



Mikrobiruoan nykytilanne ja tulevaisuuden näkymät

Katsaus mikrobiruoan käyttökohteisiin, haasteisiin ja mahdollisuuksiin

TkK-tutkielma

Turun yliopisto

Bioteknologian laitos

Biotekniikka

Joulukuu 2024

Ofelia Sarlund

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

TURUN YLIOPISTO

Bioteknologian laitos

SARLUND, OFELIA: Mikrobiruoan nykytilanne ja tulevaisuuden näkymät

Kandidaatintutkielma, 23 s.

Biotekniikka

Joulukuu 2024

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Ihmiset tuntevat mikrobiruoan yleensä fermentoitujen ruokien kautta. Mikrobiruoan tiimoilta löytyy monia muitakin kohteita, mihin mikrobeja hyödynnetään, kuten vitamiinien tuotanto ja eläinperäisten tuotteiden, lihan, maidon ja kananmunien korvaaminen. Nykyiseltään lihatuotanto tai kasvien viljely ei aina ole ympäristön kannalta kestävin vaihtoehto. Maapallon rajallisia resursseja kuluu liikaa lihantuotantoon verrattuna siihen, kuinka paljon ja kuinka ekologisesti siitä saadaan tuotettua ihmisille ruokaa. Mikrobiruoka voikin tarjota apua ruokaturvan takaamiseen sekä kestäväen globaalin ruoantuotantojärjestelmän kehittämiseen. Mikrobiruoan tuotannossa on kuitenkin haasteensa, kuten ruoan turvallisuus, tuotannon skaalaus ja taloudellinen tuottavuus. Mikrobiruoan kaikkea potentiaalia ei kuitenkaan ole vielä valjastettu. Suuria kehitysaskelia tapahtuu nykyisten fermentaatiomenetelmien saralla, mutta myös esimerkiksi avaruuden olosuhteisiin tarkoitettun mikrobiruoan kohdalla.

Tämän kandidaatintutkielman tavoitteena oli tehdä kirjallisuuskatsaus mikrobiruoan nykytilanteeseen ja siihen, mihin kaikkea mikrobiruokaa voi hyödyntää. Myös mikrobiruoan tuotantoprosesseja, fermentaatiota, käsitellään. Tutkielmassa tarkastellaan myös mikrobiruoan vaikutuksia ihmisen terveyteen sekä ympäristöön. Tutkielman pohjalta ilmenee selkeä tarve mikrobiruoantuotannon jatkotutkimukselle, sillä vielä on esimerkiksi paljon mikrobeihin liittyviä muuttujia, joita ei tunneta ja geenitekniikka avaa koko ajan lisää ovia näiden ongelmien ratkaisuun.

Avainsanat: mikrobiruoka, mikro-organismi, fermentaatio, ilmastonmuutos, ruokakriisi, eläinperäisten elintarvikkeiden korvaaminen

Sisällys

1	JOHDANTO	2
2	MIKROBIRUOAN MÄÄRITELMÄ	3
2.1	MIKROBIRUOAN ERI TYYPIT.....	3
2.2	KEHITYKSEN HISTORIA.....	3
2.3	YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET.....	4
2.4	NYKYISET SOVELLUSKOHTEET.....	5
2.4.1	<i>Ravintoaineet</i>	5
2.4.2	<i>Eläinperäisten tuotteiden korvaajat</i>	6
2.4.3	<i>Raaka-ainekomponentit</i>	7
3	MIKROBIRUOAN VALMISTUS	8
3.1	FERMENTAATIO.....	8
3.2	FERMENTAATIOSSA TARVITTAVAT LÄHTÖAINEET.....	9
3.2.1	<i>Hiiliatomien lähteet</i>	9
3.2.2	<i>Elektronien lähteet</i>	10
3.2.3	<i>Muut välttämättömät alkuaineet</i>	10
3.3	FERMENTAATIOSSA KÄYTETTÄVÄT MIKRO-ORGANISMIT.....	11
3.4	SKAALAUUS JA SEN HAASTEET.....	11
4	MIKROBIBIOMASSAN RAVINTOSISÄLTÖ	13
4.1	TERVEYSVAIKUTUKSET.....	13
4.2	RISKITEKIJÄT TERVEYDELLE.....	14
5	MARKKINATILANNE	15
5.1	TALOUDELLINEN TUOTTAVUUS.....	15
5.2	KULUTTAJIEN ASEENTEET JA TRENDIT.....	16
6	SÄÄTELY JA TURVALLISUUSTEKIJÄT	18
7	TULEVAISUUDEN SUUNTAUKSET	19
7.1	RATKAISU RUOKAPULAAN.....	19
7.2	AVARUUSMATKUSTUS.....	20
7.2.1	<i>Ruoantuotannon haasteet avaruudessa</i>	21
7.2.2	<i>Avaruusruoan kehityssuunnat</i>	22
8	YHTEENVETO	23
9	LÄHTEET	24

1 Johdanto

Maailmassa on yli kahdeksan miljardia ihmistä, joista jokainen tarvitsee ruokaa pysyäkseen hengissä (Choi ja muut 2022). Ruoantuotanto ja kuljetus kuitenkin aiheuttavat 30 % ihmisen tuottamista kasvihuonekaasuista (Choi ja muut 2024). Erityisesti lihantuotanto aiheuttaa päästöjä, jotka kiihdyttävät ilmastonmuutosta (Choi ja muut 2022). Ilmastonmuutoksesta seuraa sään ääriolosuhteita, kuten kuivuutta, tulvia ja myrskyjä. Näiden takia viljelmien saanto ja tuottavuus laskevat. Ruoantuotannon epävarmuus lisää riskiä maailmanlaajuiseen ruokakriisiin. (Choi ja muut 2024.) Esimerkiksi nauta vaatii kasvaakseen yhtä lihakilogrammaa kohden 15 400 kuutiota vettä, tilakseen 326,2 neliötä maata ja se tuottaa ilmakehään 99,5 kilogrammaa hiilidioksidia. Ravintona käytettävä *Spirulina*-mikrolevä vaatii yhtä kuluttajalle tarkoitettua biomassakilogrammaa kohden vain 104 kuutiota vettä, 0,086 neliötä maata eikä se tuota hiilidioksidipäästöjä. (Choi ja muut 2022.)

Mikrobiruoka voisi auttaa ruokakriisin ja ympäristöongelmien ratkaisussa. Mikrobeilla tuotetun ruoan hiili- ja vesijalanjälki on pienempi verrattuna kotieläimiin ja kasveihin. Lisäksi mikrobiruokatuotannossa käytettävä fermentaatio vaatii tekniikkana vähemmän maata kuin muut elintarvikkeiden tuotantomenetelmät. (Choi ja muut 2024.) Vaihtoehtoisia ja kestäviä ravinnonlähteitä tarvitaan ruoantuotannon takaamiseksi ja ilmastokriisin ratkaisemiseksi (Choi ja muut 2022). Mikro-organismit, fermentaatio ja mikrobiruoka voivat edistää merkittävästi ravitsevien elintarvikkeiden saatavuutta yhteisöille joka puolella maailmaa (Choi ja muut 2024).

Tässä kandidaatintutkielmassa tarkastellaan mikrobiruokaa, sen ominaisuuksia, käyttökohteita, tuotantoa, haasteita, maailmanmarkkinoita ja tulevaisuuden suuntauksia. Kirjallisuuskatsauksen pohjalta voidaan mikrobiruokalla havaita olevan suuri potentiaali globaalin ruokaturvan takaamisessa. Mikrobiruokan kehitys on lupaavaa ympäristön suojelun kannalta. Mikrobiruokan käyttökohteet eivät rajoitu kuitenkaan vain maapallolla tapahtuvaan ruoantuotantoon vaan sitä voi hyödyntää myös avaruusmatkoilla.

2 Mikrobiruonan määritelmä

Mikrobiruokaa ovat ruoat ja ruuan tekoon tarkoitetut ainesosat, jotka valmistetaan mikro-organismien avulla (Choi ja muut 2024). Hyödynnettäviä mikro-organismeja ovat esimerkiksi sienet ja hiivat. Niiden avulla tuotetaan juustoa, tempehiä, olutta, viiniä ja leipää. Myös bakteereilla voidaan tuottaa mikrobiruokia, kuten kimchiä, jogurttia ja juustoa fermentaation eli käymisprosessin avulla. Fermentaatiolla voidaan parantaa ruoka-aineiden ravintoarvoa. Prosessin aikana mikro-organismi muuttaa ruoka-aineen hiilihydraatit biomassaksi, jossa on paljon proteiinia ja ravinteita. (Choi ja muut 2022.) Lähtöaineena toimivissa ruoka-aineissa tapahtuu siis entsyymaattisia muutoksia mikro-organismien ollessa läsnä (Graham ja Ledesma-Amaro 2023).

2.1 Mikrobiruonan eri tyypit

Ensimmäinen mikrobiruonan tyyppi ovat fermentoidut ruoat. Fermentaatiolla voidaan muokata jotakin olemassa olevaa raaka-ainetta ja sen ominaisuuksia. Toisena tyyppinä mikrobiruokaan kuuluvat myös yhdisteet, jotka on tuotettu fermentoimalla, mutta eristetty ja puhdistettu biomassasta. Esimerkkejä tällaisista yhdisteistä ovat aminohapot, aromiyhdisteet ja väriaineet. Kolmas fermentaatiolla tuotettu ruoka on syötävä mikrobiaalinen biomassa. Tähän kuuluvat esimerkiksi single-cell-proteiinit eli yksisoluproteiinit. (Choi ja muut 2024.)

Mikrobiruokaa ja probiootteja ei pidä sekoittaa keskenään. Niillä on joitakin samoja ominaisuuksia, mutta niissä on myös eroja. Probioottiset elintarvikkeet sisältävät yleensä eläviä mikro-organismeja, joiden avulla saavutetaan terveyshyötyjä. Elävät probioottiset mikro-organismit syödään suhteellisen pieninä annoksina, yleensä jauheina tai pillereinä. Ne ovat suoraan vuorovaikutuksessa isännän kanssa tai epäsuorasti vapauttamalla liukoisia postbiootteja. Näin ollen probioottisia elintarvikkeita käytetään lisäravinteena osana muuta ruokavaliota. Mikrobiruonan ensisijainen tarkoitus on tarjota ravintoa. Mikrobiruoka koostuu pääasiassa inaktiivisista mikrobisoluista tai niiden johdannaisista. Useimmat mikrobiruonan komponentit sulavat ja imeytyvät ruoansulatuskanavassa ravintoaineina verenkiertoon. (Choi ja muut 2024.)

2.2 Kehityksen historia

Fermentaatiota on käytetty ruoanvalmistuksessa jo pitkään. Se on yksi vanhimmista ruokateknologioista. On viitteitä siitä, että fermentointia on käytetty jopa 7000 vuotta

ennen ajan laskun alkua. Sitä on käytetty eri muodoissa monissa eri kulttuureissa. (Graham ja Ledesma-Amaro 2023.) Jopa alkukantaisten ihmisten oletetaan käyttäneen fermentaatiota ruoan tuotannossa, sillä apinoiden on todistettu käyttävän fermentaatiota hedelmien käsittelyssä (Jahn ja muut 2023).

1800-luvulla ja 1900-luvun alussa *Saccharomyces cerevisiae*-, *Cyberlindnera jadinii*- ja muilla sienilajeilla tuotettiin biomassaa melassista ja lignoselluloosapohjaisesta jätteestä, kuten oljesta. Tätä tekniikkaa hyödynnettiin B-vitamiinien tuotossa ja aliravitsemuksen hoidossa. Samaan aikaan kehittyivät eteenpäin mikrobien viljelytekniikat, kuten aerobiset fermentorit sekä syöttöeräkasvatukset. Tekniikoita hapen siirtoon ja substraattien lisäämiseen kehitettiin. Tällöin tuli mahdollisesti suuremman mittakaavan mikrobimassan ja -ruoan valmistaminen. (Choi ja muut 2024.)

Mikrobiruoan kehitys on hidastunut energiakustannusten nousun takia ja elintarvikkeiden tuoton kasvettua maailmanlaajuisesti. Nyt tutkimus on palannut mikrobiperäisten elintarvikkeiden tuottamiseen kestävästä hiili- ja energialähteistä. Tällaisten kestävien resurssien hyödyntäminen tarkoittaisi esimerkiksi teollisuuden sivuvirtojen hyödyntämistä. Niiden avulla voidaan sitoa hiilidioksidia biomassana mikrobiruokaan. (Choi ja muut 2024.)

2.3 Ympäristövaikutukset

Mikrobiruoan viljelyllä on etuja eläinten kasvattamiseen ja kasvien viljelyyn verrattuna. Mikro-organismit kasvavat nopeasti. Jotkin lajit kaksinkertaistavat biomassansa jopa kymmenessä minuutissa. Mikro-organismien viljely vie myös vähemmän vettä ja maata sekä tuottaa pienemmän hiilijalanjäljen perinteiseen ruoantuotantoon verrattuna. (Choi ja muut 2022.) Esimerkiksi karjantalous vie kaikesta viljelyalasta jopa 75 %, mutta se tuottaa vain kolmasosan ihmisten ravinnoksi tarvitsemasta proteiinista (Bajic ja muut 2022). Kasvipohjaiseenkin ruokaan verrattuna mikrobiruoka on ympäristöystävällisempää (Graham ja Ledesma-Amaro 2023). Soijapapu, joka on hyvä proteiinin lähde, aiheuttaa 20 % trooppisten metsien hävittämisestä (Bajic ja muut 2022). Kasvien viljely on ilmastosta ja viljelymaasta riippuvaista. Niiden kasvattamiseen ja tuholaisten torjuntaan käytetään paljon vettä ja kemikaaleja. Mikrobiruoan tuotannolla ei ole samoja tarpeita tilan, sään, veden määrän tai kemikaalien suhteen. Mikro-organismit kasvavat bioreaktorissa, jolloin sään vaihtelulta ja perinteisen viljelyn ongelmilta vältytään. (Graham ja Ledesma-Amaro 2023.)

Jos kaikki käytössä olevat eläinperäiset elintarvikkeet korvattaisiin uusilla mikrobiruoilla, maapallon lämpenemisen todennäköisyys pieneneisi 80 %. Myös maanalan ja veden käyttö vähenisivät 80 %, jos eläinperäisistä tuotteista siirryttäisiin mikrobiruokaan. Metsäkatoon ja maankäyttöön liittyvät hiilidioksidipäästöt vähenisivät 50 %, jos vain 20 % märehitöistä saatavasta lihasta korvattaisiin sokeriruokoteollisuuden jätevirroista kasvatetuilla mikrobioteiineilla. Jätevesien ravinteilla ja anaerobisella mädätyksellä tuotetun mikrobibiomassan vaikutus ilmastonmuutokseen on 96 % pienempi kuin naudanlihalla. Myös maankäytön jalanjälki 99 % on parempi ja makean veden käyttö on 85 % pienempi mikrobibiomassalla kuin naudanlihalla. (Jahn ja muut 2023.)

Mikrobiruoalla voi kuitenkin olla ympäristön kannalta haitallisiakin vaikutuksia. Valmistusprosessiin liittyvät puhdistus- ja käsittelytekniikat voivat saastuttaa luontoa. Paras vaihtoehto ekologisuuden kannalta olisi syödä mikro-organismien biomassaa itsessään. (Choi ja muut 2022.) Ympäristön räsitus voi vähentää käyttämällä muokattuja mikrobikantoja ruoan valmistuksessa, jolloin ne pystyvät hyödyntämään laajemmin erilaisia lähtöaineita, kuten esimerkiksi jätevirtoja. Tämä tukee siirtymää kohti puhdasta kiertotaloutta. (Graham ja Ledesma-Amaro 2023.)

Mikrobi-peräisten elintarvikkeiden kestävyys ja ympäristövaikutukset on arvioitava tarkasti, jotta tiedetään, ovatko mikrobiruoan kokonaishyödyt nykyisiä vaihtoehtoja suuremmat. Tämän selvityksen pohjalta saatu tieto tarjoaa perustelut laajamittaiseen infrastruktuuriin, tuotekehitykseen ja investoimiseen. (Jahn ja muut 2023.)

2.4 Nykyiset sovelluskohteet

Fermentoidut ruoat muodostavat noin kolmanneksen maailmanlaajuisesti kulutetuista elintarvikkeista (Jahn ja muut 2023). Mikrobiviljelmistä voi eristää ja rikastaa proteiineja, hiilihydraatteja, rasvahappoja, vitamiineja ja muita toiminnallisia ravintoaineita. Erilaisten puhdistusprosessien jälkeen niitä voi käyttää esimerkiksi leivissä ja lihankorvikkeina. (Choi ja muut 2022.) Seuraavaksi käsitellään näitä mikrobeilla valmistettavia elintarvikkeita.

2.4.1 Ravintoaineet

Mikrobeilla tuotetaan vitamiineja. Vesiliukoisista vitamiineista tuotetaan B-vitamiinikompleksia sekä C-vitamiinia. Rasvaliukoisista vitamiineista mikrobeilla tuotetaan A-, D-, E- sekä K-vitamiineja. Geneettisesti muokatuilla mikrobeilla voi

tuottaa myös muita terveydelle edullisia tuotteita, kuten omega-3-rasvahappoja, reseveratrolia, naringeniinia, betakarotiinia, astaksanthiinia, beeta-alaniinia sekä gamma-aminovoihappoa. Myös *Chlorella*- ja *Spirulina*-mikroleviä käytetään elintarvikkeina, usein ravinnelisinä niiden sisältämien fytoravinteiden ja vitamiinien takia. (Graham ja Ledesma-Amaro 2023.)

2.4.2 Eläinperäisten tuotteiden korvaajat

Mikrobiruoalle koitetaan usein kehittää lihan kaltaisia ominaisuuksia ja korkeaa proteiinipitoisuutta. Yksi proteiinipitoinen mikrobiruoka on yksisoluproteiini. Se on yleensä kuivattua mikrobimassaa tai siitä uutettuja proteiineja. Yksisoluproteiinituotteita on olemassa. Esimerkiksi Marmite on olutteollisuuden sivuvirroista tehty hiivapohjainen tuote. Quorn taas on *Fusarium venenatum*-sienestä tehty lihankorvike. Muita lihankorvikkeita sienistä valmistavat yritykset Meati Foods, Mycorena ja Nature's Fynd. (Graham ja Ledesma-Amaro 2023.) Aqua Cultured Foods käyttää uudessa tekniikassaan nestemäistä pintafermentaatiota kokonaisten merenelävien kasvattamiseen (Jahn ja muut 2023). Lihaa jäljitteleviä rakennekomponenttejäkin, kuten gelatiinia ja kollageenia, voi tuottaa myös mikrobeilla (Graham ja Ledesma-Amaro 2023).

Muita eläinperäisiä tuotteita, joille etsitään korvaajia, ovat maito ja kananmunat. Maitoproteiineja, kaseiinia ja heraproteiinia voidaan tuottaa bakteereilla ja hiivoilla. Yritykset kuten Perfect Day, Better Dairy ja Formo käyttävät näitä maitoproteiineja ainesosina maidonkorvikkeen valmistamiseen. EVERY-yritys on tuottanut kananmunan valkuaisproteiineja rekombinanttitekniikalla. Eläinperäisten tuotteiden tekemiseenkin käytetään joskus fermentoimalla tehtyjä ainesosia. Esimerkiksi juustojen valmistuksessa käytettävää renniini-entsyymiä on tuotettu fermentaatiolla *A. niger*-homeella jo pitkän aikaa. (Graham ja Ledesma-Amaro 2023.) Vaikka lihankorvikkeet ovat olleet suuri mikrobiruoan kehityskohde, niin erilaisia öljyjäkin tuotetaan mikrobeilla. Kasviöljyn korvaajia tuottavat esimerkiksi Zero Acre Farms ja eläinperäisiä rasvoja korvaavia tuotteita valmistavat Melt&Marble sekä Nourish Ingredients. (Jahn ja muut 2023.) Mikrobeilla tuotettujen lihankorvikkeiden lipidikoostumus on joskus haasteellista toteuttaa. Mikrobeissa ei luonnostaan ole yhtä lailla makuun ja suutuntumaan liittyviä lipidejä, mutta niitä voidaan lisätä esimerkiksi kasviöljyjen muodossa tuotteisiin. Lipidien tuottoa mikrobeissa itsessään kuitenkin tutkitaan. (Graham ja Ledesma-Amaro 2023.)

2.4.3 Raaka-ainekomponentit

Mikrobeilla voidaan tuottaa myös monia eri komponentteja, jotka ovat ruoan valmistuksessa tärkeitä. Näitä ovat esimerkiksi aromit, kuten soijapavun leghemoglobiini c2 ja hemoglobiini. Hemoglobiinia käytetään ruoantuotannossa lihaisan maun luomiseen. Umamin makua on myös mahdollista matkia glutamaatteja, inosiinimonofosfaatteja sekä guanosiinimonofosfaatteja valmistamalla. Mikrobeja on myös muokattu tuottamaan makeutusaineita, kuten stevia-molekyylejä, ksylitolia ja erytritolia. Geenitekniikan avulla humalan aromeja voi muokata suoraan hiivaan, jotta oluesta saadaan maukkaampaa. Mikrobiprosesseilla on tavanomaista myös tuottaa ruusun, appelsiinin, sitruunan, mintun ja persikan hajuja ja aromaattisia yhdisteitä. (Graham ja Ledesma-Amaro 2023.)

Väriaineita kuten beetakaroteenia (oranssi), lykopeenia (punainen), riboflaviini (keltainen), fykosyaniinia (sininen), violatsiinia (violetti) ja melaniinia (musta) on syntetisoitu mikrobeilla. Uusia maku- ja väriyhdisteitä on mahdollista luoda synteettisellä biologialla mikrobeihin, jotka eivät muuten niitä tuottaisi. (Graham ja Ledesma-Amaro 2023.)

3 Mikrobiruoan valmistus

Fermentaatioon kuuluvilla kasvatus- ja käsittelymenetelmillä päästään eroon ei-toivotuista ominaisuuksista lopputuotteessa kuten pahasta hajusta tai mausta. (Choi ja muut 2022.) Mikro-organismit toimivat solutehtaina, jotka on valikoitu ja joskus myös geneettisesti muokattu tuottamaan tiettyjä yhdisteitä. Nämä yhdisteet yleensä puhdistetaan ja niitä hyödynnetään erilaisissa sovelluksissa. (Jahn ja muut 2023.) Erilaiset fermentointitekniikat mahdollistavat käyttämään laajasti vaihtoehtoisia mikrobi-isäntiä ja lähtöaineita. Ylimääräiset käsittelyt ja menetelmät voivat kuitenkin nostaa lopputuotteen hintaa. (Choi ja muut 2022.)

3.1 Fermentaatio

Fermentaatioissa mikro-organismit parantavat raaka-aineiden ravintoarvoa, makua ja koostumusta. Mikro-organismit muuttavat raaka-aineessa eli lähtöaineessa runsaasti esiintyviä vähempiarvoisia ravintoaineita, kuten hiilihidraatteja, ravinteikkaammaksi mikrobibiomassaksi. Samalla syntyy usein aineenvaihduntatuotteita, joissa on runsaasti proteiineja, vitamiineja ja muita arvokkaita ravintoaineita. (Choi ja muut 2024.)

Fermentoinnissa voidaan käyttää joko villityyppi- kantaa, jolloin mikrobit ovat peräisin lähtöaineesta itsestään tai ympäristöstä. Mikrobit voidaan myös tarkoituksellisesti istuttaa kasvamaan fermenttoriin, jolloin mikrobit lisätään kokonaan uutena ”starteri”-kantana. Myös aikaisempia fermentaatioeriä voi käyttää uutena starteri-kantana seuraavassa fermentaatioissa. (Jahn ja muut 2023.) Eri fermentaatiotyyppejä ovat alkoholi-, maitohappo-, voi- ja sekahappo-, propionihappo- ja etikkahappofermentaatio. Käytettävän kasvatusalustan mukaan voi myös luokitella fermentaatiotyyppejä. Yleensä käytetään kiinteää tai nestemäistä kasvualustaa. (Sun ja muut 2022.)

Fermentaatio helpottaa elintarvikkeiden säilömistä, sillä käymisolosuhteet ja mikrobitoiminta vähentävät patogeenisten organismien solujen määrää lopputuotteessa. Tämä haitallisten ominaisuuksien väheneminen tapahtuu esimerkiksi pH:n muutosten takia. Ruokaa valmistava mikrobikanta ja patogeeneja tuottava mikrobikanta kilpailevat ravinteista. Tällä on negatiivinen vaikutus patogeenien selviytymisen kannalta, sillä ruokaa tuottava kanta on yleensä optimoitu selviämään ja kasvamaan fermentaation olosuhteissa. Näin ollen fermentaatiolla valmistettuja ruokia on usein turvallisempi nauttia kuin raakoja versioita raaka-aineista. Lisäksi monien elintarvikkeiden pidempi

säilyvyysaika mahdollistaa elintarvikehävikin vähenemisen. Tämä vaikuttaa positiivisesti koko elintarviketuotannon arvoketjuun. (Jahn ja muut 2023.)

3.2 Fermentaatioissa tarvittavat lähtöaineet

Fermentaatioissa tarvitaan erilaisia lähtöaineita. Niistä tärkeimpiä ovat hiiliatomit, elektronit sekä muut välttämättömät alkuaineet. Jokaista näistä voi kuitenkin saada useasta eri lähteestä. Seuraavaksi käydään läpi hiilen, elektronien sekä välttämättömien alkuaineiden eri lähteet mikrobeilla tapahtuvassa fermentaatioissa.

3.2.1 Hiiliatomien lähteet

Lähtöaineena mikrobiruoan tuotantoon olisi helpointa käyttää hiilihydraatteja kasveista, kuten glukoosia ja sukkaaroosia. Näitä voi kuitenkin suoraan ihmisenkin nauttia ruokana, joten olisi parempi hyödyntää ihmisille ei-syömäkelpoisia biomassoja. Tällaisia ovat esimerkiksi selluloosa, hemiselluloosa ja ligniini, joita saadaan heinästä, puista tippuneista lehdistä, puuhakkeesta ja muusta kasvipohjaisesta biomassasta. Ruokajätettä voi myös käyttää mikrobiruoan tuotannossa lähtöaineena, jos mikrobeihin muokataan rasvahappoja hajottavat metaboliareitit. Muovienkin hyödyntäminen on mahdollista, jos oikeanlaiset metaboliareitit löydetään muovin hajottamiseen. (Choi ja muut 2022.)

Orgaanisen jätteen käyttäminen raaka-aineena onkin lupaava vaihtoehto kestävän mikrobiologisen elintarviketuotannon kannalta. Orgaaniset materiaalit voidaan kierrättää elintarviketuotteiksi sen sijaan, että ne hajoaisivat hiilidioksidiksi. Orgaaninen jäte sisältää paljon pienten vikojen takia ruoaksi kelpaamattomia elintarvikkeita. Niitä ei voi myydä esimerkiksi epätyypillisen koon, muodon tai vahingoittuneen pinnan vuoksi. Paljon orgaanista jätettä syntyy myös elintarvikkeista leikatuista tai poistetuista paloista, ylimääräisistä ainesosista, fyysisesti vahingoittuneista tuotteista ja jätteistä, jotka ovat jääneet jäljelle öljyn, mehun tai muiden arvokkaiden ainesosien uuttamisen jälkeen. Kaikki nämä voitaisiin hyödyntää, jopa ilman erillistä esikäsittelyä ennen mikrobeille syöttämistä. (Choi ja muut 2024.)

Kotitalouksien jätteitä ei kuitenkaan ole taloudellisessa mielessä kannattavaa kerätä mikrobiruoan lähtöaineeksi. Ne täytyy ensin käsitellä ja niistä pitää poistaa myrkylliset yhdisteet. On tärkeä välttää saasteiden siirtymistä kotitalousjätteestä lopulliseen mikrobiruokaan. Siirtyminen voitaisiin välttää esimerkiksi siten, että kotitalousjätettä käytetään ensimmäisen vaiheen mikrobimassan kasvattamiseen. Tätä kasvatettua

massaa voisi sitten syöttää toisen vaiheen mikrobikannalle ja tästä syntyisi ihmisenkin ravinnoksi kelpaavaa biomassaa. (Choi ja muut 2024.)

3.2.2 Elektronien lähteet

Kestäviä energian lähteitä tarvitaan myös kestävien hiililähteiden lisäksi. Hapellisessa fotosynteesissä valoenergiaa käytetään vesimolekyylien pilkkomiseen elektronien tuottamiseksi hiilidioksidin sitomista varten. (Choi ja muut 2024.)

Vaihtoehtoisesti molekulaarinen vety voi toimia elektroninluovuttajana hiilidioksidin sitomisessa. Fermenttoriin syötetään hiilidioksidia, vetyä ja molekulaarista happea, jotta voidaan tuottaa syötävää mikrobiruokaa. Vety voidaan tuottaa hapen kanssa vesielektrolyysillä, mieluiten auringonvalosta, tuulesta tai muusta uusiutuvasta lähteestä tuotetulla sähköllä. (Choi ja muut 2024.)

Myös hiilidioksidin pelkistyneitä muotoja, kuten hiilimonoksidia, muurahaishappoa, metanolia ja metaania, voidaan käyttää elektronien muodostamiseen. Öljynporauksen sivutuotteena syntyvässä maakaasussa oleva metaani syötetään metanotrofeille (metaania hapettaville bakteereille) kaupallisessa kaasun fermentoinnissa. Tämä bakteeri muuttaa metaanin formaldehydiksi. Sitä hyödynnetään edelleen ribuloosimonofosfaattireitin tai seriinikierron kautta, jolloin syntyy syötävää biomassaa. Muitakin kaasufermentaation muotoja on olemassa, kuten fermentaatio, jossa käytetään karboksidotrofisia ja metyyliitrofisia bakteereja. Nämä edellä mainitut metaania käyttävät kaasufermentaatiotekniikat eivät kuitenkaan ole ekologisia, sillä maakaasu itsessään ei ole uusiutuva polttoaine tai luonnonvara. Öljynporauksen sivuvirtoja olisi hyvä kuitenkin hyödyntää vielä, kun öljyä toistaiseksi tuotetaan myös uusiutumattomista lähteistä. (Choi ja muut 2024.)

3.2.3 Muut välttämättömät alkuaineet

Vedessä ja hiililähteissä runsaasti esiintyvien hiilen (C), vedyn (H) ja hapen (O) lisäksi solut tarvitsevat kasvaakseen myös muita välttämättömiä alkuaineita, kuten typpeä (N), rikkiä (S), fosforia (P) ja erilaisia mineraali-ioneja. Näiden välttämättömien alkuaineiden lähteet ovat suhteellisen standardoituja. Ammoniakki- ja ammoniumionit ovat tyypillisiä tyypilähteitä. Mineraalisuoloista (esimerkiksi magnesiumsulfaatista, kalsiumsulfaatista, natriumfosfaatista ja kaliumfosfaatista) ja ammoniumsuoloista (esimerkiksi ammoniumsulfaatista ja ammoniumfosfaatista) peräisin olevia sulfaatti- ja fosfaatti-ioneja käytetään yleisesti rikki- ja fosforilähteinä. Maataloudessa tyypillisesti

käytettäviä mineraalisuoloja (esimerkiksi magnesiumsulfaattia ja ferrosulfaattia) käytetään tuottamaan mineraali-ioneja mikrobisoluviljelmille. Kasvi- ja leväbiomassan hyödyntäminen lähtöaineina voi kuitenkin vähentää tarvetta lisätä näitä välttämättömiä alkuaineita erikseen, sillä kasvit ja levät elävinä organismeina sisältävät riittävästi näitä alkuaineita itsessään. (Choi ja muut 2024.)

3.3 Fermentaatioissa käytettävät mikro-organismit

Eri hiili- ja energialähteitä hyödyntäviä mikro-organismeja voi käyttää fermentaatioissa. Autotrofiset mikro-organismit ovat yksi esimerkki. Niihin kuuluvat mikrolevät ja syanobakteerit. (Choi ja muut 2022.) Esimerkkeinä fermentaatioissa käytettävistä autotrofisista mikrolevä- ja syanobakteerilajeista ovat *Chlorella vulgaris*, *Euglena gracilis*, *Arthrospira platensis* ja *Arthrospira maxima* (Choi ja muut 2024). Ne pystyvät fotosynteesin avulla sitomaan ilman hiilidioksidia ja käyttämään auringon energiaa. Litoautotrofit taas voivat hankkia energiansa metalli-ioneja ja rikkiyhdisteitä pelkistämällä. (Choi ja muut 2022.)

Molekylaarista vetyä energialähteenä käyttäviä hydrogenotrofeja, kuten *Cupriavidus necatoria* ja *Rhodococcus opacusta*, voidaan myös kasvattaa fermenttorissa. Öljynporauksen sivutuotteena syntyvää maakaasua voi hyödyntää fermentaatioissa. Maakaasussa oleva metaani syötetään *Methylococcus capsulatus*-bakteerin kaltaisille metanotrofeille. Muurahaishappoa on myös käytetty menestyksekkäästi raaka-aineena formatotrofisten bakteerien, kuten *C. necator* ja *Paracoccus communis*, kasvattamisessa. Formatotrofiset bakteerit pystyvät käyttämään hiililähteenään formiaattia tai muurahaishappoa. (Choi ja muut 2024.)

3.4 Skaalaus ja sen haasteet

Mikrobiruoan tuottamisessa on omat haasteensa. Niitä löytyy esimerkiksi tuotannon skaalauksesta. Tuotantoa voi olla vaikea optimoida mikrobiyhteisöjen käytön takia. Jos käyttää vain yhtä mikrobilajia, niin on helpompi ymmärtää mitä fermentaatioissa tapahtuu ja mikä mikrobin ominaisuus vaikuttaa mihinkin. Mikrobiyhteisöä käyttämällä ei samalla tavalla tiedetä varmaksi mikä muutos johtuu mistäkin. (Graham ja Ledesma-Amaro 2023.)

Skaalaukseen voi liittyä myös tekniikkaan liittyviä haasteita. Tasaisen ja voimakkaan valon tarjoaminen fototrofisen soluviljelyn aikana on tärkeää, mutta haastavaa.

Fermenttorissa kasvavan biomassan suuri solutiheys vaikuttaa valon tasaiseen jakautumiseen. Se myös vaikeuttaa solujen talteenottoa down stream- vaiheessa. Lisäksi fotobioreaktoreiden korkeat käyttö- ja ylläpitokustannukset lisäävät fotosynteesillä tapahtuvan mikrobiruoan kokonaiskustannuksia. Kaasufermenttorissa taas on haasteena kaasumaisen hiilidioksidin, vedyn ja hapen liukeneminen kasvatusmediumiin. Tämä laskee tehokkuutta ja rajoittaa kaupallista kannattavuutta. Maakaasun metaania käyttävä kaasufermenttori on myös teollisessa mittakaavassa melko vaarallinen sen sisältämien myrkyllisten hiilimonoksidin ja metanolin takia. (Choi ja muut 2024.)

Haastetta mikrobiruoan tuotannon skaalaukseen tuo myös fermentoinnissa muokattavien muuttujien monimutkaisuus. Eri mittaisella fermentointiprosessilla saadaan aikaan erilainen happamuus, maku, hyllyikä ja ravintosisältö. Esimerkiksi 37 °C:n fermentaatiolämpötila tuottaa parhaat jogurtin ravintoarvot eli vapaiden aminohappojen sekä tyydyttymättömien rasvahappojen määrät. Toisaalta paras makuprofiili syntyy 42 °C:ssa. (Jahn ja muut 2023.)

Mikrobikantoja voi kuitenkin muokata, jotta lopputuotteen kannalta parhaat ominaisuudet saataisiin tuotettua samoissa fermentoinnin olosuhteissa (Jahn ja muut 2023). Voidaan siis käyttää ja kehittää uusia työkaluja haasteiden ratkaisuun. Niihin kuuluu esimerkiksi mikro-organismien korkearesoluutioinen ja korkean läpimenotekon karakterisointi. Tärkeimpänä työkaluna kuitenkin haasteiden ratkaisussa voidaan käyttää geneettistä aineenvaihdunnan muokkausta. (Graham ja Ledesma-Amaro 2023.)

4 Mikrobibiomassan ravintosisältö

Mikro-organismeilla tuotettu biomassa sisältää paljon proteiinia kuivapainoonsa nähden, jopa 70 % (Choi ja muut 2022). Levät sisältävät yleensä proteiinia 40-60 %, sienet 30-70 % ja bakteerit 53-80 %. Monet lajit sisältävät laajasti välttämättömiä aminohappoja, jopa sellaisia, jotka kasveilta puuttuvat. (Graham ja Ledesma-Amaro 2023.) Mikrobien biomassa sisältää myös muita tärkeitä yhdisteitä, kuten vitamiineja, antioksidantteja ja bioaktiivisia yhdisteitä. Ravintosisällöltään tällainen biomassa on verrattavissa lihaan tai jopa parempi vaihtoehto. (Choi ja muut 2022.)

Levissä on paljon kuitua, joka koostuu sulamattomasta selluloosasta ja muista soluseinän polysakkarideista. Säikeisissä sienissä ja hiivoissa on myös potentiaalisesti terveydelle edullisia kuituja, enimmäkseen β -glukaania ja mannaani-oligosakkarideja. (Graham ja Ledesma-Amaro 2023.)

Yleensä mikrobeissa on vähän lipidejä verrattuna eläinperäisiin tuotteisiin. Öljypitoisissa hiivoissa ja levissä kuitenkin on ravinteellisiä lipidejä, erityisesti pitkäketjuisia monityydyttymättömiä rasvahappoja. Kaloripitoisuus taas on melko alhainen esimerkiksi ravintohiivassa. 100 grammassa ravintohiivaa on vain 400 kilokaloria energiaa. (Graham ja Ledesma-Amaro 2023.)

Mikro-organismien ravintosisältö vaatii lisää tutkimusta. Esimerkiksi mikrobiruoan sulavuudesta ei ole tarkkaa tietoa. Eri ravintoaineiden osuudet saattavat myös vaihdella suuresti kannasta ja kasvuolosuhteista riippuen. (Graham ja Ledesma-Amaro 2023.)

4.1 Terveysvaikutukset

Fermentoidussa mikrobiruoassa on terveydellisiä etuja. Niitä ovat esimerkiksi ruoan probioottiset ominaisuudet ja ravintoaineiden suurempi imeytyvyys. Mikrobiruoassa on myös vähemmän ihmiselle myrkyllisiä yhdisteitä, ja ruoan tuotossa käytettävät mikrobit estävät patogeenisten lajien kasvua. Mikro-organismit usein myös tuottavat itsessään terveyttä edistäviä yhdisteitä tai edesauttavat biokemiallisten reittien toteutumista. Tällaisia yhdisteitä ovat esimerkiksi antioksidantit, monityydyttymättömät rasvahapot, konjugoituneet linolihapot, vitamiinit ja kivennäisaineet. (Graham ja Ledesma-Amaro 2023.)

Mikrobiruoaalla voi olla positiivinen vaikutus sairauksien ehkäisyssä. Esimerkiksi mikrobiruoaan nauttiminen alentaa glykeemistä indeksiä. Sen seurauksena ei synny verensokeripiikkejä, jotka altistavat insuliiniresistenssille. Tämän seurauksena tyyppin 2 diabeteksen sekä sydänsairauksien riskitekijät pienenevät. (Graham ja Ledesma-Amaro 2023.) Mikrobiruoka voi myös lievittää aineenvaihduntasairauksia, auttaa painon ja mielialan hallinnassa sekä vähentää kokonaiskuolleisuutta. Mikrobiruokia sisältävä ruokavalio vähentää elimistön tulehdussignaaleja ja lisää suolistomikrobiston monimuotoisuutta. (Jahn ja muut 2023.) Säikeissienet sisältävät bioaktiivisia metaboliitteja. Yksi näistä metaboliiteista on lovastatiini, joka laskee kolesterolitasoa. Myös *Monascus*- sienellä on samanlaisia vaikutuksia elimistössä. (Jahn ja muut 2023.)

4.2 Riskitekijät terveydelle

Mikro-organismit eivät ole oletusarvoisesti aina turvallisia tai terveyttä edistäviä. Maitohappobakteerit voivat esimerkiksi tuottaa myrkyllisiä biogeenisiä amiineja. Mikro-organismit myös sisältävät paljon vapaata histamiinia, koska organismeissa on paljon entsyymejä, jotka sitä tuottavat. Mikro-organismeissa on usein korkea RNA-pitoisuus. Paljon RNA:ta sisältävän ruoan nauttiminen voi aiheuttaa kihtiä ja munuaiskiviä. Jotkin sieni- ja bakteerilajit myös sisältävät paljon allergeeneja ja toksiineja. Ne eivät siis sellaisenaan ilman asianmukaista käsittelyä sovi ravinnoksi. Näihin terveyteen vaikuttaviin riskitekijöihin voi kuitenkin vaikuttaa esimerkiksi mikro-organismien kantojen tarkalla valinnalla sekä muokkaamisella. (Graham ja Ledesma-Amaro 2023.)

5 Markkinatilanne

Fermentoiduilla elintarvikkeilla on merkittävä rooli elintarviketaloudessa, sillä niiden maailmanmarkkinoiden suuruudeksi arvioidaan 607,8 miljardia dollaria vuonna 2023. Niiden ennustetaan nousevan yli 989 miljardiin dollariin vuoteen 2032 mennessä. Tämä taloudellinen arvio syntyy fermentoivista mikro-organismeista. Suurin osa fermentoiduista mikrobiruoista tuotetaan kuitenkin kotona tai paikallisella tasolla suuryritysten sijaan. Markkinat antavat luotettavasti tietoa vain tietyistä elintarvikkeista kuten oluesta, viinistä, leivästä, jogurtista ja juustosta. Globaaleihin markkinoihin perustuvat luvut aliarvioivatkin huomattavasti fermentoitujen elintarvikkeiden taloudellista kokonaisarvoa. (Hernández-Velázquez ja muut 2024.)

5.1 Taloudellinen tuottavuus

Yksi suurimmista haasteista mikrobiruoan tuotannossa on taloudellinen kannattavuus. Perinteiset fermentoidut elintarvikkeet ovat jo pitkään olleet olennainen osa maailmanlaajuista elintarviketaloutta, mutta perinteisten elintarvikkeiden alhaiset hinnat ovat valtava haaste mikrobiruoan kehittämiseksi. Jotta mikrobiperäisistä elintarvikkeista tulisi taloudellisesti kilpailukykyisiä, on keksittävä uusia teknologioita ja alennettava tuotantokustannuksia. (Jahn ja muut 2023.)

Uuden teknologian kehittäminen ja tuoton laajentaminen vaativat kuitenkin suuria pääomia (Graham ja Ledesma-Amaro 2023). Good Food Institute:n raportin mukaan vuonna 2021 sijoitettiin 360 miljoonaa dollaria mikrobipohjaisten proteiinien kehitykseen. Eniten rahaa kehitysohjelmiin käyttivät Singapore, Israel, Kanada, Euroopasta Tanska, Yhdysvallat sekä Kiina. (Bajić ja muut 2022.) Uuden tuotteen markkinointi vaatii myös rahaa. Kehitysohjelmien ja lanseerauksen lisäksi taloudelliset haasteet voivat liittyä tuotannon ylläpitoon. Joskus rajoittavana tekijänä tuottavuudessa voivat olla kalliit ylläpitokustannukset tai jonkin substraatin rajallinen saatavuus. (Graham ja Ledesma-Amaro 2023.)

Uusimmat teknologiat kuitenkin antavat viitteitä siitä, että mikrobiruoan tuottavan tehtaan rakentaminen voisi olla taloudellisesti kannattavaa. Sitä puoltavat helpompi kasvuolosuhteiden optimointi, kehittyneet fermentointitekniikat ja muunnettujen mikrobien avulla saavutetut suuremmat saannot kuin perinteisessä kasvien viljelyssä. (Graham ja Ledesma-Amaro 2023.)

Säästöjä voi syntyä esimerkiksi keskittämällä hiilidioksidin kerääminen ja hyödyntämällä mikrobiruokatehtaan läheisten laitosten hiilidioksidipitoisia kaasuja. Tämä yhdessä tehokkaiden ja edullisten sähkökatalyyttien ja aurinkokennojen kanssa voisi alentaa merkittävästi tuotannon raaka-ainekustannuksia. Ilmavirtafermentaation käyttöönotto voi myös osaltaan alentaa käyttökustannuksia säästämällä sekoittamiseen ja konvektioon tarvittavaa energiaa. Lisäksi mikrobisolujen indusoitu flokkulaatio eli tuotesakan muodostuminen voi nopeuttaa mikrobibiomassan sedimentoitumista viljelyn lopussa. Tämä alentaa prosessin jatkokäsittelykustannuksia. Myös kasvualustan, viljelyparametrien ja jatkokäsittelyprosessien optimointi voi parantaa mikrobiruokan taloudellista kilpailukykyä. (Choi ja muut 2024.)

5.2 Kuluttajien asenteet ja trendit

Yleisesti ottaen ihmisillä on huolia geneettisesti muokattuja organismeja kohtaan. Se vaikeuttaa muokattujen mikro-organismien käyttöä mikrobiruokana. (Choi ja muut 2022.) Epäilevät asenteet mikrobiruokaa kohtaan saattavat kuitenkin olla muuttumassa, sillä ihmiset ovat enemmän tietoisia ruokavalionsa vaikutuksista ympäristöön. Tämä näkyy esimerkiksi lihan- ja maidonkorvikkeiden kasvavana kysyntänä. Kuluu kuitenkin aikaa ennen kuin korvikkeet ja mikrobiruoka ovat osa jokapäiväistä ruokavaliota. (Graham ja Ledesma-Amaro 2023.)

Yleensä kuluttajat kuitenkin hyväksyvät geneettisesti muunnettujen mikrobikantojen käytön tiettyjen molekyylien tuottamiseen. Tämä johtuu siitä, että fermentaation lopussa molekyylit on eroteltu mikrobeista ja puhdistettu. Molekyyleissä ei siis yleensä ole rekombinantti-soluja tai DNA:ta jäljellä, joten ne voidaan merkitä luontaisiksi tuotteiksi. (Graham ja Ledesma-Amaro 2023.)

Geenimuokkauksen lisäksi mikrobiruokan hyväksyntään vaikuttavat aistinvaraiset tekijät. Prosessoimattoman mikrobisolun hajun ja rakenteen kuvataan yleensä olevan sopimatonta ihmisen makuaistille. (Graham ja Ledesma-Amaro 2023.) Haju ja maku ovat tärkeitä ruoan ominaisuuksia ja ne vaikuttavat elintarvikevalintoihin ja uudenlaisten elintarvikkeiden omaksumiseen. Fermentaatio tuo valmistustekniikkana mahdollisuuksia erilaisten makujen ja koostumusten saralle. (Jahn ja muut 2023.) Mikrobiruokia kehitettäessä olisi hyvä myös ottaa kulttuurien ja uskontojen vaikutukset huomioon. Mikrobiruokan olisi tärkeä tulevaisuudessa täyttää esimerkiksi kosher- ja halal- ruokien vaatimukset. (Graham ja Ledesma-Amaro 2023.)

Kuluttajien käsitys mikro-organismeista ruokana on ajan kanssa parantunut, koska tiedotusvälineissä on yhä enemmän tuotu esiin fermentoimalla valmistettujen elintarvikkeiden, probioottien ja mikrobiomin merkitystä. On silti tärkeää jatkaa ponnisteluja kuluttajille tiedon tarjoamisessa. Laajempi yhteistyö teollisuuden, tiedemaailman, hallitusten ja muiden sidosryhmien välillä on tarpeen, jotta elintarvikkeina käytettävien syötävien mikro-organismien ja täten mikrobiruoan valikoimaa voidaan laajentaa. (Choi ja muut 2024.) Mikrobiruoalla onkin potentiaalia muuttaa ruokajärjestelmää radikaalisti tulevina vuosina (Jahn ja muut 2023).

6 Sääntely ja turvallisuustekijät

Mikrobiruoan täytyy olla turvallista syödä. Tällä hetkellä on vain vähän tutkittuja ja varmasti syömäkelpoiseksi todettuja mikro-organismeja. (Choi ja muut 2022.)

Mikrobipohjaisen ruoan täytyy käydä läpi tietty sääntelyprosessi. Varsinkin uudet tai jollakin tapaa muokatut lajikkeet arvioidaan tarkasti turvallisuutensa osalta. Ne eivät saa saastua missään käsittelyvaiheessa eivätkä ne saa tuottaa endo- tai eksotoksiineja. (Graham ja Ledesma-Amaro 2023.) GRAS- statuksen eli ”generally recognized as safe” turvallisuustutkimuksen hoitaa Yhdysvalloissa elintarvike- ja lääkevirasto FDA (Food & Drug Administration) sekä Euroopassa elintarviketurvallisuusviranomaisen EFSA (European Food Safety Authority) (Choi ja muut 2022). Terveydelle haitalliset riskitekijät voidaan välttää käyttämällä mikrobiruoan tuotannossa tutkittuja mikro-organismeja, puhdistusta, vierasperäisen DNA:n poistoa, elävien solujen poistoa, lämpökäsittelyä sekä kemiallisia prosesseja (Graham ja Ledesma-Amaro 2023).

Mikrobiruoan tuotantoon tarkoitettut järjestelmät eivät ole poikkeuksellisia siinä suhteessa muihin ruoantuotannon laitteisiin verrattuna, etteikö niihin voisi tulla samanlaisia ongelmia kuin teknisiin järjestelmiin muutenkin. Tällaisia ongelmia ovat esimerkiksi bioreaktorien toimintahäiriö, kontaminaatio ja mikrobin ominaisuuksien epävakaus tai ailahtelevaisuus. (Llorente ja muut 2022.)

Elintarvikkeen ravintoarvo voidaan analysoida melko helposti, mutta vielä ei ole olemassa ihanteellista mallia mikrobiruoan turvallisuuden ja aistittavien ominaisuuksien arvioimiseksi kvantitatiivisesti. On myös tärkeää kehittää nopeita ja luotettavia testejä mikrobiruoan mahdollisten toksiinien tunnistamiseksi, jotta voidaan varmistua ruoan turvallisuudesta. On myös kehitettävä helposti toteutettava seurantamalli, jolla tutkia mikrobiruoan pitkäaikaisvaikutuksia terveyteen. (Jahn ja muut 2023.)

7 Tulevaisuuden suuntaukset

Sieniä ja bakteereita arvioidaan olevan noin 13 000 000 lajia maapallolla. Vain noin 180 000 lajia näistä on tunnistettu. Tunnistetuista lajeista vain noin 7 500 lajia on löytynyt fermentoimalla tehdyistä elintarvikkeista. Tästä voisi päätellä, että tulevaisuudessa on mahdollista löytää paljon uusia mikrobilajeja elintarvikekäyttöön. (Jahn ja muut 2023.)

Mikrobien biologista monimuotoisuutta tutkimalla voidaan löytää uusia mikro-organismeja, joiden biomassaa voitaisiin suoraan nauttia ruokana. Uusilla tuntemattomilla kannoilla saattaa myös olla terveyttä edistäviä vaikutuksia.

Lisätutkimuksia tarvitaan esimerkiksi sienien bioaktiivisten yhdisteiden terapeuttisen potentiaalin tunnistamiseen. Niiden turvallisuutta on tärkeä myös tulevaisuudessa arvioida. Metagenomisen profiloinnin ja viljelytekniikoiden kehittymisen odotetaan kiihdyttävän mikrobiruoissa käytettävien uusien mikro-organismien löytämistä. (Jahn ja muut 2023.)

Tulevaisuudessa tarvittaisiin systemaattisia tutkimuksia, yhteistä tietokantaa kerätylle datalle sekä tekoälypohjaisia ennustustyökaluja, jotta fermentointiprosesseja voitaisiin optimoida. Geenitekniikan avulla mikrobiperäisiin elintarvikkeisiin voidaan lisätä täysin uusia ominaisuuksia. Tämä osoitettiin hiljattain, kun *Saccharomyces cerevisiae*-bakteeria muokattiin CRISPR-Cas9-menetelmällä tuottamaan linaloolia ja geraniolia, jotka ovat kaksi humaloitujen oluiden tärkeintä makutekijää. Samankaltainen lähestymistapa aromien tuottamiseen voitaisiin laajentaa koskemaan muitakin syötäviä mikrobeja. Tämä parantaisi fermentointiprosessia, kun tuotettaisiin aromi- ja makuyhdisteitä suoraan *in situ*. (Jahn ja muut 2023.)

7.1 Ratkaisu ruokapulaan

Mikrobiruoka voi avata mahdollisuuksia maailmanlaajuisen ruokaturvan parantamiseen ja vaikuttaa välittömästi maapallon ruoantuotantoon. Maailmanlaajuinen väestönkasvu ja siihen liittyvä kasvava ruoan tarve sekä tarve vähentää nykyaikaisen maatalouden kielteisiä ympäristövaikutuksia osoittavat, että tarvitaan innovaatioita ruokaturvan saavuttamiseksi kestäväällä tavalla. Sen lisäksi, että tarvitaan uuden sukupolven viljelykasveja, joiden tuottavuus on parantunut ja jotka kestävät paremmin ympäristöstressiä, mikrobiperäisten ruoan kehittäminen tarjoaa valtavasti

mahdollisuuksia ruokaturvan ja ympäristöhaasteiden ratkaisuun. (Llorente ja muut 2022.)

Geenitekniikka on lupaava työkalu mikrobien ravinnepitoisuuksien muokkaamiseen niin, että ne vastaavat ravitsemuksen ja ruoantuotannon tarpeisiin maailmanlaajuisesti. Geenitekniikan avulla voidaan myös luoda uudelleen ympäristöä muuten kuormittavia eläinperäisiä tuotteita, kuten kananmunia ja maitotuotteita. Tämä perustuu mikrobien käyttämiseen solutehtaina, joissa mikrobit ohjelmoidaan geneettisesti tuottamaan liikaa proteiineja tai molekyyliä, jotka voidaan kerätä soluista tai supernatantista bioreaktoreissa. (Jahn ja muut 2023.)

Vaikka geenitekniikan avulla mikrobiruoka voidaan valjastaa tehokkaaksi osaksi ruoantuotantojärjestelmää, on kehitystyössä mietittävä myös järjestelmän oikeudenmukaisuutta ja tasapuolisuutta. Kestävän ruoantuotantojärjestelmän on oltava maailmanlaajuisesti yhtä lailla saatavilla. Perinteisesti fermentointimenetelmät ovat kehittyneet rajatusti paikallisissa ympäristöissään ja ne on mukautettu pitkälti käytettävissä oleviin materiaaleihin ja ilmasto-olosuhteisiin. Nykyaikainen mikrobiruokan tuottaminen tehdään yleensä laajamittaisissa teollisissa ympäristöissä ja tiukasti valvotuissa olosuhteissa. Jotta mikrobiruokaa voitaisiin tulevaisuudessa tuottaa suuria määriä, on tarpeen kehittää teknisesti helpommin lähestyttäviä ratkaisuja, joita voidaan toteuttaa ja käyttää kaikkialla maailmassa eikä vain kaikista suurimmissa teollisissa laitoksissa. (Jahn ja muut 2023.)

7.2 Avaruusmatkustus

Tulevaisuuden ruoantuotannon kehityssuuntiin liittyy myös avaruusmatkailu. Aurinkokunnan halki ulottuvat pitkät avaruusmatkat luovat omat haasteensa. Esimerkiksi kuusihenkilöisen miehistön 500 päivän Mars-matka vaatii 5 tonnia ruokaa ja 8-10 tonnia lisävarusteita ennalta arvaamattomien tilanteiden varalta. Varastoitua ruokaa on siis haasteellista sellaisenaan viedä suuria määriä avaruuteen. Se on myös altis pilaantumiselle sekä ravintoaineiden vähentymiselle ajan myötä. Tämä voi johtaa miehistön aliravitsemukseen sekä huonompaan fyysiseen ja kognitiiviseen suoritukseen. (Llorente ja muut 2022.)

Avaruusmatkojen onnistuminen vaatii mahdollisimman suurta omavaraisuutta ja tuotanto- ja tukijärjestelmien optimointia rajallisilla resursseilla. Omavaraisuutta kasvattaa riippuvuuden vähentäminen rakettiin lastatusta lastista ja Maasta tulevista

täydennyksistä. Avaruusraketin omavarainen ruoantuotantojärjestelmä vähentää avaruusmatkustamisen riskejä. Se on myös edellytys pitkäkestoiselle avaruusasutukselle taloudellisesta ja logistisesta näkökulmasta. Geneettisesti muokattua avaruusasemilla valmistettua mikrobiruokaa voisi hyödyntää näiden ongelmien ratkaisussa. (Llorente ja muut 2022.)

Erilaisia vaihtoehtoja, kuten kasveja, leviä, hyönteisiä, viljeltyä lihaa ja mikrobeja on harkittu ruoan tuottamiseksi avaruudessa. Mikro-organismit kuitenkin vaativat suhteessa muihin vaihtoehtoihin verrattuna vähemmän raaka-aineita. Ne kaksinkertaistavat biomassansa nopeasti ja niitä on helpompi muokata geneettisesti. Varsinkin aiemminkin mainittu *S. cerevisiae*-hiiva on tähän sopiva. On tutkittu, että avaruuden mikrogravitaatio-olosuhteet eivät näyttäisi vaikuttavan merkittävästi sen kasvuun. National Aeronautics and Space Administration eli NASA onkin BioNutrients-projektissaan juuri tutkinut geenimuokatun hiivan käyttöä avaruusruokana. Vitamiineja tuottavan hiivakannan on laskelmoitu valmistavan 50-100 henkilön miehistölle tasapainoisen ruokavalion yhdestä 3000 litran fermenttorista. (Llorente ja muut 2022.)

7.2.1 Ruoantuotannon haasteet avaruudessa

Avaruuslentoja varten valmistetun ruoan täytyy olla varastoitavissa kompaktisti, kevyttä ja helposti siirrettävää. Avaruusruoan täytyy kestää ulkoavaruudesta tulevaa säteilyä, raketin tärinää ja muita ympäristömuuttuja, kuten matalaa painetta ja haitallisia vaikutuksia. Tämä asettaa haasteita tuotantojärjestelmille tekniikan näkökulmasta. (Singh ja muut 2024.)

Tietyissä maapallon ulkopuolisissa kohteissa, kuten Marsissa, mikrobien kasvun kannalta välttämättömät ravinteet, kuten hiili ja typpi, voivat olla helposti saatavilla suoraan ympäristöstä. Avaruusmatkojen aikana ja kohteissa, joissa näitä välttämättömiä ravinteita ei ole saatavilla, voitaisiin puuttuvat resurssit ottaa talteen miehistön tuottamista jätteistä. Prosessi hyödyntäisi suljettua kiertoa. Esimerkiksi ihmisen virtsan tyypeä voitaisiin käyttää mikrobifermentointiin. Lisäksi virtsasta löytyy fosfaatteja ja suoloja, jotka ovat osa normaalia mikrobien kasvualustaa. (Llorente ja muut 2022.)

On kuitenkin huomioitava, että jonkinlaista raaka-aineiden tappiota syntyy suljetussa kierrossakin. Hiivan tarvitsema sokeri tuo myös haasteita kasvatukseen. Ongelma voitaisiin ratkaista kaksivaiheisella bioreaktorilla. Ensimmäisessä bioreaktorissa fotosynteettiset syanobakteerit käyttävät miehistön tuottamaa hiilidioksidia

ravinnokseen. Geneettisesti muokatut syanobakteerit osaavat erittää valmistamansa sokerit kasvunesteeseen. Tämä neste voitaisiin sitten ohjata seuraavaan bioreaktoriin, jossa hiiva kasvaa niiden avulla. Älykkäät bioreaktorit voisivat ohjata prosessia omatoimisesti biosensorien, optogenetiikan ja elektrogeeniikan avulla. Eri mikrobiruoan eristä voitaisiinkin kasvattaa sitten eri makuisia ruokia miehistön omien preferenssien mukaisesti. Useat geneettiset muokkaukset saattavat kuitenkin aiheuttaa hiivalle ylimääräistä metabolista stressiä. Nämä muutokset hiivan metaboliaan ja kasvuun voitaisiin kuitenkin kiertää. Makuun liittyvät hiivaan muokatut metaboliareitit voitaisiin aktivoida eri promoottereilla päälle vasta ihanteellisen solutiheyden saavuttamisen jälkeen, jolloin kasvu ei hidastuisi. (Llorente ja muut 2022.)

7.2.2 Avaruusruoan kehityssuunnat

Hiivalla on onnistuttu tuottamaan monia ihmiselle välttämättömiä ravintoaineita, kuten A- ja C-vitamiinia sekä D3- vitamiinin esiastetta. Muiden välttämättömien vitamiinien tuotantoa ei ole vielä saavutettu. Viimeaikaiset tutkimustulokset kuitenkin viittaavat siihen, että ne voidaan toteuttaa lähitulevaisuudessa. Kunnes hiiva saadaan muokattua tuottamaan loputkin välttämättömät ravintoaineet, voi ruoantuotantoa täydentää muilla mikro-organismeilla, jotka jo syntetisoivat niitä. Lopullisena tavoitteena avaruusmatkailun ruoantuotannossa olisikin tuottaa mikrobisoluja, joissa on erilaisia aistittavia ominaisuuksia miehistön mieltymysten mukaan ja joka muistuttaisi rakenteeltaan kasviksia ja lihoja. Olisi hyödyllistä myös yhdistää tuotantoprosessiin mikrobiruoan 3D- printtaaminen, jotta muotoja, makuja ja tekstuureja olisi mahdollista yhdistää nautinnolliseen kokonaisuuteen. (Llorente ja muut 2022.)

Avaruusruoan kehittäminen tapahtuu monitahoisessa yhteistyössä ja siihen osallistuu eri valtioiden virastoja, kuten Kansallinen ilmailu- ja avaruushallinto (NASA), Euroopan avaruusjärjestö (ESA), Venäjän avaruusjärjestö ja jopa yksityisiä yrityksiä, kuten SpaceX, Blue Origin ja Virgin Galactic. Yhteistyö on edellytys onnistuneen ravinnon tuotantojärjestelmän kehittämiseksi. (Singh ja muut 2024.) Tuotantojärjestelmiä täytyy kuitenkin päästä testaamaan, joten kansainväliselle avaruusasemalle ja miehitetyille lennoille olisi hyvä ottaa prototyypit mukaan. (Llorente ja muut 2022.)

8 Yhteenveto

Mikrobiruoka on tuttua kuluttajille fermentoitujen ruokien kautta. Uusia käyttökohteita ja sovelluksia syntyy kuitenkin koko ajan. Mikrobiruonan tuotannossa on omat haasteensa, kuten skaalaus, taloudellinen tuottavuus sekä turvallisuus, mutta sillä on myös suuria mahdollisuuksia perinteisen ruoantuotannon aiheuttamien ympäristöhaasteiden ratkaisussa sekä globaalin ruokaturvan takaamisessa.

Mikrobiruonan tuotannossa käytettävien mikro-organismien geneettinen ja metabolinen muokkaus mahdollistavat mikrobiruonan kehittämisen siihen suuntaan ominaisuuksiensa kannalta, jotta kuluttajat pitävät sitä miellyttävänä, varteenotettava sekä kestäväenä vaihtoehtona. Ristiriidan mikrobiruonan etuihin kuitenkin luo yleinen epäileväisyys geneettisesti muokattuja organismeja kohtaan. Pitkät ja kalliit säätelyprosessit myös vaikeuttavat uusien mikrobiruokien lanseerausta.

Tulevaisuudessa on kuitenkin ilmeinen tarve kehittää mikrobiruonan tuotantoa edelleen eteenpäin. Oletettavasti vasta murto-osa ruoaksi itsekseenkin kelpaavista mikrobeista on tunnistettu ja teollisessa käytössä. Taloudellinen tuottavuus kasvaa ja edelleen tutkimukseen sijoittaminen helpottuu, mitä useammin mikrobiruosta tulee osa kuluttajan ruokavaliota.

9 Lähteet

- Bajić, B., Vučurović, D., Vasić, Đ., Jevtić-Mučibabić, R. & Dodić, S. (2022) Biotechnological Production of Sustainable Microbial Proteins from Agro-Industrial Residues and By-Products. *Foods* **12**:107.
- Choi, K. R., Jung, S. Y. & Lee, S. Y. (2024) From sustainable feedstocks to microbial foods. *Nat Microbiol* **9**:1167–1175.
- Choi, K. R., Yu, H. E. & Lee, S. Y. (2022) Microbial food: Microorganisms repurposed for our food. *Microb Biotechnol* **15**:18–25.
- Graham, A. E. & Ledesma-Amaro, R. (2023) The microbial food revolution. *Nat Commun* **14**:2231.
- Hernández-Velázquez, R., Flörl, L., Lavrinienko, A., Sebechlebská, Z., Merk, L., Greppi, A. & Bokulich, N. A. (2024) The future is fermented: Microbial biodiversity of fermented foods is a critical resource for food innovation and human health. *Trends Food Sci Technol* **150**:104569.
- Jahn, L. J., Rekdal, V. M. & Sommer, M. O. A. (2023) Microbial foods for improving human and planetary health. *Cell* **186**:469–478.
- Llorente, B., Williams, T. C., Goold, H. D., Pretorius, I. S. & Paulsen, I. T. (2022) Harnessing bioengineered microbes as a versatile platform for space nutrition. *Nat Commun* **13**:6177.
- Singh, S., Negi, T., Sagar, N. A., Kumar, Y., Kaur, S., Thakur, R., ... Tarafdar, A. (2024) Advances in space food processing: From farm to outer space. *Food Biosci* **61**:104893.

Sun, W., Shahrajabian, M. H. & Lin, M. (2022) Research Progress of Fermented Functional Foods and Protein Factory-Microbial Fermentation Technology. *Fermentation* **8**:688.