

Vaahdot elintarvikkeiden kemiassa – valkuaisvaaho

Kandidaatin tutkielma

Helsingin yliopisto

Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta

Kemian laitos

Kemian opettajankoulutusyksikkö

Tekijä: Ilona Linnavuori

PVM: 2.9.2013

Ohjaajat:

Maija Aksela

Heikki Tenhu

Anu Hopia

Sisältö

1	JOHDANTO.....	1
2	VAAHTOJEN KEMIAA	2
2.1	Rakenne.....	2
2.2	Luokittelua	3
2.3	Ominaisuuksia.....	5
2.4	Vaahdotumisen edellytykset	5
2.5	Proteiinit vaahdon muodostumisessa ja stabilisoinnissa.....	6
2.6	Vaahdoten epästabiilisuus.....	8
2.7	Vaahdotta stabilisoivat mekanismit	11
2.8	Vaahdon ominaisuuksien arviointi.....	12
3	ESIMERKKI SYVEMMIN: VALKUAISVAAHTO	13
3.1	Valkuaisen koostumus	13
3.1.1	Valkuaisen tärkeimmät proteiinit.....	15
3.2	Valkuaisen vaahdotuminen	16
3.3	Proteiinien denaturoituminen ja koaguloituminen	16
3.4	Eri proteiinit vaahdotmuodostuksessa.....	18
3.5	Vatkausajan vaikutus stabiilisuuteen	19
3.6	Valkuaisen vaahdotumiseen vaikuttavia tekijöitä.....	19
3.6.1	Hapon vaikutus	20
3.6.2	Lämpötila	21
3.6.3	Lipidit.....	22
3.6.4	Astian vaikutus	24
3.6.5	Sokeri	25
3.6.6	Suola	27
4	YHTEENVETO	27
	LÄHTEET	29

1 JOHDANTO

Vaahdoilla on monenlaisia käyttökohteita muun muassa elintarvike- ja lääkealalla, kosmetiikkateollisuudessa ja tekniikassa. Pienen tiheydensä ansiosta ne ovat erittäin käyttökelpoisia esimerkiksi palontorjunnassa ja erilaisissa erotustekniikoissa: esimerkkinä mainittakoon mineraalien rikastus vaahdotuksen avulla¹. Uusia käyttökohteita ja sovelluksia kehitellään koko ajan. Jokaisella vaahtosysteemillä on oma ainutlaatuinen kemiallinen koostumuksensa ja muodostumismekanisminsa, mikä johtaa erilaisiin makroskooppisiin ominaisuuksiin.²

Jokapäiväisten elintarvikkeidemme koostumus vaihtelee hyvinkin paljon - kovista ja hauraista karamellisoiduista sokerimassoista kevyisiin ja pehmeisiin vaahtoihin. Harva ruoka voidaan luokitella yhdeksi faasiksi, vaan useimmiten ruokien mikrorakenteet ovat varsin monimutkaisia.³

Erilaiset ilmastetut ruoat ovat olleet mukana ihmiskunnan historiassa noin 6000 vuotta, aina Egyptin kohotetun leivän keksimisestä lähtien. Nykyään erilaiset vaahtomaiset ruoat ovat arkipäivää: on erilaisia konditoriatuotteita, makeisia, meijerituotteita, kananmunavaahtoja, aamiaismuroja, juomia, jälkiruokia ja niin edelleen. Vaahtoruoat ovat kehittyneet vuosien saatossa raaka-aineiden saatavuuden, teknologisten edistysaskelten ja erilaisten kulinaaristen kokeilujen myötä.⁴

Tutkielman aihe on valittu tukemaan tulevaa Pro Gradu -tutkielmaani, jossa tullaan mahdollisesti käsittelemään aineen olomuotojen ja erilaisten kolloidien opetusta peruskoulussa ja lukiossa. Usein opetuksessa painotetaan kolmea ilmeistä olomuotoa – kiinteätä olomuotoa, nestettä ja kaasua. Monet aineet ovat kuitenkin useamman olomuodon seoksia. Miten tämä huomioidaan oppikirjoissa? Miten on esimerkiksi vaahtojen, sumujen, suspensioiden ja emulsioiden opetuksen laita? Elintarvikekontekstin valitsin tutkielmaani siksi, että se on itseäni ja usein myös oppilaita kiinnostava arkipäiväinen aihe ja suosittu harrastus. On mielenkiintoista tietää, mitä mikrotasolla tapahtuu ruokia valmistettaessa – esimerkiksi kananmunan valkuaista vaahdotettaessa.

Työni jakautuu kahteen suurempaan kokonaisuuteen. Luvussa kaksi käsitellään vaahtojen kemiaa yleisellä tasolla keskittyen elintarvikekontekstiin. Siinä tutustutaan muun muassa vaahtojen rakenteeseen ja ominaisuuksiin sekä perehdytään vaahtoutumisen edellytyksiin

sekä proteiinien rooliin vaahdon muodostumisessa ja stabilisoinnissa. Luvussa käsitellään myös vaahdoille tyypillistä epästabiilisuutta ja toisaalta tutustutaan vaahtojen stabiilisuutta kasvattaviin mekanismeihin.

Kolmannessa luvussa puolestaan perehdytään syvällisemmin yhteen tärkeään elintarvikevaahtoon – valkuaisvaahtoon. Aluksi käsitellään valkuaisen koostumusta, minkä jälkeen keskitytään valkuaisen vaahtoutumiseen molekyylitasolla. Tutkielman lopuksi tutustutaan valkuaisen vaahtoutumiseen ja stabiilisuuteen vaikuttaviin ulkoisiin tekijöihin. Erikseen esiteltäväksi elintarvikevaahdoksi valikoitui valkuaisvaahdo, sillä se on moniin muihin ruokavaahdoihin verrattuna yhdisteryhmiltään yksinkertainen vaahdo - sisältäen ilman lisäksi lähinnä vettä ja proteiineja. Tämän lisäksi valintaan vaikutti se, että valkuaisvaahdo on usein pohjana erilaisissa leivonnaisissa ja jälkiruoissa ja täten arkipäiväinen ja tuttu vaahdo.

2 VAAHTOJEN KEMIAA

2.1 Rakenne

Vaahdot voidaan useimmiten luokitella kaasukuplien dispersioiksi, joissa jatkuvana faasina on neste, puolikiinteä tai kiinteä faasi, joka sisältää erilaisia pinta-aktiivisia aineita^{5,6}. Yleensä ruokavaahdoissa kaasuna on ilma, mutta joskus se voi olla myös esimerkiksi hiilidioksidi. Jatkuvana faasina on taas usein vesiliuos tai suspensio, joka sisältää proteiineja. Jotkut ruokavaahdot ovat hyvinkin monimutkaisia kolloidisia systeemejä: esimerkiksi jäätelö voidaan luokitella rasvapisaroiden muodostamaksi emulsioksi, jääkiteiden suspensioiksi, polysakkaridigeeliksi sekä sokeri- ja proteiiniliuokseksi, joka sisältää ilmakuplia.⁶

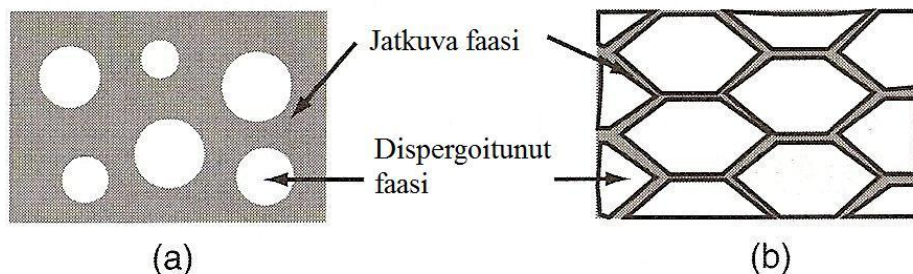
Kaasu-nesterajapinnan pinta-ala vaahdoissa voi olla jopa yksi neliometri millilitrassa nestettä⁶. Tavallisimmat vesiliuosten muodostamat vaahdot ovat siis suurimmaksi osaksi kaasua (noin 95 %), joissa nestettä on vain murto-osa⁷. Vaahdoissa kaasukuplien koko voi vaihdella paljon, noin yhdestä mikrometristä useampiin senttimetreihin, riippuen useista tekijöistä, kuten nesteen pintajännityksestä, viskositeetista ja energialisäyksestä

vaahdonmuodostuksessa⁶. Ruokavaahtoja valmistettaessa pyritään kuitenkin usein mahdollisimman tasaiseen ja melko pieneen kuplakokoon, jolloin ruokaan saadaan aikaiseksi sileä ja keveä rakenne.

2.2 Luokittelua

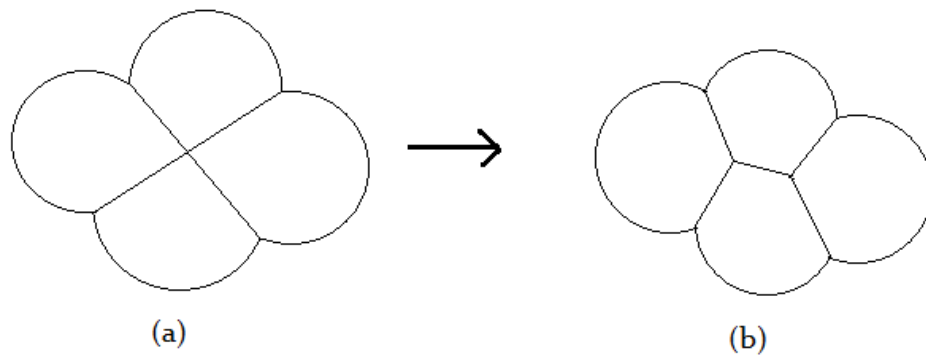
Ruokavaahdot voidaan luokitella niiden reologisten ominaisuuksien ja stabiilisuuden mukaan nestemäisiin ja kiinteisiin vaahtoihin⁸. Joskus kiinteitä vaahtoja kutsutaan myös kuiviksi vaahtoiksi. Esimerkkinä nestemäisistä vaahtoista mainittakoon oluen vahto ja kermavaahto, ja kiinteästä vaahtosta kova marenki.⁵ Nestemäisillä vaahtoilla voi olla hyvin lyhyt, muutaman sekunnin elinikä, kun taas kiinteiden vaahtojen rakenne voi säilyä useita kuukausia, jopa vuosia. Tietysti näiden ääripäiden välillä on myös keskiasteen viskositeetin omaavia vetisiä vaahtoja ja pehmeitä kiinteitä vaahtoja.⁸ Esimerkiksi sokerikakku voidaan luokitella pehmeäksi kiinteäksi vaahtoksi.

Vaahdot voidaan jakaa myös kuplien muodon mukaan joko pallomaisiin vaahtoihin (kugelschaum) tai monitahkoisiin vaahtoihin (polyederschaum) (Kuva 1)⁹. Jos kaasufaasin tilavuus vaahtossa on pieni, kuplat pysyvät pallomaisina ja kuplien väliin jää huomattava määrä väliainetta^{5,10}. Kaasun määrän kasvaessa, kuplat alkavat pakkautua toisiaan vasten ottaen samalla monitahkoisen muodon - erityisesti, kun vaahtotettavan nesteen viskositeetti on pieni^{5,11}. Toisaalta monitahkoisen vaahton muodostuminen on hyvin usein seurausta pallomaisen vaahton kuivumisesta (ks. luku 2.6)^{11,12}.

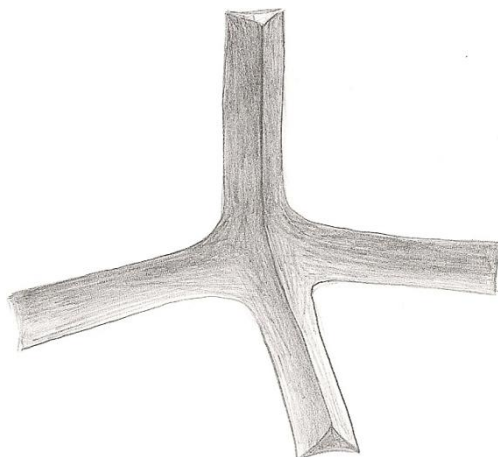


Kuva 1: Havainnekuva pallomaisesta (a) ja monitahkoisesta (b) vaahtosta. Todellisuudessa vaahtojen rakenteet eivät ole näin säännöllisiä. Kuva muokattu lähteestä 13.

Ideaalivaahdossa kaikki kuplat ovat samankokoisia ja säännöllisen dodekaedrin muotoisia. Jokapäiväisten vaahtojen rakenne on kuitenkin monimuotoisempi, ja vaahton kuplien muoto ja järjestyminen muuttuvat ajan kuluessa.^{9,12} Monitahkoisen vaahton rakenteen muodostuminen noudattaa Plateaun sääntöjä, jotka perustuvat pintajännitysvoimien ja kaasun paineiden tasapainon säilymiseen vaahdossa. Sääntöjen mukaan ainoastaan kolme kuplien välistä kalvoa voi kohdata toisensa tasossa (Kuva 2). Jos taas kuplat kohtaavat toisensa kolmiulotteisesti, ainoastaan neljä kuplaa voivat muodostaa yhtymäkohdan (Kuva 3).¹⁴ Näin kuplien väliset noin 120° kulmat ja noin 109° tetraedrikulmat ovat vaahton stabiilisuuden edellytyksenä¹¹.



Kuva 2: Neljän kuplan kohdatessa toisensa tasossa rakenne on hyvin epästabiili (a), joten kuplat järjestyvät uudelleen (b).



Kuva 3: Tetraedrimäinen kärkikohta neljän kuplan kohdatessa.

2.3 Ominaisuuksia

Tyypillisiä ominaisuuksia vaahdoille ovat pieni tiheys (keveys), korkea viskositeetti tai elastisuus ja lopulta äärellinen stabiilisuus^{2,12}. Vaahdon keveys riippuu vaahdon jatkuvaan faasiin upotetusta ilmamäärästä. Tämä taas on riippuvainen muun muassa käytetyn vaahdotusaineen laadusta ja konsentraatiosta, esimerkiksi monien ruokavaahtojen tapauksessa eri proteiinien kokoelmasta.⁵

Kun vaahdon monitahkoinen rakenne on muodostunut, on systeemin pintaenergia hetkellisesti minimissään. Tarvitaankin jokin ulkoinen ärsyke kasvattamaan vaahdon rajapinta-alaa ja rikkomaan vaahdon rakenne.¹² Käytännössä normaaliolosuhteissa tällaisen ärsykkeen voi aiheuttaa esimerkiksi pölyhiukkaset, orgaaniset epäpuhtaudet, ilman liike tai lämpötilaeroista johtuva lämmön virtaus^{12,15}. Tämän vuoksi heikkojen vaahtojen rakenne romahtaa helposti, ja ne palautuvat nopeasti tilaan, jossa faasit ovat erottuneet.¹² Vaahdon stabiilisuutta voidaan kuitenkin tietoisesti parantaa lisäämällä jatkuvaan faasiin erilaisia ainesosia.^{1,12}

2.4 Vaahtoutumisen edellytykset

Jotta neste voisi muodostaa vaahdon, sen täytyy kyetä laajentamaan rajapinta-alaansa niin, että jokaisen kaasukuplan ympärille muodostuu kalvo. Tämän lisäksi nesteellä on oltava oikeanlaiset reologiset ominaisuudet ja pintaominaisuudet, jotta vaahdon rakenne ei heti sorru. Nesteiden täytyy myös kyetä viivyttämään kupliin vangitun kaasun diffuusiota pienemmistä kuplista suurempiin (ks. luku 2.6) tai ympäröivään ilmaan.¹⁶

Puhtaiden nesteiden molekyylien välillä on nestettä koossapitäviä vuorovaikutuksia, jotka estävät puhtaiden nesteiden vaahtoutumisen sellaisenaan^{17,18}. Tämän vuoksi jatkuvaan faasiin täytyy olla liuenneena erilaisia pinta-aktiivisia aineita, joiden tehtävänä on alentaa nesteen pintajännitystä ja vahvistaa kaasukuplien seinämiä^{6,17}. Nämä pinta-aktiiviset molekyylit häiritsevät puhtaan nesteen molekyylien välisiä voimia tarpeeksi, jotta vaahtoutuminen on mahdollista¹⁷. Useimmissa ruoissa eri proteiinit toimivat tällaisina vaahdon muodostajina ja stabilisaattoreina¹⁹. Vaikka nämä proteiinit ovat pääasiassa vesiliukoisia, pystyvät ne paljastamaan hydrofobisia ryhmiään ilma-nesterajapinnoilla ja näin toimimaan pinta-aktiivisina aineina¹⁰.

Lisäksi tarvitaan ulkoista energiaa, jotta vaahtoutuminen saadaan aikaiseksi¹⁰. Tämä energia voidaan saada aikaan eri tavoin – vaahton muodostuminen tapahtuu kuitenkin joko kaasun dispersion tai kondensaation kautta¹³. Useimmiten ruokavaahtoja valmistettaessa energialähteenä käytetään joko vatkausta tai voimakasta ravistamista, jolloin vaahto muodostuu dispersion kautta kaasun jakautuessa yhä pienempiin osiin^{6,13}. Vaahtoja voidaan muodostaa myös esimerkiksi kuplittamalla ilmaa huokoisen kaasunjakolaitteen läpi.⁶

Kondensaatioissa alkuperäisen kaasufaasin koko on molekyyalitasoa, ja kaasun annetaan kondensoitua nesteen sisällä muodostaakseen kuplia ja edelleen vaahton. Esimerkkinä vaahton muodostumisesta kondensaation kautta voidaan mainita oluen vaahtoutuminen.¹³ Kun oluttölkki, -pullo tai -hana avataan, käymisen kautta tuotettu ja paineen avulla liuotettu hiilidioksidi vapautuu, jolloin liuos tulee ylikylläiseksi. Ylimääräinen kaasu muodostaa dispergoituneen faasin, joka nousee oluen pinnalle muodostaen vaahton.^{12,13} Toisaalta myös esimerkiksi purkkikermavaahton vaahtotus perustuu nopeaan paineen alentamiseen nesteessä⁶.

2.5 Proteiinit vaahton muodostumisessa ja stabilisoinnissa

Proteiinien toiminta vaahtojen stabilisaattoreina perustuu niiden kykyyn muodostaa joustavia ja koossapitäviä kalvoja kaasukuplien ympärille¹⁹. Proteiinin soveltuvuus vaahtonmuodostajaksi riippuu pääasiassa sen tehokkuudesta alentaa liuoksen pintajännitystä, sen diffuusioluonteesta, kyvystä kestää ohuilla kalvoilla esiintyviä paineroja sekä joustavuusominaisuuksista rajapinnoilla²⁰.

Kun vaahtotettavaan liuokseen tuodaan energiaa esimerkiksi vatkauksen avulla, amfifiilisen luonteensa ansiosta proteiinimolekyyliä adsorboituu ilman ja nesteen rajapinnalle, alentaen samalla nesteen pintajännitystä¹⁹. Myös proteiinien konformaatioissa saattaa tapahtua muutoksia ja hydrofobiset osat hakeutuvat kohti kaasufaasia ja hydrofiiliset osat kohti vesiliuosta^{19,21}. Samalla tapahtuu proteiinien osittaista avautumista eli denaturoitumista. Denaturoituminen saa aikaan aminohappojen sivuketjujen vapautumista, mikä edelleen johtaa molekyylien välisten vuorovaikutusten syntymiseen. Osittain avautuneet proteiinit liittyvät toisiinsa (koaguloituminen) ja muodostavat stabiloivan kalvon vaahtokuplien ympärille.^{17,19,22}

Ilma-nesterajapinnoilla proteiinit voivat vuorovaikuttaa keskenään eri tavoin muodostaakseen vaahdon rakennetta ylläpitävän proteiiniverkoston. Esimerkkeinä mainittakoon van der Waalsin vuorovaikutukset, vetysidokset ja kovalenttiset disulfididisidokset (-S-S-). Elektrostaattinen repulsio tai steeriset esteet proteiinien välillä saattavat toisaalta vaikuttaa proteiinikalvojen laatua heikentäen, kun molekyylit eivät kykene lähestymään kunnolla toisiaan ja kiinnittyvät toisiinsa vain vähäisessä määrin.²³

Proteiiniverkoston muodostuminen voi esimerkiksi edetä tioli-ryhmien (-SH) ja disulfididisidosten vaihtumisen kautta, mikä on hyvin nopeaa neutraaleissa ja emäksisissä olosuhteissa, tai kysteiinitähteiden hapettua disulfididisidoksi. Nämä mekanismit ovatkin usein osaltaan mukana ruokavaahtojen muodostumisessa sekä molekyylien välisten että molekyylien sisäisten sidosten muodostumisessa ja hajoamisessa.²³

Kokeelliset tutkimukset ovat osoittaneet, että vaahdon muodostamiseen ja stabiloimiseen tarvitaan jossain määrin erilaisia ominaisuuksia proteiineilta²⁴. Mitä nopeammin proteiini diffundoituu ilma-nesterajapinnoille ja mitä helpommin se siellä denaturoituu, sitä parempi vaahdonmuodostaja se yleensä on¹⁹. Usein joustavat molekyylit, joissa on vain vähän molekyylin eri osien välisiä sisäisiä sidoksia ja vuorovaikutuksia, ovatkin tehokkaita pinta-aktiivisia aineita²⁴. Proteiinien osittainen avautuminen ja tästä aiheutuva paljastuneen hydrofobisuuden kasvu näyttävät kasvattavan adsorptionopeutta¹⁸. Toisaalta myös proteiinin molekyylipainolla on vaikutusta adsorptionopeuteen ja tätä kautta vaahdon muodostumiseen¹⁹.

Vahto on sitä stabiilimpaa, mitä vahvempia, joustavampia ja ilmatiiviimpiä kalvoja proteiinit kykenevät muodostamaan^{19,25}. Koska proteiinien pienin mahdollinen nettovaraus edistää proteiinien adsorptionopeutta ja molekyylien välisten vuorovaikutusten syntymistä, tulisi systeemin pH:n olla lähellä proteiinien isoelektristä pistettä^{18,19}. Isoelektrisellä pisteellä tarkoitetaan pH:ta, jossa proteiinin positiivisesti varautuneiden ryhmien lukumäärä vastaa negatiivisesti varautuneiden ryhmien lukumäärää. Toisin sanoen proteiinimolekyylillä ei ole nettovarausta. Tällöin proteiinimolekyylit eivät hylji toisiaan niin voimakkaasti ja pystyvät vuorovaikuttamaan vahvemmin.²⁶

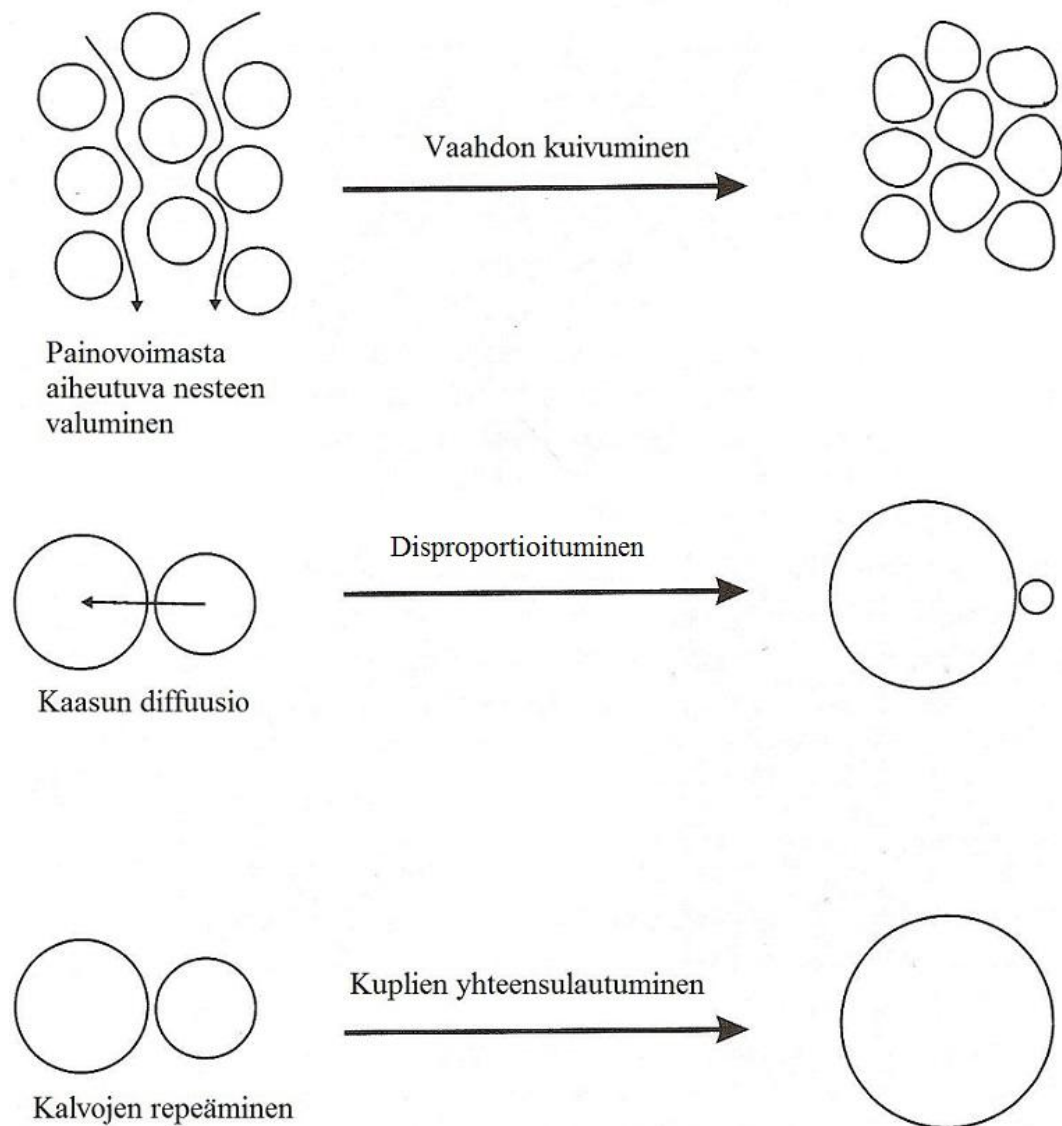
Vaikka proteiinimolekyylien pieni molekyylipaino edistää adsorptionopeutta, saattaa suurempi molekyylipaino vaikuttaa suotuisasti vaahton stabiilisuuteen^{19,27}. Näyttää nimittäin siltä, että suuremman molekyylipainon omaavat proteiinit, jotka osittain vastustavat laskosten avautumista, tuottavat paksumpia kalvoja, joilla on hyvät reologiset ominaisuudet²⁷.

Hyvän vaahtoutumiskyvyn omaavia proteiineja ovat muun muassa kananmunan valkuaisen proteiinit, gelatiini, heraproteiinit, β -kaseiini, hemoglobiinin globiiniosa, vehnäproteiinit ja soijaproteiinit²⁷.

2.6 Vaahtojen epästabiilisuus

Koska useimmilla vaaardoilla on hyvin suuret rajapinta-alat, ovat ne usein epästabiileja⁶. Vaahdossa vaikuttavat voimat pyrkivätkin ensisijaisesti pienentämään kokonaisrajapinta-alaa eri faasien välillä¹. Kaikissa vaahtonmuodostamisen menetelmissä ensimmäisiä kuplia erottaa varsin paksut jatkuvan faasin kerrokset, jolloin muodostuva vahto on pallomaista. Useimmiten painovoima kuitenkin muuttaa kuplat monitahkoiseen muotoon. Kuplien noustessa kohti pintaa ulkoinen hydrodynaaminen paine pienenee ja kuplakoko kasvaa, jolloin kuplien sisäinen paine pienenee. Sisäinen paine on kuitenkin edelleen suurempi kuin ulkoinen paine, minkä vuoksi kuplat pyrkivät vapauttamaan ylimääräisen paineen hajoamalla.¹²

Vaahtojen rakenne romahtaakin helposti erilaisten voimien vaikutuksesta^{5,28}. Vaahtojen stabiilisuuteen vaikuttaa epäsuotuisasti pääasiassa kolme mekanismia: painovoimasta aiheutuva kuivuminen, kuplien yhteensulautuminen ja disproportioituminen (Kuva 4)⁵. Nämä kaikki kolme mekanismia toimivat yhdessä, johtaen vähitellen vaahton epätasaiseen mikrorakenteeseen ja huonontuneeseen laatuun²⁹.



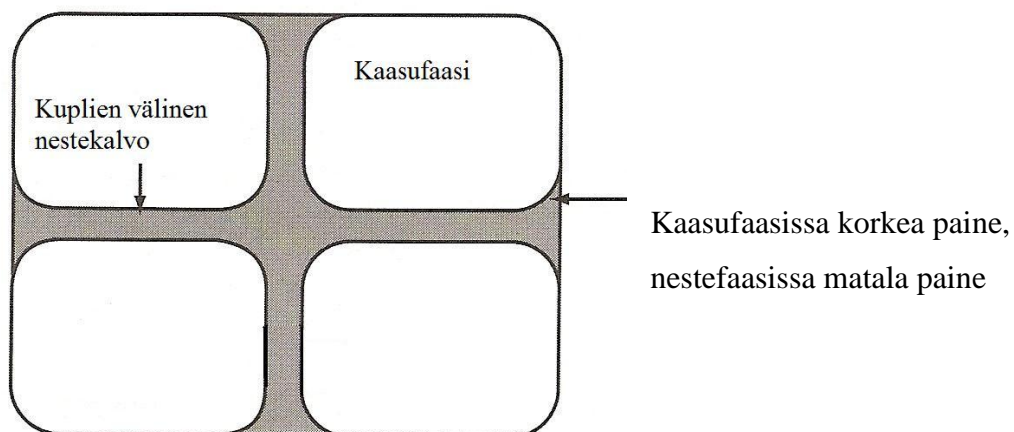
Kuva 4: Vaahdon rakennetta ensisijaisesti heikentävät mekanismit. Kuva muokattu lähteestä 8.

Painovoima ja osittain myös kapillaarivoimat sekä paine-erot aiheuttavat sen, että neste kaasukuplien välissä alkaa valua alaspäin jo vaahdon muodostumisen aikana^{8,25}. Tämä aiheuttaa vaahdon kuivumista ja rakenteen romahtamista, kun nestekalvojen paksuus ja vahvuus pienenevät. Myös vaahdon sisältämän nesteen haihtuminen itsessään aiheuttaa kuivumista.²⁵

Kolmesta vaahtoja pääasiassa epästabiloivasta mekanismista juuri painovoimasta aiheutuva hydrodynaaminen nesteen valuminen on kaikkein nopeinta. Jos vaahto on hyvin epästabiliia, eivät muut mekanismit edes ehdi juuri vaikuttaa ennen täydellistä rakenteen

romahtamista. Kun nesteen valuminen kuplien välistä aiheuttaa kriittisen 5-15 nanometrin paksuuden kalvoihin, nestekerros ei pysty enää ylläpitämään kaasun painetta kuplien sisällä, jolloin kuplat puhkeavat.³⁰

Toinen pääsyy vaahtojen rakenteen romahtamiseen on kapillaarivirtauksesta aiheutuva kuplien yhteensulautuminen. Kun esimerkiksi neljä kuplaa on kontaktissa keskenään, niiden välistä nestealuetta erottavien kalvojen kaarevuus on paljon suurempi kuin esimerkiksi kahden kuplan välillä, jossa kalvot voivat olla lähes tasomaisia. Koska kaasun paineen kuplan sisällä täytyy pysyä yhtä suurena joka puolella kuplaa, nesteen paine on pienempi useamman kuplan risteyskohdassa kuin tasomaisemmilla alueilla (Kuva 5). Tämä paine-ero ajaakin nesteen kuplien risteyskohtiin ohentaen samalla kahden kuplan välisiä nestealueita.³⁰ Samalla tapahtuu kuplien välisten kalvojen repeämistä ja kuplien yhteensulautumista, mikä edelleen johtaa vaahtojen rakenteen sortumiseen^{25,30}.



Kuva 5: Matalampi paine oikealla olevan nuolen osoittamassa kohdassa ajaa nesteen kuplien välistä useamman kuplan risteyskohtaan. Kuva muokattu lähteestä 30.

Vaahtojen kuplakoon ollessa suuri, kalvot rikkoontuvat entistä helpommin ja yhteensulautuminen on runsasta. Mitä suuremmiksi kuplat kasvavat, sitä heikommaksi vaahtojen rakenne muuttuu. Vaahtojen kuivuminen vaikuttaa myös kuplien yhteensulautumiseen, kun nestekalvojen paksuus ja vahvuus heikkenevät.²⁵

Disproportioitumisella tarkoitetaan suurten kaasukuplien kasvua pienten kuplien kustannuksella¹⁹. Se johtuu kaasun diffuusiosta pienemmistä kuplista suurempiin: pienemmät kuplat kutistuvat ja lopulta katoavat, kun taas suuremmat kuplat kasvavat entisestään. Disproportioituminen on seurausta erikokoisten kuplien välisestä Laplacen

paine-eroista, jotka taas aiheutuvat kaasukuplien kalvojen kaarevuuseroista.^{8,28} Kaasu pyrkii siirtymään pienten kuplien suuresta sisäisestä paineesta suurempien kuplien pienempään paineeseen tai vaahtoa ympäröivään kaasufaasiin²⁸. Mitä pienempi on kaasun liukoisuus nesteeseen, sitä pienempi on diffuusionopeus⁵. Diffuusionopeuteen vaikuttaa myös kuplien välinen kokoero. Jos kahden kuplan välinen kokoero on alussa hyvin pieni, on diffuusio hidasta. Ajan kuluessa kuplien kokoeron suurentuessa sekä diffuusionopeus että vaahtoon keskimääräinen kuplakoko kuitenkin kasvavat.³⁰

Proteiinikalvot pyrkivät toimimaan disproportioitumista vastaan. Proteiinien denaturoituminen rajapinnoilla vapauttaa yleensä aminohapposivuketjuja, jotka auttavat molekyylien välisten vuorovaikutusten syntymisessä. Mitä enemmän ristsidoksia proteiinimolekyylien välille muodostuu, sitä stabiilimpi kalvosta tulee ja sitä vähemmän disproportioituminen pääsee vaahtoon rakenteeseen vaikuttamaan.¹⁹

2.7 Vaahtoa stabilisoivat mekanismit

Vaahtoon kuivumista voidaan vähentää huolehtimalla nestefaasin viskositeetista^{15,25}. Paksu liuos valuu hitaammin pois kuplien seinämien välistä kuin ohut^{15,17}. Korkean viskositeetin ansiosta vaahto kestää myös paremmin satunnaisesta tai tarkoituksella aiheutetusta liikkeestä johtuvia ärsykejä rakenteen romahtamatta^{15,16}. Korkeampi viskositeetti pienentää vaahtoon kuplakokoa, jolloin kuplien yhteensulautuminenkin vähenee⁵. Ruokavaahtoja valmistettaessa joukkoon voidaankin esimerkiksi lisätä sokeria nestefaasin viskositeetin lisäämiseksi³¹. Vaahtoon stabiilisuuteen vaikuttaa myös nesteen höyrynpaine. Pieni höyrynpaine osaltaan parantaakin vaahtoon stabiilisuutta, kun nesteen taipumus haihtua kuplien ympäriltä vähenee³².

Toisaalta myös pintaviskositeetilla on vaikutusta vaahtoon rakenteen säilymiseen. Korkea pintaviskositeetti osaltaan myös hidastaa nesteen valumista rajapintojen väliltä ja vahvistaa kalvojen muodostumista.¹⁶ Vaikka proteiinivaahdojen tapauksessa proteiinien suurta liukoisuutta pidetään yleensä edellytyksenä hyvälle vaahtoutumiskapasiteetille (ks. luku 2.8) ja stabiilisuudelle, voivat myös proteiinikalvojen muodostumisen kannalta hyödyttömät nesteeseen liukenemattomat proteiinit stabilisoida vaahtoja kasvattamalla juuri pintaviskositeettia.³¹ Proteiinivaahdoissa pintaviskositeetin suuruus riippuu pääasiassa proteiini-proteiini- ja proteiini-vesivuorovaikutusten vahvuuksista.²⁵

Proteiinivaahtojen stabiilisuuden kannalta oleellisia ovat myös proteiinien muodostamat vahvat ja joustavat kalvot sekä pieni pintajännitys²⁵. Pintajännityksen alentamiseksi vaahdotettavassa nesteessä onkin oltava erilaisia pinta-aktiivisia aineita^{6,17} – ruokavaahtojen tapauksessa yleensä juuri proteiineja. Mitä pienempi nesteen pintajännitys on, sitä vähemmän työtä tarvitaan vaahdon muodostamiseen ja sitä suurempi neste-kaasurajapinta-ala vaahtoon on mahdollista muodostua^{16,20}. Tällöin saadaan aikaiseksi pienempiä kuplia ja sileä rakenne vaahtoon¹⁶.

Ainesosia lisäämällä tai lämpötilaa muuttamalla voidaan vaahtojen stabiilisuutta mahdollisesti tietoisesti kasvattaa. Luvuissa 3.5 ja 3.6 tarkastellaan tarkemmin valkuaisvaahdon stabiilisuuteen vaikuttavia tekijöitä.

2.8 Vaahdon ominaisuuksien arviointi

Proteiinien vaahdotumisominaisuuksia voidaan arvioida eri tavoin³³. Vaahdotumiskapasiteetilla tarkoitetaan joko ilmamäärää, joka on mahdollista sisällyttää vaahtoon tai rajapinta-alueen määrää, jonka proteiiniliuos kykenee muodostamaan⁵. Vaahdotumiskapasiteettia kuvaavat muun muassa

(a) suhteet (”overrun”)

$$100 \times \frac{\text{dispersion kokonaistilavuus} - \text{alkuperäisen nesteen tilavuus}}{\text{alkuperäisen nesteen tilavuus}} (\%)$$

ja

$$100 \times \frac{\text{vatkaamattoman näytteen paino} - \text{tilavuudeltaan yhtä suuren vatkatun näytteen paino}}{\text{tilavuudeltaan yhtä suuren vatkatun näytteen paino}} (\%),$$

(b) vaahdotumisteho (”foaming power”)

$$100 \times \frac{\text{vaahdossa olevan kaasun tilavuus}}{\text{vaahdossa olevan nesteen tilavuus}} (\%)$$

ja (c) vaahdon tiheys.^{5,33}

Vaahdotumisteho yleensä kasvaa nestefaasin proteiinikonsentraation kasvaessa kunnes jokin maksimiarvo saavutetaan. Eri proteiinien kykyä edistää vaahdotumista voidaan vertailla muun muassa mittaamalla maksimivaahdotumisteho jossakin tietyssä proteiinipitoisuudessa tai proteiinikonsentraatio, jolla vaahdotumisteho on puolet maksimistaan.³³

Vaahdon stabiilisuutta puolestaan voidaan arvioida muun muassa mittaamalla nesteen kuivumisen aste tai vaahdon tilavuuden pieneneminen tietyn ajan kuluttua. Voidaan myös mitata esimerkiksi aika, joka kuluu ennen kuivumisen alkua tai aika, joka kuluu vaahdon tilavuuden puolittumiseen.³³

Vaahdon vahvuutta tai jäykkyyttä on mahdollista arvioida esimerkiksi mittaamalla vaahdotylyvään kykyä kantatella tiettyä painoa tai määrittämällä vaahdon viskositeetti.³³

3 ESIMERKKI SYVEMMIN: VALKUAISSVAHTO

Kananmunien erityislaatuinen proteiinkoostumus tekee niistä erinomaisia vaahdonmuodostajia muiden lintujen muniin sekä muihin ruoka-aineisiin verrattuna³⁴. Kananmunan valkuaisen proteiinien erilaiset fysikaaliskemialliset ominaisuudet täydentävät toisiaan, minkä seurauksena saadaan nopeasti tiheydeltään pieniä, stabiileja ja lämmönkestäviä vaahtoja²⁷. Erinomaiset vaahdotumisominaisuudet ovat seurausta valkuaisen proteiinien kyvystä adsorboitua nopeasti ilma-nesterajapinnoille vatkaessa ja kyvystä muodostaa vaahdon rakennetta ylläpitäviä viskoelastisia kalvoja ilmakuplien ympärille molekyylien välisten vuorovaikutusten avulla³⁵.

3.1 Valkuaisen koostumus

Kananmunan valkuainen kattaa lähes kaksi kolmasosaa kananmunan kuorettomasta massasta³⁶. Valkuainen koostuu lähes yksinomaan erilaisista proteiineista ja vedestä^{26,37}. Lisäksi valkuaisessa saattaa olla erittäin pieniä määriä mineraaleja, hiilihydraatteja, vitamiineja ja lipidejä^{36,38}. Eri lähteiden mukaan valkuaisen proteiinipitoisuus on noin 10-13%^{26,36,37}. Juuri proteiinit antavat kananmunan valkuaiselle sen erityislaatuiset ominaisuudet ruoanvalmistuksessa²⁶.

Raaka kananmunan valkuainen ei ole homogeeninen, vaan se koostuu neljästä kerroksesta, kahdesta paksusta ja kahdesta ohuesta^{26,36,38}. Eri kerrosten proteiinkoostumus on ovomusiiniproteiinia lukuun ottamatta identtinen²⁶. Paksummat geelimäiset kerrokset sisältävät noin nelinkertaisen määrän ovomusiinia, joka kuitumaisen rakenteensa ansiosta antaa valkuaisen rakenteelle viskositeettia^{26,37}. Valkuaisen muut tärkeät proteiinit ovalbumiini, konalbumiini, ovomukoidi, lysotsyymi (globuliini G1) ja globuliinit G2 ja G3 ovat pallomaisia²⁶. Eri proteiinien prosenttiosuudet valkuaisessa näkyvät taulukossa 1.

Ovomusiinin lisäksi myös muilla proteiineilla lienee suuren molekyylikokonsa ansiosta merkitystä valkuaisen huomattavan viskositeetin muodostamisessa. Ainutlaatuisen proteiinkoostumuksensa lisäksi viskositeetti tekeekin valkuaisesta erinomaisen vaahdonmuodostajan stabiloidessaan vaahdon rakennetta.¹⁷ Valkuaisvaahtoja valmistettaessa valkuaisen ohuet ja paksut kerrokset sekoittuvat keskenään, jolloin valkuaista voidaan pitää yksinkertaisena proteiinien vesiliuoksena²⁶.

Taulukko 1: Valkuaisen tärkeimpien proteiinien prosenttiosuudet, isoelektriset pisteet ja joitakin vaahtoutumiseen liittyviä ominaisuuksia.

Proteiini	%-osuus valkuaisen proteiineista (lähde 23)	pI (lähde 23)	Ominaisuuksia (lähdet 17, 23, 35, 37, 39, 40, 41)
Ovalbumiini	54,0	4,5-4,7	Stabiloi vaahtoa kuumennettaessa, altis denaturoitumiselle ilma-vesirajapinnoilla
Konalbumiini	13,0	6,1-6,6	Sitoo metalli-ioneja, stabiloi vaahtoa
Ovomukoidi	11,0	4,1	Stabiili lämpimissä ja happamissa olosuhteissa
Ovomusiini	1,5-3,0	4,5-5,0	Stabiloi vaahtoa, kasvattaa viskositeettia
Lysotsyymi	3,4-3,5	10,7	Vuorovaikuttaa ovalbumiinin kanssa
Globuliinit	4,0-4,2	5,5	Alentavat pintajännitystä, kasvattavat viskositeettia, stabiloivat vaahtoa

3.1.1 Valkuaisen tärkeimmät proteiinit

Valkuaisen hallitsevin proteiini, ovalbumiini, on fosfoglykoproteiini, joka koostuu 385 aminohappotähteestä^{35,37}. Se on ainoa kananmunan valkuaisen proteiini, joka sisältää vapaita tioliryhmiä (-SH)³⁵. Lisäksi ovalbumiinista löytyy yksi disulfidiryhmä³⁷. Ovalbumiinia on kolmea erilaista muotoa, A1, A2 ja A3, jotka sisältävät nolasta kahteen fosfaattiryhmää³⁵.

Konalbumiini (toiselta nimeltään ovotransferriini) on glykoproteiini, joka sisältää 686 aminohappo-osaa ja 15 disulfidisiltaa^{26,35}. Konalbumiinilla on muun muassa kyky hidastaa mikro-organismien kasvua ja metalli-ioneja sitova ominaisuus (ks. luku 3.7.4)^{26,37}.

Ovomukoidi on yhdeksän disulfidisidosta ja 186 aminohappo-osaa omaava glykoproteiini^{23,35}. Sitä pystytään lämmittämään sadassa asteessa happamissa olosuhteissa pitkän aikaa ilman merkittäviä muutoksia fysikaalisissa tai kemiallisissa ominaisuuksissa^{35,37}.

Ovomusiinia on sekä matalahiilihydraattipitoista muotoa (α -ovomusiini, hiilihydraattipitoisuus noin 15 %) että korkeahiilihydraattipitoista muotoa (β -ovomusiini, hiilihydraattipitoisuus noin 50 %). Kuten aikaisemmin on todettu, on ovomusiinilla merkittävä osa valkuaisen viskositeetin muodostamisessa.^{35,37}

Valkuainen sisältää kolmea eri globuliinia, G1, G2 ja G3, joista G1 on sittemmin tunnistettu lysotsyymiksi. Näistä kolmesta globuliinista G1 eli lysotsyymi on tutkituin, ja sen tiedetään koostuvan 129 aminohappotähteestä ja sisältävän neljä disulfidisidosta.^{35,37} Globuliineista G2 ja G3 on vain vähän tutkimustietoa, mutta niiden ajatellaan kuitenkin olevan tärkeässä osassa valkuaisen vaahdotumisessa ja alentavan pintajännitystä, mikä on hyödyksi erityisesti vaahdotuksen alkuvaiheessa^{35,39}.

3.2 Valkuaisen vaahtoutuminen

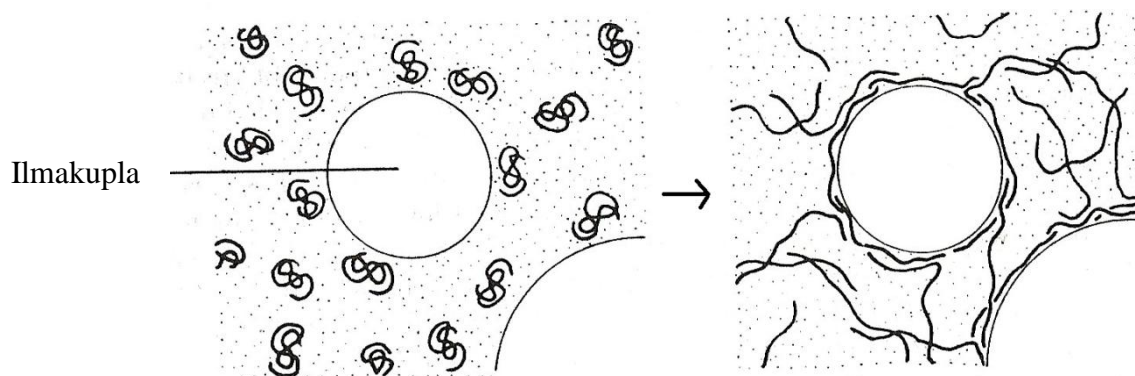
Vaahdotettaessa valkuaisista ilmakuplat jäävät loukkuun nestefaasiin ja tilavuus voi jopa kahdeksankertaistua^{17,34,39}. Valkuaisvaahdon pääkomponentteina ovatkin vesi, proteiinit ja ilma. Valkuaisvaahdon vangitun ilman vuoksi sitä käytetään usein nostatusaineena monissa ruoissa, kuten erilaisissa leivonnaisissa, pikkuleivissä ja kohokkaissa⁴².

Mielenkiintoinen tosiasia on, että yhden kananmunan valkuaisen proteiinipitoisuus riittäisi muodostamaan jopa useita litroja vaahtoa - rajoittavana tekijänä on siis vesi⁴³. Kun vaahtoon on vatkattu tarpeeksi ilmaa, ei neste enää riitä erottamaan ilmakuplia toisistaan⁵. Vettä lisäämällä hitaasti pieniä määriä kerrallaan, vaahdon määrää voidaankin siis vielä kasvattaa entisestään. Toki vaahdon stabiilisuus alkaa tällöin pikku hiljaa heikentyä, kun proteiiniliuos laimenee.^{44,45} Tietyssä pisteessä proteiiniverkosto jää liian löyhäksi, jolloin neste alkaa valua ulos vaahdosta⁴⁴.

Valkuaisen vatkauksen aikana ilmakuplien koko pienenee ja määrä kasvaa. Valkuaisen ulkomuoto muuttuu läpikuultavasta sameaksi, mutta kosteus säilyy. Kun ilman määrä vaahdossa vähitellen kasvaa, vaahdosta tulee jäykkää ja se menettää juoksevuutensa. Jos vaahdottamista jatketaan liian kauan, vaahdon rakenteesta tulee hauras ja kostean kiiltävä ulkomuoto häviää.⁴⁶

3.3 Proteiinien denaturoituminen ja koaguloituminen

Valkuaisen proteiinit ovat aminohappojen muodostamia pitkiä ketjuja, jotka ovomusiinia lukuun ottamatta ovat kietoutuneet kompaktiin karkeasti pallomaiseen muotoon^{22,47}. Aminohappojen hydrofobiset sivuketjut ovat suuntautuneet kohti molekyylin keskustaa, pois päin ympäröivästä vedestä²⁶. Ketjun eri osien välillä on useanlaisia sidoksia, jotka pitävät yllä proteiinimolekyylin laskostunutta rakennetta. Käsittelemättömässä raaka-ainassa kananmunassa valkuaisen proteiineilla on negatiivinen nettovaraus, joka ehkäisee niiden sitoutumista toisiinsa samanlaisen varauksen hylkiessä samanlaista.^{22,47} Proteiinimolekyylien sisäiset sidokset ja keskinäinen hylkimisvoima häiriintyvät kuitenkin helposti, esimerkiksi vaahdotettaessa ilmakuplien vaikutuksesta.²² Tämä voi saada proteiinimolekyylien laskokset avautumaan ja molekyylit sitoutumaan toisiinsa eli koaguloitumaan (Kuva 6)^{22,26,48}.



Kuva 6: Valkuaisen proteiinit muodostavat kestävän vaahdon koaguloituessaan ilmakuplien ympärille. Kuva muokattu lähteestä 17.

Valkuaisvaahtoja valmistettaessa valkuaisen eri proteiinit toimivat yhteistyössä muodostaakseen vaahdon ja lopulta stabiloidakseen sitä³⁴. Kun valkuaista vatkataan ja ilmakuplat yhdistyvät siihen, proteiinit kuplien seinämällä joutuvat erilaisten voimien vaikutuksen alaisiksi^{17,48}. Vesimolekyylit vetävät vetysidostensa avulla puoleensa yhtä osaa proteiinimolekyylistä, kun taas ilmataskun puolella olevaan osaan proteiinia eivät tällaiset voimat vaikuta.¹⁷ Kun osa vedestä korvautuu ilmalla, ei hydrofobisten aminohappojen sivuketjujen molekyylin keskelle suuntautumisesta ole enää merkittävää etua²⁶. Tästä johtuen yleensä normaalisti laskostuneiden proteiinien kvaternääri- ja tertiäärirakenteet alkavat rikkoontua ja proteiini denaturoituu⁵. Toisaalta vispilän kulkiessa valkuaisen läpi, aiheuttaa se myös vetävän voiman, joka vaikuttaa proteiinimolekyylien laskosten avautumiseen⁴⁸.

Laskosten avautuessa paljastuu proteiinin reaktiivisia osia, esimerkiksi tioliryhmiä -SH (sulfhydryyliryhmä), jotka johtavat liukoisempien ja liukenemattomampien aggregaattien muodostumiseen. Aggregaattien luonne määrää vatkatun proteiiniliuoksen pinta-aktiiviset ominaisuudet.⁵ Amfiifilisten proteiinimolekyylien hydrofiiliset osat suuntautuvat kohti vettä, ja hydrofobiset osat taas kääntyvät kohti ilmakuplia⁴⁸. Tämä proteiinien asettuminen rajapinnoille sekä paljastuneet reaktiiviset ryhmät helpottavat molekyylien välisten proteiini-proteinisidosten (usein disulfididisidokset) ja vaahdon rakennetta ylläpitävien proteiinikalvojen muodostumista ilma-nesterajapinnoille^{5,40}. Proteiinimolekyylien koaguloituessa vaahdon rakenne stabiloituu, kun proteiinit luovat verkoston, joka pitää sekä veden että ilman omilla paikoillaan^{5,26,48}.

3.4 Eri proteiinit vaahdonmuodostuksessa

Valkuaisen vaahtoutuminen molekyylitasolla yksittäisten proteiinien kannalta ei ole kovin tarkasti ymmärretty ilmiö, vaikka yksittäisten valkuaisen proteiinien vaahtoutumisominaisuuksia onkin vertailtu³⁵. Kananmunan valkuaisen proteiinien tiedetään kuitenkin käyttäytyvät hieman eri tavoin vaahdotettaessa⁴⁹, ja tässä luvussa pyritään hiukan valottamaan proteiinien erilaisia rooleja.

Jotkut proteiinit denaturoituvat ja koaguloituvat nopeasti ja helposti ja ovat siksi tärkeitä vaahdonmuodostuksessa. McGeen mukaan valkuaista vaahdotettaessa tällaisia proteiineja ovat esimerkiksi konalbumiini, globuliinit ja ovomusiini.¹⁷ Toisten lähteiden mukaan myös ovalbumiini on erityisen altis denaturoitumiselle ilma-vesirajapinnoilla^{26,37}. Vaahdon stabilisoinnissa avainasemassa on ovomusiini. Se muodostaa vahvan ja joustavan kalvon ilmakuplien ja nestefaasin välille ja näin stabiloii vaahdon rakennetta.^{5,42} Myös konalbumiinilla ja globuliineilla ajatellaan olevan merkittävä rooli valkuaisvaahdon stabilisoinnissa⁴⁰.

Ovomukoidilla, lysosyyymilla, ovomusiinilla ja konalbumiinilla uskotaan joidenkin tutkimusten mukaan olevan vain vähän tai ei lainkaan vaahtoutumiskapasiteettia yksinään. Vuorovaikutuksessa toistensa ja muiden valkuaisen proteiinien kanssa ne kuitenkin suuresti edistävät vaahtoutumista ja vaahdon stabiilisuutta. Esimerkiksi ovomukoidin suurta resistanssia denaturoitumiselle on selitetty sen yhdeksällä disulfididisidoksella, jotka stabiloivat proteiinin laskostunutta rakennetta. Myös lysosyyymimolekyylin neljä disulfididisidosta vaikuttanevat sen vaahtoutumisominaisuuksia heikentäen.⁵

Kuumennettaessa vaahtoja korkeissa lämpötiloissa vaahdon rakenteen ylläpitämisestä on vastuussa pääasiassa yksi proteiini, ovalbumiini^{17,34,48}. Lämpölaajenemisen ansiosta vaahdon ilmakuplat kasvavat uunissa, ja ilman ovalbumiinia vaahdon rakenne romahtaisi nopeasti kuplien seinämien rikkoontuessa¹⁷. Kuumennettaessa ovalbumiini kuitenkin koaguloituu helposti, jolloin ilmakuplien seinämiä vahvistavan kiinteän proteiiniverkoston määrä jopa kaksinkertaistuu^{17,48}. Tämä vastustaa vaahdon rakenteen romahtamista kuuman ilman vapautuessa ja vesihöyryn haihtuessa vaahdosta. Ovalbumiinin ansiosta nestemäisiä vaahtoja pystytään muuttamaan kiinteiksi, ja esimerkiksi marenkien ja sokerikakkujen valmistus on mahdollista.¹⁷

3.5 Valkuaisajan vaikutus stabiilisuuteen

Valkuaisen vatkaamista stabiiliksi vaahdoksi on hankala kontrolloida²⁶. Jos valkuaisista vatkataan liian vähän aikaa, proteiinien koaguloituminen jää riittämättömäksi vaahdon rakenteen tukemisen kannalta. Vaahto jää karkeaksi ja tilavuudeltaan pieneksi. Vaahdon runsaasti koaguloitumattomia proteiineja sisältävä nestefaasi hiljalleen valuu pois, jolloin kuplat rikkoontuvat ja vaahdon rakenne romahtaa.⁴⁹

Vatkausajan pidentyessä tapahtuu proteiinien liiallista koaguloitumista, jolloin myös kuplista tulee epästabiileja^{31,49}. Liian suuri osa proteiineista, erityisesti ovalbumiinista, denaturoituu ja sitoutuu ilmakuplia ympäröiviin kalvoihin, jolloin liukoista denaturoitumatonta proteiinia jää riittämätön määrä veden sitomiseen^{5,26}. Muodostuu liukenemattomia proteiiniaggregaatteja, joilla on hyvin vähän vedensitomiskapasiteettia⁵⁰. Mitä useampia proteiinimolekyylien välisiä sidoksia muodostuu, sitä vähemmän molekyylit kykenevät muodostamaan vetysidoksia vesimolekyylien kanssa. Tietyssä vaiheessa proteiinien vedensitomiskapasiteetti laskee liikaa, jolloin vaahto alkaa vuotaa nestettä. Vaahto menettää tilavuuttaan ja juoksettuu eli neste ja kiinteä aine erottuvat toisistaan.⁴⁹

Ideaali vatkausaika on jossakin näiden kahden ääripään välillä. Vaahtoa pitää vaahdottaa tarpeeksi kauan, jotta muodostuu riittävän vahvat proteiinikalvot ylläpitämään vaahdon rakennetta. Ei kuitenkaan niin kauan, että vesi pusertuu ulos vaahdosta. Tämä optimitila saavutetaan jo ennen kuin vaahdon tilavuus on maksimissaan.⁴⁹ Usein vatkausta neuvotaan jatkamaan niin kauan, että vaahto on tarpeeksi jäykkää muodostaakseen selkeitä piikkejä^{26,49}.

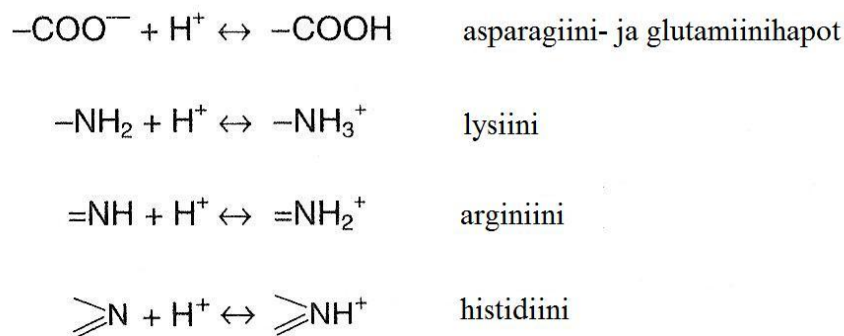
3.6 Valkuaisen vaahtoutumiseen vaikuttavia tekijöitä

Olosuhteet vaikuttavat huomattavasti valkuaisen vaahtoutumiseen. Esimerkiksi vatkaustilalla ja valkuaiseen lisätyillä ainesosilla on merkitystä vaahtoutumisen kannalta. Myös kananmunien tuoreudella on merkitystä. Ruokia valmistettaessa valkuaisvaahtoon lisätään lähes poikkeuksetta muita raaka-aineita, joten lopputuloksen kannalta on oleellista tietää, miten olosuhteet ja lisäykset vaikuttavat vatkausprosessiin ja lopulliseen ruokalajiin.

3.6.1 Hapon vaikutus

Aivan tuoreen kananmunan valkuaisen pH on noin 7,6–7,9. pH kuitenkin nousee säilytyksen aikana jopa 9,7:ään kananmunan kuoren läpi tapahtuvan valkuaiseen liuenteen hiilidioksidin diffuusion takia.³⁷ On kuitenkin havaittu, että hapot ja happojen suolat parantavat valkuaisvaahtojen stabiilisuutta, minkä vuoksi valkuaisvaahtoja valmistettaessa joukkoon lisätäänkin usein viinikiveä eli kaliumbitartraattia (cream of tartar), sitruunamehua tai etikkahappoa^{5,51}. Jo hyvin pienillä määrillä on havaittu olevan merkitystä.⁴⁴

Monien proteiinien aminohappojen sivuketjut sisältävät ionisoituvia ryhmiä, varsinkin asparagiini- ja glutamiinihapot, lysiini, arginiini ja histidiini (Kuva 7)²⁶. Kun näiden ionisoituvien ryhmien varaukset ovat tasapainossa siten, että proteiinin nettovaraus on nolla, heikkenee proteiinien välinen elektrostaattinen hylkimisvoima^{26,52}. Tämän seurauksena proteiinit pystyvät pakkaantumaan tiiviimmin kiinni toisiinsa ilmanesterajapinnoilla ja muodostamaan vahvempia vaahtoa stabiloivia kalvoja⁵². Happoa lisäämällä valkuaisen pH pystytään muuttamaan lähemmäs proteiinien isoelektristä pistettä (Taulukko 1), jolloin varauksettomien proteiinien stabiloiva vaikutus saadaan hyödyksi^{26,52,53,54}.



Kuva 7: Proteiinien hapon vaikutuksesta ionisoituvia ryhmiä. Proteiinien nettovarauksen ollessa nolla proteiinien välinen elektrostaattinen hylkimisvoima pienenee. Kuva muokattu lähteestä 26.

Hapot tekevät valkuaisvaahdoista myös vähemmän alttiita ylikoaguloitumiselle, jolloin vaahdon paakkuuntuminen, kuivuminen ja rakenteen romahtaminen vähenevät⁴⁴. Viinikiven, sitruunamehun tai etikkahapon lisääminen vaikuttavaan valkuaismassaan

puuduttaa pH:n lähelle neutraalia⁵. Vetyionien määrän lisääntyessä joidenkin aminohappojen sivuryhmien reaktiivisuus pienenee (esimerkiksi karboksyyli ryhmien dissosiaatioasteen pienentyessä), jolloin proteiinien sitoutuminen toisiinsa rajoittuu⁴⁴.

pH:n pienentyessä myös esimerkiksi disulfididosten muodostuminen valkuaisen proteiinimolekyylien välille hidastuu^{5,45}. Disulfididokset muodostuvat kahden eri proteiinimolekyylin tioliryhmien (-SH) luovuttaessa vetynsä ja muodostaessaan rikkisillan (-S-S-) molekyylien välille. Kun hapon lisäyksestä johtuen valkuaisessa olevien vetyionien määrä kasvaa, pysyvät proteiinien tioliryhmät kuitenkin pääasiassa muuttumattomina. Näin myös rikkisiltojen muodostuminen vaikeutuu, mikä edelleen vähentää ylivatkauksen riskiä.⁴⁵

Myös vaahdon tilavuuteen on happamuudella joidenkin tutkimusten mukaan havaittu olevan vaikutusta. Esimerkiksi Bovskovan ja Mikovan⁵⁵ tutkimuksessa suurimmat tilavuudet pastörimattomalle valkuaiselle saatiin pH:n ollessa noin 4, jonka läheisyydessä suurimmalla osalla valkuaisen proteiineista on isoelektrinen piste (Taulukko 1), sekä toisaalta pH:n ollessa lähellä neutraalia. Toisissa tutkimuksissa pH:lla puolestaan ei ole havaittu olevan juurikaan vaikutusta vaahdon tilavuuteen tai tulokset ovat olleet poikkeavia^{44,55}.

3.6.2 Lämpötila

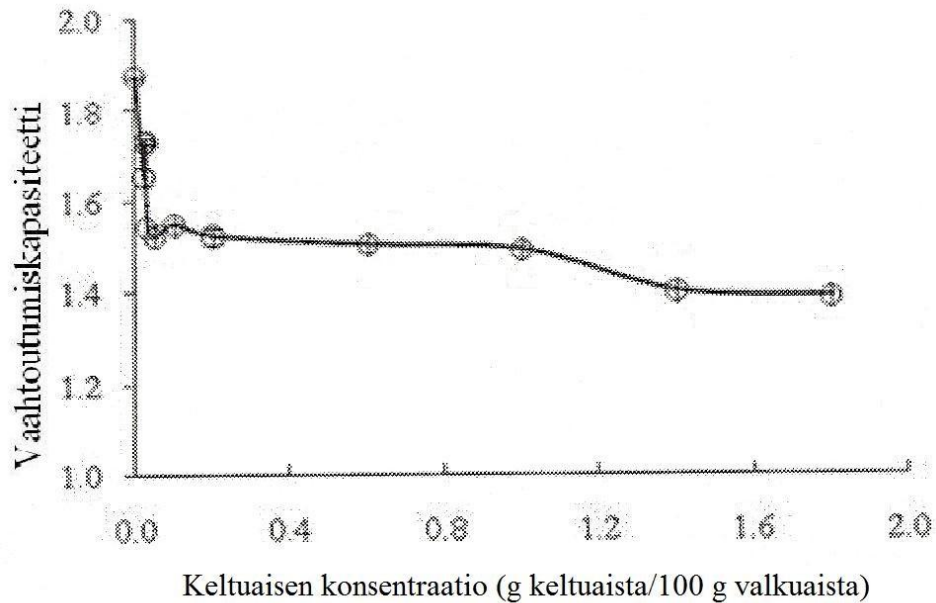
Tutkimusten perusteella valkuaiset vaahtoutuvat helpommin, muodostavat stabiilimman vaahdon ja saavuttavat suuremman tilavuuden huoneenlämmössä kuin alemmissa jääkaappilämpötiloissa^{5,34,44,56}. Tätä voidaan perustella sillä, että lämpötilan nostaminen johtaa pintajännityksen alenemiseen, jolloin suurempi rajapinta-ala on mahdollista saavuttaa^{44,56}.

Toisaalta huoneenlämpötilassa proteiineilla on myös parempi liikkuvuus, toisin sanoen valkuaisen viskositeetti alenee. Vaikka tietty viskositeetti tarvitaankin vaahdon stabilisoimiseen, liian suuri viskositeetti vaikeuttaa vaahtoutumista. Valkuaisvaahtoja valmistettaessa usein suositellaankin käyttämään huoneenlämpöisiä kananmunia.^{26,34} Jääkaappikylmät kananmunat tosin lämpenevät vaahtotettaessa, jolloin ero on käytännössä melko mitätön^{5,45}.

3.6.3 Lipidit

Jopa hyvin pieni lipidikonsentraatio (noin 0,1 %) valkuaisessa vaikuttaa sen vaahtoutumisominaisuuksiin³¹. Hydrofobisuutensa ansiosta lipidit pyrkivät ilmakuplien rajapinnoille ja kilpailevat tilasta proteiinien kanssa^{19,34}. Ilma-nesterajapinnoilla lipidit joutuvat proteiinien koaguloitumisen tielle, jolloin stabiloivien proteiinikalvojen muodostuminen häiriintyy. Koska lipidit itsessään eivät proteiinien tapaan kykene muodostamaan stabiileja kalvoja, vaahdon rakenne heikkenee ja tilavuus jää pienemmäksi.^{19,44,45} Kananmunan keltuaisen vaahtoutumista häiritsevä vaikutus perustuu pääasiassa lesitiinin proteiinien koaguloitumista rajoittavaan vaikutukseen¹⁹.

Kananmunan keltuainen sisältää noin 34 % lipidejä, joista kaksi kolmasosaa on tavallisia eläinrasvoja, neljäsosa fosfori- ja rasvahappojen komplekseja ja noin yksi kahdeskymmenesosa kolesterolia⁵⁷. Jos valkuaisen joukkoon joutuu pienikin määrä keltuaista sitä vaahdotettaessa, vaikuttaa se muodostuvan vaahdon tilavuuteen merkittävästi (Kuva 8). Joidenkin tutkimusten mukaan ainoastaan yksi pisara keltuaista voi vähentää valkuaisvaahdon maksimitilavuutta jopa kahdella kolmanneksella.^{44,58} Muiden rasvojen ja öljyjen vaikutus valkuaisvaahdon tilavuuteen ei ole aivan yhtä radikaali keltuaiseen verrattuna, mutta kuitenkin niin merkittävä, että niiden joutumista vaahdotettavaan valkuaiseen tulee välttää⁴⁴.



Kuva 8: Jo hyvin pieni keltuaiskonsentraatio vaikuttaa valkuaisen vaahtoutumiskapasiteettia selvästi heikentäen. Huomattava ero vaahtoutumiskapasiteetissa huomataan jo, kun keltuaisen pitoisuus on vain 0,022 % (kuvan ensimmäinen lisäys). Kuva muokattu lähteestä 58.

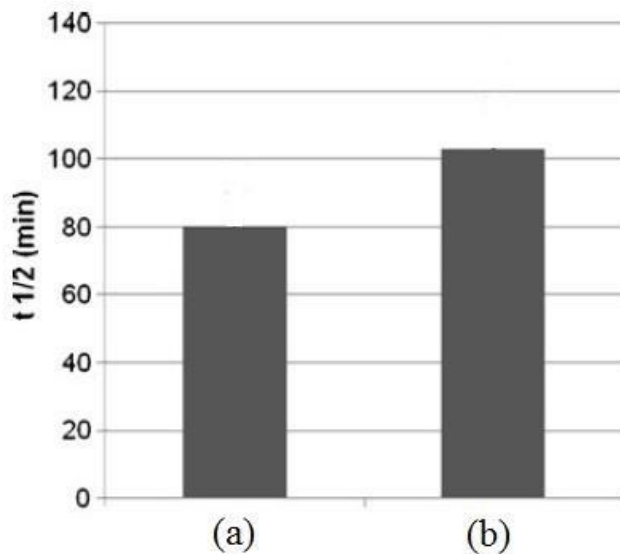
Yksi tapa, jolla valkuaisen proteiinimolekyylit sitoutuvat toisiinsa, on vaahtotuksessa paljastuvien poolittomien hiilivetyosioiden välityksellä.⁴⁴ Näyttää siltä, että jotkut keltuaisen lipoproteiineista sitoutuvat näihin hiilivetyosioihin ja tätä kautta häiritsevät proteiinien kontaktia ilman kanssa ja vaahtoa stabiloivien proteiini-proteiinisidosten muodostumista. Tällöin proteiinien vaahtoa stabiloiva vaikutus jää vajaaksi ja vaahton rakenne heikkenee.^{44,59}

Kun valkuaisvaahto on muodostunut, voidaan se sekoittaa varovasti keltuaiseen tai muuhun rasvaiseen seokseen, sillä valkuaisen proteiinit ovat jo hoitaneet tehtävänsä vaahtonmuodostuksessa. Vaikka vaahton rakenne saattaa tällöin hieman rappeutua, jää siihen huomattavasti enemmän ilmakuplia kuin, jos vatkaus aloitettaisiin suoraan keltuaisten kanssa. Tätä toimintatapaa hyödyntäen esimerkiksi kohokkaiisiin ja sokerikakkuihin saadaan kuohkea rakenne.⁴⁴

3.6.4 Astian vaikutus

Myös sillä on merkitystä, millainen astia valkuaisen vaahdotukseen valitaan. Muovit ovat usein hiilivetyjä, jolloin ne sitovat hyvin poolittomia rasvoja itseensä. Yleensä neuvotaankin käyttämään lasikulhoa muovikulhon sijaan, sillä jopa hyvin puhdistetun muovikulhon pinta on todennäköisesti kontaminoitunut pienillä rasvajäämillä, mikä heikentää vaahdon muodostusta.^{26,44}

Parhaimpana astiana valkuaisen vaahdotukseen pidetään kuitenkin kuparikulhoa. Vaikka vaahdotusaika hieman pitenee, saadaan aikaiseksi stabiilimpi vaahto (Kuva 9) ja ylivatkauksen riski pienenee^{40,41,45}. Valkuaisen proteiinilla, konalbumiinilla, on kyky muodostaa komplekseja kulhosta irtoavien Cu^{2+} -ionien kanssa^{26,41}. Nämä kupari-proteiinikompleksit ovat väriltään keltaisia ja antavat koko valkuaisvaahdolle hieman normaalia kellertävämmän värin.⁴¹



Kuva 9: Valkuaisvaahdon stabiilisuus kasvaa huomattavasti kuparikulhossa vatkatessa. Diagrammissa on vertailtu ruostumatonta terästä olevassa kulhossa (a) ja kuparikulhossa (b) vatkattujen valkuaisvaahtojen puoliintumisaikoja (aika, jonka kuluessa puolet vaahdon massasta on valunut pois). Kuva muokattu lähteistä 5 ja 60.

Jos proteiinien denaturoitumis- ja ryhmittymisprosessit ovat hyvin nopeita, vaahtojen stabiilisuus jää huonoksi. Ohuet kalvot alkavat vuotaa nestettä ja vaahdon rakenne romahtaa. Kun proteiineilla puolestaan on jonkin verran vastustuskykyä denaturoitumiselle, muodostuu stabiilimpia ja pitkäikäisempiä vaahtoja.⁴⁰ Alun perin

kuparikulhon käyttämisen hyötyä valkuaisvaahtoja vatkatessa perusteltiin sillä, että kupari-ionien irrotessa muodostuvat kupari-konalbumiinikompleksit ovat paljon stabiilimpia ja vastustuskykyisempiä denaturoitumiselle kuin proteiinit yksinään^{5,41}. Tämän kompleksien stabiilisuuden selitettiin viivästyttävän proteiinimolekyylien rakenteen purkautumista rajapinnoilla, jolloin ylikoaguloitumisen riskin ajateltiin pienenevän ja vaahdon kestävän paremmin liiallistakin vatkauksesta. Stabiloimalla valkuaisen konalbumiinimolekyyliä kuparikulhon ajateltiin näin stabiloivan samalla koko valkuaisvaahtoa.⁴¹

Myöhemmin muun muassa McGeen tutkimuksissa havaittiin, että myös hopeapäälysteisissä kulhoissa vatkatessa saatiin aikaiseksi yhtä stabiileja vaahtoja, joiden rakenne ei mennyt pilalle liiallisestakaan vatkauksesta. Konalbumiini ei kuitenkaan sido hopeaa, jolloin aikaisempi teoria ei enää ollut aukoton. Sittemmin kuparikulhon käyttämisen hyötyä on perusteltu kuparin (ja toisaalta myös hopean) taipumuksella muodostaa erittäin vahvoja sidoksia valkuaisen proteiinien rikkiryhmien kanssa. Nämä sidokset ovat niin vahvoja, että rikki ei käytännössä enää pysty reagoimaan minkään muun molekyylin kanssa. Näin kuparin läsnäolo estää proteiinien rikkiryhmien välisten vahvojen sidosten muodostumisen, jolloin proteiinien liiallinen kiinnittyminen toisiinsa estyy. Näin ollen kuparikulhossa vatkatessa valkuaisvaahdon ulkomuoto säilyy kiiltävänä eikä rakenne muutu rakeiseksi, vaikka vatkauksesta jatkettaisiin pidemmällekin.⁴⁵

3.6.5 Sokeri

Sokeria lisätään moniin elintarvikevaahtoihin, kuten marenkiin, missä se antaa tukea nestemäisen vaahdon rakenteelle ja huolehtii osittain tai kokonaan dehydratoituneen lopputuotteen rakenteellisesta eheydestä.⁵ Sokerin lisääminen valkuaiseen vaikuttaa pääasiassa kahdella tavalla: vaahdonmuodostusta viivytetään ja vaahdon rakennetta stabiloiden^{5,45,50}.

Kun sokeria on tarpeeksi, joutuvat sokerimolekyylit valkuaisista vaahdotettaessa proteiinien koaguloitumisen esteeksi. Tällöin proteiinien sitoutuminen toisiinsa hidastuu, mikä edelleen vaikuttaa vaahdon muodostumisnopeuteen.⁴⁴ Toisaalta myös irrallisten proteiiniaggregaattien muodostuminen vähentyy, jolloin proteiineja jää enemmän jäljelle kalvojen muodostamiseen ja tätä kautta vaahdon stabiloimiseen⁶¹. Vaahtoutumisen

viivästyminen vaikuttaa myös sokerista aiheutuva jatkuvan faasin viskositeetin kasvu⁵. Tiheämmän massan vaahdottamiseen tarvitaan enemmän energiaa, jolloin vaahdotusaika voi jopa yli kaksinkertaistua^{5,44}.

Valkuaisen proteiinin, ovalbumiinin, käyttäytymistä sokerin kanssa ovat tutkineet muun muassa Antipova, Semenova ja Belyakova. Ovalbumiinin kyky muodostaa vetysidoksia sokerimolekyylien kanssa johtaa proteiinin lisääntyneeseen hydrofiilisyyteen ja samalla sen pinta-aktiivisuuden pienenemiseen.⁶² Tämä aiheuttaa sen, että sokerimolekyyliin sitoutuneet ovalbumiinimolekyylit ensisijaisesti jäävät vaahdon jatkuvaan faasiin ennemmin kuin adsorboituvat rajapinnoille^{50,62}. Näin ollen tällä ovalbumiinin käyttäytymisellä on mahdollisesti myös osaltaan vaikutusta valkuaisen vaahdotumisnopeuteen, vaikka vaahdotumiseen osallistuvat toki muutkin proteiinit ovalbumiinin lisäksi⁵⁰.

Sokerin vaahtoa stabiloiva vaikutus perustuu pääasiassa sekä viskositeetin kasvuun että vetysidosten muodostumiseen sokerimolekyylien ja valkuaisen vesimolekyylien välille. Vaikka sokeri usein hieman pienentää vaahdon tilavuutta, hidastaa se viskositeetin kasvun myötä painovoimasta aiheutuvaa kuivumista, jolloin vaahdon rakenne ei romahda niin helposti.^{29,31,44,45} Erityisesti vaahtoa kuumennettaessa sokerin hyödyt tulevat esille: vetysidosten ansiosta veden höyrystyminen kuplien seinämiltä viivästyy ja proteiineilla, erityisesti ovalbumiinilla, on enemmän aikaa koaguloitua ja vahvistaa vaahtoa ylläpitävää verkostoaan.⁴⁴

Vaahtoruokia valmistettaessa sokerin haitat ja toisaalta hyödyt voidaankin huomioida vatkaamalla valkuaiset ilman sokeria ja lisäämällä sokeri vasta vaahdotuksen loppuvaiheessa juuri ennen uunia. Näin sokeri ei aiheuta vaahdonmuodostuksen viivästyistä, mutta sen stabiloiva vaikutus saadaan kuitenkin hyödyksi. Toisaalta sähkövatkainta käytettäessä sokerin lisääminen jo ennen vaahdotusta saattaa pelastaa ylivatkauksen riskiltä.^{31,44}

3.6.6 Suola

Ruokasuolan lisäämisen sanotaan vaikuttavan vaahdon stabiilisuutta heikentäen. McGeen mukaan NaCl:n vaikutus valkuaisvaahtoon on oletettavasti ei-toivottujen keltaisen lipoproteiinien kaltainen. Suolan positiiviset ja negatiiviset ionit pyrkivät kiinnittymään avautuviin proteiinimolekyyleihin, jolloin proteiini-proteiinisidosten muodostuminen häiriintyy ja proteiiniverkosto heikkenee.^{44,45} Toisaalta suolan vastakkaismerkkiset ionit saattavat kuitenkin suojata varautuneita proteiinimolekyylejä, jolloin sähköstaattinen hylkimisvoima adsorboituneiden ja adsorboitumattomien proteiinien välillä heikkenee. Tällöin proteiinien adsorboituminen ilma-nesterajapinnoille helpottuu.⁵⁰

Kalsiumkloridia käytettäessä Ca^{2+} -ionit saattavat vaikuttaa vaahdon stabiilisuutta parantaen muodostamalla siltoja proteiinien karboksyyliyhdyntöryhmien välillä.³¹

4 YHTEENVETO

Vaahtoja on tutkittu paljon. Tutkimus on kuitenkin jäänyt jokseenkin epäsystemaattiseksi ja varsin kokeelliseksi.¹⁴ Monien vaahtojen, kuten valkuaisvaahdon, rakenne alkaa muuttua minuuttien tai jopa sekuntien kuluttua muodostumisestaan. Tämän vuoksi vaahtojen ominaisuuksia joudutaan usein määrittämään muuttuvissa olosuhteissa, jolloin sekä tutkimusten sisäisten että eri tutkimusten välisten tulosten tulkinta monimutkaistuu.⁶³ Rajallisen stabiilisuuden lisäksi vaahtojen tutkimusta vaikeuttanee niiden komponenttien suuri lukumäärä.

Kuten tässäkin tutkielmassa - proteiinivaahtojen muodostuminen selitetään yleensä vatkauksen ansiosta tapahtuvan proteiinien denaturoitumisen ja koaguloitumisen kautta. Näyttää kuitenkin siltä, että vielä ei ole kehitetty täysin yhtenäistä teoriaa proteiinien stabiloimien vaahtojen muodostumismekanismeille, vaahtoissa ilmeneville rakennemuutoksille tai niiden stabiilisuuteen vaikuttaville tekijöille¹⁸. Erityisesti tiettyjen toiminnallisten roolien kohdistaminen vaahdon yksittäisille komponenteille tuntuu olevan vaikeaa².

Kirjallisuutta tarkastelemalla on ilmeistä, että tietyt proteiinivaahtoja koskevat käsitykset ovat hyvin pysyviä, mikä tutkimusaiheen monimutkaisuuden lisäksi hidastanee proteiinivaahtojen ymmärtämisessä tapahtuvia edistysaskeleita. Aiheesta on olemassa kuitenkin joitakin mielenkiintoisia artikkeleita, jotka tarjoavat vakiintuneista käsityksistä hieman poikkeavia näkökulmia.¹⁸

Viime vuosina on muun muassa osoitettu, että adsorboituneiden proteiinien konformaatio ei välttämättä poikkea niin huomattavasti niiden nesteeseen liuenneesta konformaatiosta, mitä perinteinen malli antaa ymmärtää. Näyttää esimerkiksi siltä, että adsorption yhteydessä tietyillä proteiineilla tapahtuu vain vähäisiä muutoksia sekundäärirakenteessaan. On jopa havaittu, että adsorption yhteydessä β -kaseiini ottaa entistä järjestyneemmän rakenteen, jossa on enemmän β -laskoksia kuin liuenneessa muodossa.¹⁸

Vaikka erilaisten vaahtojen rakenne, muodostumismekanismit ja stabiilisuus poikkeavat huomattavasti toisistaan, keittokirjan ohjeita noudattamalla jokainen meistä pystyy valmistamaan erilaisia vaahtoruokia. Ymmärtämällä vaahtonmuodostusta koskevat peruseriaatteet ja taustalla olevaa kemiaa, ruoanlaittaja pystyy kuitenkin maksimoimaan halutun vaahtoutumiseffektin valmistaessaan elintarvikevaahtoja. Lopputuloksena saadaan näin entistä kuohkeampia ja stabiilimpia vaahtoja. Mitä useammasta komponentista ruokavaahto koostuu, sitä hankalammaksi kaikkien vaahtoon vaikuttavien komponenttien ja ulkoisten tekijöiden huomioiminen muodostuu. Koska valkuaisvaahto on vielä melko yksinkertainen vaahto moniin muihin ruokavaahtoihin verrattuna, pystyy ruoanlaittaja suhteellisen helposti omalla toiminnallaan vaikuttamaan lopputuotteen laatuun.

LÄHTEET

1. Myers, D. *Surfaces, Interfaces and Colloids: Principles and Applications*, 2. p., WILEY-VCH, New York, 1999, s. 298
2. German, J.B. ja McCarthy, M.J. Stability of Aqueous Foams: Analysis Using Magnetic Resonance Imaging. *J. Agric. Food Chem.* **37** (1989) 1321-1324
3. Barham, P., Skibsted, L.H., Bredie, W.L.P., Frøst, M.B., Møller, P., Risbo, J., Snitkjær, P. ja Mortensen, L.M. Molecular Gastronomy: A New Emerging Scientific Discipline. *Chem. Rev.* **110**(4) (2010) 2338-2342.
4. Campbell, G.M. teoksessa *Bubbles in Food 2: Novelty, Health and Luxury*, toim. Campbell, G.M., Scanlon M.G. ja Pyle D.L., Eagan Press, AACC International, Inc., USA, 2008, luku 1, s. 1
5. Vega, C. ja Sanghvi, A. Cooking Literacy: Meringues as Culinary Scaffoldings. *Food Biophysics* **7** (2012) 103-113
6. Fennema, O.R. *Food Chemistry*, 2. p., Marcel Dekker, New York, 1985, s. 303-304
7. Nasa Science, Science News, The Strange Physics of Foam, www-sivusto, NASA, 2011 <http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2003/09jun_foam/> (luettu 11.4.2012)
8. Germain, J.C. ja Aguilera J.M. teoksessa *Bubbles in Food 2: Novelty, Health and Luxury*, toim. Campbell, G.M., Scanlon M.G. ja Pyle D.L., Eagan Press, AACC International, Inc., USA, 2008, luku 11, s. 111
9. Viite 1, s. 295
10. Langevin, D. Aqueous Foams: A Field of Investigation at the Frontier Between Chemistry and Physics. *ChemPhysChem*, **9** (2008) 510–522
11. Adamson, A.W. ja Gast, A.P. *Physical Chemistry of Surfaces*, 6. p., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997, s. 519-521
12. Viite 1, s. 297
13. Viite 1, s. 296
14. Weaire, D. ja Phelan, R. The physics of foam, *Journal of Physics: Condensed Matter* **8** (1996) 9519-9524
15. Viite 1, s. 302
16. Viite 1, s. 303
17. McGee, H. *On Food and Cooking: The Science and Lore of the Kitchen*, 1. p., Scribner, New York, 1984, s. 72-73

18. Wierenga, P.A., Gruppen, H. New views on foams from protein solutions. *Current Opinion in Colloid & Interface Science* **15** (2010) 365-373
19. Belitz, H.-D., Grosch, W., Schieberle, P. *Food Chemistry*, 3. p., M.M. Burghagenin käännös viidennestä saksalaisesta painoksesta, Springer, Berlin, 2004, s. 61-62
20. Viite 1, s. 308
21. Viite 1, s. 306
22. Viite 17, s. 66-67
23. Hammershøj, M., Prins, A. ja Qvist, K.B. Influence of pH on surface properties of aqueous egg albumen solutions in relation to foaming behavior. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **79** (1999) 859–868
24. Viite 6, s. 308
25. Viite 6, s. 305
26. Coultate, T.P. *Food: The Chemistry of Its Components*, 5. p., Royal Society of Chemistry, Cambridge, 2009, s. 184-187
27. Viite 6, s. 309-310
28. Viite 1, s. 299
29. Lau, C.K. ja Dickinson, E. Instability and structural change in an aerated system containing egg albumen and invert sugar. *Food Hydrocolloids* **19** (2005) 111–121
30. Viite 1, s. 300
31. Viite 6, s. 307
32. Baldwin, R.E. teoksessa *Egg Science and Technology*, toim. Stadelman, W.J. ja Cotterill, O.J., 3. p., MacMillan Publishers, Basingstoke, 1986, luku 16, s. 354
33. Viite 6, s. 306
34. Viite 4, s. 7
35. Mine, Y. Recent advances in the understanding of egg white protein functionality. *Trends in Food Science & Technology*, **6** (1995) 225-232
36. McGee, H. *On Food and Cooking: The Science and Lore of the Kitchen*, 2. p., Scribner, New York, 2004, s. 77
37. Viite 19, s. 553-555
38. Powrie, W.D. ja Nakai, S. teoksessa *Egg Science and Technology*, toim. Stadelman, W.J. ja Cotterill, O.J., 3. p., MacMillan Publishers, Basingstoke, 1986, luku 6, s. 101-102
39. Viite 32, s. 355

40. Sagis, L.M.C., de Groot-Mostert, A.E.A., Prins, A. ja van der Linden, E. Effect of copper ions on the drainage stability of foams prepared from egg white. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, **180** (2001) 163–172
41. Viite 17, s. 78-79
42. Viite 19, s. 561-562
43. This, H. *Molecular Gastronomy: Exploring the Science of Flavor*, Columbia University Press, New York, 2006, s. 301
44. Viite 17, s. 75-76
45. Viite 36, s. 103-105
46. Viite 32, s. 353
47. Viite 36, s. 84
48. Viite 36, s. 101-102
49. Viite 17, s. 74
50. Raikos, V., Campbell, L. ja Euston, S.R. Effects of sucrose and sodium chloride on foaming properties of egg white proteins. *Food Research International* **40** (2007) 347-355.
51. Viite 32, s. 359
52. Oldham, A.M., McComber, D.R. ja Cox, D.F. Effect of Cream of Tartar Level and Egg White Temperature on Angel Food Cake Quality. *Family and Consumer Sciences Research Journal*, **29**(2) (2000) 111-124
53. Coultate, T.P. *Food: The Chemistry of Its Components*, 3. p., Royal Society of Chemistry, Cambridge, 1996, s. 117-119
54. Licciardello, F., Frisullo, P., Laverse, J., Muratore, G. ja Del Nobile, M. A. Effect of sugar, citric acid and egg white type on the microstructural and mechanical properties of meringues. *Journal of Food Engineering* **108** (2012) 453-462
55. Bovskova, H. ja Mikova, K. Factors Influencing Egg White Foam Quality. *Czech J. Food Sci.* **29** (2011) 322-327.
56. Viite 32, s. 361
57. Viite 17, s. 63
58. Wang, G. ja Wang, T. Effects of Yolk Contamination, Shearing, and Heating on Foaming Properties of Fresh Egg White. *Journal of Food Science* **74** (2009) 147-156.
59. Viite 43, s. 272

60. Luck, P.J. ja Foegeding, E.A. The Role of Copper in Protein Foams. *Food Biophysics*, **3** (2008) 255-260
61. Rodriguez Patino, J.M., Delgado, M.D.N. ja Fernfindez, J.A.L. Stability and mechanical strength of aqueous foams containing food proteins. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, **99** (1995) 65-78
62. Antipova, A.S., Semenova, M.G. ja Belyakova, L.E. Effect of sucrose on the thermodynamic properties of ovalbumin and sodium caseinate in bulk solution and at air–water interface. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, **12** (1999) 261–270
63. Foegeding, E.A., Luck, P.J. ja Davis J.P. Factors determining the physical properties of protein foams. *Food Hydrocolloids*, **20** (2006) 284–292