuman perusteella. Täysin kuivattu tuote on kevyt, rapea ja helposti murtuva tai jauhettava. 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 korkeammissa kosteuspitoisuuksissa. 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 keston 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 murenevät 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  $-18^{\circ}\text{C}$ , 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 jäädäy 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 tärisävällä 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 rutiläkoriissa 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 esikäsittelymenetelmiä kotimaisille karpaloille, jotka ovat erittäin haastavia kuivattavia. Testissä havaittiin, että vaikka entsyymaattiset esikäsittelyt olivat teoriassa lupaavia, suuremman ongelman aiheutti hidas jäädytys. Kun jäädytysolosuhteet optimoitiin, lopputulos parani merkittävästi riippumatta muista esikäsittelyistä. 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  $-50^{\circ}\text{C}$  ja  $-80^{\circ}\text{C}$  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  $-70^{\circ}\text{C}$  ja  $-80^{\circ}\text{C}$  välillä (Oetjen ja Haseley, 2004). Nämä kylmäaineet mahdollistavat lähes kaikkien elintarvikkeiden tehokkaan pakastekuivauksen. EU:n F-kaasusäädökset ovat kuitenkin asettaneet merkittäviä rajoituksia korkean lämmityspotentiaalin (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  $-50^{\circ}\text{C}$  ja  $-60^{\circ}\text{C}$  välisiä lämpötiloja. Tämä korkeampi kondensoijan lämpötila johtaa korkeampaan kammiossa vallitsevaan paineeseen, mikä puolestaan rajoittaa tuotteiden valikoimaa, joita kyseisellä laitteella voidaan tehokkaasti kuivata.

Myös ammoniakkia ( $\text{NH}_3$ , R717) ja hiilidioksidia ( $\text{CO}_2$ , 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  $-33^{\circ}\text{C}$ , 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  $-60^{\circ}\text{C}$  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 ilmastoa lämmittävästä vaikutuksesta. Yleisesti ottaen suositellaan, että tarkastus tehdään vähintään kerran vuodessa ja isoimmista laitteistoista 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 tekstuuriin muutoksiin 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 jäädityslämpötiloissa. 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 herkemmän rakenteen romahtamiselle. Suolapitoisten tuotteiden pakastekuivaus vaatii yleensä alhaisempia jäädityslämpötiloja 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 molekyyliä, 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 proteiinirikkaat 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  $-30^{\circ}\text{C}$  ja  $-20^{\circ}\text{C}$  välillä, jotta vältetään mikrobien kuolemalla. Lämpötilan nostaminen sekundäärikuivaukseen on tehtävä erittäin varovaisesti ja asteittain. Monet probioottiset bakteerit ja hiivat kestävät korkeintaan  $20^{\circ}\text{C}$ - $30^{\circ}\text{C}$  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 juurisyyn 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 laatujärjestelmää. 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 pätevätytynyt kylmälaiteasentaja. Kylmäaineet ovat säänneltyjä aineita, joiden käsittely vaatii asianmukaisen koulutuksen ja sertifiointin. F-kaasusäädökset edellyttävät myös vuotovalvontaa ja dokumentointia kylmäainemääristä. 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.

## Jäädymisen ensisijainen merkitys

Jäädymisvaihe määrittää koko jatkoprosessin onnistumisen tavalla, jota usein aliarvioidaan. Hidas jäädymisvaihe 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 jäädymisvaihe tuottaa pieniä jääkiteitä, säilyttää solurakenteen ja jättää huokoisen matriisin. Teollisessa mittakaavassa kontaktipakastus rutiläkoreissa, IQF-pakastus, tunneli- ja spiraalipakastus toimivat hyvin, kun tuotekerros pidetään ohuena (max 5-10 cm) ja ilmavirta pääsee kiertämään. Kryogeeninen jäädymisvaihe ja akustinen pakastus (AEF) tarjoavat erinomaisia tuloksia premium-tuotteille. Käytännön tutkimukset ovat toistuvasti osoittaneet, että oikea jäädymismenetelmä 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  $-70^{\circ}\text{C}$  -  $-80^{\circ}\text{C}$ , mutta niiden GWP-arvot ovat erittäin korkeat (noin 4000). EU:n F-kaasusäädökset rajoittavat näiden käyttöä. Uudemmat ympäristöystävälliset

kylmäaineet (R449A, R513A, R290) saavuttavat tyypillisesti  $-50^{\circ}\text{C}$  -  $-60^{\circ}\text{C}$ , 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 ( $-30^{\circ}\text{C}$  -  $-20^{\circ}\text{C}$ ), 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. Stabiloi 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  $\beta$ -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.

<b>Tuoteryhmä</b>	<b>Primäärikuivaus lämpötila</b>	<b>Sekundäärikuivaus lämpötila</b>	<b>Tavoite jäännöskosteus</b>	<b>Erityispiirteet</b>
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 murenevat.
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.

<b>Ongelma</b>	<b>Mahdollinen syy</b>	<b>Ratkaisu</b>
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.*