LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
School of Engineering Science
Tuotantotalous

Johannes Ruuni

INKREMENTAALISET INNOVAATIOT KALANREHUN FYYSISEN LAADUN KEHITTÄMISESSÄ

Tarkastajat: Dosentti Kalle Elfvengren
Dosentti Lea Hannola

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Engineering Science
Tuotantotalouden koulutusohjelma

Johannes Ruuni

Inkrementaaliset innovaatiot kalanrehun fyysisen laadun kehittämisessä

Diplomityö
2020
82 sivua, 11 kuvaa, 11 taulukkoa ja 1 kaava
Tarkastajat: Dosentti Kalle Elfvengren ja Dosentti Lea Hannola

Hakusanat:
inkrementaalinen innovaatio, prosessi-innovaatio, tuoteinnovaatio, innovaatioprosessi, kalanrehu, ekstruusioprosessi

Kalanrehun fyysiseen laatuun kohdistuneet vaatimukset ovat kasvaneet viime vuosina. Rehun heikko fyysinen laatu saattaa johtaa kalankasvattajan kannalta epätoivottuihin vaikutuksiin, kuten rehun rikkoutumiseen ja muuttumiseen pölyksi, mikä taas vaikuttaa kasvatuksen ravinnekuormitukseen ja kalankasvattajalle jäävään katteeseen.

Tutkimuksen tavoitteena oli löytää keinoja rehun fyysisen laadun parantamiseksi tekemällä muutoksia prosessiin ja kokeilemalla uusia raaka-aineita tuotannossa. Suuntaviivoja muutoksiin haettiin ekstruusioprosessia käsittelevästä kirjallisuudesta. Muutosten vaikutusta tutkittiin kovuuden ja kestävyyden mittauksilla sekä silmämääräisesti rehun fyysistä ulkonäköä arvioiden. Suurimmat muutokset tuotantoon tehtiin ekstruusioprosessissa. Koetulosten perusteella SME:n (Specific Mechanical Energy) kasvatus ja ekstruusioöjyn vähennys kasvattavat rehupelletin kovuutta ja kestävyyttä. Myös jauhatukseen ja kuivuriin tehtiin diplomityössä muutoksia. Jauhatuksen vaikutus jäi epäselväksi, mutta kuivurin säädöt vaikuttivat parantavan rehun laatua. Työssä testattiin myös uusia raaka-aineita. Uudet raaka-aineet kasvattivat rehun kovuutta ja kestävyyttä, mutta vaikutus havaittiin vähäiseksi. Uusilla raaka-aineilla ei näyttänyt olevan vaikutusta rehun ulkonäköön.

Ymmärrys Raisioaquan tuotantoprosessista ja laatuun vaikuttavista tekijöistä kasvoi tämän tutkimuksen seurauksena. Työn tulosten perusteella otettiin käyttöön joitakin hyväksi havaittuja muutoksia kalanrehun valmistusprosessissa. Uusia raaka-aineita taas ei otettu käyttöön, koska niiden vaikutus rehun laatuun suhteessa kustannuksiin oli hyvin vähäinen.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT
School of Engineering Science
Degree Programme in Industrial Engineering and Management

Johannes Ruuni

Incremental innovations in improving physical quality of fish feed

Master's thesis
2020
82 pages, 11 figures, 11 tables and 1 formula
Examiners: Docent Kalle Elfvengren ja Docent Lea Hannola

Keywords: incremental innovation, process innovation, product innovation, innovation process, fish feed, extrusion process

Demands on the physical quality of fish feed have grown during recent years. Poor quality of the feed pellet may lead to unwanted effects for the fish farmer, such as broken pellets and formation of fines. These increase the environmental effects of fish farming, as well as decrease the profits for the fish farmer.

Objective of this master's thesis was to find means to increase the physical quality of the fish feed pellet by making changes to the production process and by testing new ingredients. Changes on the production process were based on literature of extrusion process. Effects of changing the process and ingredients were measured with hardness and durability tests. Most of the changes were performed on the extrusion process. Based on experiments, increasing SME (Specific Mechanical Energy) and decreasing oil addition in extrusion improves the physical quality measurements of the pellet. Changes in milling and drying process were also investigated. Clear effect of changes in the milling could not be determined. However, changes in drying process seemed to improve the quality. New ingredients were also tested in this master's thesis study. These ingredients increased hardness and durability of the pellet, but the effect was mild. Inclusion of new ingredients had no effect on the observed visual quality of pellet.

Understanding of Raisioaqua's production process and factors affecting the pellet quality increased as a result of this master's thesis study. Based on the results of this study, some changes were implemented on the process. New ingredients were not taken in use, since their effects on the physical quality of the pellet were determined to be very mild in comparison to the costs.

ALKUSANAT

Kiitokset kaikille lukuisille ohjaajille, jotka ovat auttaneet minua tähän työhön liittyen. Erityisesti heistä haluan kiittää Susanna Airaksista ja Kalle Elfvengreniä. Kiitän myös Raisioaquaa ja sen henkilökuntaa, jotka antoivat minulle tämän mahdollisuuden näyttää ammatillista osaamistani.

Haluan myös kiittää tyttöystävääni vankkumattomasta tuesta ja rohkaisuista epäilyksen hetkinä, sekä myöskin pahoitella muuttumistani puhuvaksi kalanrehutietokirjaksi. Kiitos myös muulle perheelleni, jotka olette tukeneet minua opiskelutaipaleeni läpi. Ilman teitä en kirjoittaisi näitä sanoja tässä ja nyt.

Raisiossa 24.6.2020

Johannes Ruuni

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO 3
1.1 Työn tausta 3
1.2 Tavoitteet ja rajaus 3
1.3 Tutkimuksen toteutus 4
1.4 Työn rakenne 5
2 INNOVAATIOTOIMINTA JA TUOTEKEHITYS ELINTARVIKETEOLLISUUDESSA 7
2.1 Inkrementaaliset tuote- ja prosessi-innovaatiot 8
2.2 Innovaatiotoiminta ja prosessi kalanrehuteollisuudessa 9
3 KALANREHUN FYYSINEN LAATU JA SEN VAIKUTUKSET 15
3.1 Rehun kovuus, kestävyys ja pölyisyys sekä niiden mittaaminen 16
3.2 Ominaispaino, pullahdusaste, uppoamisnopeus ja rehun kelluminen 18
3.3 Rehun öljyisyys ja öljyn pysyminen sisällä 20
4 KALANREHUN PÄÄRAAKA-AINEET 22
4.1 Tärkkelys 22
4.1.1 Erilaiset tärkkelyslähteet 23
4.1.2 Tärkkelyslähteiden funktionaalisten ominaisuuksien syntyminen 23
4.1.3 Gelatinisoituminen 25
4.1.4 Retrogradaatio 26
4.2 Proteiini 28
4.3 Rasva 29
4.4 Raaka-aineiden vaikutus ekstruusioprosessiin 30
5 KALANREHUN VALMISTUS EKSTRUUSIOPROSESSILLA 31
5.1 Kalanrehun ekstruusioprosessi kirjallisuudessa 33
5.1.1 Jauhatus 33

5.1.2 Lämpötilaprofiilit 34
5.1.3 Kosteus ja sen syöttö 35
5.1.4 Ekstruuderin ruuvikokoonpano 35
5.1.5 SME, ruuvin pyörimisnopeus ja ampeerit 37
6 RAISIOAQUA 39
7 MENETELMÄT 41
7.1 Tuotantoprosessin muutokset 41
7.2 Tärkkelyslähteiden valinta 41
7.3 Laadun mittauksen laitteisto ja menetelmät 43
7.3.1 Kovuustestaus 43
7.3.2 Kestävyystestaus 44
8 REHUN LAADUN KEHITTÄMINEN INKREMENTAALISILLA PROSESSI- JA TUOTEINNOVAATIOILLA 47
8.1 Koeajo 1: Ekstruusioöljyn poistaminen prosessista 47
8.2 Koeajo 2: Ekstruusioöljyn poistaminen prosessista ja uusi ruuvikokoonpano 51
8.3 Koeajo 3: Prosessin lisäsäädöt 55
8.4 Koeajo 4: Ekstruusioöljyn vähentäminen, SME:n kasvattaminen ja jauhatuksen pienentäminen 58
8.5 Koeajo 5: Esigelatinoitujen tärkkelysten kokeileminen ja siihen liittyvä innovaatioprosessi 61
9 Johtopäätökset 65
9.1 Pohdinta 66
9.2 Ehdotukset jatkotoimenpiteille ja suositukset 68
10 YHTEENVETO 69
LÄHTEET 70

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Kalankasvatuksessa vaatimukset kalanrehun fyysiselle laadulle ovat viime vuosina kasvaneet. Kasvattajien pääasiallinen intressi rehun laatuun on taloudellinen, sillä kalankasvatuksen suurin menoerä muodostuu kalanrehusta (Dethlefsen 2017; Sørensen 2012). Mitä suurempi osa rehusta hajoaa ennen kalojen ruokintaa, sitä enemmän rehua menee hukkaan. Rehun heikon fyysisen laadun vaikutus kalankasvattajalle jäävään katteeseen on siis suuri. Hajonnut hukkarehu voi myös päätyä kasvatusympäristöön ja aiheuttaa ympäristöhaittaa. Tämä on vastoin muun muassa yleistä etua ja viranomaisten pyrkimyksiä vähentää vesistöihin kohdistuvaa ravinnekuormaa, mikä saattaa vaikeuttaa esimerkiksi kasvattajan ympäristöluvan saamista.

Työ liittyy Raisio-konserniin kuuluvan kalanrehujen valmistaja Raisioaquan kalanrehun laadun kehitykseen. Työstä tehtiin sekä julkinen että luottamuksellinen versio. Luottamuksellisessa versiossa tuotantoa ja sen kehittämistä on käsitelty tarkemmin.

Raisioaquan asiakkaat ovat olleet Suomelle tyypillisiä, pääsääntöisesti pienehköjä kalankasvatusyrityksiä, ja päämarkkina-alueet ovat olleet Suomi ja Venäjä. Kasvua on viime aikoina haettu mm. Ruotsista ja Puolasta, joissa markkinat ja yksittäiset asiakkaat ovat suurempia ja kilpailua on enemmän. Tämä on johtanut entistä kovempiin vaatimuksiin rehun fyysisen laadun suhteen, jota onkin pyritty viime aikoina parantamaan. Tämä diplomityötutkimus on osa kehitystyötä, joka pyrkii löytämään ratkaisuja rehun fyysisen laadun parantamiseksi.

1.2 Tavoitteet ja rajaus

Työn keskeisin tavoite on luoda kokonaisvaltainen kuva kirjallisuuslähteiden perusteella siitä, kuinka rehun fyysistä laatua voitaisiin parantaa ja myös tehdä kokeellisia koeajoja, jossa kirjallisuuslähteistä tehdyt johtopäätökset pyritään todentamaan tuotanto-olosuhteissa. Rehun fyysisen laadun paranemiseen tähtääviä asioita etsitään pääasiassa sekä ekstruusioprosessiin

tehtävistä muutoksista että uusista raaka-aineista. Ekstruusioprosessin muutokset tulevat johtamaan myös tarpeeseen muuttaa jonkin verran muiden tuotantoprosessin laitteiden säätöjä. Työn lopullinen tavoite on saada aikaan konkreettinen parannus työssä valmistettujen koerehujen fyysisessä laadussa.

Kalanrehun valmistus ekstruusiolla on monimutkainen prosessi. Yhden asian muuttaminen johtaa usein toisiin muutoksiin, mikä taas vaatii lisää muutoksia jne. Tämän lisäksi fyysisen laadun muutokset saattavat vaikuttaa rehun ravinteiden imeytymiseen. Vaikka nämä kaikki asiat pitää kalanrehun valmistumisessa ottaa huomioon, työn liiallisen laajenemisen estämiseksi työ rajattiin koskemaan pääasiassa fyysistä laatua.

Työssä etsitään vastauksia seuraaviin pääkysymyksiin:

- Mitkä säädettävissä olevat tekijät ekstruusioprosessissa vaikuttavat rehun fyysiseen laatuun?
- Minkälaisia muutoksia tuotanto- ja erityisesti ekstruusioprosessiin pystytään tekemään rehun fyysisen laadun parantamiseksi?
- Miten vaaditut muutokset tuotantoprosessiin saadaan käytännössä toteutettua?
- Miten erilaiset raaka-aineet, erityisesti esigelatinoidun tärkkelyksen lähteet, vaikuttavat rehun fyysiseen laatuun?

1.3 Tutkimuksen toteutus

Tutkimustyö alkoi raaka-aineisiin liittyvään kirjallisuuteen tutustumalla. Työssä kokeiltavat tärkkelyslähteet piti saada päätettyä mahdollisimman nopeasti, jotta niitä ehdittiin kokeilemaan ennen seuraavan tuotantokauden alkamista. Tärkkelyslähteiden kirjallisuuskartoituksen ja sopivuuden jälkeen etsittiin valittujen tärkkelyslähteiden valmistajaa, mikä oli kokonaisuudessaan haastava prosessi.

Samanaikaisesti toimittajan etsinnän kanssa tutustuttiin erityisesti kalanrehun ekstruusioprosessiin liittyvään kirjallisuuteen. 2019 kesän aikana löytyneet viitteet ekstruusioprosessin asetusten kehityssuunnasta saivat vahvistusta, jonka seurauksena ensimmäinen koeajo päätettiin tehdä öljyn vähentämisestä ekstruusioprosessissa.

Kirjallisuudesta havaittiin myös, että rehun laadun kannalta kaikkia konkreettisia parametreja ei tuotannossa pystytty seuraamaan. Ekstruudereihin asennettiin uudet ekstruusiomassan lämmön ja paineen mittarit. Lisäksi ekstruuderissa rehumassaan kohdistuvan mekaanisen energian SME-laskelma (Specific Mechanical Energy) saatettiin kuntoon. Ekstruudereihin liittyvää sähköpostikeskustelua käytiin paljon ekstruuderien valmistajien ja prosessikonsulttien kanssa, jotta kirjallisuudesta löytyneille kehitysideoille saatiin lisävahvistusta. Tämän lisäksi Raisioaquan tuotannosta keräämää sisäistä dataa analysoitiin kirjallisuuslähteiden löydösten tueksi. Dataa ei kuitenkaan esitetä työssä.

Tarvittavien toimenpiteiden jälkeen toteutettiin koeajoja tuotannossa. Koeajot koskivat sekä prosessiparametreja että uusia raaka-aineita. Koeajot toimivat kehitysideoiden vahvistuksen lisäksi myös oppimisprosessina, joiden perusteella käytännön ymmärrys prosessista, sen hallitsemisesta ja raaka-aineista parani. Koeajoissa syntyneet rehut arvioitiin fyysisen laadun osalta käyttämällä Raisioaquan fyysisen laadun mittauslaitteistoja sekä silmämääräisesti öljyisyyden ja pölyisyyden arvioimiseksi.

1.4 Työn rakenne

Työ jakaantuu neljään osaan. Ensimmäisessä osassa on johdanto (luku 1), seuraavassa käydään läpi työn sisältämää teoriaa (luvut 2-5), kolmannessa luvussa teoriaa sovelletaan käytännössä (luvut 6-8) ja lopuksi luvussa 9 johtopäätökset, pohdintaa ja ehdotukset jatkotoimenpiteille. Tämän jälkeen luvussa 10 esitetään työn yhteenveto. Tarkemmin työn sisältöä on kuvattu taulukossa 1.

Taulukko 1: Työn sisältö input-output-kaaviona

Input	**Luvun otsikko**	**Output**
Työn taustaa	1 Johdanto	Työn tavoite ja rajaukset
Aiempi tutkimustieto elintarviketeollisuudesta ja innovaatioista	2 Innovaatiotoiminta ja tuotekehitys elintarviketeollisuudessa	Inkrementaaliset tuote ja prosessi-innovaatiot sekä niiden merkitys elintarvikealan yritykselle Kalanrehuteollisuuden innovaatiotoiminta ja uuden tuotteen kehittäminen
Aiempi tutkimustieto kalanrehusta ja kalanrehun fyysisestä laadusta sekä sen mittaamisesta	3 Kalanrehun fyysinen laatu ja sen vaikutukset	Kalanrehu Kalankasvatuksen tulevaisuus Rehun laadun mittaaminen Laatupoikkeamien vaikutukset
Aiempi tutkimustieto kalanrehussa käytettävistä raaka-aineista	4 Kalanrehun pääraaka-aineet	Rehun raaka-aineet ja niiden vaikutus rehun fyysiseen laatuun sekä valmistusprosessiin
Valmistusprosessin kuvaus ja aiempi tutkimustieto kalanrehun valmistuksesta	5 Kalanrehun valmistus ekstruusioprosessilla	Rehun valmistus ja työn kannalta kriittiset osuudet prosessissa sekä näiden prosessiparametrit rehun valmistuksessa
Kehityshanke ja yritysesittely	6 Raisioaqua	Yritys, tuotteet ja aiemmat rehuinnovaatiot Ongelmien kuvaus ja kehityshankkeen tavoitteet
Työn tutkimusmenetelmät	7 Menetelmät	Tuotantoprosessin muutokset Tärkkelyslähteen valintamenetelmä Työssä tehtyjen koerehujen fyysisen laadun mittaus ja arviointi
Kirjallisuuslähteiden, koeajojen ja koerehujen yhteisanalysointi	8 Rehun laadun kehittäminen inkrementaalisilla prosessi- ja tuoteinnovaatioilla	Prosessiparametrien säätämisen vaikutukset fyysiseen laatuun Inkrementaalisten prosessi-innovaatioiden ketjuttamisen vaikutukset Tärkkelyslähteiden vaikutukset fyysiseen laatuun
Aiempien lukujen sisältö Havainnot kehityshankkeesta	9 Johtopäätökset	Analyysi tehdystä tutkimuksesta ja loppupäätelmät Ehdotetut jatkotoimenpiteet
Työn sisältö	10 Yhteenveto	Yhteenveto työstä ja sen tuloksista

2 INNOVAATIOTOIMINTA JA TUOTEKEHITYS ELINTARVIKETEOLLISUUDESSA

Yrityksen innovaatiotoiminta on elintärkeää sen toiminnan ja toiminnan jatkuvuuden kannalta. Harmaakorpi et al. (2012, 7) toteaa yrityksen menestyksen tulevaisuudessa ratkaisevan se, kuinka se tunnistaa markkinoiden, asiakkaiden tai teknologioiden muutoksesta syntyvät uudet liiketoimintamahdollisuudet ja muuntaa nämä onnistuneesti uudeksi liiketoiminnaksi. Tällainen uusi liiketoiminta voi syntyä esimerkiksi tuoteinnovaation pohjalta. Elintarviketeollisuudessa tuoteinnovaatio voi olla uutuus, parannus tai perustavanlaatuinen muutos (Earle 1997). Nämä tunnetaan myös todella uutena innovaationa, inkrementaalisena innovaationa tai radikaalina innovaationa (Harmaakorpi et al. 2012, 19). Uusi innovaatio voi olla Earlen (1997) mukaan olla esimerkiksi uuden maun suklaalevy. Inkrementaalinen innovaatio taas voi olla esimerkiksi pikapurkkikeiton uusi pakkaussuunnittelu. Pakasteruokien kehittäminen aikanaan oli radikaali innovaatio (Earle 1997). Inkrementaalisessa innovaatiossa parannuksia tehdään siis jo olemassa oleviin tuotteisiin, palveluihin ja ne suunnataan olemassa oleville markkinoille (Harmaakorpi et al. 2012, 19). Parannukset voivat kohdistua myös prosesseihin (Mäntyneva 2016). Todella uudessa innovaatiossa epäjatkuvuuksia on teknologiassa tai markkinoissa, mutta ei molemmissa samaan aikaan (Harmaakorpi et al. 2012, 19). Radikaalissa innovaatiossa nämä epäjatkuvuudet taas ovat samanaikaisia (Harmaakorpi et al. 2012, 19).

Yrityksen toiminnan jatkuvuuden kannalta olisi tärkeää, että ainakin jotakin näistä erilaisista innovaatiotyypeistä luotaisiin ja hyödynnettäisiin, jotta kilpailukyky säilyy ja tuottavuutta saadaan kasvatettua. Jos tuottavuutta haluttaisiin lisätä merkittävimmin, niin parhaiten tämä voisi onnistua radikaaleilla innovaatioilla (Mäntyneva 2016). Radikaalit innovaatiot ovat kuitenkin riskipitoisempia verrattuna inkrementaalisiin innovaatioihin ja ne tyypillisesti johtavat myös suurempaan muutosvastarintaan ihmisissä (Mäntyneva 2016). Radikaaleissa innovaatioissa tarvitaan usein myös vahvaa oman tieteenalan ymmärtämistä (Harmaakorpi et al. 2012, 10). Inkrementaalinen innovointi taas on käytäntölähtöisempää (Harmaakorpi et al. 2012, 10, 19). Inkrementaalisen innovointi vaatii siis vähemmän taustatietoa, jolloin myös suurempi osa henkilöstöstä pystyy osallistumaan innovointiin. Suurin osa innovoinnista tapahtuukin inkrementaalisesti (Tidd & Bessant 2005, 13).

2.1 Inkrementaaliset tuote- ja prosessi-innovaatiot

Tuoteinnovaatiossa muutos tapahtuu tuotteissa tai palveluissa, jota yritys tarjoaa. Kun kyseessä on prosessi-innovaatio, muutos tapahtuu siinä, miten tuotteet valmistetaan ja toimitetaan. (Tidd & Bessant 2005, 10) Ne eroavat siis siinä, että toisessa muutos kohdistuu tehtyyn asiaan ja toisessa siihen, miten se tehdään. Nämä saattavat kulkea myös käsikädessä. Inkrementaalinen prosessi-innovaatio saattaa johtaa toteutuessaan inkrementaaliseen tuoteinnovaatioon. Yleisesti ottaen kuitenkin prosessi-innovaatioiden osuus innovaatioiden kokonaismäärästä kasvaa tuotteen elinkaaren loppupäätä kohti, kun taas tuoteinnovaatioiden määrä pienenee (Loch & Kavadias 2008, 30).

Iso osa prosessi-innovaatioista on sellaisen säätämistä ja soveltamista, mikä on kehitetty jossain muualla, ja sen käyttämistä (Tid & Bessant 2005, 54). Sama pätee joissakin tapauksissa myös tuoteinnovaatioihin, mikäli innovaatio ei käytännössä ole suojattavissa. Sekä prosessi-innovaatio että tuoteinnovaatio ovat siis kumpikin tärkeitä yritykselle vähintään ”tasoihin” pääsemiselle, jotta voidaan olla kuluttajalle vähintään yhtä houkutteleva vaihtoehto kuin kilpailija. Innovaatioiden merkitys kutenkin korostuu, kun jotain tehdään ensimmäisenä. On suuri kilpailuetu, että pystytään tekemään jotakin, jota muut eivät pysty tekemään tai tehdään se paremmin kuin kukaan muu (Tidd & Bessant 2005, 6). Tuoteinnovoiminen onkin mennyt entistä enemmän differentioinnin, eli erilaistamisen suuntaan ja tuotteen räätälöintiin, jolla tiettyjen asiakkaiden erityistarpeet täytetään paremmin (Tidd & Bessant 2005, 22).

Yksittäisillä inkrementaalisilla prosessi-innovaatioilla ei välttämättä pystytä saavuttamaan samanlaista kilpailuedun ja tuottavuuden kasvua kuin differentoimalla lopputuotetta tai radikaaleilla prosessi-innovaatioilla. Yksittäiset inkrementaalit innovaatiot ovatkin vaikutukseltaan melko pieniä (Mäntyneva 2012, 38). Jos inkrementaaleja prosessi-innovaatioita kuitenkin ketjuttaa, niiden yhteenlaskettu vaikutus voi olla merkittävä (Mäntyneva 2016).

Kalanrehuteollisuus on osa elintarviketeollisuutta. Tyypillisten elintarvikkeiden ja rehujen tarkoitukset eivät ole kuitenkaan kaikilta osin samoja. Rehujen päätarkoitus on kasvattaa eläintä mahdollisimman nopeasti ja tehokkaasti. Näin ei ole yleensä ihmisille suunnatuilla

elintarvikkeilla. Tästä syystä kalanrehuteollisuuden innovaatioprosessia tulee tarkastella tarkemmin.

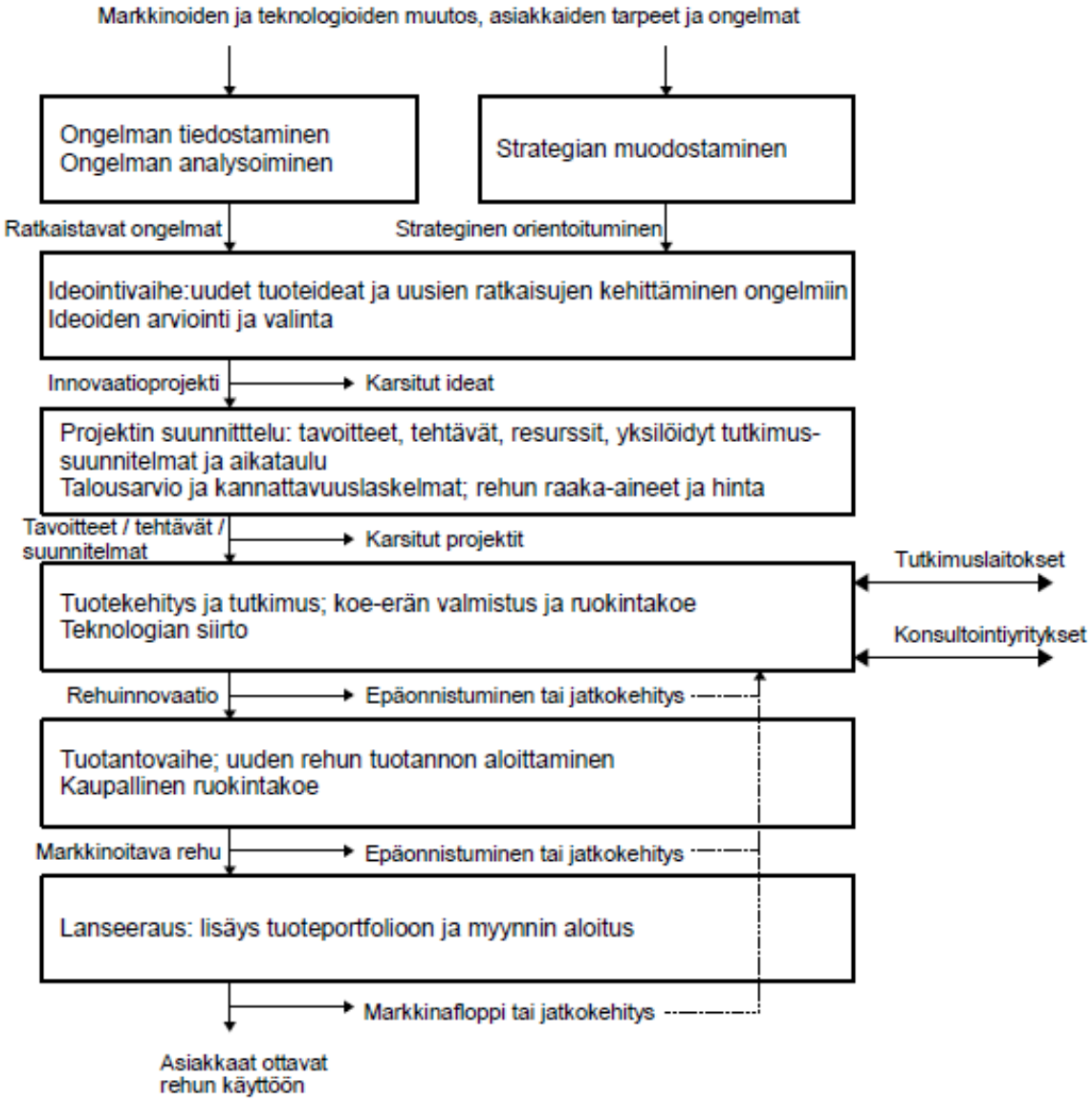
2.2 Innovaatiotoiminta ja prosessi kalanrehuteollisuudessa

Kalanrehu on muuttunut raaka-aineiltaan viime vuosina merkittävästi. Kalajauhon hinta on kasvanut merkittävästi (Tacon & Metian 2008), mikä on vauhdittanut innovaatiokehitystä korvaavien proteiinin ja rasvan lähteiden etsimisessä (Ytrestøyl et al. 2015). Kalajauhoa alettiin korvaamaan esimerkiksi soijalla. Nykyään taas soijalle pyritään löytämään vaihtoehtoisia proteiinin lähteitä muun muassa sen tuotannon kestävyysvaikutusten vuoksi (Hanhinen & Bjurström 2019). Raaka-aineita onkin nykyään aiempien pääraaka-aineiden vehnän, kalajauhon ja kalaöljyn lisäksi nyt yhdessä rehussa moninkertainen määrä. Vaihtelevat reseptit ja kymmenet erilaiset raaka-aineet, joita kotiutetaan aiempaa pienempinä erinä sekä niiden laatuvaihtelut ovat tehneet ekstruusioprosessin hallinnasta entistä haastavampaa. Erilaisilla raaka-aineyhdistelmillä saattaa myös olla ennalta arvaamattomia vaikutuksia. Kaikki nämä ovat johtaneet siihen, että laadussa syntyy helposti vaihteluita.

Raaka-aineiden kasvaneen määrän lisäksi kalanrehun valmistajat ovat viime vuosina kokeneet myös muita muutoksia liiketoimintaympäristössään. Asiakkaat ovat alkaneet siirtyä kalankasvatuksessa entistä edistyneempien ruokintalaitteiden käyttäjiksi. Kalan syöttö syöttölaitteilla on entistä automatisoidumpaa ja toimintaa on saatu tehostettua. Pneumaattiset laitteet kuitenkin käsittelevät pellettejä perinteisiä syöttökanuunoita kovakouraisemmin ja rehujen siirtomatkat putkissa voivat olla hyvin pitkiä. Tämä muutos teknologiassa on johtanut entistä kovempiin vaatimuksiin rehun fyysisen laadun suhteen, jonka vuoksi rehun laadun kehittäminen erilaisella innovaatiotoiminnalla on tärkeää.

Kalanrehuteollisuuden innovaatioprosessin malli on hahmoteltu alla olevassa kuvassa 1. Pohjana siinä on käytetty Vernwornin ja Herstatin (2002) esittelemää innovaatioprosessimallia. Se alkaa muutoksesta, joka tapahtuu joko markkinoilla, teknologian kehityksessä, asiakastarpeissa tai asiakkaan ongelmissa, jota seuraa reagointivaihe. Reagointivaiheen ensimmäisessä polussa jokin konkreettinen ongelma tunnistetaan ja analysoidaan. Toinen polku taas pohjautuu havaintoon tai tarpeeseen markkinoilla, johon vastataan muodostamalla

strategia. Reagointivaiheesta siirrytään ideointivaiheeseen, jossa uusia ratkaisuideoita luodaan ja arvioidaan. Osa ideoista pääsee jatkotarkasteluun. Tämän jälkeen seuraavassa vaiheessa suunnitellaan toteuttamisohjelma sekä tehdään projektin talousarvio ja kannattavuuslaskelmat. Tuotekehitys- ja tutkimusvaiheessa rehusta tehdään koe-erä, jossa sen soveltuvuutta tuotantoon pystytään arvioimaan, minkä jälkeen koe-erärehun vaikutuksia kalan kasvuun ja hyvinvointiin tutkitaan ruokintakokeella. Tuotantovaiheessa uusi rehu on valmis ja sen tuotanto voidaan aloittaa. Tähän saattaa sisältyä vielä uusi kaupallinen ruokintakoe. Lanseerausvaiheessa uusi rehu lisätään yrityksen tuoteportfolioon ja sen myynti voidaan aloittaa.



Kuva 1:Rehuteollisuuden innovaatioprosessi, muokattu lähteestä: (Vernworn & Herstat 2002)

Muutos markkinoissa, teknologiassa tai asiakkaan tarpeissa ja ongelmissa

Muutosten tunnistaminen yrityksen liiketoimintaympäristössä ratkaisee yrityksen tulevaisuuden menestyksen (Harmaakorpi et al. 2012, 7). Tällainen muutos voi olla esimerkiksi vaatimus ympäristölle ystävällisemmistä tuotteista (Tidd & Bessant 2005, 5). Rehujen ympäristöystävällisyys on ollut yksi kalanrehuteollisuuden tärkeimmistä innovaatioajureista kasvaneen ympäristötietoisuuden myötä. Muutos voi olla myös teknologinen, kuten pneumaattiset syöttölaitteet, joka johtaa muutoksiin asiakkaan tarpeissa. Muutos saattaa olla myös uusi asiakas, jolla on poikkeuksellisia tarpeita rehun suhteen.

Reagointivaihe

Kun toimintaympäristössä tapahtunut muutos on tunnistettu, siihen voi vastata kahdella eri tavalla riippuen muutoksen laadusta. Tämä riippuu siitä, onko muutos ratkaistava ongelma vai tilaisuus, johon voi vastata strategisesti. Muutos voi ilmentyä alustavasti vaikka asiakaspalautteena. Tällöin muutoksesta syntynyt ongelma tiedostetaan ja sitä analysoidaan. Tällainen ongelma voisi olla esimerkiksi heikko pelletti tai kalankasvun odottamaton heikkeneminen. Ongelman analysoiminen ei toisinaan ole aivan yksinkertainen asia. Jos esimerkiksi ongelma koskee kalan fysiologiaa, vaikuttavia asioita on runsaasti ja syy-seuraussuhde voi jäädä puutteellisten taustatietojen vuoksi selvittämättä.

Jos tiedostettu muutos ei ole ongelma, vaan esimerkiksi muutos asiakaskunnassa tai markkinassa, niin siihen voidaan vastata strategisesti. Rehuteollisuuden yrityksen asiakas saattaa esimerkiksi ottaa suoraan yhteyttä ja pyytää tietyt ominaisuudet täyttävän uudenlaisen tuotteen.

Ideointi ja ratkaisujen etsiminen

Ideointivaiheessa löydetyn tai havaitun ongelman ratkaisemiseksi tai mahdollisuuden hyödyntämiseksi kehitetään ja etsitään ideoita. Tähän ideointiin voi osallistuu henkilöitä yrityksen useista eri toiminnoista. Ideat käydään läpi. Osa karsitaan, mikäli niitä ei ole mielekästä toteuttaa. Jotkin siirtyvät harkintaan, koska niiden toteuttaminen ei vielä ole

mahdollista tai mielekästä. Jos idea on toteuttamiskelpoinen ja sitä pidetään kaikin puolin järkevänä, se viedään innovaatioprosessissa eteenpäin. Saattaa myös olla, että idea tiedetään taloudellisesti mahdolliseksi toteuttaa ja ymmärrys aiheesta on jo tarpeeksi kattava muun muassa aiempien kokeilujen vuoksi. Tällöin voidaan siirtyä suoremmin valmistusvaiheeseen.

Mikäli reagointivaiheessa muutokseen vastataankin strategisesti, ei pyritäkään ratkaiseman ongelmaa, vaan sitä, miten valittu strategia saataisiin toteutettua. Uudella markkinalla saattaa esimerkiksi olla erilainen hintakilpailutilanne tai laatuvaatimus, jolloin asiakas haluaa vaikka aina edullisimman rehun. Tämä vaikuttaa käytettävissä olevien raaka-aineiden valintaan hinnoittelustrategian kautta.

Projektin suunnittelu

Projektin suunnitteluvaiheessa idean tai ideoiden testaus projektoidaan, eli laaditaan toteuttamissuunnitelma. Luodaan projektin tehtävälista, selvitetään mitä on tiedettävä ja tehtävä, miten ja millä aikataululla, tarvitaanko ulkopuolista tutkimuspalvelua tai konsultaatiota. Jos näitä tarvitaan, selvitetään paljonko nämä maksavat lähettämällä tarjouspyynnöt ja arvioidaan saavutettavaa hyötyä. Tässä vaiheessa projektista tehdään alustava talousarvio ja laaditaan myös mahdollisesta innovaatiosta kannattavuuslaskelma. Selvitetään myös onko innovaatiota mahdollista suojata aineettomilla oikeuksilla. Jos innovaatioprosessi on käynnistynyt esimerkiksi asiakkaan toiveesta saada edullisempi rehu, tutkitaan myös tarkemmin, että pystytäänkö rehua valmistamaan siten, että sekä kalan ravitsemukselliset tarpeet että valmistuksen tavoitteet kustannustehokkuudesta täyttyvät suhteessa raaka-aineiden hintaan.

Tutkimus ja kehitys sekä teknologian siirto

Tässä vaiheessa saatetaan testata erilaisia vaihtoehtoja aiemmin suunniteltujen reseptin reunaehtojen mukaan tai sitten koe-erä valmistetaan koesuunnitelman mukaisesti. Resepti saattaa kuitenkin elää jonkin verran sen elinkaaren aikana, riippuen esimerkiksi raaka-aineiden saatavuudesta ym. Koe-erän valmistuksen yhteydessä myös tuotteen fyysinen laatu testataan. Riippuen innovaatiosta, fyysinen laatu ei tässä vaiheessa ole välttämättä vielä niin oleellinen

asia, mikäli innovaation tarkoitus ei ole parantaa fyysistä laatua. Kun koe-erä on onnistuneesti valmistettu, sillä saatetaan tehdä ruokintakoe. Ruokintakokeessa tarkastellaan usein esimerkiksi kalan kasvua ja jotain muita innovaation kannalta oleellisia muutoksia kalassa. Yritys voi toteuttaa ruokintakokeen itsenäisesti tai tehdä yhteistyötä jonkin tutkimuslaitoksen kanssa. Ruokintakoe paljastaa lopullisesti, pitääkö rehua vielä jatkokehittää.

Innovaatioprosessiin saattaa osallistua muitakin toimijoita tutkimuslaitosten lisäksi. Tällaisia toimijoita ovat esimerkiksi konsultointiyritykset ja muut yritykset, jotka mahdollistavat teknologian siirron. Tällainen teknologian siirto voi esimerkiksi mahdollistaa tuotteiden valmistuksen tuotannossa uudella tavalla.

Tuotantovaihe

Tuotantovaiheessa rehusta tehdään koe-erä, josta nähdään miten valmistus onnistuu käytännössä siten että myös fyysisen laadun kriteerit täyttyvät. Käytännön ongelmia voi syntyä esimerkiksi jo ekstruusiossa pelletin muodostuksessa, mikäli reseptissä on suuri muutos. Valmistettu rehu tarkastetaan fyysisen laadun osalta erilaisilla mittareilla ja muutoksia tarkastellaan verrokkirehuun nähden. Mikäli rehu läpäisee fyysisen laadun testit ja raaka-aineen ravinto-ominaisuudet tunnetaan hyvin tieteellisestä kirjallisuudesta, rehu on valmis myytäväksi. Tarpeen vaatiessa rehulle voidaan tehdä ennen myyntiä vielä lisäksi kaupallisia ruokintakokeita ja pilotteja.

Nämä ruokintakokeet paljastavat lopullisesti, miten hyvin uusi raaka-aine ja rehu sopivat kalan ruokintaan. Mikäli rehu ei läpäise näitä vaatimuksia, niin sen sisältämää uutta raaka-ainetta ei voi ottaa jatkossa tuotantoon tai sen määrää pitää säätää ym. Näiden ruokintakokeiden lisäksi rehulle saatetaan vielä ennen myynnin aloittamista suorittaa kaupallisia pilotteja kalankasvatusyrityksissä laadun varmistamiseksi.

Tuotteen lanseeraus

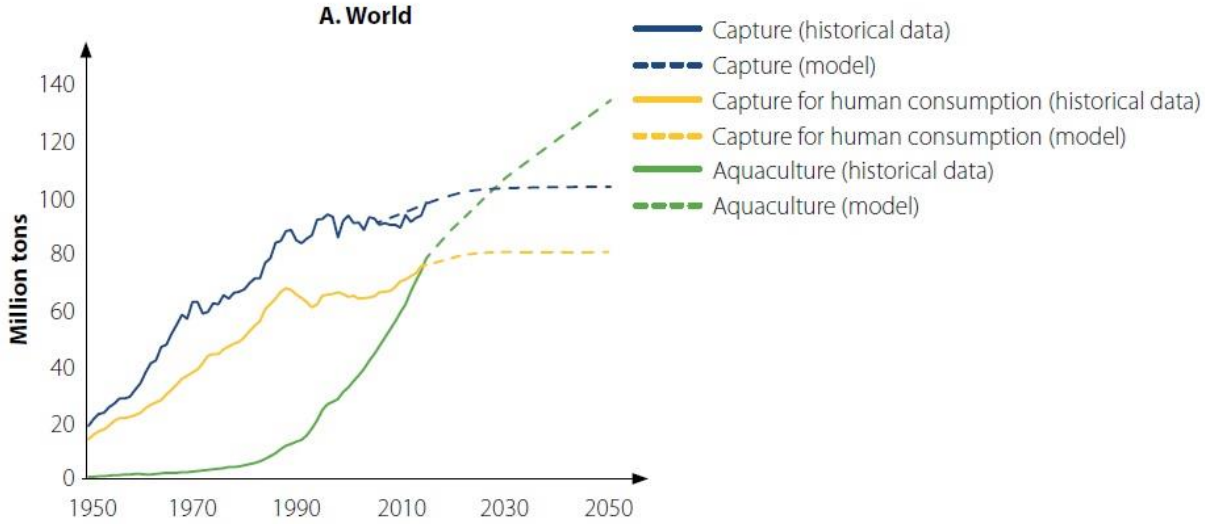
Kun uusi rehu on saatu valmistettua ja siitä on saatu hyvät tulokset ruokintakokeessa, se voidaan lisätä yrityksen tuoteportfolioon ja sen myynti asiakkaille voidaan aloittaa. Tässä vaiheessa uudelle rehulle tehdään myös mahdollisesti markkinointimateriaalit ja rehu hinnoitellaan. Hinnoittelustrategiaan vaikuttaa esimerkiksi markkinoilla jo olevien korvaavien tuotteiden hinta. Mikäli uusi markkina halutaan avata aggressiivisesti, voi rehun hinta uudelle asiakkaalle olla myös normaalia edullisempi. Innovaation toimivuutta myös seurataan ja selvitetään, mikä on innovaation takaisinmaksuaika. Jos uusi kalanrehu pysyy markkinoilla, niin sitä tarvittaessa kehitetään edelleen.

3 KALANREHUN FYYSINEN LAATU JA SEN VAIKUTUKSET

Kalanrehu on kalojen kasvatuksessa käytettävää kalan ruokaa ja se on kasvatettavien petokalojen, kuten kirjolohen, ainoa ravinnon lähde. Se mitä kalanrehuna käytetään ja miten se valmistetaan vaihtelee runsaasti maailmalla toiminnan ammattimaisuuden ym. mukaan. Se saattaa olla esimerkiksi pelkästään pilkottua tuoretta kalaa tai sitten höyrypelletöijällä, ekspanderilla tai ekstruusiolla valmistettuja pellettejä (Dethlefsen 2017; Sørensen 2012). Tässä työssä kalanrehusta puhuttaessa tarkoitetaan ekstruusiomenetelmällä valmistettua pellettimäistä kalanruokaa.

Kalanrehulla voidaan kasvattaa monia eri kalalajeja. Kasvatetut lajit vaihtelevat runsaasti maailmalla riippuen asiakkaiden tarpeesta ja kalalajeille sopivista kasvuolosuhteista. Suomessa kasvatettu kala on pääasiassa kirjolohta ja siikaa.

Maailmalaajuinen trendi on, että kalan kysyntä kasvaa ja tulee kasvamaan ennusteiden mukaan ainakin vuoteen 2030 ja jopa 2050 asti (Chan et al. 2017, kuva 2; The World Bank 2013). Kalan pyynti tulee kuitenkin ennusteiden mukaan pysymään suurin piirtein samalla tasolla (Garcia & Grainger 2005; The World Bank 2013). Tämä johtuu siitä, että pyydystämällä saadun kalan määrä rajoittuu luontaisesti 80 - 100 megatonniin (Garcia & Grainger 2005). Ainut keino siis vastata kysyntään tulee tällöin olemaan kasvatetun kalan osuuden lisääminen. Tämä tulee ilmenemään suoraan myös kalanrehun kasvavana kysyntänä.



Kuva 2: Kalastus ja vesiviljelytuotanto 1950-2050 (Chan et al. 2017)

Rehun laatu on tärkeää rehun valmistajalle esimerkiksi hävikin syntymisen vähentämiseksi, mutta erityisen tärkeää se on asiakkaalle. Kalankasvatuksen kokonaiskustannuksista rehun osuus on kaikista suurin (Dethlefsen 2017; Sørensen 2012). Tällöin esimerkiksi fyysisen laadun ongelmat johtavat asiakkaan kannalta taloudellisiin menetyksiin. Sørensen et al. (2010a; 2011a) mukaan rehun fyysinen laatu riippuu käytetyistä raaka-aineista ja prosessiparametreista. Se tarkoittaa sitä, että rehun fyysisten laatuominaisuuksien kokonaisvaltainen optimoiminen vaatii kattavan ymmärryksen sekä tuotantoprosessista että käytetyistä raaka-aineista ja siitä, miten nämä vaikuttavat toisiinsa.

Tämä työ käsittelee pääasiassa fyysisen laadun parantamista, mutta vähän myös ravitsemuksen laadun parantamista. Kuten muutkin laatutekijät, myös fyysisen laadun vaatimukset syntyvät asiakkaan tarpeista. Alla käydään läpi erilaisia fyysisen laadun tekijöitä sekä laadun vaikutuksia.

3.1 Rehun kovuus, kestävyys ja pölyisyys sekä niiden mittaaminen

Tyypillisesti rehun kovuuden mittarina käytetään tekstuurianalysaattoria ja sen mittaustulos ilmoitetaan newtoneina. Mittari puristaa pellettiä niin kauan, kunnes sen rakenne antaa periksi, jolloin pelletti halkeaa. Kovuuden mittausta ei ole standardisoitu, minkä vuoksi kovuutta mitataan kirjallisuudessa usein eri laitteilla ja erilaisilla asetuksilla (Sørensen 2012). Tästä

johtuen eri tutkimusten kovuusmittauksen tuloksia on hankala verrata keskenään. Kovuuden ajatellaan kuvastavan esimerkiksi sitä, kuinka hyvin pelletti kestää siilossa ja varastossa ulkoista painetta tai miten se pysyy ehjänä ruuvikuljettimessa (Dethlefsen 2017; Sørensen 2012).

Kestävyyttä mitataan usein syöttölaitetta simuloivalla Doris-testerillä (Dethlefsen 2017; Sørensen 2012; Sørensen et al. 2011a). Lisäksi joissakin tutkimuksissa saatetaan käyttää myös esimerkiksi Holmen kestävyystesteriä (Samuelsen et al. 2013; Sørensen 2012; Sørensen et al. 2010a). Doris-testi on norjalaisten kalanrehuyritysten kehittämä, juuri kalanrehulle suunniteltu testausmenetelmä. Sen tarkoitus on simuloida jännitteitä, joita pneumaattiset syöttölaitteet kohdistavat rehuun (Sørensen 2012).

Mikäli pelletin kovuus ja kestävyys on heikko, se hajoaa ja rehun joukkoon alkaa muodostumaan pölyä. Pölyn muodostuminen rehuun saattaa alkaa jo suoraan ekstruuderista ulos tullessa, mikäli ekstruuderin asetukset ovat väärät tai raaka-aineiden laatu on heikko. Tuotantolinja on ensimmäinen vaihe, joka koettelee pellettien kestävyyttä. Pneumaattinen imusiirto, kuljetinhihnat ja ruuvikuljettimet, kuivuri, tippuminen siilon pohjaan ym. rasittavat pellettiä. Erityisesti pölyä tuottaa kirjallisuuden mukaan pelletin leikkurissa syntyvä konkaavi pää, joka on herkkä murtumiselle (Dethlefsen 2017). Pelletit saattavat kuitenkin myös hajota isommiksi kappaleiksi, kuten puolikkaiksi. Nämä hajoavat edelleen pienemmiksi palasiksi muodostaen pölyä.

Pellettejä koetellaan fyysisesti myös varastossa. Säkkejä pinotaan varastossa toistensa päälle ja ne saattavat vaikka joskus kaatua. Joskus pelletit ovat tehtaalta lähtiessään pölyttömiä, mutta kuljetuksen jälkeen asiakkaalle saapuessaan ne ovat hanganneet toisiaan vasten ja muodostaneet runsaasti pölyä (Dethlefsen 2017).

Ennen käyttöä pellettien pitää kestää vielä asiakkaan prosessit. Asiakas laittaa ne usein esimerkiksi omaan siiloonsa. Tämän jälkeen asiakas ruokkii kalat käyttäen siihen esimerkiksi syöttötykkiä, jolla rehut ammutaan sisälle kalankasvatusaltaaseen. Nykyään on myös pneumaattisia syöttölaitteita, jotka vaativat rehulta entistä suurempaa kestävyyttä. Kestävät

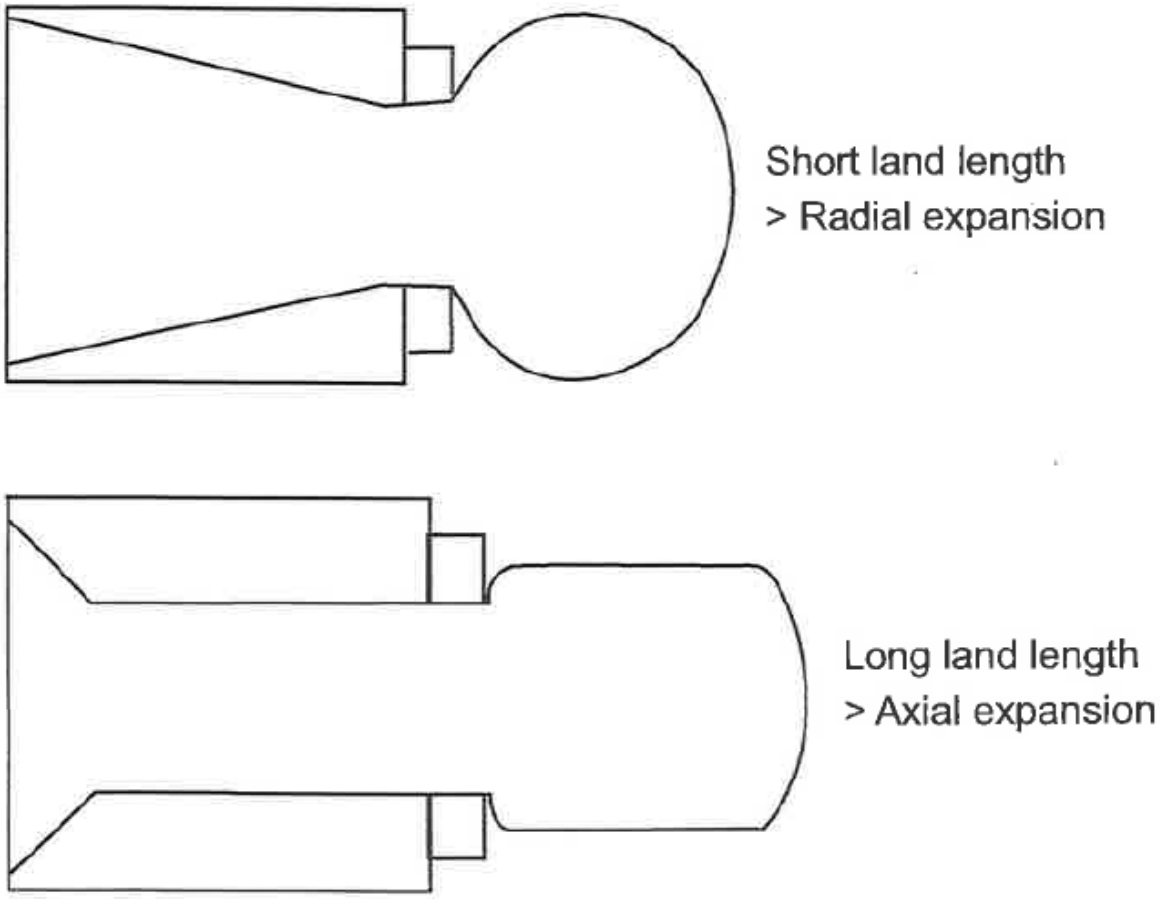
pelletit muodostavat vähemmän pölyä ja pieniä hiukkasia säkityksessä, varastoinnissa ja pneumaattisissa syöttölaitteissa (Sørensen 2012)

Hajonneesta rehusta syntyy hävikkiä, joka ei päädy kalojen ruuaksi. Rehupöly jää pinnalle, eivätkä kalat myöskään pysty syömään sitä. Tällöin rehupölyn sisältämät ravinteet siirtyvät kalankasvattamon ympäristöön. Rehupöly ja sen sisältämä öljy saattaa kulkeutua myös rannalla asuvien rannoille. Tämä saattaa esimerkiksi hankaloittaa asiakkaan ympäristöluvan uusimista. Syöttölaitteessa rehupöly saattaa muodostaa tukoksia rehun sisältämän öljyn kanssa (Aas et al. 2011; Dethlefsen 2017; Sørensen 2012).

3.2 Ominaispaino, pullahdusaste, uppoamisnopeus ja rehun kelluminen

Kun rehumassa tulee ulos ekstruuderin suutinlevystä, paineen äkillinen laskeminen saa rehun pullahtamaan. Rehun pullahdus on kuvattu alla olevassa kuvassa 3. Rehun pullahdusaste, ominaispaino ja uppoamisnopeus liittyvät vahvasti toisiinsa. Mitä pienempi rehun tilavuuspaino on, sitä suurempi sen pullahdusaste on. Toisaalta taas suuri pullahdusaste ei välttämättä tarkoita pientä tilavuuspainoa, mikäli rehuun on lisätty paljon rasvaa jälkirasvauksessa.

Pullahdusasteen optimoiminen on erittäin tärkeää. Suurempi pullahdusaste johtaa pelletin kovuuden ja kestävyyden heikentymiseen, mutta liian vähäinen pullahdus taas liian vähäiseen öljyn imeytymiseen rehuun (Sørensen 2012). Liian vähäinen öljyn imeytyminen johtaa siihen, että rehu ei ole sen spesifikaation mukainen. Rehun pullahdusaste lasketaan siten, että rehupelletin halkaisija jaetaan ekstruuderin suutinlevyn kanavan halkaisijalla, jonka jälkeen lukemasta vähennetään 1. Esimerkiksi 5 mm kanavalla 7 mm pelletin pullahdusaste olisi 0,4 tai 40 %.



Kuva 3: Pelletin pullahdus ekstruusiossa (Riaz & Rokey 2012, 22)

Rehun tilavuuspaino vaikuttaa rehun uppoamisnopeuteen ja kelluvuuteen. Rehun uppoaminen ja uppoamisnopeus ovat tärkeitä, sillä ne vaikuttavat siihen, kuinka kalat saavat hyödynnettyä rehua. Jos rehu esimerkiksi kelluu, linnut pystyvät syömään osan rehusta, mikäli kasvatusallas ei ole suojattu. Toisaalta taas, mikäli rehun tilavuuspaino on liian suuri, niin se uppoaa niin nopeasti, että kalat eivät ehdi syömään sitä kaikkea. Tämä johtaa siihen, että rehua menee hukkaan. Osa kalankasvattajista saattaakin haluta, että esimerkiksi 20 % rehusta kelluu ja 80 % uppoaa, jolloin kalat syövät uppoavat rehut ensiksi ja kelluvat myöhemmin (Dethlefsen 2017).

Tilavuuspaino ei kuitenkaan kokonaan riitä selittämään sitä, jääkö rehu kellumaan vai ei. Tähän vaikuttaa todennäköisesti myös esimerkiksi rehun sisältämä pölyn määrä. Pöly ei välttämättä irtoa pelletin pinnalta hyvin, vaikka se heitetään veteen. Tällöin rehuun pinnalle muodostuu herkemmin ilmataskuja, jotka lisäävät rehuun kohdistuvaa nostetta.

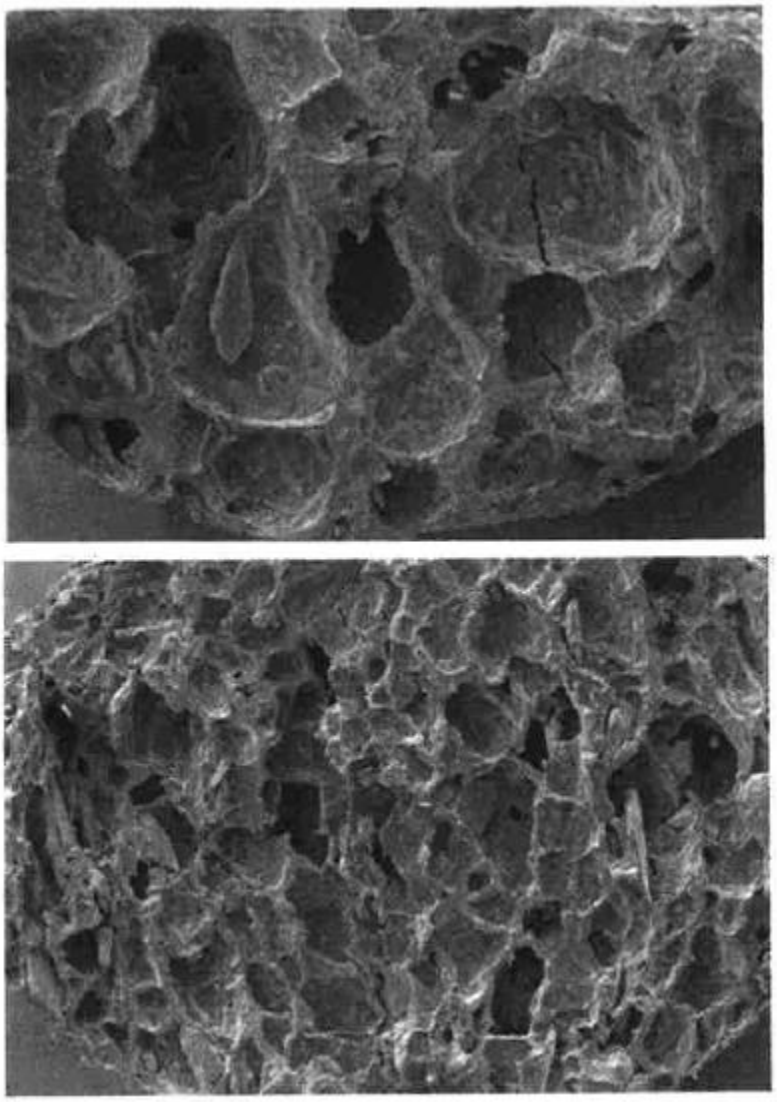
Pelletin muoto saattaa myös erityisesti pienissä rehuissa vaikuttaa rehun kellumiseen. Pääasiassa muoto vaikuttaa pienemmissä, alle 3mm pelleteissä. Kelluminen johtuu osittain pelletin konkaavista pohjan muodosta, joka tehostaa veden pintajännityksen vaikutuksesta syntyvää nostetta. Tällöin ei välttämättä riitä, vaikka pelletin tilavuuspaino olisi suurempi kuin veden. (Dethlefsen 2017)

3.3 Rehun öljyisyys ja öljyn pysyminen sisällä

Kalojen kasvun lisäämiseksi nykyaikaisissa lohikalojen rehuissa öljyn osuus saattaa olla jopa 40 % (Dethlefsen 2017; Sørensen 2012). Tämä on johtanut teknisiin vaikeuksiin sen suhteen, että haluttu määrä öljyä saadaan mahtumaan rehuun, mutta myöskin pysymään rehussa sisällä. Suuresta öljyn määrästä on enemmän haittaa, kuin hyötyä, ellei se pysy rehussa. Se saattaa esimerkiksi tukkia rehupölyn kanssa yhdessä syöttölaitteita (Aas et al. 2011; Dethlefsen 2017; Sørensen 2012). Siitä koituu haittaa kalankasvattajille ylimääräisinä siivouskustannuksina ja laitteiden huoltona. Öljy saattaa työntyä läpi pakatuista säkeistä, jolloin niiden käsittely on epämiellyttävää. Näiden ongelmien lisäksi ulos valunut öljy vähentää rehun kokonaisenergian määrää, mikä heikentää kalojen kasvua.

Kun entistä suurempi määrä öljyä halutaan rehuun, rehun pitää pullahtaa enemmän ekstruusiossa, jolloin sen rakenteesta tulee huokoisempi ja se imee rasvan paremmin. Tämä joidenkin tutkimusten mukaan kuitenkin vaikuttaa kuitenkin negatiivisesti pelletin kovuuteen ja kestävyyteen (Draganovic et al. 2011; Sørensen 2012). Vaikka haluttu määrä öljyä saataisiin pellettiin, se ei välttämättä pysykään sen sisällä. Tähän vaikuttaa ulkoiset tekijät, kuten korkea säilömislämpötila, mutta myöskin pelletin raaka-aineet ja siihen syntynyt mikrorakenne (Dethlefsen 2017; Kearns & Rokey 2014; Sørensen 2012; Sørensen et al. 2010a; 2011a; b).

Pelletin mikrorakenteeseen pystytään vaikuttamaan raaka-aineilla ja ekstruuderin asetuksilla (Dethlefsen 2017; Draganovic et al. 2013; Kearns & Rokey 2014; Riaz & Rokey 2012, 103)



Kuva 4: Pellettien mikrorakenne (Riaz & Rokey 2012, 103)

Yllä olevassa kuvassa 4 on kaksi erilaista mikrorakennetta pelletissä, jonka raaka-aineet ovat samat. Alemmassa rakenteeseen on vaikutettu ekstruuderin asetuksilla nostamalla ruuvin massaan kohdistamaa energiaa (SME:tä). Alemman pelletin mikrorakenteen voitaisiin päätellä Kearnsin ja Rokeyn (2014) perustella pitävän paremmin öljy sisällään ja pärjäävän paremmin rehun fyysisen kestävyyden testeissä.

4 KALANREHUN PÄÄRAAKA-AINEET

Lohikalan tärkeimpiä rehun raaka-aineita on noin 10 - 20. Tämän lisäksi rehussa käytetään rehun koostumuksen kannalta pienemmässä osassa olevia raaka-aineita. Pääraaka-aineet voidaan jakaa esimerkiksi proteiinien, tärkkelyksen ja rasvan lähteisiin. Niiden määrä, laatu, osuudet ym. vaikuttavat pelletin fyysiseen ja ravitsemukselliseen laatuun (Riaz & Rokey 2012, 43-54; Sørensen 2012). Pääraaka-aineiden lisäksi rehuun lisätään myös kalan tarvitsemia muita ravinteita, kuten aminohappoja, vitamiineja, hivenaineita ja esimerkiksi astaksantiinia, josta viljellyt lohikalat saavat punasävyisen värinsä (Dethlefsen et al. 2016). Raaka-aineiden vaikutus rehupelletin kovuuden kehittymisessä vaihtelee käytettyjen raaka-aineiden mukaan (Draganovic 2011; Sørensen et al. 2010a; 2011a). Lisäksi kasvi- ja eläinraaka-aineiden laatu vaihtelee kasvuolosuhteiden ja vuodenajan ym. mukaan (Eliasson et al. 1995; Sharma et al. 2019, 3). Niiden imeytymisessä kalaan ja maittavuudessa on myös eroja. Raaka-aineiden valinta onkin tasapainottelua rehun fyysisen laadun, ravinto-ominaisuuksien ja hinnan välillä.

4.1 Tärkkelys

Tärkkelyksen päätarkoitus petokalojen rehussa on toimia pelletin ainesosien sitojana (Sørensen et al. 2010a). Ilman tärkkelystä pelletti olisi huomattavasti haastavampi valmistaa siten, että se pysyisi ehjänä alkaen tuotannosta aina kalan vatsaan asti. Tärkkelys on tärkeä osa pellettiä sitomiskyvyn lisäksi myös siksi, että se kykenee turpoamaan ekstruusiossa. Turvotessaan tärkkelyksen rakenne muuttuu huokoisemmaksi. Tämän tärkkelyksen ominaisuuksien vuoksi pellettiin saadaan imeytettyä suuria määriä lohikalojen tarvitsemaa rasvaa, mikä on tärkeä ravinnon lähde niille.

Lohikalat pystyvät jonkin verran hyödyntämään tärkkelystä ravintona, mutta kuitenkin heikommin verrattuna rasvaan tai proteiiniin. Tämä johtuu esimerkiksi siitä, että ne ovat luonnostaan lihansyöjiä, jonka vuoksi niiden ruoansulatustoiminta ei sovellu niin hyvin kasviperäisten ainesosien hajottamiseen. Tästä syystä tärkkelyksen osuutta rajoitetaankin noin 10 prosenttiin lohikalojen rehussa (Sørensen et al. 2010a). Luontaisesti kasvipohjaista ravintoa hyödyntävät kalalajit taas pystyvät hyödyntämään tärkkelystä huomattavasti tehokkaammin ja tärkkelyksen osuus voikin tällöin olla suurempi (Kanmani et al. 2018).

4.1.1 Erilaiset tärkkelyslähteet

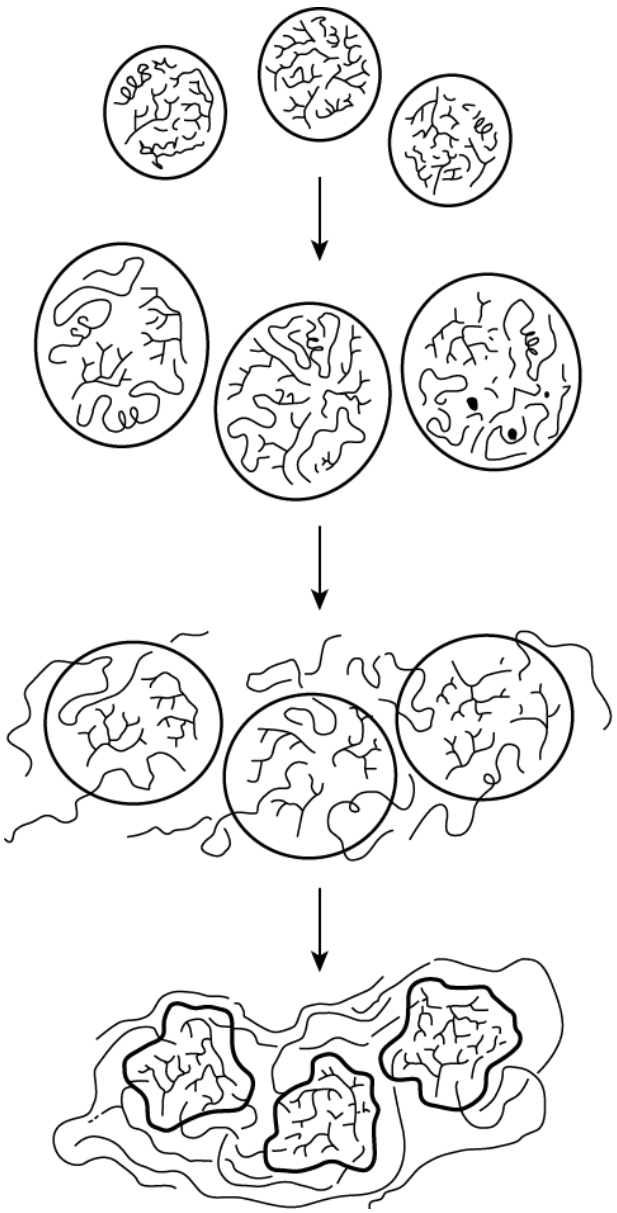
Kalanrehussa tyypillisiä tärkkelyksen lähteitä ovat erilaiset viljat, mukulat ja palkokasvit (Aas et al. 2019; Adamidou et al. 2009; Morken et al. 2011; Sørensen et al. 2010a; 2011a; 2011b). Yleisin käytetyistä viljoista lohikaloihin liittyvissä tutkimuksissa on vehnä. Vehnää pidetään erinomaisena, sillä se on halpaa ja se toimii hyvin tärkkelyspohjaisena sitojana rehussa. Mukulakasvien käyttö ei ole niin yleistä, mutta esimerkiksi perunan käytöstä sitojana on jonkin verran lupaavia tutkimuksia fyysisen laadun suhteen (Rodríguez-Miranda et al. 2012; Sørensen et al. 2010a). Palkokasveja käytetään usein rehussa proteiinin lähteinä, mutta myös esimerkiksi hernettä ja härkäpapua vehnän korvaavana tärkkelyksen lähteenä on tutkittu (Adamidou et al. 2009; Sørensen et al. 2011a).

Tärkkelyslähteet vaihtelevat toisiinsa nähden ominaisuuksiltaan hyvin runsaasti. Osa soveltuu kalanrehun raaka-aineeksi paremmin kuin toiset. Vaihtelua esiintyy runsaasti myös saman kasvin eri lajikkeiden välillä (Katyal et al. 2019; Ratnayake et al. 2002). Myös kasvuolosuhteet saattavat vaikuttaa tärkkelyksen ominaisuuksiin (Eliasson et al. 1995). Tällöin myös sitomisominaisuudet pelletissä vaihtelevat kasvuolosuhteiden, kuten vuodenajan ja kosteuden ym. mukaan. Näistä syistä käytetyn tärkkelyslähteen valinta kannattaa toteuttaa huolellisesti, jotta rehulle saadaan aikaiseksi halutut laatuominaisuudet.

4.1.2 Tärkkelyslähteiden funktionaalisten ominaisuuksien syntyminen

Tärkkelyslähteet eroavat ominaisuuksiltaan runsaasti toisiinsa nähden (Chen et al. 1998; Liying et al. 2019; Jane et al. 1999). Niiden ominaisuuksien erot johtuvat suurimmaksi osaksi geneettisistä eroista eri lajien ja lajien variaatioiden välillä, mutta myös kasvuolosuhteet voivat vaikuttaa ominaisuuksiin. Kun eri lajeja, variaatioita ja eri kasvuolosuhteissa kasvaneita tärkkelyslähteitä tarkastellaan, niissä voidaan havaita eroavaisuuksia muun muassa tärkkelyksen amyloosin ja amylopektiinin suhteessa, rakeiden koossa ja mallissa, muiden makroravinteiden määrässä, mikroravinteiden määrässä ynnä muuta. (Katyal et al. 2019; Sørensen 2012; Schirmer et al. 2013). Nämä erot vaikuttavat tärkkelyksen funktionaalisiin ominaisuuksiin kalanrehun valmistuksessa (Sørensen 2012).

Tärkkelys koostuu pääosin amyloosista ja amylopektiinistä (Ratnayake et al. 2002). Amyloosi- ja amylopektiinimolekyylit ovat polysakkarideja, eli ne koostuvat yhteen liitetyistä monosakkarideista, eli tärkkelyksen tapauksessa glukoosiyksiköistä. Amyloosin ja amylopektiinin suhde vaikuttaa tärkkelyksen käyttäytymiseen prosessoinnissa ja lopputuotteen ominaisuuksiin (Talja 2007).



Raakoja tärkkelysrakeita, jotka koostuvat amyloosista (kierteiset osat) ja amylopektiinistä (haarautuneet osat).

Veden lisääminen rikkoo amyloosin kristallirakenteen ja sekoittaa kierteitä. Rakeet turpoavat.

Lämmön ja veden kasvattaminen lisää johtaa suurempaan turpoamiseen. Amyloosi alkaa valua ulos rakeista.

Rakeet sisältävät nyt pääosin amylopektiiniä. Ne ovat painuneet kokoon ja amyloosigeeli ympäröi niitä.

Kuva 5:Gelatinisoituminen (Forte & Young 2018)

4.1.3 Gelatinisoituminen

Mikäli tärkkelyksen sitovat sekä muut funktionaaliset ominaisuudet halutaan aktivoida, tärkkelys pitää gelatinisoida (Sørensen et al. 2010). Gelatinisoitumisprosessi on kuvattu yllä olevassa kuvassa 5. Tärkkelys pitää gelatinisoida, jotta se imeytyy lohikalojen ruuansulatuksessa (Storebakken et al. 2015). Gelatinisoimaton tärkkelys johtaa myös esimerkiksi rasvan huonompaan imeytymiseen (Storebakken et al. 2015).

Gelatinisoituminen käynnistyy, kun tärkkelystä kuumennetaan vedessä. Tällöin sen kristallirakenne alkaa muuttumaan. Tärkkelysrakeet imevät itseensä vettä ja ne alkavat turpoamaan. Suuremmat tärkkelysrakeet alkavat gelatinisoitumaan ensimmäisenä. Amyloosi sulaa ja alkaa valumaan ulos rakeista muodostaen geelimäisen rakenteen, jossa rakeet ovat sisällä. Tällöin rakeisiin jää pääosin enää amylopektiiniä. Mikäli kuumennusta jatketaan entisestään myös amylopektiini sulaa. Lopputuloksena täydellisessä gelatinisaatiossa tärkkelysrakeet ovat kaikki sulaneet ja kristallirakenne on hajonnut kokonaan.

Mitä suurempi amyloosin määrä tärkkelyksessä, sen haastavampi tärkkelys usein on gelatinisoida. (Fredrikkson et al. 1998; Hegenbert 1996; Schirmer et al. 2013). Jos siis haluttaisiin gelatinisoida tärkkelys helpoiten, kannattaisi valita tärkkelyksen lähde, jossa amyloosi on alhainen. Amyloosi kuitenkin taas parantaa joitakin tärkkelyksen haluttuja funktionaalisia ominaisuuksia, kuten Aoki et al. (2012) mukaan sen kovuutta.

Gelatinisoitumista vaikeuttaa tärkkelyksen sisältämät lipidit (Schirmer et al. 2013). Ekstruusiossa gelatinisoituminen heikentyy myös, jos kuivamassassa ylipäätään on paljon rasvaa (Lin et al. 1997). Heikko gelatinisoituminen johtaa siihen, että tärkkelyksen sitomisominaisuudet eivät aktivoidu ja pelletistä tulee heikko. Tästä syystä ekstruusiotuotteeseen rasva tulisi lisätä vasta ekstruusion jälkeen (Riaz & Rokey 2012, 52). Jos kuivamassassa on paljon rasvaa, tulisi esim. lämpötilaa kasvattaa gelatinisoitumisen parantumiseksi (Sorensen 2012). Gelatinisoitumiseen vaikuttaa myös muutkin ainesosat. Näitä voivat olla esimerkiksi tärkkelysseokseen lisättävät tai niiden valmiiksi sisältämät suolat (Waterschoot et al. 2015).

Tärkkelyksen kypsymistä ekstruusiossa kuvataan puhumalla gelatinisaatiosta ja gelatinisaatioasteesta. Todellinen gelatinisoituminen on kuitenkin saavuttamattomissa ekstruusiosysteemillä, koska todellisen gelatinisoitumisen vaatima veden määrä on ekstruusiossa liian alhainen, jolloin kyse onkin tärkkelyksen sulamisesta tai kypsymisestä (Sørensen 2012). (Forte & Young 2018) Kirjallisuudessa kuitenkin yleensä puhutaan gelatinisaatiosta ja sen viitataan olevan rehuissa 73-100% (Sørensen 2012).

Kaupallisesti on tarjolla sellaisia tärkkelyksiä, jotka on jo etukäteen jollakin keinolla gelatinisoitu. Näitä kutsutaan kylmäliukoisiksi tai esigelatinisoiduiksi tärkkelyksiksi. Kun gelatinisoituminen ekstruusiossa on puutteellista kirjallisuuden perusteella, niin mahdollisesti tästä johtuen esimerkiksi Sørensen et al. (2010) ja Rodríguez-Miranda et al. (2012) tekemissä tutkimuksissa tällaiset esigelatinisoidut tärkkelyksen lähteet kalanrehun raaka-aineena pärjäävät erityisesti fyysistä laatua mitattaessa paremmin.

4.1.4 Retrogradaatio

Kun tärkkelys on gelatinisoitunut, siinä käynnistyy retrogradaatioksi kutsuttu ilmiö. Retrogradaatiossa gelatinisoitunut tärkkelys alkaa uudelleenkristallisoitumaan (Schirmer et al. 2013; Wang et al. 2015). Tämä johtaa sen kovettumiseen (Wang et al. 2015). Lopullinen rakenne ei kuitenkaan vastaa alkuperäistä tärkkelyksen rakennetta. Uudelleenkristallisoituminen johtaa myös synereesiksi kutsuttuun ilmiöön, jossa vesi alkaa vuotaa ulos sen rakenteesta (Wang et al. 2015).

Retrogradaatiosta ja gelatinisoitumisesta hyvä käytännön esimerkki on leivän valmistus ja sen säilöntä. Kun kostea leipätaikina laitetaan kuumaan uuniin, sen sisältämän tärkkelyksen gelatinisoituminen kiihtyy. Kun leipä on valmis, sen sisältämä tärkkelys on suurelta osin gelatinisoitunut. Uunista ulos tulessaan leipä alkaa jäähtymään ja retrogradaatio kiihtyy. Leipä on tällöin vielä pehmeää. Sen rakenne alkaa kuitenkin muuttumaan, koska tärkkelys alkaa uudelleenkristallisoitumaan ja synereesi työntää vettä ulos leivästä. Tätä voidaan rajoittaa laittamalla leipä pussiin tai lisäämällä valmistuksessa taikinaan retrogradaatiota heikentäviä ainesosia. Vanhassa leivässä retrogradaatio ja tärkkelyksen uudelleenkristallisoituminen on tullut päätökseen. Leipä on sen seurauksena kovaa ja kuivaa.

Amyloosi ja amylopektiini retrogradoituvat eri tavoilla. Miles et al. (1985) mukaan amyloosi alkaa retrogradoitumaan amylopektiiniä nopeammin ja se saavuttaa lopullisen kristallirakenteensa ja kovuutensa aiemmin, kun taas amylopektiinin retrogradoituminen kestää kauemmin ja sen lopullisen kristallirakenteen muodostuminen saattaa kestää useita viikkoja. Amyloosin kristallisaatio on myös usein voimakkaampi kuin amylopektiinillä. Tästä johtuen tärkkelyksen korkea amyloosipitoisuus johtaakin tärkkelyspohjaisen tuotteen rakenteen lujittumiseen (Talja 2007). Retrogradaatioon vaikuttaa myös tärkkelysmolekyylin ketjun pituus ja haarautuminen (Jane 1999; Chen 1990). Haarautuneet pitkäketjuiset amylopektiinimolekyylit saattavatkin retrogradoitua yhtä tehokkaasti amyloosimolekyyleihin verrattuna (Jane 1999).

Retrogradaation alkamiseen vaikuttaa paljon se, missä lämpötilassa tärkkelystä säilytetään ja paljonko se sisältää kosteutta. Nopeimmillaan retrogradaatio on alhaisessa lämpötilassa. Tämä tarkoittaisi esimerkiksi sitä, että mikäli tärkkelys halutaan saada kovetettua mahdollisimman pian tuotannossa, jäähdytys on tärkeää.

Vaikka amyloosi kovettaakin pelletin rakennetta, niin myös amylopektiini on tärkeää pelletin rakenteelle ekstruusiossa vähintään siitä syystä, että suuren amyloosin omaavat tärkkelykset on hankala gelatinisoida. Amylopektiiniin määrän lisääntyminen myös saattaa johtaa suurempaan pelletin pullahtamiseen (Hegenbart 1996). Kirjallisuus tästä on kuitenkin ristiriitainen, sillä toisaalta Riaz (2000, 130); Riaz & Rokey (2012, 48), Chinnaswamy & Hanna (1988) ja Della Valle et al. (1997) toteavat amyloosin määrän kasvattamisen lisäävän ekstruuderilla valmistettavan tuotteen pullahtamista. Pullahtamista tarvitaan monessa elintarviketeollisuuden tuotteessa, kuten vaikka muroissa, mutta on myös erittäin tärkeää kalanrehussa, koska se mahdollistaa suuren rasvan määrän imeyttämisen rehuun. Sekä amylopektiiniä että amyloosia tarvitaan tärkkelystä sisältävään optimaaliseen rehupellettiin vähintään gelatinisoitumista ajatellen. Tärkkelystä sisältävässä ekstrudoidussa tuotteessa näiden haluttu suhde voikin olla tärkeä määrittää (Hegenbart 1996).

4.2 Proteiini

Proteiinin merkitys kalan kasvussa on suuri. Alun perin proteiinin lähteenä kalanrehussa on käytetty lähinnä kalajauhoa. Kalajauho on kaloille luontainen proteiinin lähde, ja sillä on lisäksi suuri merkitys kalanrehupelletin fyysiseen laatuun (Draganovic et al. 2011). Paine korvaaville raaka-aineille voidaan päätellä olevan viime vuosina kasvanut, koska kalajauhon hinta on vuodesta 2000 vuoteen 2020 mennessä noussut vajaan 300 %:ia (Indexmundi 2020). Lisäksi merten kalakannat eivät ole enää niin kestävällä pohjalla, joten tarve myös ekologisesti kestävämmille vaihtoehdoille on kasvanut. Kalajauhon käyttö rehussa voi kuitenkin olla myös ympäristöystävällistä, koska lähialueen kalajauhoa käyttämällä kalanviljelyn ravinnekuormitusta pystytään jopa vähentämään (Setälä et al. 2015; Sitra 2017). Kuitenkin hintavaikutusten vuoksi kasvipohjaisten ja muiden eläinproteiinien määrä rehussa on kasvanut. Kalanrehussa käytetään nykyään runsaasti useista eri lähteistä peräisin olevia proteiineja perinteisen kalajauhon lisäksi. Näitä ovat esimerkiksi teurasjätteestä valmistettu kana- ja verijauho (Lu et al. 2015). Rehuun laitetaan myös kasvipohjaisia proteiinin lähteitä kuten esimerkiksi soijaa ja härkäpapua (Aas et al. 2019). Muitakin kasvi- ja eläinpohjaisia lähteitä tutkitaan ja käytetään rehussa (Aas et al. 2019; Draganovic 2013; Tyapkova et al. 2016; Kraugerud et al. 2011). Niiden vaikutukset rehun laatuominaisuuksiin vaihtelevat verrattuna perinteisesti käytettyyn kalajauhoon (Draganovic 2013; Tyapkova et al. 2016). Hyviä tuloksia vaihtoehtoisten proteiinin lähteiden sisältämän proteiinin imeytymisen suhteen on myöskin saatu (Lu et al. 2015). Kalajauhoa pystyykin jonkin verran korvaamaan vaihtoehtoisilla proteiineilla ilman, että se vaikuttaa kalan kasvuun (Johnsen et al. 2011).

Vaikutukset rehun fyysiseen laatuun

Erilaiset proteiiniraaka-aineet ja niiden käsittelymenetelmät vaikuttavat niistä valmistettavan kalanrehun laatuun (Draganovic 2013; et al. 2011, Riaz & Rokey 2012, 43-36; Tyapkova et al. 2016). Proteiinit saattavat parantaa tuotteen fyysistä laatua tai olla juurikaan vaikuttamatta siihen (Riaz & Rokey 2012, 42). Tämä johtuu esimerkiksi niiden erilaisesta koostumuksesta. Jotkin proteiinit liukenevat hyvin veteen, jolloin ne voivat vaikuttaa tuotteen rakenteeseen positiivisesti ja täten olla funktionaalisia. Heikosti vesiliukoiset proteiinit taas ovat yleensä epäfunktionaalisia eivätkä täten paranna tuotteen fyysisiä laatuominaisuuksia.

Hyvin vesiliukoisia proteiineja ovat useimmiten erilaiset kasviproteiinit (Riaz & Rokey 2012, 44). Ne tekevätkin pelletistä usein kovempaa (Draganovic 2013; et al. 2011). Vaikka jotkin eläinproteiinit ovat hyvin vesiliukoisia, niin niiden käsittelyprosessi usein heikentää niiden ominaisuuksia (Chinprahast et al. 1995). Liian kuuma ja pitkäkestoinen valmistusprosessi denaturoi proteiinia, mikä vaikuttaa sen vesiliukoisuuteen ja sitomisominaisuuksiin. Rehun raaka-aineiden valmistusprosesseja kontrolloidaan kuitenkin esimerkiksi EU:n toimesta niiden hygieenisyyden takaamiseksi (Euroopan Unioni 2011).

Proteiinilla ja sen laadulla on vaikutuksia esimerkiksi rehun kovuuteen ja rakenteeseen (Draganovic 2013; et al. 2011; 2013; Samuelsen et al. 2013; Samuelsen & Oterhals 2016; Tyapkova et al. 2016). Rakenteessa sillä on vaikutusta ekstruusiossa muodostuviin kammioihin, eli mikrorakenteeseen, ja rehun pullahdukseen sen tullessa ulos ekstruuderista (Draganovic 2013; et al. 2013). Nämä vaikuttavat merkittävästi siihen, miten rehu imee öljyä jälkirasvauksessa ja pitää sen sisällään (Sørensen 2012; Kearns & Rokey 2014). Pelletin mikrorakennetta on kuvattu sivulla 20.

Proteiinin laatu vaikuttaa myös ekstruusioprosessiin. Jotkin funktionaaliset proteiinit, kuten esimerkiksi kalajauho, taas vaikuttavat ekstruusioprosessiin muun muassa nostamalla ruuvin massaan kohdistaman energian määrää, mikä taas nostaa tärkkelyksen gelatinisoitumsastetta ja johtaa kovempaan pellettiin (Samuelsen et al. 2013).

4.3 Rasva

Rasvaa laitetaan lohikalojen rehuun, koska se on hyvin kalaan imeytyvä ja proteiinia edullisempi energianlähde. Siinä on myös yli kaksi kertaa enemmän kaloreita hiilihydraattiin ja proteiinin nähden. Rehun kokonaisenergian määrä korreloi hyvin kasvun ja rehun kulutuksen kanssa lohella ja tästä syystä rasvan määrä rehussa saattaakin olla jopa 40 % (Sørensen 2012). Rasva pyritään suurimmaksi osaksi lisäämään vasta ekstruusion jälkeen, koska sen lisääminen vaikuttaa prosessiin, tärkkelyksen gelatinisoitumiseen ja tuotteen laatuun (Bouvier & Campanella 2014, 247; Riaz & Rokey 2012, 52; Sørensen 2012). Jos rasvaa kuitenkin lisätään tai sitä on rehun kuivamassassa, niin Bouvierin & Campanellan (2014, 247) mukaan jo alle 3-

4 % vaikuttaa merkittävästi ekstruusion kypsentämisprosessiin, mikä taas heikentää pelletin rakennetta ja ravinteiden imeytymistä.

4.4 Raaka-aineiden vaikutus ekstruusioprosessiin

Raaka-aineet vaikuttavat ekstruusoprosessin parametreihin monella tapaa. Erilaiset raaka-ainesuhteet parhaimman fyysisen laadun takaamiseksi vaativat omat ajoarvonsa (Sørensen et al. 2010a, 2011a). Joillakin raaka-aineilla on suurempi taipumus pullahtaa ekstruusiossa kuin toisilla (Draganovic et al. 2011; Sørensen 2010a). Tätä pullahdusta pitää kontrolloida ekstruuderin ajoparametreja säätämällä, jotta rehusta tulee oikean kokoista.

Raaka-aineiden vedensitomiskapasiteetti taas vaikuttaa ekstruusioprosessissa vääntöön (Draganovic et al. 2011). Vedensitomiskapasiteetti riippuu myös partikkelikoosta, johon raaka-aineet on hienonnettu (Hemmingsen et al. 2008). Yksittäisten raaka-aineiden korkea vedensitomiskapasiteetti saattaa johtaa liian pieneen rehumassan hydraatioon ekstruusioprosessisa. Ekstruuderilla rehumassan liian heikko hydraatio taas johtaa pölyn syntymiseen (Draganovic 2013). Tällöin taas, jos vettä lisätään hydraation parantamiseksi, niin SME laskee (Pansawat et al. 2008). Alentunut SME taas johtaa huonoon tärkkelyksen gelatinisoitumiseen jne. Raaka-aineet ja niiden käsittely vaikuttavat siis monella ja monimutkaisella tapaa ektruusioprosessin asetuksiin. Mikäli halutaan pellettiin hyvä fyysinen laatu, niin on äärimmäisen tärkeätä tuntea raaka-aineiden ominaisuudet ja ymmärtää niiden vaikutus prosessiin.

5 KALANREHUN VALMISTUS EKSTRUUSIOPROSESSILLA

Kalanrehua on valmistettu ekstruudereilla 1970-luvulta lähtien (Bouvier & Campanella 2014, 6). Ekstruuderin edut kalanrehun valmistuksessa ovat muun muassa sen suuri tuotantoteho ja hyvä pelletin fyysinen laatu (Bouvier & Campanella 2014, 6; Sørensen 2012). Näistä syistä siitä onkin tullut pääasiallinen kalanrehun valmistusmenetelmä (Sørensen 2012).

Kuivamassan valmistus

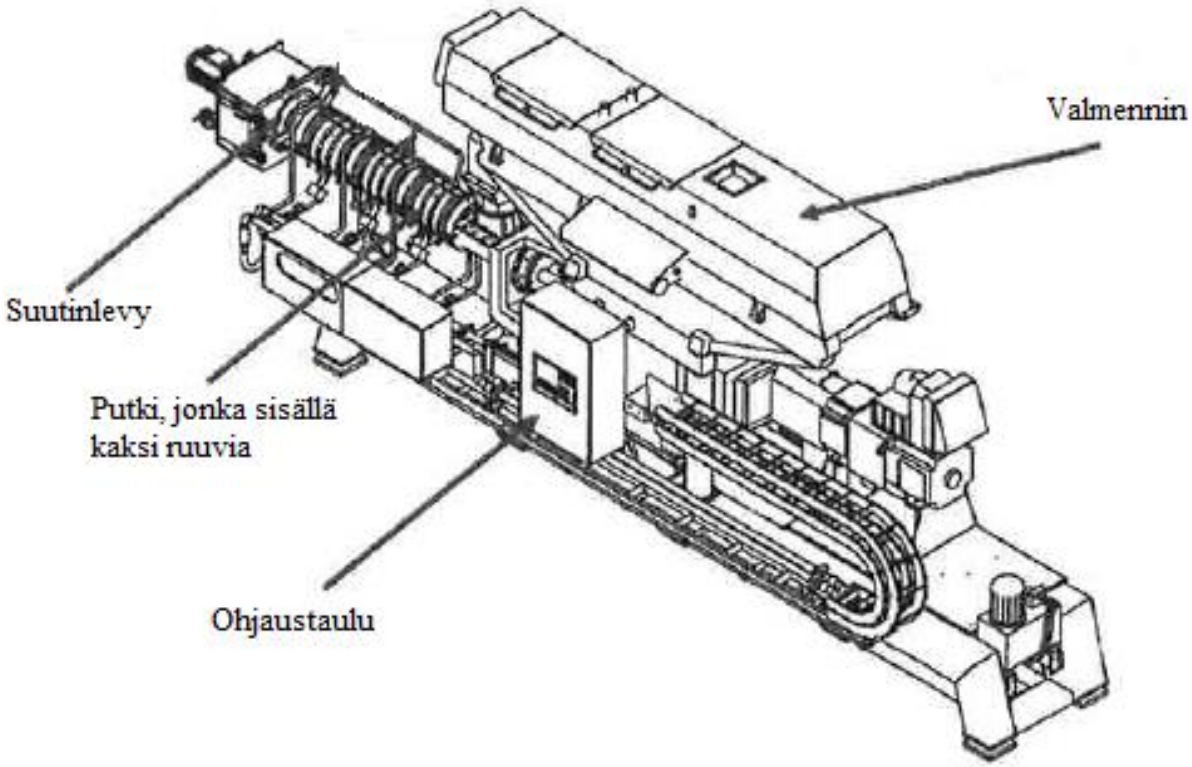
Rehun valmistus alkaa kuivamassan valmistuksella. Tässä vaiheessa rehuun etukäteen suunnitellut raaka-aineet annostellaan oikeissa suhteissa siiloista. Raaka-aineet jauhatetaan sopivaan partikkelikokoon ja sekoitetaan, jotta kuivamassasta saadaan tasalaatuista. Kun se on sekoittunut, se siirretään siiloon. Siilosta se annostellaan ekstruuderille, kun ekstruusioprosessi aloitetaan.

Ekstruusioprosessi

Ekstruusioprosessi on kalanrehun valmistuksen kakkosvaihe (kuva 6). Se koostuu kahdesta erillisestä vaiheesta. Kuivamassa annostellaan siilosta valmentimeen. Valmentimessa massaan sekoitetaan höyryä ja vettä, sekä jossakin tapauksessa öljyä. Lämmön ja veden yhteisvaikutus käynnistää tärkkelyksen gelatinisoitumisen ja proteiinin hydraation (Sørensen 2012).

Valmentimessa tehty taikinamassa siirtyy ekstruuderin putkeen. Putkessa on erilaisia ruuvielementtejä, jotka vaivaavat massaa ja työntävät sitä eteenpäin putkessa. Kitkan vaikutuksesta massan lämpötila nousee entisestään. Ekstruuderilla putkeen voidaan lisätä vielä lisää vettä ja höyryä.

Ekstruuderin putken päädyssä sijaitsee suutinlevy. Ruuvit puristavat prosessissa syntyneen ja kypsentyneen taikinan suutinlevyn lävitse, jonka jälkeen suutinlevyn takana olevat leikkurit leikkaavat taikinan pelleteiksi. Ulos tullessaan rehupelletti pullahtaa sisäisen paineen vuoksi, jolloin kosteutta haihtuu ja rakenne jää huokoiseksi.



Kuva 6: Evolum 145 ekstruuderi (Leppänen 2019)

Kuivaus ja seulonta

Ekstruusion jälkeen kostea pelletti siirtyy kuivureihin. Kuivauksessa pellettien kosteus lasketaan 22 - 24 %:sta noin 8 %:iin. Kuivurilla ja sen asetuksilla on merkittävä vaikutus pelletin laatuun. Epäoptimaaliset kuivurin asetukset saattavat esimerkiksi johtaa pölyn syntymiseen, kalan lihan väriin vaikuttavan astaksantiinin hajoamiseen ja pelletin maittamiseen kaloille. (Bouvier & Campanella 2014, 303) Kuivurista rehupelletit menevät seulaan, joka vähentää pellettien pinnalla olevan pölyn määrää.

Jälkirasvaus ja jäähdytys

Rehut siirtyvät seulan jälkeen jälkirasvaukseen. Jälkirasvauksessa rehuun lisätään suuri määrä rasvaa kalan ja rehun reseptiin mitoitetun tarpeen mukaan. Tämä pystytään tekemään erillisellä jälkirasvauskoneella.

Kun rasvaamattomat pelletit ovat koneessa, se imee tilaan alipaineen. Tällöin ilma poistuu pelletin rakenteista. Kun asetettu alipaine on saavutettu, kone ruiskuttaa öljyä pellettien päälle ja vapauttaa tyhjiön, jolloin öljy työntyy sisälle pellettiin. Tämä mahdollistaa jopa 40 % öljypitoisuuden pellettiin. (Bouvier & Campanella 2014, 303, 304)

Pelletit siirtyvät jäähdytykseen jälkirasvauksen jälkeen. Jäähdytyksessä pellettien lämpötilaa lasketaan. Jäähtyminen johtaa muun muassa siihen, että pelletin tärkkelyksen kovettuminen kiihtyy retrogradaation seurauksena. Pelletit siirtyvät lopuksi edelleen siiloihin. Sieltä ne siirretään pakkaukseen ja varastoidaan.

5.1 Kalanrehun ekstruusioprosessi kirjallisuudessa

Kalanrehun valmistamisesta ekstruusiota käyttäen on tehty runsaasti tutkimusta viime vuosina (Draganovic et al. 2011; 2013; Kraugerud et al. 2011; Tyapkova et al. 2016; Samuelsen et al. 2013; 2016; Sørensen et al. 2010a, 2011a). Tutkimukset, joissa valmistusprosessi on kuvattu tarkkaan, noudattavat usein samansuuntaisia prosessiasetuksia. Tutkimuskirjallisuudessa ja käytännössä voi olla kuitenkin runsaasti eroja. Kirjallisuudessa havaittuja hyviä prosessiarvoja ei aina pysty suoraan soveltamaan tuotannossa. Ne voivat kuitenkin sisältää hyviä tavoitteita prosessin säätämisessä oikeaan suuntaan.

5.1.1 Jauhatus

Kuivamassan partikkelikoon pienennyksellä on monia etuja. Bouvierin ja Campanellan (2014, 301) mukaan 1) se vähentää ekstruuderin putken ja ruuvien kulumista ja kasvattaa sen kapasiteettia 2) se parantaa syntyvän pelletin fyysistä laatua johtamalla parempaan taikinan kypsymiseen, jolloin muun muassa pelletin kestävyys kasvaa ja murenevuus vähenee. Tämä todennäköisesti johtaa pienempään pölyn määrän syntymiseen tuotannossa 3) se saattaa parantaa ravinteiden imeytymistä kalaan. Pienempi jauhatus kasvattaa näiden lisäksi myös ekstruuderilla valmistettavan pelletin kovuutta (Carvalho et al. 2010).

Tyypillisesti kalanrehun kuivamassan hienonnuksessa käytetään esimerkiksi vasaramyllyä. Nyrkkisääntönä suutinlevyn ulostuloreikien ollessa alle 3 mm, suurin hiukkanen ei saisi olla yli

1 mm ja yli 3mm reiän tapauksessa suurin hiukkanen ei saisi olla yli 1,5 mm. Tyypillisesti 95 - 99 % jauhatuksesta tulevista partikkeleista on alle 0,5 mm, keskimääräisen partikkelikoon ollessa 0,2 - 0,3 mm. (Bouvier & Campanella 2014, 301, 302)

5.1.2 Lämpötilaprofiilit

Ekstruusiossa mitataan tyypillisesti seuraavia lämpötiloja: valmentimen lämpöä, ekstruuderin putken eri osien lämpöjä, massan lämpöä ja suutinlevyn lämpöä (Sørensen et al. 2010a, 2011a). Jotta esimerkiksi tärkkelys saadaan gelatinisoitua, tarvitaan riittävän korkea lämpötila. Lämpötila vaikuttaa myös esimerkiksi aminohappojen ja muiden ravinteiden imeytymiseen kalan ruuansulatuksessa (Morken et al. 2012). Korkealla lämpötilalla pystytään myös tuhoamaan ravinteiden imeytymiseen vaikuttavia antinutrientteja, kuten trypsiini-inhibiittoreita (Barrows et al. 2007).

Valmentimen lämpö tuotetaan syöttämällä valmentimeen vesihöyryä ja lämmintä vettä. Massan lämmitys valmentimessa vähentää ekstruuderin ruuvilla taikinan kypsentämiseksi vaadittavan energian määrää. Valmentimen lämpö on tyypillisesti 80-90 ^{o}C asteen luokkaa (Bouvier & Campanella 2014; Sørensen 2012). Massan lämmitys höyryllä ja vedellä vastaa noin 2/3:aa koko massaan kohdistetusta energiasta (Sørensen 2012). Lämmön tuottaminen valmentimessa saattaa olla taloudellisesti kannattavampaa kuin sen tuottaminen ekstruuderin putkessa (Riaz & Rokey 2012, 134).

Lämpöä voidaan tuottaa ja kontrolloida ekstruuderin putkessa tyypillisesti kahdella tapaa. Ruuvi liikuttaa massaa eteenpäin ja vaivaa sitä. Massa lämpenee tällöin kitkan vaikutuksesta. Massan syöttöä voidaan myös kasvattaa, jolloin putken täyttöaste ja lämpötila kasvaa. Liian kuuma ekstruusio kuitenkin tuhoaa taas kalanrehun valmistuksessa käytettäviä lämpöherkkiä raaka-aineita, kuten astaksantiinia (Dethlefsen 2017; et al. 2016). Esimerkiksi tämän ja liiallisen pullahtamisen vuoksi putken lämpöjä kuitenkin kontrolloidaan jäähdytyksellä.

Tyypillisesti massan lämpö ekstruuderin putkessa on kalanrehuja valmistaessa noin 100-140 ^{o}C-astetta (Bouvier & Campanella 2014, 253; Sørensen 2012). Monesti lämpötila putken syöttövaiheesta kasvaa alle 100 asteesta noin 130 asteeseen, jonka jälkeen putkea jäähdytetään

hieman tästä loppua kohden (Sørensen 2010a; 2011a). Jäähdytyksellä pystytään kontrolloimaan esimerkiksi liian suurta pullahdusta. Liian suurilla prosessilämmöillä voikin korkeamman pullahtamisen kautta olla negatiivinen vaikutus rehun laatuun, huolimatta tärkkelyksen paremmasta gelatinisoitumisesta.

5.1.3 Kosteus ja sen syöttö

Kalanrehun valmistuksessa tyypillinen kokonaiskosteus on noin 20-30 % (Bouvier & Campanella 2014, 253; Sørensen 2012). Jotkin raaka-aineet kuitenkin tarvitsevat hyvän pelletin muodostukseen runsaamman, jopa yli 30 % kosteuden (Draganovic 2013). Suurin osa kosteudesta tulee veden lisäyksenä höyrynä tai nesteenä. Noin 20 - 30 % vedestä tulee raaka-aineista. Liian vähäinen kosteuden lisääminen ekstruuderilla saattaa johtaa pölyn syntymiseen jo rehun tullessa ulos ekstruuderista (Draganovic 2013). Jos taikina ei ole kostunut läpikotaisesti, se tuottaa rakenteeltaan murenevia pellettejä (Tyapkova et al. 2016). Nämä synnyttävät tuotannossa enemmän pölyä. Ekstruuderilla kalanrehua valmistaessa liian alhainen kosteus heikentää myös tärkkelyksen gelatinisoitumista (Storebakken et al. 2015). Kosteuden lisääminen toisaalta taas johtaa siihen, että kuivausprosessia on tehostettava, jolloin kustannukset kasvavat.

Vettä lisätään kalanrehun kuivamassaan joko höyrynä tai nestemäisenä. Niitä voidaan laittaa joko valmentimessa tai ekstruuderin putkella. Niillä saattaa olla erilainen vaikutus prosessiin ja pellettiin, riippuen lisäyspaikasta. Jos esimerkiksi kosteutta lisätään valmentimeen, valmistettu rehupelletti yleensä kevenee ja pullahtaa enemmän. Veden lisääminen putkelle taas usein pienentää ekstruusiolämpötilaa ja vähentää pullahtamista. Höyryn lisääminen ekstruuderin putkella johtaa usein suurempaan pelletin pullahtamiseen. Mahdollisesti suuremman pullahtamisen vuoksi Sørensenin (2011a) mukaan höyryn lisäyksen putkella on myös havaittu heikentävän pelletin kovuutta.

5.1.4 Ekstruuderin ruuvikokoonpano

Ekstruuderin ruuvit koostuvat useista peräkkäisistä elementeistä. Ne saattavat erota toisistaan jonkin verran tarkoitukseltaan. Sørensen et al. 2010a havaitsi ruuvikokoonpanon vaikuttavan

merkittävästi rehun fyysiseen laatuun. Ruuvikokoonpano vaikuttaa oleellisesti siihen, miten hyvin ekstruuderin putki täyttyy (Zhang et al. 2015). Tämä vaikuttaa ruuvin massaan kohdistamaan energiaan (SME, Specific Mechanical Energy) (Zhang et al. 2015). SME taas vaikuttaa muun muassa tärkkelyksen gelatinisoitumiseen (Kraugerud et al. 2011; Kearns & Rokey 2014). Ekstruuderin putki halutaan siis saada yleensä täyttymään mahdollisimman hyvin. Liian suuri ruuvin täyttyminen kuitenkin saattaa myös johtaa ongelmiin, kuten höyrynsyötön heikentymiseen (Riaz & Rokey 2012, 104). Kalanrehun ekstruusiossa tyypillisesti käytetään keskitasoisesti leikkaavaa ruuvikokoonpanoa (Riaz & Rokey 2012, 111). Liian aggressiivinen ruuvikokoonpano saattaa johtaa liian suureen tehon tarpeeseen, jolloin moottori ylikuormittuu (Riaz & Rokey 2012, 81). Tämä johtaa koneen sammumiseen ellei ekstruusioasetuksia muuteta.

Ruuvikokoonpano ilmoitetaan tutkimuksissa tyypillisesti kuvaamalla ruuvin eri elementit peräkkäin asennetussa järjestyksessä. Suurin osa elementeistä on taikinaa putkessa eteenpäin työntäviä. (Sørensen et al. 2010a, 2011a) Tämän lisäksi on myös käänteisiä ruuvielementtejä ja vaivauspalikoita, joiden tarkoitus on vaivata taikinaa, sekoittaa sitä ja kasvattaa täyttöastetta Bouvier & Campanella 2014, 32, 33). Käänteiset ruuvielementit ja vaivauspalikat sijaitsevat kalanrehututkimuksissa usein melko keskellä samassa osassa putkea, jonka lähettyville myös putken höyrynsyöttö on sijoitettu (Sørensen et al. 2010a, 2011a).

Erilaisista ruuvikokoonpanoista ja niiden vaikutuksesta on myös tehty tutkimusta. Ruuvikokoonpanolla pystytään vaikuttamaan esimerkiksi syntyvän pelletin kovuuteen, gelatinisoitumiseen, vääntöön ja pullahtamiseen (Sørensen et al. 2011a; Tyapkova et al. 2016; Zhang et al. 2015). Sillä on siis merkittävä vaikutus pelletin fyysiseen laatuun. Tästä syystä myös ruuvikokoonpanon optimoiminen on tärkeää.

Ruuvikokoonpano riippuu luonnollisesti myös ekstruuderin putken pituudesta. Enemmän pituutta tarkoittaa useampia mahdollisia ruuvikokoonpanoja. Pituus lisää myös ekstruusioaikaa, jonka massa kulkee putkessa. Tällöin pelletin kypsyminen paranee. Tyypillisesti kalanrehua valmistaessa ekstruuderin ruuvin pituus on 20-28 kertainen ruuvin paksuuteen nähden (Bouvier & Campanella 2014, 253).

5.1.5 SME, ruuvin pyörimisnopeus ja ampeerit

SME on tärkeä prosessiparametri. Se tarkoittaa energiaa, jonka ruuvi kohdistaa putkessa liikkuvaan massaan. SME voidaan laskea monella tapaa. Käytettävä laskutapa tässä työssä on kuvattu kaavassa 1,

$$SME = \mathrm{P} * \frac{\frac{RPM}{\mathrm{RPM_{max}}} * \frac{I}{\mathrm{I_{max}}}}{\dot{m}} * \mu_\mathrm{m} * \mu_\mathrm{v} \qquad (1)$$

jossa P = moottorin teho 310 kW, *RPM* = ruuvien pyörimisnopeus [1/s], $\mathrm{RPM_{max}}$ = maksimikierrokset = 800 rpm, *I* = virta = [A], $\mathrm{I_{max}}$ = 726 A, μ_m= moottorin hyötysuhde = 1, μ_v= vaihdelaatikon hyötysuhde = 0,9 ja $\dot{m}$ = massavirta = ekstruuderissa käytettyjen massojen yhteenlaskettu määrä = [kg]

Laskutapa SME:lle vaihtelee (Young & Forte 2017). Kirjallisuudessa SME lasketaan yleensä käyttämällä ampeerien sijasta vääntöä. Youngin ja Forten (2017) esittämistä kaavoista voidaan päätellä, että ampeerit ja vääntö käyttäytyvät samalla tavalla ja kummankin nousu johtaa SME:n nousemiseen.

Mitä korkeampi SME on, sen korkeampi on myös pelletin tärkkelyksen gelatinisoitumisaste (Kearns & Rokey 2014). SME:n nostaminen vaikuttaa myös pelletin mikrorakenteeseen pienentämällä sen kammioita (Riaz & Rokey 2012, 103; Kearns & Rokey 2014). Pelletti tulee tällöin kovemmaksi ja kestävämmäksi sekä imee paremmin rasvaa (Kearns & Rokey 2014). Suositus SME-arvolle vaihtelee kirjallisuudessa. Bouvierin ja Campanellan (2014) mukaan tyypillinen SME on alle 60 Wh/kg kalanrehun valmistuksessa. Young & Forte (2017) taas suosittelevat SME:ksi 20-45 Wh/kg.

SME:tä pystyy muun muassa kirjallisuuden ja kaavan 1 perusteella kasvattamaan nostamalla kierroksia, vähentämällä massavirtaa, nostamalla ampeereita (Draganovic 2013; Pansawat et al. 2008). Myös ruuvikokoonpano vaikuttaa SME:hen (Sørensen 2010a; Tyapkova et al. 2016). Kierroslukemat kalanrehun valmistuksessa ovat tyypillisesti korkeita (Riaz & Rokey 2012, 111;

Bouvier & Campanella 2014, 253). Käytännössä tämä tarkoittaa 500 - 800 kierrosta minuutissa (Bouvier & Campanella 2014, 253).

6 RAISIOAQUA

Raisioaqua on suomalainen Raisio-konserniin kuuluva kalanrehujen valmistaja ja ruokinnan asiantuntija. Se tunnettiin aiemmin nimellä Raisioagro, jolloin se myös valmisti kalanrehujen lisäksi muita kotieläinrehuja. Kalanrehuja on valmistettu Raision tehtailla vuodesta 1982. Raisioaquan päämarkkina-alueet ovat Suomi, Venäjä ja Itämeren alue. Rehuja myydään jonkin verran kuitenkin myös esimerkiksi Aasian alueelle.

Raisioaqua valmistaa rehuja kirjolohelle, taimenelle, lohelle, siialle, nieriälle, kuhalle ja sammelle (Raisioaqua 2020). Näistä tärkeimmät ja eniten kysytyt rehut ovat punalihaisille lohikaloille valmistettavat rehut. Pääasiassa näillä rehuilla kasvatetaan kirjolohta.

Eniten punalihaisten lohikalojen rehuista myydään Hercules-tuoteperheen rehuja. Punalihaisille kaloille on tarjolla myös Vital Red erikoisrehua, jossa on Herculesta enemmän kalan hyvinvointia edistäviä ainesosia. Siioille Raisioaqua valmistaa Silver rehua, joka poikkeaa Hercules rehuista raaka-aineiltaan ja ravitsemukselliselta koostumukseltaan. Jonkin verran valmistetaan myös Circuit-tuoteperheen rehuja, jotka on tarkoitettu kalojen kiertovesikasvatukseen.

Tärkeimmät Raisioaquan innovaatiot ovat fytaasientsyymin käyttö kalanrehuissa ja matalafosforiset rehut, kuluttajabrändi Benella ja Baltic Blend -Itämerirehu. Fytaasi on entsyymi, jonka lisääminen rehuun parantaa kasvipohjaisen fosforin imeytymistä kalaan. Fytaasin käyttö mahdollisti matalafosforisten rehujen lanseerauksen, mikä vähensi merkittävästi rehujen rehevöittävää ympäristökuormitusta. Benella taas on brändi ja ruokintamenetelmäinnovaatio. Rehujen käyttäjä sitoutuu ruokkimaan kalaa Raisioaquan kehittämällä ruokintamenetelmällä, jolloin kalan Benella-brändissä määrätyt sydänterveyttä edistävien rasvahappojen tasot saadaan täyttymään. Vastineeksi kasvattaja ja myyjä pystyy myymään tuotetun kalan Benella-brändiä hyödyntäen. Baltic Blend taas on Raisioaquan tavaramerkki. Se tarkoittaa sitä, että rehuissa kalaraaka-aineet ovat peräisin Itämerestä. Myös kasviperäiset raaka-aineet pyritään saamaa Itämeren ympäristöstä. Tällöin kalankasvatuksen aiheuttama ravinnekuorma fosforin osalta menee jopa negatiiviseksi ja typpikuorma taas vähenee merkittävästi.

Suurin osa Raisioaqualle tulleista reklamaatioista vuonna 2019 liittyi rehun fyysiseen laatuun. Reklamaatioiden kokonaismäärä kauden aikana kokonaisuudessaan oli toimitusmääriin nähden melko vähäinen. Viisi suurinta olivat 1) järjestyksessä rehun pölyisyys, 2) puolikkaiden määrä, 3) öljyn valuminen, 4) rehun kelluminen ja 5) homehtuminen, joista rehun pölyisyydestä tuli reilusti eniten reklamaatioita. Vaikka reklamaatioiden osuus on vähäinen, niin niitä halutaan vähentää entisestään ja asiakastyytyväisyyttä parantaa. Erityisesti pölyn vähentäminen koetaan tarpeelliseksi. Tästä johtuen katsottiin tarpeelliseksi toteuttaa rehun fyysisestä laadusta diplomityö, josta fyysisen laadun ongelmiin voisi löytyä uusia näkökulmia ja ratkaisuja. Raisioaquan asettamana tavoitteena työlle onkin, että sen avulla löydettäisiin keinoja rehun fyysisen laadun parantamiseksi. Tähän tavoitteeseen pääsemiseksi työssä pyritään löytämään tuotannossa sovellettavia inkrementaalisia tuote- ja prosessi-innovaatioita.

7 MENETELMÄT

Kalanrehun laatuun pureuduttiin rehun raaka-aineen valinnan ja niiden prosessisäätöjen avulla, joiden arvioitiin kirjallisuuden perusteella keskeisimmin vaikuttavan rehupelletin kovuuteen ja pölyn muodostumiseen. Esigelatinoitujen tärkkelysten valinta tehtiin kirjallisuuslähteiden ja saatavuuden perusteella. Koeajoista valmistetut rehut testattiin Raisioaquan standardimenetelmin, jotka ovat laajalti käytössä rehuteollisuudessa.

7.1 Tuotantoprosessin muutokset

Kirjallisuudesta löydettyjen ja tuotannossa tehtyjen havaintojen perusteella suoritettiin koeajoja. Niissä tavoitteena oli parantaa rehun fyysistä laatua sekä tuotantoprosessia säätämällä että uusia raaka-aineita käyttämällä. Pääasiassa tuotantoprosessin muutokset koskivat muutoksia ekstruuderilla, mutta myöskin muutoksia kuivausprosessissa, jauhatuksessa ja jälkirasvausprosessissa. Muutoksia prosessiparametreissa tehtiin Clextralin Evolum 145 ekstruuderilla, joka on kuvattu kuvassa 6 sivulla 32. Kuivauksen ja jälkirasvauksen muutokset olivat seurauksia ekstruusioprosessin muutoksista.

Koeajot suoritettiin vähintään 20 tonnin rehuerissä ja ajon aikana muutoksia tehtiin etukäteen asetetut tavoitteet mielessä. Suunnitelmia jouduttiin kuitenkin toisinaan muuttamaan runsaasti prosessin hankalan ennakoimisen vuoksi. Kunkin koeajon aikana oli pääasiallisena tavoitteena kontrolloidusti parantaa fyysistä laatua mittaavien muuttujien arvoja ja vähentää pölyn muodostumista.

7.2 Tärkkelyslähteiden valinta

Ekstruusioprosessin lisäksi fyysisen laadun parantamiseen pyrittiin myös uusilla raaka-aineilla. Raaka-aineet olivat esigelatinoituja tärkkelyksiä. Rehun kovuus on tärkeä rehun fyysisen laadun mittari ja tärkkelyskirjallisuuden perusteella tärkkelyksen kovuus kasvaa, kun sen amyloosipitoisuus kasvaa. Lisäksi tärkkelyksen pitkät ja haarautuneet amylopektiiniketjut LBCA:t (Long Branch-Chain Amylopectin) retrogradoituvat samaan tapaan amyloosin kanssa

(Chen 1990; Hegenbert 1996; Jane et al. 1999). Ne kasvattavat tärkkelysgeelin kovuutta ja voivat olla yhtä tehokkaita kristallirakenteen muodostumisessa (Jane et al. 1999; Chen 1990).

Koska ensisijaisena tavoitteena uusille tärkkelyksille oli saada kasvatettua rehupelletin kovuutta, pyrittiin esigelatinoidut tärkkelykset valitsemaan sen mukaan, paljonko tärkkelyslähteet sisältävät amyloosia ja LBCA:ta. Eri tärkkelyslähteiden amyloosi ja LBCA pitoisuudet on esitetty taulukossa 2. Herneelle ja härkäpavulle ei kuitenkaan löytynyt lähdettä, josta LBCA:n määrä olisi pystytty päättelemään tarkemmin, joten niiden kirjallisuudessa annettu amyloosimäärä laskettiin amyloosin ja LBCA:n yhteistulokseksi. Näin tehtiin siitä syystä, koska potentiometrisessä titrauksessa LBCA näyttäytyy tuloksissa amyloosina (Jane et. al. 1999). Määritystapa amyloosille kummassakin tutkimuksessa on potentiometrinen, paitsi Jane et al. (1999) amyloosin määrässä oli huomioitu LBCA:t (Li et al. 2019).

Taulukko 2: Eri tärkkelyslähteiden prosentuaaliset amyloosin ja LBCA:n osuudet (Datan lähteet: Jane et al. (1999) ja Li et al. (2019))

Tärkkelyslähde	Amyloosi %	LBCA %	Amyloosi + LBCA
Amylomaissi V	27,3	24,7	52
Amylomaissi VII	40,2	27,8	68
Herne			41,1
Härkäpapu			39,9
Maissi, normaali	22,5	6,9	29,4
Maissi,waxy	0	0	0
Ohra	23,6	1,9	25,5
Peruna	16,9	19,1	36
Riisi	20,5	4,5	25
Tapioka	17,8	5,7	23,5
Vehnä	25,8	3	28,8

Taulukko on kuitenkin vain suuntaa-antava, koska tärkkelyslähteen pellettiin tuoma kovuus riippuu muustakin kuin amyloosin ja amylopektiinin suhteesta ym. Lisäksi menetelmä ei huomioi tärkkelyslähteille ominaista luonnollista vaihtelua amyloosin ja amylopektiinin suhteissa. Lisäksi menetelmä ei huomioi sitä, miten ja missä suhteessa amyloosi ja LBCA todellisuudessa vaikuttavat kovuuden kehittymiseen. Näiden välillä kuitenkin on eroja (Chen 1990). Taulukon tiedoista on arvioitavissa se, että korkeimman kovuuden pellettiin voisi tuottaa amylomaissi VII, jonka jälkeen toisena tulisi amylomaissi V. Kolmanneksi paras kovuuden kehittymisen kannalta olisi hernetärkkelys. Kovasta etsinnästä huolimatta esigelatinoitua amylomaissin lähdettä ei löytynyt, joten kokeeseen päädyttiin valitsemaan esigelatinoitu

hernetärkkelys. Toiseksi testattavaksi esigelatinoiduksi tärkkelykseksi valittiin perunatärkkelys. Esigelatinoitu perunatärkkelys haluttiin kokeeseen siksi, että sen käyttämisestä kalanrehun raaka-aineena on ollut jo lupaavia tutkimuksia fyysisen laadun kehittymisen suhteen (Sorensen et al. 2010a; Rodríguez-Miranda et al. 2012). Lisäksi taulukon mukaan sen kovuuden pitäisi kehittyä vehnää paremmin ja sitä oli myös valmiina tehtaalla saatavilla.

7.3 Laadun mittauksen laitteisto ja menetelmät

Rehun fyysistä laatua tarkasteltiin visuaalisesti ja mitattiin kahdella eri mittalaitteella. Nämä ovat puristuskovuusmittari ja Doris-kestävyysmittari. Öljyn pysymistä rehun sisällä arvioitiin Doris-testituloksista. Rehun kellumista ja uppoamista seurattiin upotuskokeella. Rehun muita ominaisuuksia, kuten öljyisyyttä ja pölyisyyttä arvioitiin rehusta silmämääräisesti. Näytteet rehuista otettiin vasta, kun prosessi oli saatu stabiiliksi.

7.3.1 Kovuustestaus

Erweka TBH125 on puristuskovuusmittari, mikä on suunniteltu lääketeollisuuteen tabletin kovuuden mittaamiseen. Rehupelletti asetetaan mittatelineeseen, jonka jälkeen mittari puristaa rehua niin kauan, kunnes rehu halkeaa. Pelletin kovuus annetaan voimana (N, Newton), joka tarvitaan pelletin hajottamiseen. Laite ja mittaustapa näkyy kuvassa 7. Mittarissa on kaksi eri mittausmenetelmää, jotka ovat vakionopeus tai vakiovoima. Työssä käytettiin vakioitua voimaa. Mittariin ei tehty muutoksia verrattuna Raisioaquan normaaleihin mittausasetuksiin.

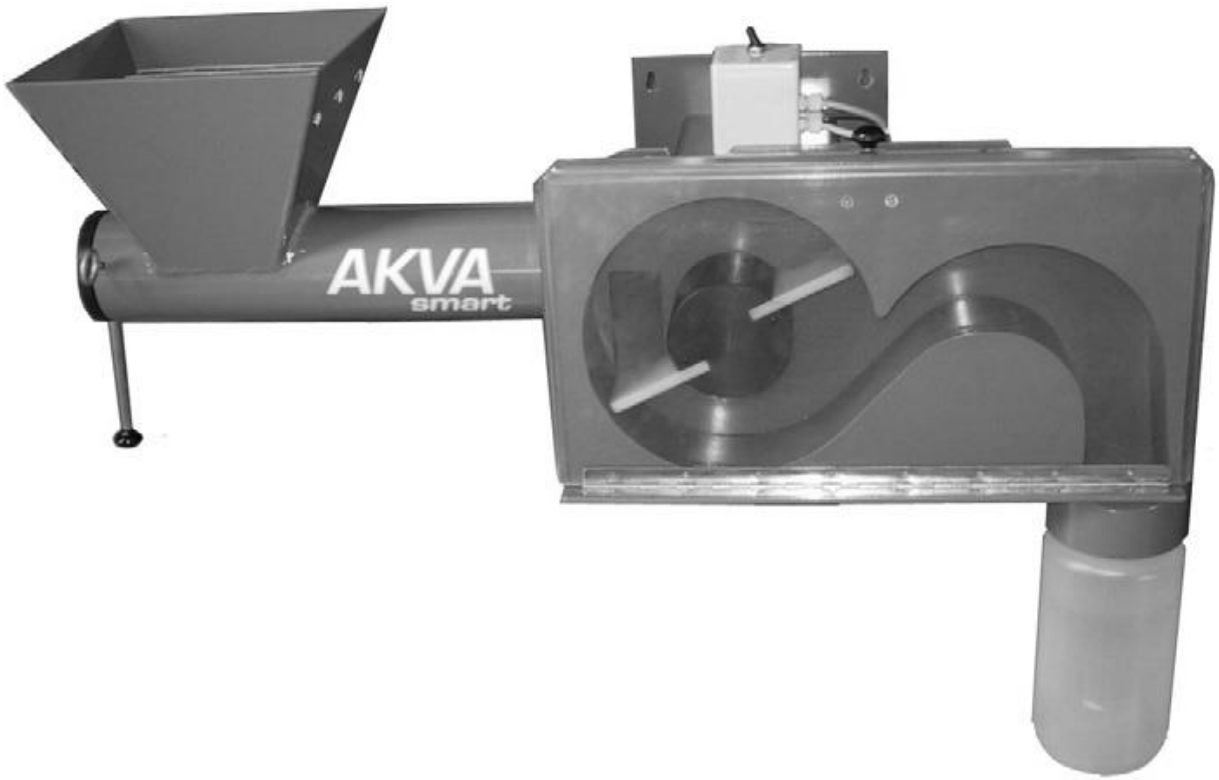
Kuva 7: Erweka TBH125 puristuskovuusmittari

Mittausprosessissa otettiin ylös mittalaitteen laskema pellettien keskimääräinen hajoamisvoima. Mittauksia tehtiin 10 pelletin sarjoissa, joista saatiin keskimääräiset hajoamisvoimat ja keskimääräiset paksuudet. Alun perin näitä sarjoja piti tehdä kolme kappaletta. Tärkkelyskokeissa mittausten määrää päätettiin kuitenkin kasvattaa viiteen, koska eri rehuista saatujen mittaustulosten havaittiin olevan niin lähellä toisiaan. Mittauksista saaduista kymmenen sarjan tuloksista laskettiin vielä lopuksi kovuuksien keskiarvot eri näytteistä.

7.3.2 Kestävyystestaus

Kestävyystestaus suoritettiin Akvasmartin valmistamalla Doris-laitteella, kuva 8. Doris (Durability on a realistic test) on norjalaisen kalanrehuteollisuuden kehittämä mittauslaite, joka simuloi pellettiin kohdistuvia voimia pneumaattisella syöttölaitteella (Aas et al. 2011). Laitteessa on aukko rehunäytteen syöttämistä varten. Aukon jälkeen rehu kulkeutuu putkessa

ruuvikuljettimella pneumaattista syöttölaitetta simuloivaan tilaan. Tilasta ne päätyvät näyteastiaan, jonka jälkeen näyte seulotaan.



Kuva 8: Doris testeri (Aas et al. 2011)

Työssä käytetty mittausprosessi oli samanlainen kuin Raisioaquan mittauksessa yleensäkin. Rehuista punnittiin 300g näyte, joka ajettiin kahdesti Doris-laitteeseen testauksen läpi. Tämän jälkeen rehu kaadettiin näyteastiasta mitta-astiaan, joka koostuu kolmesta päällekkäisestä osasta, kuva 9. Mitta-astia laitetaan täristimeen, jossa näyte erottuu partikkelikoon perusteella eri kerroksiin. Ylimmässä osassa on sihti, jossa verkon silmäkoko on noin 4,5 mm. Tähän sihtiin jäävät kokonaiset pelletit, sekä sellaiset pelletit, jotka eivät ole hajonneet pieniksi palasiksi. Keskimmäisessä osassa on sihti, jonka silmäkoko on noin 1 mm. Tähän sihtiin muun muassa

jää puolikkaita, mikäli sellaisia muodostuu testauksessa. Alimpaan astiaan päätyy kaikista pienimmät rehun kappaleet, kuten rehupöly.

Kuva 9: Doris-testauksen mitta-astia

Täristimen jälkeen mittausastian kolme osaa punnittiin erikseen vaa'alla. Niistä laskettiin, kuinka paljon rehua on jäänyt yläsihtiin, alasihtiin ja ala-astiaan. Nämä laskettiin myös yhteen ja vähennettiin alkuperäisestä 300 gramman määrästä. Tämän määrän voidaan ajatella kuvastavan sitä, kuinka paljon rehua jäi Doris-laitteen sisälle joko pölyn tai rehusta irronneen öljyn ja veden muodossa. Kun grammamäärät olivat tiedossa, tulokset muutettiin prosenttiyksiköiksi ja taulukoitiin.

8 REHUN LAADUN KEHITTÄMINEN INKREMENTAALISILLA PROSESSI- JA TUOTEINNOVAATIOILLA

Mahdollisuuksia inkrementaalisiin prosessi- ja tuoteinnovaatioihin tutkittiin tässä luvussa. Ekstruuderin ajoarvot vaihtelevat Raisioaqualla reseptien ja raaka-aineiden sekä niiden laadun vaihtelun mukaan. Niiden kuitenkin huomattiin poikkeavan tutkimusten ja muun kirjallisuuden keskiarvoista ja suosituksista jonkin verran. Prosessin ajoparametreja pyrittiin säätämään lähemmäs kirjallisuutta tuotannossa tehtävien koeajojen muodossa. Muutokset pyrittiin tekemään lähtökohtaisesti ekstruuderilla, mikä joissakin tapauksissa vaatii myös muutoksia kuivurin asetuksissa ja jälkirasvauksessa. Lisäksi yhdessä koeajossa muutoksia tehtiin myös jauhatuksessa. Viidennessä koeajossa kokeiltiin myös esigelatinoituja tärkkelyksiä rehun laadun parantamisessa.

Kirjallisuuden perusteella kalanrehun valmistusprosessissa öljy tulisi lisätä vasta ekstruusioprosessin jälkeen jälkirasvauksessa, jotta vaikutus fyysiseen laatuun olisi mahdollisimman pieni. Ekstruusioöljyn poistaminen ja vähentäminen oli yksi prosessiparannusten lähtökohdista. Lisäksi pyrittiin kasvattamaan SME:tä, joka näytti myös olevan kirjallisuuslähteiden perusteella matalahko. Pyrkimys oli myös toissijaisesti kasvattaa kirjallisuuden perusteella matalahkoksi arvioitua kokonaiskosteutta. Kaikkia asioita ei välttämättä pyritty saavuttamaan samoissa kokeissa, vaan koeajoja tehtiin useampia, jotta vaikutuksia oli helpompi arvioida ja muutokset saatiin toteutettua helpommin.

8.1 Koeajo 1: Ekstruusioöljyn poistaminen prosessista

Ensimmäisen koeajon suunnitelmana oli vähentää ekstruusiossa lisättävää öljyä koerehun tuotannossa. Lipidien vaikutus ekstruuderilla valmistettavan tuotteen fyysiseen laatuun tiedettiin useaan lähteeseen perustuen heikentävän tuotteen fyysistä laatua. Ekstruusioöljyä lisättiin tuotannossa lähtökohtaisesti siitä syystä, että haluttiin vähentää rehun liiallista pullahtamista ja kontrolloida tehon tarvetta. Tehon tarpeen tiedettiin siis tulevan kasvamaan runsaasti öljyn poiston seurauksena, mikä pahimmassa tapauksessa johtaa ekstruuderin sammumiseen. Tästä syystä koeajolle yritettiin tehdä myös mahdollisimman kattava

koeajosuunnitelma, jonka ideana oli pullahtamisen ja tehon tarpeen kontrolloiminen muilla keinoilla kuin ekstruusioöljyn lisäyksellä.

Raaka-aineiden vaikutusta ei vielä tässä vaiheessa kovin hyvin tunnettu. Reseptiksi valikoituikin nykyisen tiedon mukaan kaikista hankalin tuote kokeen tavoitteisiin nähden. Rehun reseptissä oli suuri määrä soijaa, joka Draganovic et al. mukaan (2011) nostaa vääntöä, mikä tarkoittaa ampeerien ja tehon kulutuksen kasvua.

Koeajosuunnitelma ja koeajon kulku prosessin öljyn poistamiseksi

Koeajoon tehtiin kattava suunnitelma. Ekstruusioprosessin parametreja kuvaava Excel-taulukko laadittiin, josta prosessin kokonaiskosteutta pystyttiin seuraamaan kokeen aikana. Suunnitelmassa pääpainotus oli kontrolloida odotettavissa olevaa rehun pullahtamista ja seurata tehon tarvetta ampeerien avulla. Tiivistetysti suunnitelmana oli kontrolloida pullahtamista seuraavasti:

1) Höyryn siirtäminen putkesta höyrynä tai/ja nesteenä valmentimeen
2) Ekstruuderin ruuvien kierroslukemien vähentäminen
3) Jäähdytyksen lisääminen ekstruuderin putkessa, mikäli lämmöt nousevat
4) Kokeilemalla veden lisäämistä entisestään valmentimeen

Näistä keinoista ensimmäiset kolme toimivat kirjallisuuslähteiden mukaan pullahtamisen vähentämiseen (Riaz & Rokey 2012, 97, 98; Sørensen 2010a). Vaikka Pansawat et al. (2008) mukaan ekstruusiokosteuden lisääminen vähentää pullahtamista, koeajossa vaikutus oli päinvastainen.

Tehon kulutuksen liiallisen nousun osalta suunnitelmana oli laskea ekstruuderin massan syöttöä normaalista määrästä reilusti. Tämän vuoksi arvioitiin, että massansyötön laskiessa SME taas tulee nousemaan reilusti, kuten SME:n laskentakaavasta voisi päätellä. Suunnitelma oli myös lisätä öljyä jonkin verran takaisin, mikäli toimenpiteet eivät auta ja prosessi sen vaatii. Koeajoon lähdettäessä oli tunnistettu myös sellainen vaihtoehto, että tehon tarvetta (ampeereja) ja pullahtamista ei pystytä kontrolloimaan riittävästi prosessiparametreja säätämällä. Tämä johtuisi siitä että ekstruuderin ruuvikokoonpano saattaa olla liian aggressiivinen.

Koeajossa ei saatu muodostettua kunnollisia pellettejä koerehusta eikä edes kontrollirehusta, joten rehut eivät menneet jälkirasvaukseen. Tästä huolimatta näytteet kerättiin sekä ekstruuderin ulostulohihnalta että kuivurin jälkeen. Kokeen ajoarvot on esitetty alla olevassa taulukossa 3.

Taulukko 3: Koerehun lopulliset ekstruusioparametrit

Parametrit	**Kontrolli öljy 200**	**Öljy 100**	**Öljy 75**	**Öljy 100/ Vesi 600**
Syöttöteho [kg/h]	4200	4300	4300	4300
Valmennin vesi [kg/h]	530	530	530	600
Ekstruuderi vesi [kg/h]	520	520	520	600
Valmennin höyry [kg/h]	180	220	180	180
Ekstruuderi höyry [kg/h]	Ei tiedossa	Ei tiedossa	Ei tiedossa	Ei tiedossa
Virta [A]	460	574	618	604
Massan lämpö [ºC]	106,4	113.5	108,3	107
Ruuvin nopeus [RPM]	480	460	460	400
SME [Wh/kg]	~ 19	~ 22	~ 24	~ 20
Kokonaiskosteus (kuivamassa 7,9%)	27,7 %	28,4 %	28,0 %	29,8 %

Koeajon tulokset

Pelletin kovuutta (Newton) ja Doris-kestävyyttä saatiin nostettua koeajossa kontrollirehuun nähden suunnitelmassa kerrotuilla toimenpiteillä kaikissa näytteissä, taulukot 4 ja 5. Muutosten seurauksena kuitenkin pelletin ulkonäkö kärsi, eikä myyntikelpoista pellettiä saatu valmistettua. Rehuja silmämääräisesti verrattaessa tehtiin kuitenkin yksi oleellinen havainto. Kontrollirehussa, jossa oli enemmän ekstruusioöljyä, oli paljon puolikkaiksi haljenneita pellettejä. Koeajorehussa haljenneita pellettejä ei ollut.

Osa mittauksiin käytettävistä rehunäytteistä otettiin suoraan ekstruuderin jälkeiseltä kuljettimelta, jolloin ne olivat vielä märkiä. Tämän tarkoitus oli saada pellettejä, joiden ajoarvoista oltiin sataprosenttisen varmoja. Nämä pelletit pyrittiin kuivaamaan uunissa normaaliin rehun kosteuteen. Toiset näytteet pelleteistä otettiin tuotannon kuivurin jälkeen. Alla olevissa taulukoissa 4 ja 5 on kuvattu kovuus ja kestävyysmittausten tulokset.

Taulukko 4: Koerehun fyysisen laadun tulokset kuivurikuivatuista näytteistä

Kuivurinäytteet	Keskikovuus	Doris-yläsihti	Doris-alasihti	Doris-ala-astia	Laskettu kokonaispöly
Kontrolli öljy 200	40,95 N	63,50 %	29,50 %	5,5 %	7 %
Öljy 100	63,35 N	90,50 %	5 %	3,33 %	4,5 %
Öljy 75	57,05 N	68,33 %	24,33 %	5,83 %	7,33 %

Taulukko 5: Koerehun fyysisen laadun tulokset uunikuivatuista näytteistä

Uuninäytteet	Keskikovuus	Doris-yläsihti	Doris-alasihti	Doris-ala-astia	Laskettu kokonaispöly
Kontrolli öljy 200	86,26 N	95,00 %	1,75 %	2,50 %	3,25 %
Öljy 100	106,2 N	96,00 %	0,25 %	2,75 %	3,75 %
Öljy 75	96 N	94,50 %	1,25 %	3,25 %	4,25 %
Öljy 100/ Vesi 600	102,9 N	95,25 %	1,50 %	2,75 %	3,25 %

Koeajon ja tulosten analysointi

Kovuusmittauksia tehtiin 30 kappaletta per näytepussi. Mittaustulokset eivät ole ihan täysin johdonmukaisia öljyn lisäyksen suhteen ”Öljy 75”-näytteissä. Tämä saattoi johtua aikaisemmasta koneen ylikuormittumisesta, jonka vuoksi ekstruuderin massan lämpö ei ollut vielä täysin palautunut. On myös mahdollista, että sen höyryn syöttö putkelle oli erilainen muihin rehuihin verrattuna. Tulosten perusteella näyttäisi tätä poikkeusta lukuun ottamatta siltä, että pelletin kovuutta ja kestävyyttä pystyy kasvattamaan vähentämällä ekstruusiossa lisättävää öljyä. Tulokset ovat tältä osin johdonmukaisia kirjallisuuslähteiden kanssa.

Uunissa ja kuivurissa kuivatut näytteet eroavat kovuuksiltaan runsaasti toisistaan. Näistä eroista voidaan päätellä, että kuivausprosessia optimoimalla pystyisi mahdollisesti tekemään pelletistä kovempaa ja kestävämpää. Erot voivat kertoa myös siitä, että tuotantoprosessi itsessään heikentää rehun fyysistä laatua. Heikentäviä vaiheita voivat olla vaikka rehujen imusiirto ja erilaiset kuljettimet. Pellettien kosteuden analyysissä huomattiin myös, että kontrollinäytteen kosteus oli korkeampi kuin koerehujen, vaikka kosteuden määrää koerehuissa nostettiin. Tämän pääteltiin johtuvan erosta rasvan määrässä, sillä Riazin ja Rokeyn (2012, 52) mukaan rasva vaikeuttaa tuotteen kuivaamista. Ekstruusioöljyn poistaminen johtaa siis myös kuivaustehon parantumiseen, jolloin kuivausprosessin energian kulutusta pystytään laskemaan. Rasva hidastaa myös tärkkelyksen retrogradaatiota, eli sen kovettumisprosessia (Wang et al. 2015). Ilman ekstruusioöljyä valmistettu pelletti siis kovettuu nopeammin tuotannossa. Tällöin se

saattaa kestää paremmin iskuja tai sitä, kun sen päälle lastataan kymmeniä tonneja rehua siilossa.

Koe itsessään ei onnistunut toivotulla tavalla. Suunniteltuja koearvoja ei pystynyt käyttämään siten että kunnollinen pelletti olisi saatu muodostettua. SME-arvo ei käyttäytynyt odotetulla tavalla. Tästä syystä myöskään SME-arvoa ei saatu kirjallisuuden osoittamalle tasolle, koska tällöin pelletti meni vielä huonomman näköiseksi. Kontrolliin nähden SME kuitenkin nousi alhaisesta 19 Wh/kg:sta kohtuulliseen 24 Wh/kg:aa, kun tavoite oli noin 30 Wh/kg. 24 Wh/kg on lähellä Forten ja Youngin (2018) suosituksen alarajaa.

Kokeessa tehon tarve kasvoi ja ampeerit nousivat rasvan vähennyksen seurauksena runsaasti. Ampeerit olivat korkealla ja kaksi kertaa ampeerit nousivat yli rajojen, jolloin kone sammui koeajon aikana. Tämän mahdollisuutta osattiin odottaa jo kokeen suunnitteluvaiheessa. Se tiedettiin etukäteen, että kirjallisuuslähteiden perusteella tämä saattaa johtua esimerkiksi liian aggressiivisesta ruuvikokoonpanosta (Riaz & Rokey 2012, 81). Ekstruuderin tehon tarpeeseen vaikuttivat kuitenkin myös raaka-ainevalinnat ja -määrät. Raaka-aineiden korkea vedensitomiskapasiteetti nostaa tehon tarvetta. Valitussa reseptissä oli korkea määrä soijaproteiinia (20 %), mikä johtaa tehon tarpeen kasvuun (Draganovic et al. 2011). Ekstruusiossa lisättävä rasva taas pienentää prosessin tehon kulutusta. Resepti itsessään osoittautui siis hankalaksi ekstruusioöljyn vähentämiseen, mikä huomioitiin kahta viimeistä koeajoa suunnitellessa.

Ruuvikokoonpano tiedettiin kirjallisuuslähteiden perusteella varsin aggressiiviseksi. Se myös poikkesi runsaasti kalanrehun valmistuksen kirjallisuuslähteistä. Aiemmin on myös arvioitu, että kyseinen ruuvikokoonpano vaatii öljyn lisäämistä ekstruuderilla. Tästä syystä seuraavassa kokeessa ruuvikokoonpanoa päätettiin muuttaa vähemmän aggressiiviseksi.

8.2 Koeajo 2: Ekstruusioöljyn poistaminen prosessista ja uusi ruuvikokoonpano

Ensimmäisen koeajon päätteeksi laadittiin ehdotetut toimenpiteet seuraavaa koeajoa varten. Yhtä tarkkaa suunnitelmaa ei laadittu kuin aikaisemmassa kokeessa. Prosessissa tapahtuvien muutosten ennakoiminen koettiin hankalaksi eikä suuria hyötyjä saavutettu. Pääajatus oli

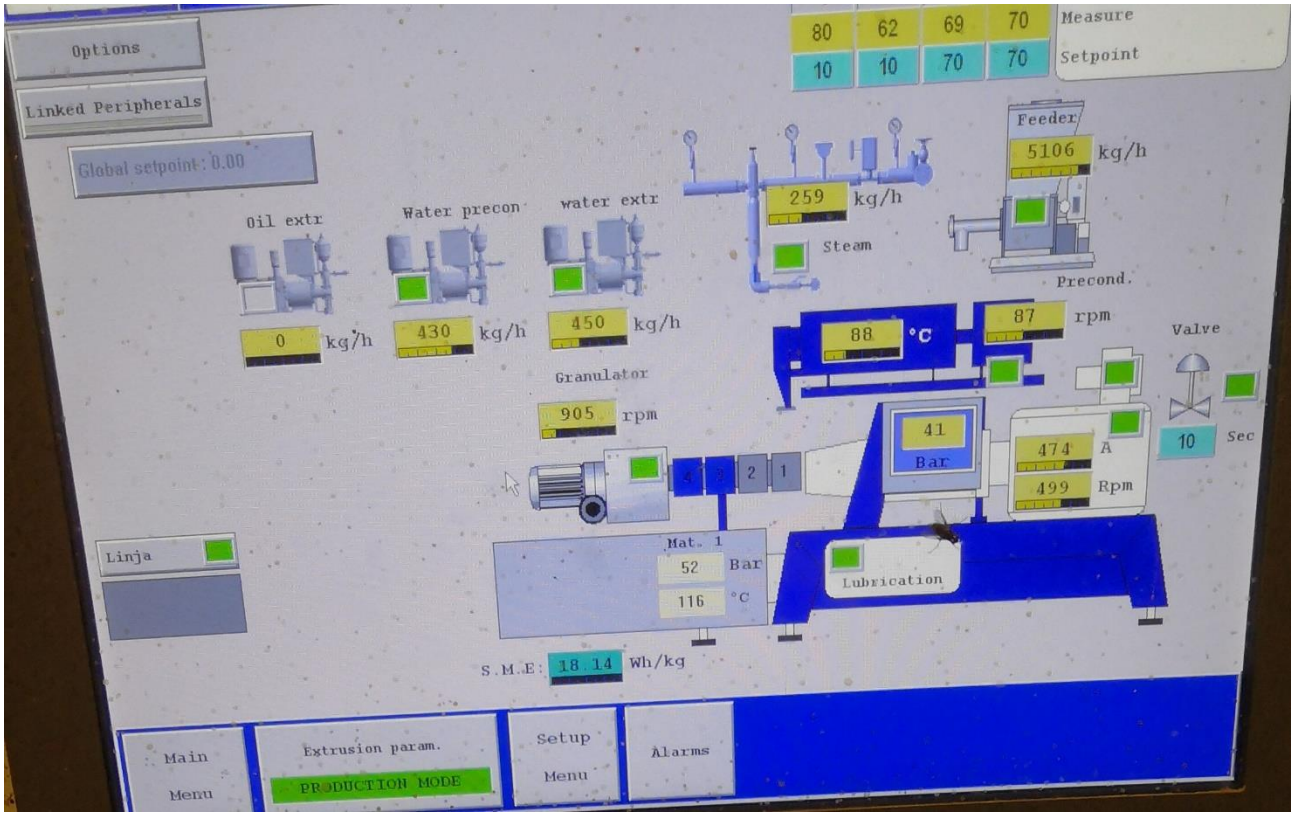
ruuvikokoonpanon muuttaminen vähemmän aggressiiviseksi, jotta ampeerit eivät nousisi kokeessa niin paljon, kun ekstruusioöljyn määrää vähennetään. Samalla kuitenkin pyrittiin saamaan SME-lukemaa kasvatettua. Uusi koeajo ekstruusioöljyn poistamiseksi prosessista tehtiin toisella rehureseptillä. Tässä rehureseptissä ekstruusioöljyä on myös tyypillisesti käytetty runsaasti. Ensimmäisestä koeajosta poiketen rehusta ei otettu kuivaamattomia näytteitä suoraan ekstruuderilta, koska rehua ei saatu kuivattua tasaisesti aiemmassa kokeessa, eikä sillä koettu olevan vaivaan nähden lisähyötyä. Rehuun ei myöskään tehty kontrolliajoa, vaan kontrollina käytettiin viiden edellisen ajokerran keskiarvoja fyysisen laadun mittauksista.

Koeajon kulku

Koeajossa ekstruusioöljy saatiin kokonaan poistettua koerehusta. Valmiista rehusta otettiin tästä vaiheesta näyte, josta mittaustulokset on saatu. Koeajossa muodostui puolikkaita pellettejä jo ekstruuderin ulostulolinjalla. Lisäksi rehuissa oli jonkin verran halkeamia. Jälkirasvauksessa rehuun ei koeajon aikana saatu mahdutettua sen speksien mukaista määrää öljyä, vaan rehu jäi vaaditulla määrällä pinnaltaan öljyiseksi. Tästä syystä jälkirasvauksen öljyn määrää tiputettiin normaaliin nähden. Jälkirasvauksen määrän tiputuksesta huolimatta rehun ominaispainosta tuli kuitenkin tarpeeksi suuri siten että se upposi upotuskokeessa.

SME:tä ei saatu nostettua koeajon aikana, koska ampeerit jäivät alhaiseksi ja kuivamassan syöttöä jouduttiin nostamaan runsaasti hyvän pelletin saamiseksi. Arvioitiin, että SME laski aiempiin ajoarvoihin nähden. Koeajossa havaittiin myös, että ekstruuderin ruuvien kierroslukemat eivät nouse yli 630 kierroksen minuutissa, kun maksimin pitäisi olla 800 kierrosta minuutissa.

Lopulliset ajoarvot on kuvattu alla olevassa kuvassa 10. Ekstruuderilla lisättävä öljy saatiin kokonaan pois. Valmentimeen laitettiin vettä 430 kg/h ja ekstruuderin putkeen 450 kg/h. Höyryä lisättiin valmentimeen 260 kg/h ja putkelta se otettiin kokonaan pois, mikä ei näy kuvassa. Kokonaiskosteus kuivamassan kosteus mukaan lukien oli noin 24,7 %.



Kuva 10: Koeajon lopulliset ekstruusioparametrit

Tulokset

Rehun fyysisten mittausten tulokset on kuvattu taulukossa 6. Pellettien kovuus kasvoi kyseisen rehureseptin tyypilliseen kovuuteen nähden runsaasti. Sen kestävyys Doris-mittauksessa ei kuitenkaan kaikelta osin kasvanut, vaan se jopa hieman heikkeni kokonaisten pellettien osalta keskiarvoon nähden. Kuitenkin pölyä muodostui ala-astiaan vähemmän, joten tulos on tulkinnanvarainen. Lisäksi pystyttiin päättelemään, että öljyn vuotaminen ja pölyn jääminen Doris-laitteistoon vähentyi. Rehussa oli jonkin verran puolikkaita, jotka syntyivät jo ekstruuderista ulos tullessaan. Tästä syystä mahdollisesti myös rehun Doris-tulokset olivat yläsihdin osalta keskimääräistä alhaisemmat. Puolikkaat eivät kuitenkaan enää hajonneet niin paljon pölyksi kuin kontrollirehuissa.

Rehusta tuli puolikkaat ja säröt pois lukien erittäin hyvän näköinen. Pellettiin tuli normaalia parempi, tasainen ja kiiltävä pinta ja se oli verrattain tasainen pituudeltaan ja paksuudeltaan. Lisäksi pölyä oli erittäin vähän.

Taulukko 6: Koerehun fyysisen laadun tulokset

	Doris-yläsihti	**Doris-alasihti**	**Doris-ala-astia**	**Todellinen pöly & öljy**	**Kovuus**
Keskiarvo aiemmat 5 ajoa	90,00 %	6,50 %	1,47 %	3,50 %	38,5 N
Koerehu	87,33 %	11,2 %	1,00 %	1,50 %	65,9 N

Koeajon ja tulosten analysointi

Kovuuden parantuminen voidaan kirjallisuuden perusteella selittää ekstruusioöljyn poistolla. Lisäksi normaaleihin ajoarvoihin nähden myös höyryn syöttö otettiin pois ekstruuderin putkelta, mikä parantaa kovuutta (Sørensen 2010a). Öljyn poisto johti myös siihen, että kuivurin suhteellinen kuivausteho nousi. Tätä ei ehditty huomioida kuivurin asetuksissa ja pelletistä tulikin tämän seurauksena kuivurin automaatiomittauksen mukaan tavallista kuivempaa. Tämä on myös mahdollisesti lisännyt puolikkaiden pellettien määrää, sillä myöhemmissä ekstruusiokokeissa kuivurin asetusten huomattiin liittyvän tähän.

SME jäi alhaiseksi. Lopulliseksi arvoksi muodostui vain noin 18 Wh/kg. Tämä on alhaisempi kuin normaalisti ja reilusti alempi, mitä kirjallisuuslähteiden perusteella sen pitäisi olla. Mahdollisesti muun muassa tästä johtuen pellettiin ei saatu reseptin mukaista määrää rasvaa jälkirasvauksessa. Alhainen SME johtuu alhaisista ampeereista ja suuresta massan syötöstä.

Kirjallisuuslähteiden perusteella kalanrehun valmistuksessa SME:n pitäisi olla 25-60 Wh/kg (Bouvier & Campanella 2014; Young & Forte 2017). Tyypillisiksi kierroslukemiksi Bouvier & Campanella (2014) ilmoittaa 500-800 RPM. Maksimissa 630 RPM:ssä ekstruuderi vaikutti epävakaalta ja piti kovaa ääntä. Korkeat kierrokset ovat kokemuksen mukaan nostaneet pelletin kovuutta ja täten parantaneet fyysistä laatua, mikäli resepti on mahdollistanut kierrosten nostamisen. Olisi siis mahdollista, että muutokset ekstruuderilla 800 RPM:n kierroslukeman saavuttamiseksi voisivat parantaa pelletin laatua entisestään. 630:ssä ekstruuderi kuitenkin kuulosti toimivansa aivan äärirajoilla. Tämä saattaisi mahdollisesti johtua esimerkiksi liian pienitehoisesta moottorista. Ampeerit jäivät suuremmasta massansyötöstä huolimatta normaalia alhaisemmaksi ja kierroslukemien nosto taas yleensä alentaa ampeereita lisää. Voisi olla siis järkevää suunnitella myös ruuvikokoonpano uudestaan siten että ruuvin täyttöaste

kasvaa, jolloin ampeerit kasvavat. Myös kuivamassan syöttöä pystyttäisiin tällöin laskemaan. Näillä toimenpiteillä SME saataisiin lähemmäs suositusarvoja.

8.3 Koeajo 3: Prosessin lisäsäädöt

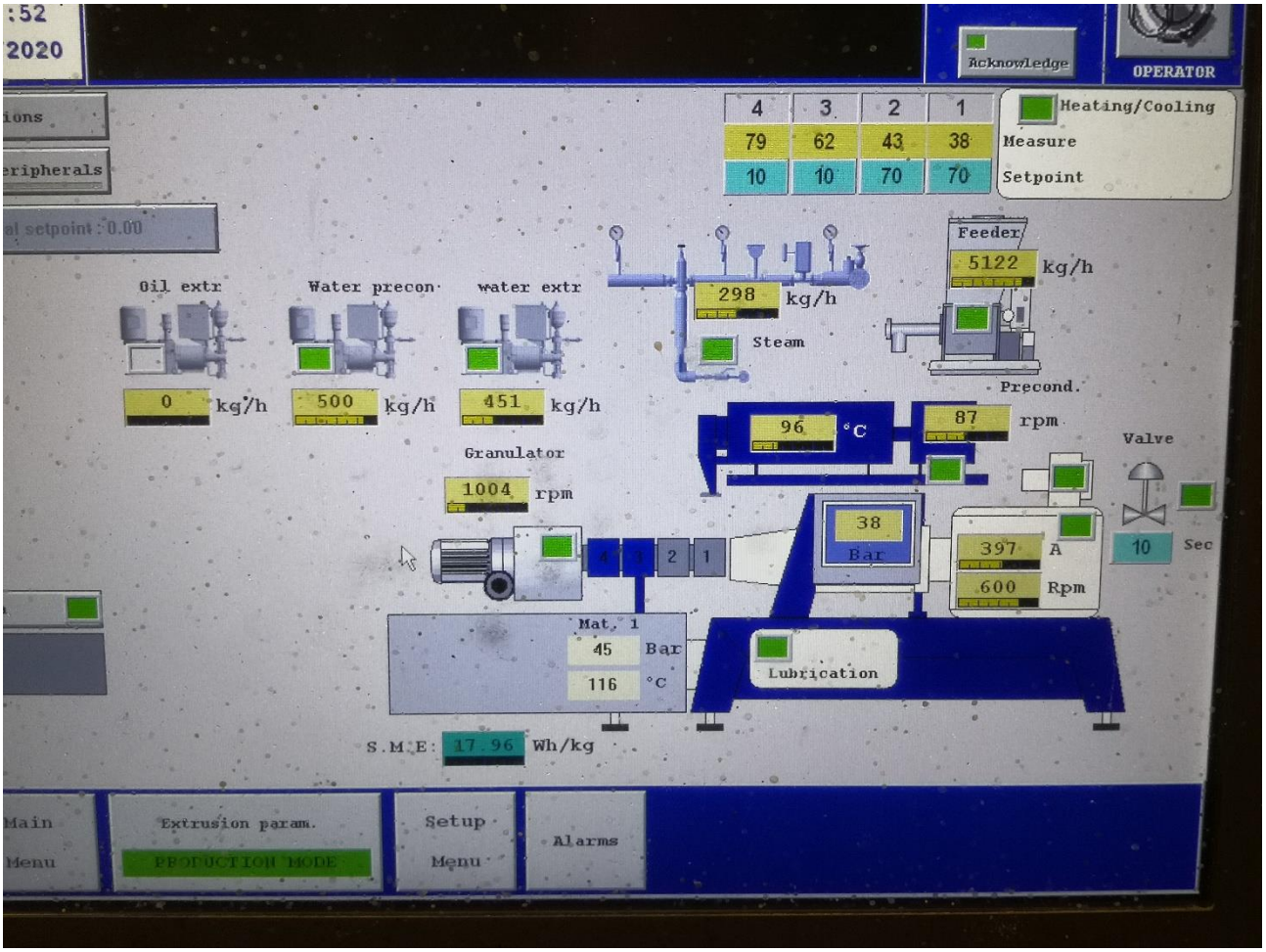
Seuraava koeajo päätettiin tehdä samalla ruuvikokoonpanolla kuin aiemmin, vaikka erilaisia ongelmia siihen liittyen tiedostettiin. Tämä johtui siitä, että pelletin kovuus kasvoi, siihen oli kokonaisuudessaan kuitenkin saatu hyvä ulkonäkö eikä pelletissä ollut pintapölyä. Näiden vuoksi uusi koeajo tehtiin samalla ruuvikokoonpanolla ja samalla reseptillä. Koeajossa pyrittiin vähentämään viime koeajossa syntyneiden puolikkaiden määrää sekä parantamaan rasvanimukykyä. Tähän pyrittiin muun muassa kasvattamalla rehun pullahtamista ja SME:tä kasvattamalla kierroslukemia ja veden määrää.

Koeajon kulku

Koeajo aloitettiin laittamalla samat ajoasetukset ekstruuderiin kuin aikaisemmassa koeajossa. Pelletistä ei kuitenkaan saatu samoilla asetuksilla ja samalla reseptillä yhtä hyvää, vaan siinä oli esimerkiksi pituusvaihteluita. Tämä johtui todennäköisesti raaka-aineiden laadussa tapahtuneesta muutoksesta.

Alkutilanteesta päädyttiin kasvattamaan kierroksia 600 RPM ja kasvattamaan kosteuksia sekä syöttöä. Tällöin SME pysyi suurin piirtein samassa edellisen koeajon kanssa, vaikka ampeerit nousivat. Tavoitteena oli kuitenkin saada nostettua SME:tä, mikä ei koeajossa näin ollen toteutunut.

Kuvassa 11 näkyy lopulliset ajoarvot ekstruuderilla. Öljy on otettu pois ekstruusiosta. Vettä lisätään valmentimeen 500 kg/h ja ekstruuderille 450 kg/h. Höyryä menee valmentimeen 300 kg/h ja ekstruuderin putkelle 88 kg/h. Kokonaiskosteus 7,9 %:n kuivamassan kosteudella laskettuna oli noin 27,0 %.



Kuva 11: Koeajon lopulliset prosessiparametrit

Tulokset

Pelletin kovuus ja Doris-kestävyys laski edelliseen koeajoon nähden. Tyypilliseen tulokseen nähden ne olivat edelleen kovuuden osalta suurempia, mutta Doris testin osalta huonompia. Rehujen puolikkaiden syntyminen ekstruuderilla pieneni edelliseen koeajoon nähden, mutta puolikkaita muodostui edelleen myöhemmin tuotannossa. Valmiissa rehussa näytti siltä, että pölyn määrä edelliseen koeajoon nähden hieman kasvoi. Valmistettu rehu läpäisi upotuskokeen.

Taulukko 7: Koerehun fyysisen laadun tulokset

	Doris-yläsihti	**Doris-alasihti**	**Doris-ala-astia**	**Todellinen pöly & öljy**	**Kovuus**
Keskiarvo aiemmat 5 ajoa	90,00 %	6,50 %	1,47 %	3,50 %	38,5 N
Koerehu 1	87,33 %	11,2 %	1,00 %	1,50 %	65,9 N
Koerehu 2	85,50 %	12,5 %	1,33 %	2,00 %	63,0 N

Koeajon ja tulosten analysointi

Muutoksista huolimatta rehun öljynimukyky ei parantunut merkittävästi. Tämä voisi johtua esimerkiksi siitä, että sen SME pysyi käytännössä samana. On kuitenkin myös epäselvää, mikä reseptin öljynimukyky ylipäätään oli. Reseptissä ei esimerkiksi ollut yhtään vehnägluteenia, mikä Draganovic et al. (2013) mukaan edistää öljyä imevien kammioiden syntyä rehussa.

Pelletin kestävyys ja kovuus heikkeni aiempaan koerehuun nähden. Tulokset eivät kuitenkaan heikentyneet erityisen merkittävällä tavalla. Syy heikkenemiseen ei ole täysin yksiselitteinen, koska reseptin raaka-aineet olivat samat. Raaka-aineiden laadussa on kuitenkin saattanut olla vaihteluita edelliseen koeajoon nähden, mihin viittaa muun muassa se, että samoilla ajoarvoilla ei saatu samanlaista rehua edelliseen koeajoon nähden. Pelletti oli enemmän pullahtanut kuin aiempi koerehu. Tämä johtui lähes kaikista ekstruuderilla tehdyistä säädöistä. Kierroslukemien kasvattaminen ja höyryn lisääminen putkeen kasvattaa pullahtamista (Sørensen 2010a; Sørensen 2011a). Pullahtamisen taas on havaittu Sørensenin (2012) mukaan monessa tutkimuksessa heikentävän kovuutta ja kestävyyttä.

Koeajon perusteella näytti siltä, että koeruuvikokoonpano ei sopinut sovellettavaksi suoraan tuotannossa. Ampeerit olivat varsin alhaiset suhteessa rehun kuivamassan syöttömäärään. Tämä johtui todennäköisesti siitä, että ruuvikokoonpano laski ekstruuderin täyttöastetta suhteessa aiempaan. Kokeista pystyttiin kuitenkin päättelemään, että ekstruusioöljyn pystyy ottamaan pois, jolloin pelletin kovuus kasvaa. Jotta paremman fyysisen laadun pellettiin päästään, olisi ruuvikokoonpanoa muutettava sellaiseen suuntaan, että ekstruuderin täyttöaste saataisiin suuremmaksi, kuitenkin siten että rasvaa ei tarvitse lisätä ekstruusiossa.

8.4 Koeajo 4: Ekstruusioöljyn vähentäminen, SME:n kasvattaminen ja jauhatuksen pienentäminen

Koeajo 4 tehtiin aiemmista rehuista täysin poikkeavalla reseptillä. Aiempiin resepteihin verrattuna rehussa oli soijaproteiinin tilalla vehnägluteenia ja härkäpapua. Ruuvikokoonpano oli sama kuin koeajossa 1. Koeajo 4 oli aikaisempia koeajoja pidempi. Prosessiin tehtiin ajon aikana useampia muutoksia ajoasetuksiin. Koeajosta otettiin neljä eri näytettä ajoasetusten muutosten mukaan.

Pääasiallisesti kokeessa pyrittiin kasvattamaan SME:tä ja vähentämään ekstuusioöljyä, kuten aikaisemmissakin koeajoissa. Lisäksi oli havaittu, että kirjallisuuden perusteella jauhatuksella saattaa olla merkittävä vaikutus rehun laatuun. Kirjallisuuden mukaisen keskimääräisen jauhatustuloksen arvioitiin olevan epätodennäköinen nykyisellä jauhatuksella. Tästä syystä koeajossa jauhatuksen vasaramyllyyn vaihdettiin 1,0 mm jauhatussihdit tyypillisen 1,5 mm sihdin sijaan.

Koeajon kulku

Koeajossa ekstruusioöljyä lähdettiin tiputtamaan 130 kg/h:sta ja päädyttiin lopulta 0 kg/h. Lisäksi SME:tä kasvatettiin samalla ja kierroslukemia 490 RPM:stä 600 RPM:ään. Rehuista otettiin neljä eri näytettä. Koeajossa säädettiin myös kuivurin asetuksia siten että pelletti ei ekstruusioöljyn poistosta huolimatta kuivunut liikaa niin kuin aikaisemmissa koeajoissa, vaan pysyi nyt normaaleissa rajoissa. Lopulliset ekstruuderin asetukset on esitetty alla olevassa taulukossa 8.

Taulukko 8: Koerehun lopulliset ekstruusioparametrit

Parametrit	Kontrolli 130	Öljy 90/520 RPM	Öljy 0/520 RPM	Öljy 0/600 RPM
Syöttöteho [kg/h]	4200	4250	4350	5100
Valmennin vesi [kg/h]	480	480	480	510
Ekstruuderi vesi [kg/h]	420	420	400	400
Valmennin höyry [kg/h]	210	240	210	240
Ekstruuderi höyry [kg/h]	80	0	0	0
Virta [A]	400	441	550	564
Massan lämpö [ºC]	111,5	111,6	115,7	122,7
Ruuvin nopeus [RPM]	490	450	520	600
SME [Wh/kg]	~17	~20	~25	~26
Kokonaiskosteus (kuivamassa 7,9%)	27,6 %	26,9 %	26,4 %	24,8 %

Tulokset

Kovuus ja Doris-tulokset kasvoivat selvästi öljyn vähennyksen ja SME:n kasvatuksen seurauksena, taulukko 9. Mitä vähemmän öljyä, suurempi SME ja isommat kierrokset, sen kovempi pelletistä käytännössä tuli ja sen kestävämpää siitä tuli. Tulokset eivät kuitenkaan ole ihan johdonmukaisia 90 kg öljynäytteen ja 130 kg öljynäytteen osalta Doris-testissä. Kun kierrokset ja SME ovat olleet kaikkein korkeimmalla viimeisessä rehussa, niin ala-astian ja laskennallisen pölyn ja öljyn erotus on nolla. Tästä voidaan päätellä, että Doris-laitteistoon ei poikkeuksellisesti jäänyt näytteestä käytännössä yhtään pölyä eikä öljyä.

Ulkoisesti rehusta myös tuli erittäin hyvännäköistä ja pölytöntä. Rehuun kuitenkin muodostui ajon aikana suurimmilla kierroksilla puolikkaita pellettejä ekstruuderilla sekä myöhemmin lisää tuotannossa. Tämä saattoi johtua joiltain osin suuresta ekstruusiolämpöjen kasvamisesta. Ajossa siirryttiin lopuksi 520 RPM:n kierroksiin, jolloin lämpötila laski. Puolikkaita ei enää tämän jälkeen muodostunut ekstruuderilla. Kuivurilla puolikkaita kuitenkin muodostui vähän, mutta kuivurin asetusten säätöjen jälkeen niitä ei enää syntynyt. Rehuun saatiin koko ajon aikana mahdutettua tarvittava määrä öljyä jälkirasvauksessa. Lisäksi rehu myös upposi täysin normaalisti.

Taulukko 9: Fyysisen laadun mittauksen tulokset

Öljy/Ruuvin kierrokset	Kovuus (30 pellettiä per näyte)	Doris-yläsihti	Doris-alasihti	Doris-ala-astia	Todellinen pöly ja öljy
130kg/490RPM	59,6 N	96,80 %	2,20 %	0,70 %	0,80 %
90kg/520RPM	66,3 N	96,20 %	2,80 %	0,80 %	1,00 %
0kg/520RPM	77,5 N	97,80 %	1,30 %	0,70 %	1,00 %
0kg/600RPM	81,35 N	97,30 %	2,20 %	0,50 %	0,50 %

Tulosten analysoiminen

Ekstruuderin asetusten säätämisen mahdollisti aikaisemmista koeajoista poikkeava resepti. Reseptissä oli aikaisempiin nähden suurempi määrä kalajauhoa ja vehnägluteenia, kun taas aiemmissa resepteissä oli soijaproteiinia. Vehnägluteeni ja kalajauho eroavat soijaproteiinista muun muassa siinä mielessä, että niillä on huomattavasti alhaisempi vedensitomiskapasiteetti (Draganovic et al. 2011). Reseptin raaka-aineiden korkea vedensitomiskapasiteetti kasvattaa ekstruuderin vääntöä (Draganovic 2017; et al. 2011), mikä tarkoittaa laitteiston tehon käytön kasvua eli enemmän ampeereita. Nyt reseptin raaka-aineet tuottivat alhaiset ampeerit, kuten kontrollirehun ajoarvoista on pääteltävissä. Tämä mahdollisti myös ekstruusioasetusten säätämisen siten että SME:tä pystyttiin kasvattamaan ja ekstruuderilla lisättävä öljy ottamaan pois kokonaan. Kumpikin näistä johtaa kirjallisuuden mukaan parempaan rehun fyysiseen laatuun (Kearns & Rokey 2014; Riaz & Rokey 2012, 51).

Aiemmista koeajoista poiketen koeajossa ei myöskään nyt tullut ongelmia rasvan imeytymisen suhteen. Rasvaa saatiin rehuun mittausten mukaan täysin oikea määrä. Kokeessa löydetyt hyvät toimintatavat pystyttiin ottamaan koeajon reseptissä suoraan käytäntöön.

Koeajossa 4 pystyttiin hyödyntämään useaa erilaista inkrementaalista prosessi-innovaatiota, jotka samanaikaisesti johtivat sekä rehun fyysisen laadun paranemiseen, pienempään hävikkiin että mahdollisesti pienempiin kokonaisprosessikustannuksiin kuivurin pienemmän kuivaustehon käytön vuoksi. Kun pystyttiin onnistuneesti ketjuttamaan suurempi SME lukema, ekstruusioöljyn poistaminen ja pienempi jauhatus, rehun fyysinen olemus parani huomattavasti sekä visuaalisesti että mittarien perusteella. Jauhatuksen vaikutusta ei kuitenkaan tämän kokeen perusteella täysin todistettu, koska siihen ei ollut kontrollia ja prosessissa tehtiin monta muutosta kerrallaan.

8.5 Koeajo 5: Esigelatinoitujen tärkkelysten kokeileminen ja siihen liittyvä innovaatioprosessi

Tässä osiossa on kuvailtu esigelatinoitujen tärkkelysten käyttöönottamiseen liittyvä projekti, jossa hyödynnetään kalanrehuteollisuuden innovaatioprosessia. Prosessi on kuvattu sivulla 10. Seuraavat väliotsikot on nimetty innovaatioprosessin osien mukaisesti. Esigelatinoitujen tärkkelysten innovaatioprosessi ei noudattanut täysin kalanrehun innovaatioprosessin teoriaa. Kaikkia innovaatioprosessiin kuuluvia vaiheita toteutettu eikä niitä tässä diplomityössä ollut myöskään tarpeen toteuttaa. Projektin suunnitteluosio jätettiin väliin ja siirryttiin suoraan tutkimus ja kehitysvaiheeseen. Valmistettujen koerehujen mitattu fyysinen laatu kasvoi, mutta eivät riittävästi suhteessa hintaan. Tästä syystä tutkimus ja kehitysvaiheen koeajojen jälkeen innovaatioprosessi keskeytettiin.

Reagointivaihe

Kesällä ennen diplomityön aloittamista oli tiedossa, että rehussa on toisinaan fyysisen laadun poikkeamia. Rehuun syntyi joskus pölyä tuotannossa ja sen saapuessa asiakkaalle fyysisestä laadusta tuli välillä reklamaatioita. Syyksi tähän oli analysoitu pelletin pehmeys.

Ideointi ja ratkaisujen etsiminen

Ongelman ratkaisemiseksi syntyi syksymmällä idea kirjallisuuden pohjalta, josta diplomityön kirjoittaja myöhemmin teki aloitteen. Aloite koski esigelatinoidun tärkkelyksen käyttöönottamista rehuissa. Tehtiin päätös, että ideaa lähdetään viemään eteenpäin.

Tutkimus ja kehitys

Myöhemmin diplomityön alkaessa alkoi tutkimus siitä, mitä tärkkelyksiä kirjallisuuden perusteella halutaan kokeilla. Kirjallisuuden perusteella parhaaksi arvioitua tärkkelyksen lähdettä kovuuden kehittämiseksi ei ollut kaupallisesti saatavana. Tästä syystä tärkkelyksen lähteeksi valittiin hernetärkkelys, joka kirjallisuuden perusteella arvioituna oli varteenotettava vaihtoehto. Toiseksi tärkkelyksen lähteeksi valittiin perunatärkkelys, jota oli muusta syystä

valmiiksi saatavilla. Käytettävissä olevien resurssien ja tarvearvioinnin pohjalta tehtiin tilaus koe-erän valmistamista varten. Arvioita raaka-aineiden kustannuksista lopullisina rehun raaka-aineina ei kuitenkaan laadittu. Tulevan koerehun muut raaka-aineet määritettiin sen perusteella, miten uusien raaka-aineiden arvioitiin vaikuttavan tuotantoon, jotta hyvät koerehut varmasti saadaan aikaiseksi.

Koeajon valmistelu ja kulku

Muista koeajoista poiketen tärkkelyskokeissa rehun reseptin raaka-aineita muutettiin. Tämä tapahtui sekä siitä syystä että uusia raaka-aineita kokeiltiin, mutta myös siksi että raaka-aineet kohdistivat erilaisia vaatimuksia tuotantoon. Oli etukäteen tiedossa, että esigelatinoidut tärkkelykset saattavat kasvattaa koneen tehon tarvetta suhteessa vehnään, jota niillä korvattiin. Tämä johtuu siitä, että gelatinoituessaan tärkkelyksen vedensitomiskapasiteetti kasvaa (Pinnavaia & Pizzirani 1998). Lisäksi tiedettiin että Zhang et al. (2016) mukaan peruna- ja hernetärkkelys johtavat kumpikin suurempaan vääntöön kuin vehnä, jolloin myöskin ampeerit tulevat kasvamaan. Tästä syystä rehuista poistettiin kokonaan Draganovic et al. (2011) mukaan korkeampaa vääntöä aiheuttava soijaproteiini ja tilalle laitettiin vehnägluteenia. Kokeessa pääidea oli korvata puolet vehnästä koetärkkelyksillä. Koerehujen erot pyrittiin reseptejä laadittaessa muutoin pitämään kaikilta osin niin pieninä kuin käytettävien raaka-aineiden puolesta oli mahdollista.

Kattavien valmisteluiden ansiosta kaikista rehuista saatiin aikaiseksi hyviä pellettejä. Koerehut ajettiin peräkkäin jatkuvana ajona. Ensimmäisenä ajettiin perunatärkkelys, toisena herne ja lopuksi vehnä. Prosessiparametrit pyrittiin pitämään samoina eikä niitä tarvinnut juurikaan muuttaa. Rehujen lopulliset prosessiparametrit on esitelty alla olevassa taulukossa 10.

Taulukko 10: Rehujen lopulliset prosessiparametrit

Parametrit	Kontrolli - Vehnä	Koerehu - Esig. herne	Koerehu - Esig. peruna
Syöttöteho [kg/h]	3600	3550	3500
Valmennin vesi [kg/h]	300	300	260
Ekstruuderi vesi [kg/h]	380	370	450
Valmennin höyry [kg/h]	190	190	190
Ekstruuderi höyry [kg/h]	0	0	0
Ekstruuderi öljy [kg/h]	80	80	80
Virta [A]	547	613	619
Massan lämpö [ºC]	116,5	114,4	111,9
Ruuvin nopeus [RPM]	400	400	400
SME [Wh/kg]	~23	~26	~26,5
Kokonaiskosteus (kuivamassa 7,9%)	25,4 %	25,4 %	26,3 %

Koeajojen tulokset

Näytteet haettiin varastosta, keskeltä koe-eriä, jolloin prosessisäädöt olivat vakiintuneet. Tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan sekä kovuuden että Doris-testin osalta, taulukko 11. Tästä syystä muun muassa kovuustestauksessa päätettiin kasvattaa mittausten määrää 50 mittaukseen. Pelletit olivat ulkoisesti kaikki hyvän näköisiä, mutta eivät täysin pölyttömiä.

Taulukko 11: Tärkkelyskoerehujen fyysisen laadun tulokset

	Doris yläsihti	Yläsihti	Ala-astia	Todellinen pöly & öljy	Kovuus
Peruna	95,50 %	3,50 %	0,83 %	1,00 %	81,52 N
Herne	95,67 %	3,00 %	1,00 %	1,33 %	82,12 N
Vehnä	95,33 %	3,50 %	1,17 %	1,17 %	77,88 N

Koeajon tulosten analysoiminen

Koeajossa saatiin parannettua fyysisen laadun mittaustuloksia uusilla tärkkelyksillä. Rehun pölyisyydessä ei kuitenkaan näyttänyt tapahtuvan muutosta. Tuloksiin saattaa vaikuttaa muun muassa hernetärkkelyksen osalta se, että hernetärkkelyksen annostelu jouduttiin tekemään käsikaatona, jonka vuoksi se ei todennäköisesti sekoittunut yhtä tasaisesti kuin siilosta annosteltuna. Tulokset olivat erittäin tasaisia, eikä näiden perusteella suurta hyötyä esigelatinoidusta hernetärkkelyksestä tai perunatärkkelyksestä ole. Kuitenkin kirjallisuuden perusteella perunatärkkelyksen ja erityisesti esigelatinoidun perunatärkkelyksen pitäisi kasvattaa pelletin kovuutta suhteessa vehnään (Sørensen et al. 2010a). Tärkkelysten Doris-tulokset olivat myös lähes identtiset. Niiden perusteella kuitenkin on mahdollista, että herne ja

peruna ovat testauksessa vuotaneet hieman enemmän öljyä ulos Doris-testeriin. Suurempaa öljyn vuotoa vehnään nähden on havaittu sekä herneellä että perunalla (Sørensen et al. 2011a; b).

Pelletit poikkesivat toisistaan fyysisesti jälkirasvausprosessista otetuissa näytteissä ainakin perunan ja herneen osalta. Hernetärkkelystä sisältävä pelletti oli niin kovaa jo jälkirasvauksen jälkeen, että sitä ei pystynyt enää sormin puristamaan rikki. Vehnää sisältävän pelletin taas pystyi vielä jälkirasvauksen jälkeen puristamaan hajalle. Tämä saattoi johtua esimerkiksi hernetärkkelyksen korkeammasta amyloosipitoisuudesta, jonka seurauksena se on kovettunut nopeammin. Kuten tuloksista on nähtävissä, niin käytännössä kuitenkaan suuria eroja kovuuksissa ei usean päivän jälkeen ajosta enää ollut. Nopeammasta kovettumisesta voisi kuitenkin olla hyötyä esimerkiksi kesällä, jolloin pellettien varastointilämpötila on korkeampi, minkä taas pitäisi hidastaa tärkkelyksen retrogradaatiota.

Tärkkelyskokeet menivät yleisesti ottaen hyvin kaikkien rehujen osalta. Jokaisesta kokeen rehusta saatiin kelvollisia, asiakkaiden vaatimukset täyttäviä pellettejä. Rehuista ei tullut öljyisiä ja ne upposivat hyvin. Kaikkien rehujen kovuudet kasvoivat normaaliin tasoon nähden. Liian suuri rehun kovuus saattaa kuitenkin Aas et al. (2009) mukaan kirjolohella johtaa rehun alhaisempaan syötyyn määrään ja huonompaan kasvuun. Muun muassa tästä syystä valmistettujen rehujen suhteen harkittiin ruokintakokeen tekemistä kuten kalanrehun innovaatioprosessissa koerehun suhteen joskus toimitaan. Käytetyistä esigelatinoiduista tärkkelyksistä itsessään tiedettiin kuitenkin kirjallisuudesta, että ne imeytyvät hyvin, eikä sisällyttämistaso reseptiin ollut huomattavan korkea. Raaka-aineet eivät kuitenkaan niiden huomattavasti suurempaan hintaan nähden vaikuttaneet rehun laatuun riittävästi, jonka vuoksi päätettiin, että uusia raaka-aineita ei etenkään tästä syystä oteta osaksi tuotantoa. Näistä syistä ruokintakoetta ei myöskään katsottu tarpeelliseksi toteuttaa ja raaka-aineisiin liittyvää innovaatioprosessia ei jatkettu enää tuotantovaiheeseen.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Ravinnonlähteenä viljellyn kalan osuus suhteessa luonnon kalaan tulee kasvamaan maailmanlaajuisesti. Tämä tulee näkymään suurempana kalanrehun tarpeena. Suurempi rehun käyttö voi johtaa vesistöjen suurempaan ravinnekuormitukseen, minkä vuoksi rehun fyysisen laadun merkitys tulee luultavasti kasvamaan entisestään. Rehun fyysisen laadun merkitykset ovat myös taloudellisia. Näistä syistä rehun fyysisen laadun kehittäminen on tärkeää myös tulevaisuudessa.

Ekstruusiolla valmistetun kalanrehun fyysinen laatu riippuu paljon käytetyistä raaka-aineista, niiden laadusta ja käytetyistä prosessiparametreista. Uusien ja entistä parempien raaka-aineiden etsiminen on tärkeää. Vielä tärkeämpää on kuitenkin ymmärtää nykyään käytettyjen raaka-aineiden vaikutukset laatuun ja prosessiparametreihin, jotta laatuvaihtelu voidaan minimoida.

Tämä tutkimus pyrki selvittämään, mitkä säädettävissä olevat tekijät tuotantoprosessissa vaikuttavat rehun laatuun ja minkälaisia inkrementaalisia prosessi-innovaatioita tuotantoprosessissa pystytään tekemään, jotta rehun fyysinen laatu paranee. Työ pyrki myös löytämään keinot siihen, miten nämä muutokset saadaan myös käytännössä toteutettua. Kirjallisuuden perusteella ensisijaisiksi keinoiksi valittiin ekstruusiossa lisättävän öljyn määrän vähentäminen ja SME:n kasvattaminen. Tämän lisäksi tutkittiin myös jauhatuksen sekä rehun kuivurin asetusten vaikutusta laatuun.

Työn tulokset osoittivat, että rehun fyysisten laatumittareiden arvoja pystyy parantamaan huomattavasti vähentämällä ekstruusioöljyä ja kasvattamalla SME:tä. Lisäksi laatua pystyttiin aiempien muutosten seurauksena parantamaan myös kuivurin asetusten säädöillä. Viitteitä saatiin myös siitä, että jauhatuksen pienentäminen paransi rehun laatua, mutta täyttä varmuutta tästä ei näissä koeajoissa saatu. Työn tuloksista on pääteltävissä, että inkrementaalisten prosessi-innovaatioiden ketjuttamisella rehun fyysistä laatua ja sen laatumittaustuloksia pystyttiin parantamaan merkittävällä tavalla.

Ekstruusioöljyn ja SME:n muutoksia ei kaikissa rehuresepteissä onnistuttu tekemään siten että myyntikelpoista rehupellettiä olisi saatu aikaiseksi. Työn tuloksista on kuitenkin pääteltävissä,

että nämä inkrementaaliset parannukset todennäköisesti pystytään tekemään silloin, kun samalla tehdään muutoksia ruuvikokoonpanoon. Sopivaa ruuvikokoonpanoa ei tässä diplomityössä löytynyt. Nykyisellä ruuvikokoonpanolla muutokset ovat kuitenkin jo mahdollisia, mikäli reseptin raaka-aineet valitaan muutoksille suotuisiksi.

Tutkimus pyrki myös selvittämään sitä, miten ja millä keinoin raaka-aineet vaikuttavat rehun laatuun. Työssä havaittiin, että rehun raaka-aineiden vaikutus fyysiseen laatuun on merkittävä. Tämä selittyi kirjallisuuden perusteella raaka-aineiden sidosominaisuuksilla. Käytännön osiossa myös huomattiin joidenkin raaka-aineiden johtavan kirjallisuuteen verrattuna poikkeaviin prosessiparametreihin, jolloin pelletin fyysinen laatu kärsi. Lisäksi raaka-aineista haluttiin tietää erityisesti, miten esigelatinoidut tärkkelykset vaikuttavat rehun laatuun. Tutkimuksen perusteella tuotannossa kokeiltujen esigelatinoitujen tärkkelysten vaikutus rehun fyysiseen laatuun oli positiivinen, mutta vain vähäisessä määrin.

9.1 Pohdinta

Työssä saadut tulokset ovat lupaavia, ja antavat hyviä suuntaviivoja siitä, millä tavalla rehun fyysistä laatua voi jatkokehittää hyödyntäen inkrementaalisia prosessi- ja tuoteinnovaatioita. Koeajoissa kirjallisuuslähteisiin perustuvat SME:n kasvattaminen ja öljyn vähentäminen pystyttiin vahvistamaan, joten tulokset ovat täysin nykytiedon mukaisia. Kirjallisuuslähteiden perusteella jauhatuksen pienentäminen johtaa myös paremman fyysisen laadun rehupellettiin. Jauhatuksen vaikutusta ei kuitenkaan pysty erottamaan ilman kontrollia työssä tehdyn koeajon tuloksista. On kuitenkin kirjallisuuslähteiden perusteella epätodennäköistä, että jauhatuksen hienontamisella ei ollut positiivista vaikutusta rehun fyysiseen laatuun. Kuivurin säädöillä huomattiin olevan vaikutus silloin, kun ekstruusioöljy jätettiin pois. Tämä todennäköisesti johtuu siitä, että vähempirasvainen rehu kuivuu nopeammin, mikä myös kirjallisuuden mukaan pitää paikkansa. Kuivurin asetusten säätäminen vaikutti johtavan puolikkaiden pellettien syntymisen vähäisempään lukumäärään. Kirjallisuuden mukaan kuivurin asetuksilla on merkittäviä vaikutuksia pelletin fyysiseen laatuun.

Neljäs koeajo kuvaa hyvin inkrementaalisten prosessi-innovaatioiden ketjuttamisen vaikutusta. Koeajossa pystyttiin poistamaan sekä ekstruusiorasva että kasvattamaan SME:tä. Tämän lisäksi

jauhatuksen sihtien kokoa vielä pienennettiin ja lopulta kuivuria säädettiin. Näitä yksittäisiä pienempiä prosessi-innovaatioita ketjuttamalla saatiin aikaiseksi ulkoisesti erinomaisia, ravintoarvot täyttäviä rehupellettejä, jotka pärjäsivät huomattavan hyvin myös rehun fyysisen laadun kokeissa.

Suurin osa prosessikoeajojen tuloksista on loogisia ja ne ovat yhdenmukaisia kirjallisuuslähteisiin verrattuna. Ensimmäisessä koeajossa kuitenkin öljyn vähennyksen vaikutukset eivät ole yhden näytteen osalta johdonmukaisia. Tämä saattaa olla jonkinlainen mittavirhe, tai näyte otettiin väärästä kohtaa tai se meni sekaisin jonkin muun kanssa. On myös mahdollista, että ekstruuderin ylikuormittumiset vaikuttivat tulokseen jollakin tavalla.

Tärkkelyskokeen tulokset ovat kirjallisuuslähteiden kanssa osittain johdonmukaisia. Kahden aikaisemman tutkimuksen perusteella esigelatinoitu perunatärkkelys kasvattaa pelletin kovuutta ja kestävyyttä verrattuna vehnään. Kokeen perusteella vaikutukset ovat kuitenkin kirjallisuuslähteisiin verraten huomattavasti vaatimattomampia. Tärkkelyskirjallisuuden perusteella odotettiin, että herneestä tulee kovin pelletti ja mittarien mukaan tämä piti paikkansa. Erot kontrolliin ovat kuitenkin vaatimattomia ja tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan. Kirjallisuuden perusteella odotukset uusien tärkkelyslähteiden laatua parantavasta vaikutuksesta eivät vaikutuksen suuruudelta toteutuneet. Tuloksia saattaisi selittää se, että esigelatinoidut tärkkelyslähteet kokeessa eivät välttämättä olleet erityisen hyvin gelatinisoituneita. Tämä selittäisi lisäksi sitä, miksi raaka-aineen vaihtuessa muutokset ampeereissa jäivät odotettua pienemmiksi. Tällöin vaikutukset fyysiseen laatuunkin jäävät heikommiksi.

Tutkimus jäi rajoittuneeksi esigelatinoitujen tärkkelyslähteiden valinnassa. Niiden valintamenetelmään perustuen parhaimpia tärkkelyksen lähteitä ei ollut tarjolla. Lisäksi tutkimustietoa LBCA:n todellisesta määrästä herneen osalta ei löytynyt. LBCA:n todellinen määrä ei kuitenkaan olisi todennäköisesti vaikuttanut valintaan. Lisäksi oli hyvin tiedossa, että tärkkelyslähteiden amyloosin ja amylopektiinin pitoisuuksissa esiintyy runsaasti vaihtelua. Todellisuudessa ei siis tiedetä sitä, miten paljon amyloosin ja LBCA:n määrä kontrollirehuun nähden nousi.

9.2 Ehdotukset jatkotoimenpiteille ja suositukset

Koska kalanrehun valmistuksessa ekstruuderilla SME:n voi kirjallisuuden perusteella nostaa aina 60 Wh/kg, niin voisi olla järkevää kehittää uusia ratkaisuja SME:n nostamisesta entistä korkeammaksi. Rehun laatu saattaisi tällöin parantua lisää. Yksi tämän mahdollistavista ratkaisuista voisi tulevaisuudessa olla se, että ruuvien pyörimisnopeudet saataisiin korkeammaksi. Koeajojen tuloksista päätellen voisi myös olla järkevää selvittää uudenlaisen ruuvikokoonpanon käyttöönottamista tehtaalla. Uudesta ruuvikokoonpanosta olisi eniten hyötyä silloin, jos se saataisiin sellaiseksi että ekstruusioöljyn pystyy ottamaan pois tai vähentämään sekä samalla nostamaan kierroslukemat kalanrehun kirjallisuuden suosittelemalle tasolle. Tällöin pystyttäisiin kasvattamaan SME:tä entisestään. Tämä voisi johtaa entistä parempaan pelletin laatuun. Ekstruusioöljyn vähentäminen johtaa kuivausprosessin tehostumiseen. Kuivurin asetuksia pitää tämän jälkeen optimoida, jotta pelletin fyysinen laatu ei kärsi. Tämä tarkoittaa kuitenkin myös potentiaalisesti pienempiä prosessikustannuksia.

Kirjallisuuden perusteella pienempi jauhatus kasvattaa pelletin fyysistä laatua. Myös koeajot viittasivat tähän suuntaan, mutta useiden samanaikaisten muutosten vuoksi ja ilman kontrollirehua tätä ei pystynyt täysin vahvistamaan. Voisi olla hyvä tehdä mittaukset jauhatuksen jälkeisestä kuivamassan partikkelikoosta ja verrata sen mittaustuloksia kirjallisuuslähteisiin. On myös mahdollista, että keskitasoon nähden pienemmästä jauhatuksesta voisi olla hyötyä, mikäli muita prosessiparametreja ei pystytä tuomaan kirjallisuuden ehdottamalle tasolle. Tämä keskimääräistä alhaisempi jauhatus muun muassa saattaisi parantaa tärkkelyksen gelatinisoitumista.

Näitä kaikkia jatkotoimenpiteitä ja suosituksia toteuttamalla rehun fyysistä laatua pystyttäisiin todennäköisesti kasvattamaan lisää. Työ keskittyi pääasiassa ekstruusioöljyn ja SME:n kasvattamiseen. Kalanrehun valmistus on kuitenkin monimutkainen prosessi, jossa on paljon muitakin erilaisia muuttujia. Kokonaisvaltainen tuntemus rehun valmistuksen prosessista ja rehun raaka-aineista mahdollistaisi vielä merkittävämmän rehun laadun kehittämisen.

10 YHTEENVETO

Vaatimukset kalanrehun fyysiselle laadulle ovat kasvaneet viime vuosina. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kuinka kalanrehun fyysistä laatua pystytään parantamaan muuttamalla tuotannon prosessiparametreja ja löydökset oli tarkoitus mahdollisuuksien mukaan todentaa tuotanto-olosuhteissa. Tarkoitus oli myös selvittää, kuinka raaka-aineet vaikuttavat kalanrehun fyysiseen laatuun, erityisesti esigelatinoitujen tärkkelysten osalta.

Työn teoriaosiossa perehdyttiin inkrementaalisiin prosessi- ja tuoteinnovaatioihin sekä kalanrehuteollisuuden innovaatioprosessiin. Tämän lisäksi selvitettiin, miten raaka-aineet ja tuotantoprosessin eri osat, erityisesti ekstruusioprosessi ja sen prosessiparametrit, vaikuttavat rehun fyysiseen laatuun.

Soveltavassa osassa prosessin säädettävät tekijät ja esigelatinoitujen tärkkelysten lähteet valittiin. Valinnan jälkeen suoritettiin koeajoja. Koeajoista saatujen koerehujen fyysinen laatu todennettiin erilaisilla mittausmenetelmillä ja silmämääräisesti tarkastelemalla. Mittaustulosten ja silmämääräisen tarkastelun perusteella kalanrehun fyysistä laatua pystyttiin parantamaan merkittävästi työssä tehdyillä tuotantoprosessin muutoksilla. Muutokset koskivat pääasiassa ekstruusioöljyn vähentämistä ja SME:n kasvattamista. Rehun fyysinen laatu parani myös työssä kokeilluilla esigelatinoitujen tärkkelyksen lähteillä, mutta niiden merkitys fyysisen laadun kannalta näytti olevan hyvin vähäinen. Työn seurauksena syntyi inkrementaalisia prosessi-innovaatioita, jotka pystyttiin ottamaan suoraan käyttöön rehun valmistusprosessissa. Uudet raaka-aineet taas eivät olleet taloudellisesti kannattavia, joten niitä päätettiin olla hyödyntämättä jatkossa.

Jatkotoimenpiteenä inkrementaalisia prosessi-innovaatioita voisi vielä jatkaa rehun fyysisen laadun ja prosessin parantamiseksi. SME:n kasvattaminen vielä entisestään kirjallisuuslähteiden tasolle todennäköisesti parantaisi fyysistä laatua. Lisäksi ruuvikokoonpanon ja jauhatuksen jatkokehityksellä pystyttäisiin mahdollisesti parantamaan rehun fyysistä laatua. Fyysistä laatua voisi parantaa lisää myös optimoimalla kuivurin asetuksia.

LÄHTEET

Aas, T., Terjesen, B., Sørensen, M., Oehme, M., Sigholt, T., Hillestad, M., Holm, J. & Åsgård, T. 2009. Nutritional value of feeds with different physical qualities. Tromsø: Nofima. Report 21/2009

Aas, T., Oehme, M. Sørensen, M., He, G., Lygren, I. & Åsgård, T. 2011. Analysis of pellet degradation of extruded high energy fish feeds with different physical qualities in a pneumatic feeding system. *Aquacultural Engineering*, vol. 44, s. 25-34.

Aas, T., Ytrestøyl, T. & Åsgård, T. 2019. Resource utilization of Norwegian salmon farming in 2016. Tromsø: Nofima. Report 26/2019.

Adamidou, S., Nengas, I., Alexis, M., Foundoulaki, E., Nikolopoulou, D., Campbell, P., Karacostas, I., Rigos, G., Bell, G. & Jauncey, K. 2009. Apparent nutrient digestibility and gastrointestinal evacuation time in European seabass (Dicentrarchus labrax) fed diets containing different levels of legumes. *Aquaculture*, vol. 289, s. 106-112.

Aoki, N., Umemoto, T., Hamada, S., Suzuki, K. & Suzuki, Y. 2012. The Amylose Content and Amylopectin Structure Affect the Shape and Hardness of Rice Bread. *Japanese Society of Applied Glycoscience*, vol. 59, s. 75-82.

Barrows, F., Stone, D. & Hardy, R. 2007. The effects of extrusion conditions on the nutritional value of soybean meal for rainbow trout (Oncorhynchus mykiss). *Aquaculture*, vol. 265, s. 244-252.

Bouvier, J.-M. & Campanella, O. 2014. Extrusion Processing Technology: Food and Non-Food Biomaterials. 1 ed. Chichester: John Wiley & Sons.

Carvalho, C., Takeiti, C., Onwulata, C. & Pordesimo, L. 2010. Relative effect of particle size on the physical properties of corn meal extrudates: Effect of particle size on the extrusion of corn meal. *Journal of Food Engineering*, vol. 98, s. 103-109.

Chan, C., Tran, N., Dao, C., Sulser, T., Phillips, M., Batka, M., Wiebe, K. & Perston, N. 2017. Fish to 2050 in the ASEAN region. Penang: WorldFish ja Washington DC: International Food Policty Research Institute. Working Paper: 2017-01.

Chen, J.-F. 1990. Effects of amylose and amylopectin on the functional properties of starch. Pro Gradu-tutkielma. Ames: Iowa State University.

Chen, Y.-Y., McPherson, A., Radosavljevic, M., Lee, V., Wong, K.-S. & Jane, J. 1998. Effects of Starch Chemical Structures on Gelatinization and Pasting Properties. *Żywność. Technologia. Jakość,* vol. 4, nro. 17, s. 63-71.

Chinnaswamy, R. & Hanna, M. 1988. Relationship Between Amylose Content and Extrusion-Expansion Properties of Corn Starches. *Cereal Chemistry,* vol. 65, nro. 2, s. 138-143.

Chinprahast, N., Jantawat, P. & Kristavee, D. Functional Properties of Vacuum-dried, Freeze-dried and Spray-dried Porcine Blood Plasma. 1995. [WWW-dokumentti]. [Viitattu 7.6.2020]. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/265120508_Functional_Properties_of_Vacuum-dried_Freeze-dried_and_Spray-dried_Porcine_Blood_Plasma

Della Valle, G., Vergnes, B., Colonna, P. & Patria, A. 1997. Relations between rheological properties of molten starches and their expansion behaviour in extrusion. *Journal of Food Engineering*, vol. 31, nro. 3, s. 277-295.

Dethlefsen, M., Hjermitslev, N., Frosch, S., & Nielsen, M. 2016. Effect of storage on oxidative quality and stability of extruded astaxanthin-coated fish feed pellets. *Animal Feed Science and Technology*, vol. 221, s. 157-166.

Dethlefsen. M. 2017. Die Hard – improving the physical quality of extruded fish feed pellets. Väitöskirja, Technical University of Denmark, DTU Food.

Draganovic, V. 2013. Towards Sustainable Fish Feed Production Using Novel Protein Sources. Väitöskirja. Wageningen: Wageningen University.

Draganovic, V., van der Goot, A., Boom, R. & Jonkers, J. 2011. Assessment of the effects of fish meal, wheat gluten, soy protein concentrate and feed moisture on extruder system parameters and the technical quality of fish feed. *Animal Feed Science and Technology*, vol. 165, s. 238-250.

Draganovic, V., van der Goot, A., Boom, R. & Jonkers, J. 2013. Wheat gluten in extruded fish feed: effects on morphology and on physical and functional properties. *Aquaculture Nutrition*, vol. 19, s. 845-859.

Earle, M. 1997. Innovation in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*. Vol. 8, s. 166-175.

Eliasson, A.-C., Gudmundsson, M. & Svensson, G. 1995. Thermal Behaviuor of Wheat Starch in Flour – Relation to Flour Quality. *LWT - Food Science and Technology*, vol. 28, nro. 2, s. 227-235.

Euroopan Unioni. 2011. Komission asetus (EU) N:o 142/2011.

Forte, D. & Young, G. 2018. Gelatinised extruded feed: Does it matter? [WWW-dokumentti]. [Viitattu 6.6.2020]. Saatavilla: https://www.allaboutfeed.net/Equipment/Articles/2018/2/Gelatinised-extruded-feed-Does-it-matter-253018E/

Fredriksson, H., Silverio, J., Andersson, R., Eliasson, A.-C. & Åman, P. 1998. The influence of amylose and amylopectin characteristics on gelatinization and retrogradation properties of different starches. *Carbohydrate Polymers*, vol. 35, s. 119-134.

Garcia, S. & Grainger, R. 2005. Gloom and doom? The future of marine capture fisheries. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 360, s. 21-46.

Hanhinen, H. & Bjurström, E. 2019. Maa- ja metsätalousministeri täsmensi avustajansa lausuntoa: Suomesta täysin soijaton rehukäytössä vuoteen 2025 mennessä. [WWW-dokumentti]. [Viitattu: 5.6.2020]. Saatavissa: https://yle.fi/uutiset/3-10940292

Harmaakorpi, V., Oikarinen, T., Kallio, A., Mäkimattila, M., Rinkinen, S., Salminen, J. & Uotila, T. 2012. Innopakki: Käytäntölähtöisen innovaatiotoiminnan käsikirja. Lappeenrannan teknillinen yliopisto & Lahti School of Innovation.

Hegenbart, S. 1996. Understanding Starch Functionality. [WWW-dokumentti]. [Viitattu 6.6.2020]. Saatavilla: https://www.naturalproductsinsider.com/foods/understanding-starch-functionality

Hemmingsen, A., Stevik, A., Claussen, I., Lundblad, K., Prestløkken, E., Sørensen, M. & Eikevik, T. 2008. Water Adsorption in Feed Ingredients for Animal Pellets at Different Temperatues, Particle Size and Ingredient Combinations. *Drying Technology*, vol. 26, nro. 6, s. 738-748.

Indexmundi. 2020. Fishmeal Monthly Price - US Dollars per Metric Ton. [WWW-dokumentti]. [Viitattu: 7.6.2020]. Saatavilla: https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=fish-meal&months=240

Jane, J., Chen, Y.-Y., Lee, F., McPherson, A., Wong, K.-S., Radosavljevic, M. & Kasemsuwan, T. 1999. Effects of Amylopectin Branch Chain Length and Amylose Content on the Gelatinization and Pasting Properties of Starch. *Cereal Chemistry*, vol. 76, nro. 5, s. 629-637.

Johnsen, C., Hagen, Ø. & Bendiksen, E. 2011. Long-term effects of high-energy, low-fishmeal on growth and flesh characteristics of Atlantic salmon (Salmo salar L.). *Aquaculture*, vol. 312, s. 109-116.

Kanmani, N., Romano, N., Ebrahimi, M., Amin, S., Kamarudin, M., Karami, A. & Kumar, V. 2018. Improvement of feed pellet characteristics by dietary pre-gelatinized starch and their subsequent effects on growth and physiology in tilapia. *Food Chemistry*, vol. 239, s. 1037-1046.

Katyal, M., Singh, N., Chopra, N. & Kaur, A. 2019. Hard, medium-hard and extraordinarily soft wheat varities: Comparison and relationship between variuous starch properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 123, s. 1143-1149.

Kearns, J. & Rokey, G. 2014. Processing aquatic feeds to optimize nutritional and pellet characteristics. *Aquafeed: Advances in Processing & Formulation*, vol. 4, nro 4, s. 33-36.

Kraugerud, O., Jørgensen H. & Svihus, B. 2011. Physical properties of extruded fish feed with inclusion of different plant (legumes, oilseeds , or cereals) meals. *Animal Feed Science and Technology*, vol. 163, s. 244-254.

Leppänen, J. 2019. Ekstruusioprosessin jäähdytysveden hallinta - Ekstruuderin sylinterin jäähdytyksen optimointi. Opinnäytetyö. Turku: Turun Ammattikorkeakoulu, Energia ja ympäristötekniikka.

Lin, S., Hsieh, F. & H. Huff. 1997. Effects of lipids and processing conditions on degree of starch gelatinization of extruded dry pet food. *LWT – Food Science and Technology*, vol. 30, nro. 7, s. 754-761.

Liying, L., Yuan, T., Setia, R., Raja, R., Zhang, B. & Ai, Y. 2019. Characteristics of pea, lentil and faba bean starches isolated from air-classified flours in comparison with commercial starches. *Food Chemistry*, vol. 276, s. 599-607.

Loch, C. & Kavadias, S. 2008. Handbook of New Product Development Management. Oxford: Elsevier.

Lu, F., Haga, Y. & Satoh, S. 2015. Effects of replacing fish meal with rendered animal protein and plant protein sources on growth response, biological indices, and amino acid availability for rainbow trout Oncorhynchus mykiss. *Fisheries Science*, vol. 81, s. 95-105.

Miles, M., Morris, V., Orford, P., Ring, S. 1985. The roles of amylose and amylopectin in the gelation and retrogradation of starch. *Carbohydrate Research*, vol. 135, nro. 2, s. 271-281.

Morken, T., Kraugerud, O., Barrows, F., Sørensen, M., Storebakken, T. & Øverland, M. 2011. Sodium diformate and extrusion temperature affect nutrient digestibility and physical quality of diets with fish meal and barley protein concentrate for rainbow trout (Oncorhynchus mykiss). *Aquaculture,* vol. 317, s. 138-145.

Morken, T., Kraugerud, O.F., Sørensen, M., Storebakken, T., Hillestad, M., Christiansen, R. & Øverland, M. 2012. Effects of feed processing conditions and acid salts on nutrient digestibility and physical quality of soy-based diets for Atlantic salmon (Salmo salar). *Aquaculture Nutrition*, vol. 18, s. 21-34.

Mäntyneva, M. 2012. Kasvua innovaatioista. Helsinki: Kauppakamari.

Mäntyneva, M. 2016. Inkrementaalit prosessi-innovaatiot tuottavuuden parantamisessa. [WWW-dokumentti]. [Viitattu: 28.4.2020]. Saatavissa: https://unlimited.hamk.fi/yrittajyys-ja-liiketoiminta/inkrementaalit-prosessi-innovaatiot-tuottavuuden-parantamisessa/

Pansawat, N., Jangchud, K., Jangchud, A., Wuttijumnog, P., Saalia, F.-K., Eitenmiller, R.-R. & Phillips, R.-D. 2008. Effects of extrusion conditions on secondary extrusion variables and physical properties of fish, rice-based snacks. *LWT - Food Science and Technology,* vol. 41, nro. 4, s. 632-641.

Pinnavaia, G. & Pizzirani, S. 1998. Evaluation of the Degree of Gelatinization of Starchy Products by Water Holding Capacity. *Starch/Stärke,* vol. 50, nro. 2-3, s. 64-67.

Raisioaqua. 2020. Tarjonta. [WWW-dokumentti]. [Viitattu: 26.2.2020]. Saatavissa: http:www.raisioaqua.fi/rehut

Ratnayake, W., Hoover, R. & Werkentin, T. 2002. Pea Starch: Composition, Structure and Properties – A Review. *Starch/Stärke,* vol. 54, s. 217-234.

Riaz, M. & Rokey, G. 2012. Extrusion problems solved: Food, pet food and feed. Cambridge: Woodhead Publishing.

Riaz, M. 2000. Extruders in food applications. Boca Raton: CRC Press.

Rodríguez-Miranda, J., Delgado-Licon, E., Hernández-Santos, B., Reyes-Jaquez, D., Aguilar-Palazuelos, E., Medrano-Roldan, H., Navarro-Cortez, R.., Castro-Rosas, J. & Gómez-Aldapa, C. 2012. *Journal of Animal Production Advances*, vol. 2, nro. 7, s. 355-344.

Samuelsen, T.-A. & Oterhals, Å. 2016. Water-soluble protein level in fishmeal affects extrusion behaviour, phase transitions and physical quality of feed. *Aquaculture Nutrition*, vol. 22, s. 120-133.

Samuelsen, T.-A., Mjøs, S.-A. & Oterhals, Å. 2013. Impact of variability in fish meal physicochemical properties on the extrusiuon process, starch gelatinization and pellet durability and hardness. *Animal Feed Science and Technology*, vol. 179, s. 77-84.

Schirmer, M., Höchstötter, A., Jekle, M., Arendt, E. & Becker, T. 2013. Physicochemical and morphological characterization of different starches with variable amylose/amylopectin ratio. *Food Hydrocolloids*, vol. 32, s. 52-63.

Setälä, J., Kankainen, M., Vielma, J., Niukko, J., Pitkämäki, A., Saario, M. Ahvenharju, S., Hillgren, A. & Tommila, P. 2015. Itämerirehua kotimaisista kalavirroista. Helsinki: Luonnonvarakeskus.

Sharma, S., Bhagat, A. & Parisi, S. 2019. Raw Material Scarcity and Overproduction in the Food Industry. Cham: Springer Nature Swizerland.

Sitra, 2017. Lähialueen raaka-aineilla kasvatettu kala Itämeren ravinnekuorman vähentämiseen. [WWW-dokumentti]. [Viitattu: 7.6.2020]. Saatavilla: https://www.sitra.fi/caset/lahialueen-raaka-aineilla-kasvatettu-kala-itameren-ravinnekuorman-vahentamiseen/

Storebakken, T., Zhang, Y., Kraugerud, O., Ma, J., Øverland, M., Apper, E. & Feneuil, A. 2015. Restricted process water limits starch gelatinization, and reduces digestibility of starch,

lipid, and energy in extruded rainbow trout (oncorhynchus mykiss) diets. *Aquaculture*, vol. 448, s. 203-206.

Sørensen, M. 2012. A review of the effects of ingredient composition and processing conditions on the physical qualities of extruded high-energy fish feed as measured by prevailing methods. *Aquaculture Nutrition*, vol. 18, s. 233-248.

Sørensen, M., Berge, G., Thomassen, M., Ruyter, B., Hatlen, B., Ytrestøyl, T., Aas, T. & Åsgård, T. 2011b. Today's and tomorrow's feed ingredients in Norwegian aquaculture. Tromsø: Nofima. Report 52/2011.

Sørensen, M., Morken, T., Kosanovic, M. & Øverland, M. 2011a. Pea and wheat starch possess different processing characteristics and affect physical quality and viscosity of extruded feed for Atlantic salmon. *Aquaculture Nutrition*, vol. 17, s. e326-e336.

Sørensen, M., Nguyen, G., Storebakken, T. & Øverland, M. 2010a. Starch source, screw configuration and injection of steam into the barrel affect the physical quality of extruded fish feed. *Aquaculture Research*, vol. 41, s. 419-432.

Tacon, A. G. J. ; Metian, M., 2008. Global overview on the use of fish meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds: Trends and future prospects. *Aquaculture*, vol. 285, s. 146-158.

Talja, R. 2007. Preparation and characterization of potato starch films plasticized with polyols. Väitöskirja, Helsingin yliopisto, Elintarviketeknologian laitos.

The World Bank, 2013. FISH TO 2030: Prospects for Fisheries and Aquaculture, The World Bank: Agriculture and Environmental Services, Washington.

Tidd, J. & Bessant, J. (toim.) 2005. Managing Innovation: Integrating Technological, Market and Organizational Change. 3. ed. Chichester: John Wiley & Sons.

Tyapkova, O., Osen, R., Wagenstaller, M., Baier, B., Specht, F. & Zacherl, C. 2016. Replacing fishmeal with oilseed cakes in fish feed – A study on the influence of processing parameters on the extrusion behavior and quality properties of the feed pellets. *Journal of Food Engineering,* vol. 191, s. 28-36.

Vernworn, B. & Herstatt, C. 2002. The innovation process: an introduction to process models. Hamburg: Hamburg University of Technology. Working Paper No. 12.

Wang, S., Li, C., Copeland, L., Niu, Q. & Wang, S. Starch Retrogradation: A Comprehensive Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety,* vol. 14, s. 568-585.

Waterschoot, J., Gomand, S., Fierens, E. & Delcour, J. 2015. Starch blends and their physicochemical properties. *Starch/Stärke,* vol. 67, s. 1-13.

Young , G. & Forte, D. 2017. Specific Mechanical Energy (SME) in aquafeed extrusion. *Aquafeed: Advances in Processing & Formulation,* vol. 9, nro. 1, s. 13-16.

Ytrestøyl, T., Aas, T. & Åsgård, T. 2015. Utilisation of feed resources in production of Atlantic salmon (Salmo salar) in Norway. *Aquaculture,* vol. 448, s. 365-374.

Zhang, B., Zhang, Y., Dreisoerner, J. & Wei, Y. 2015. The effects of screw configuration on the screw fill degree and special mechanical energy in twin-screw extruder for high –moisture texturized defatted soybean meal. *Journal of Food Engineering,* vol. 157, s. 77-83.

Zhang, W., Li, S., Zhang, B., Drago, S. & Zhang, J. 2016. Relationships between the gelatinization of starches and the textural properties of extruded texturized soybean protein-starch systems. *Journal of Food Engineering,* vol. 174, s. 29-36.