

Eerik Ingalsuo

# VAPAKALASTUKSEN SIIMAN MATERI- AALIVALINTA

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Toukokuu 2025

# TIIVISTELMÄ

Eerik Ingalsuo: Vapakalastuksen siiman materiaalivalinta  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Teknisten tieteiden koulutus, materiaalitekniikka  
Toukokuu 2025

---

Kalastus on ollut ihmisten elinkeino tuhansia vuosia, mutta se on viime vuosisadan aikana kehittänyt monipuoliseksi harrastukseksi ja urheilulajiksi. Teollisen kehityksen ansiosta kalastustavat ja -materiaalit ovat monipuolistuneet ja parantuneet merkittävästi. Kalastusvälineistä etenkin kalastussiimoissa tai -verkoissa käytettävät materiaalit ovat kehittyneet ajan myötä, kun helposti saatavilla olleet luonnonkuidut on vaihdettu laadukkaisiin synteettisiin kuitumateriaaleihin. Tässä työssä keskitytään vapakalastuksen siiman entisiin, nykyisiin ja tuleviin valmistusmateriaaleihin.

Työssä käydään läpi siimalle olennaisia piirteitä ja suureita, joiden perusteella yleisimpiä siimamateriaaleja verrataan toisiinsa yksityiskohtaisesti. Tarkastelussa käytetyt suureet on jaoteltu luvuissa eri ominaisuusluokkiin: mekaaniset, fysikaaliset, valmistukselliset ja kemialliset ominaisuudet. Työssä tutkitaan kattavasti materiaalin vaikutusta kalastussiiman elinkaareen valmistusvaiheessa, käytön aikana ja käytön jälkeen erilaisten suureiden avulla. Valmistusvaiheessa huomioidaan materiaalin ominaisuuksien vaikutukset valmistusmenetelmiin, joiden perusteella materiaalista valmistetaan mono- tai multifilamenttisiimaa. Työssä tutkitaan siimatyyppin ja materiaalin yhteisvaikutusta kalastussiiman ominaisuuksiin.

Siimatyyppin valinta vaikuttaa siiman edullisuuteen, näkyvyyteen ja UV-säteilyn kestävyyskykyyn. Monofilamenttisiimalla nämä ominaisuudet ovat parempia kuin multifilamenttisiimalla, kun siimojen valmistusmateriaalit ovat samat. Siimatyyppi vaikuttaa valmistusmateriaaliin verrattuna rajoitetusti siiman ominaisuuksiin.

Yleisimmät monofilamenttisiimat ovat nailon- eli polyamidisiimat ja fluorihilisiimat. Yleisin multifilamenttisiima on UHMWPE-siima. Nailonsiimalla on hyvät ominaisuudet edullisuuteensa nähden, mutta sen UV-säteilyn ja veden imeytymisen kestävyys olivat PVDF- eli fluorihilisiimaan nähden heikompia. PVDF-siima on muita siimoja kalliimpi, mutta se on pitkäikäinen ja vedessä heikosti näkyvä. UHMWPE osoittautui mekaanisilta ominaisuuksiltaan parhaaksi siimamateriaaliksi, mutta sen multifilamenttirakenne lisää siiman näkyvyyttä vedessä ja nostaa valmistuskustannuksia.

Siimamateriaalien suurin heikkous oli biohajoamattomuus, jonka vuoksi siimat jäivät vesistöihin ja aiheuttavat ympäristöhaittoja aavekalastuksen myötä. Biohajoavat siimamateriaalit, kuten PBAT, PBSAT ja PBS, ovat nykyisin kehityksen kohteena, jotta ne voivat korvata perinteiset siimamateriaalit. Nykyisin biohajoavien siimojen heikkoudet ovat esimerkiksi muita materiaaleja huonommat mekaaniset ominaisuudet ja korkeammat valmistuskustannukset.

Avainsanat: kalastussiima, monofilamentti, multifilamentti, synteettiset kuidut, polyamidi, polyeteeni, fluorihilli, ominaisuusvertailu

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

- Ei
- Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia:

Tekoälysovellusten nimi ja versio: Scopus AI.

Käyttötarkoitus: Scopus AI:ta on käytetty tässä työssä akateemisten lähtemateriaalien löytämiseen.

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty: Luku 2 ja luku 3.

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien tekoälyllä tuotetut osat, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. KALASTUSSIIMA JA SEN TOIMINTAVAATIMUKSET .....	2
2.1 Kalastussiiman kehitys ja ominaisuudet.....	2
2.2 Kalastussiimatyytit ja niiden vertailu.....	5
3. KALASTUSSIIMAN MATERIAALIVAIHTOEHDOT.....	12
3.1 Luonnonkuidut ja biohajoavat materiaalit .....	12
3.2 Polyamidi (PA).....	14
3.3 Polyetyleni (PE).....	18
3.4 Polyvinylideenifluoridi (PVDF) .....	21
4. MATERIAALIEN OMINAISUUKSIEN VERTAILU .....	23
4.1 Mekaaniset ominaisuudet.....	23
4.2 Fysikaaliset ja valmistukseen liittyvät ominaisuudet.....	24
4.3 Kemiaaliset ominaisuudet.....	26
5. YHTEENVETO.....	28
LÄHTEET .....	30

# 1. JOHDANTO

Kalastus on kehittynyt vaatimattomasta elinkeinosta monipuoliseksi harrastukseksi ja urheilulajiksi. Teknologisen kehityksen yhteydessä kalastuslajeja ja -tyylejä on irtautunut erillisiksi kokonaisuuksiksi, joissa kalastusvälineet eroavat toisistaan merkittävästi. Vastaavanlainen kehitys on kohdistunut myös kalastusvälineiden materiaaleihin, jotka ovat jatkuvan kehityksen kohteessa kalastusvälineiden suorituskyvyn parantamiseksi.

Kalastusvälineissä käytetään materiaaleja, jotka kestävät vedessä jatkuvia mekaanisia rasituksia murtumatta. Kuitumaisia materiaaleja käytetään kalastussii-  
moissa ja -verkoissa niiden fysikaalisten ominaisuuksien, kuten ohuuden, ke-  
veyden ja orientoituneen mikrorakenteen vuoksi.

Tässä työssä tutkitaan vapakalastusta siiman materiaalivalinnan näkökulmasta. Tarkoituksena on selvittää siiman materiaalivalintoja historiallisesta, nykyajan sekä tulevaisuuden näkökulmasta. Luvussa kaksi käsitellään siiman toiminta-  
vaatimuksia ja keskeisiä ominaisuuksia mekaanisesta, fysikaalisesta, valmistuk-  
sellisesta ja kemiallisesta näkökulmasta. Luvussa selvitetään, mitä ominaisuuksia on otettava huomioon kalastussii-  
massa. Tämän lisäksi esitellään mono- ja  
multifilamenttisiimat sekä niiden valmistusmenetelmät lyhyesti. Luvussa kolme  
perehdytään yleisimpiin synteettisiin siimamateriaaleihin ja biohajoaviin materi-  
aaleihin, jotka ovat toistaiseksi vähäisessä käytössä. Tämän lisäksi luvussa  
käydään läpi näiden materiaalien edut ja haitat pääpiirteittäin. Luvussa neljä  
verrataan yleisimpien siimamateriaalien ominaisuuksia toisiinsa syventävästi lu-  
vussa kaksi valittujen suureiden perusteella.

## 2. KALASTUSSIIMA JA SEN TOIMINTAVAATI- MUKSET

Luvussa käsitellään kalastussiiman ominaisuuksia, joita on otettava huomioon materiavalinnassa ja tuotteen suunnittelussa. Lisäksi luvussa perehdytään mono- ja multifilamenttisiimoihin sekä niiden valmistukseen.

### 2.1 Kalastussiiman kehitys ja ominaisuudet

Kalastus on ollut osa ihmiselämää muinaisajoilta lähtien, ja monet nykyiset kalastustyyli-tylit ovat satoja tai tuhansia vuosia vanhoja [1]. Nykyajan kalastus on kuitenkin muuttunut merkittävästi historiallisesta kalastuksesta. Kalastus pääosin toimi ennen elinkeinona yhteiskunnan alaluokille, kun taas nykyisen teknologian kehityksen myötä se on eriytynyt elinkeinosta harrastukseksi ja jopa urheilulaji-ksi. Tämä kehitys näkyy kalastusvälineissäkin. Vaatimattomat ja yksinkertaiset välineet muuttuivat ajan mittaa monimutkaisiksi sekä korkealaatuisiksi teollisuuden tuotteiksi, joissa eri komponenttien materiaalit on valittu harkiten.

Kuitumaisesta materiaalista valmistettu kalastussiima on ollut merkittävän kehi-tyksen kohteena viime vuosisatoina erilaisten valmistusmenetelmien ja tutki-musten myötä. Siiman käyttökelpoisuus onkin edellytys kalastuksen tehokkuu-teen elinkeinona ja mukavuuteen harrastuksena. Vapaan syötetään paljon sii-maa kerrallaan suuren heittoetäisyyden ja syötin uppoamisen mahdollista-miseksi, joten sen vaihtaminen kulumisen tai katkeamisen myötä on hankalaa tai kallista. Tämän vuoksi sen on oltava kulutuksenkestävä. Siima ei siten saa katketa esimerkiksi kalan puraistua tai kulua liiallisesti kivien hankauksesta. Li-säksi siiman täytyy kestää suuren kalan painoa katkeamatta. Tämän välttä-miseksi siimalla on oltava riittävän hyvät mekaaniset ominaisuudet, kuten kor-kea murto- ja hankauslujuus, jotta se kestäisi siihen kohdistuvat mekaaniset ra-situkset. Toisaalta kalastajan on helpompi huomata kalan aiheuttama nykäisy siimassa, jos siimamateriaali vastustaa venymää voimakkaasti. Tällöin siima antaa vähemmän periksi kalalle. Tämän vuoksi siiman on oltava jäykkä ja sillä on oltava korkea kimmokerroin.

Siiman on oltava pitkäikäinen, jottei kalastajan tarvitse vaihtaa siimaa usein. Hietaampi siiman kuluminen ja pidemmät käyttöajat vaikuttavat positiivisesti tuotteen ympäristöystävällisyyden lisäksi myös tuotteen taloudellisuuteen. Tämä tarkoittaa tiettyjen mekaanisten ominaisuuksien lisäksi myös siiman ympäristön sietokykyä eli materiaalin kemiallista stabiiliutta. Moni polymeeripohjainen kuitu heikkenee ajan mittaa auringonvalon vaikutuksesta. Jatkuva auringon UV-säteily laskee esimerkiksi merkittävästi polyamidikuidun eli nailonin murtolujuutta [2] ja kellertää sen ulkonäköä [3]. Se voi myös aiheuttaa luonnonkuiduissa ristisilloittumista tai hajoamista [4].

On myös aiheellista harkita siiman toimintaa ja vaikutuksia käytön jälkeen eli tuotteen elinkaaren lopussa. Kalastussiima katkeaa tai katoaa usein käytössä, jolloin suuria määriä siimaa jää luontoon. Tämä on haitallista ympäristölle, sillä vedenalaiset eliöt ja kasvit saattavat tarttua ja jäädä kiinni hylättyyn siimaan. Tätä ilmiötä kutsutaan aavekalastukseksi. Do ja Armstrong [5] toteavat, että aavekalastuksen merkitys ja vaikutusalue ovat kasvaneet kalastusvälineiden kehityksen vaikutuksesta. Kaluston pitkäikäisyys, edullisuus ja siirtymä synteettisiin materiaaleihin ovat lisänneet aavekalastuksen määrää. Siiman materiaalivalinnassa tulisi siis ottaa huomioon ympäristöystävällisyys. Biohajoavasta materiaalista valmistettu kalastusväline hajoaa veden alla tietyssä ajassa [6] ja vähentää samalla mikromuovien vaikutusta vesistöissä. Biohajoavien materiaalien käyttö kalastusvälineissä voi vähentää aavekalastuksen vaikutusaikaa usealla vuodelle [7].

Siiman pitkäikäisyyteen ja biohajoavuuteen vaikuttaa myös kuitumateriaalin kastuminen eli veden imeytyminen käytössä. Hydrolyysi tarkoittaa kemiallisten sidosten hajoamista veden vuoksi. Shamey ja Sinha [3] kertovat, että monien polymeeripohjaisten materiaalien runko hajoaa hydrolyysin vaikutuksesta. Koska siimaan kohdistuu eniten mekaanisia rasituksia vedessä, materiaalin täytyy hylkiä vettä tarpeeksi hyvin. Correa ja Stumpf [8] toteavat, että synteettisen köyden lujuuden heikkeneminen hydrolyysin takia matalan lämpötilan vedessä voi viedä useista kuukausista vuosiin.

Vesi voi aiheuttaa hydrolyysin nailoniin vasta yli 150 celsiusasteessa ja korkeassa paineessa [9], joten hydrolyysi ei vaikuta siimaan käyttölämpötilassa. Nailon eli alifaattinen polyamidi on synteettinen kuitu ja yleinen kalastussiimamateriaali. Kalastussiiman lujuus märkänä on pienempi kuin kuivana. Vesi voi siten heikentää materiaalin mekaanisia ominaisuuksia ilman hydrolyysiä, joten veden imeytymisen prosentuaalinen määrä materiaaliin on oltava pientä.

Kalastussiiman toimintaan vedessä vaikuttavat myös ominaisuudet, kuten materiaalin tiheys. Tiheyden perusteella materiaali voi upota tai kellua veden pinnalla, mikä vaikuttaa esimerkiksi kalastustapaan. Siiman näkyvyyteen vedessä vaikuttaa pienen halkaisijan lisäksi materiaalikohtainen taitekerroin, joka kuvaa aineen kykyä taittaa valoa. Mitä lähempänä materiaalin taitekerroin on veden taitekerrointa, sitä vähemmän kalastussiima erottuu kalalle. Veden taitekerroin on noin 1,33.

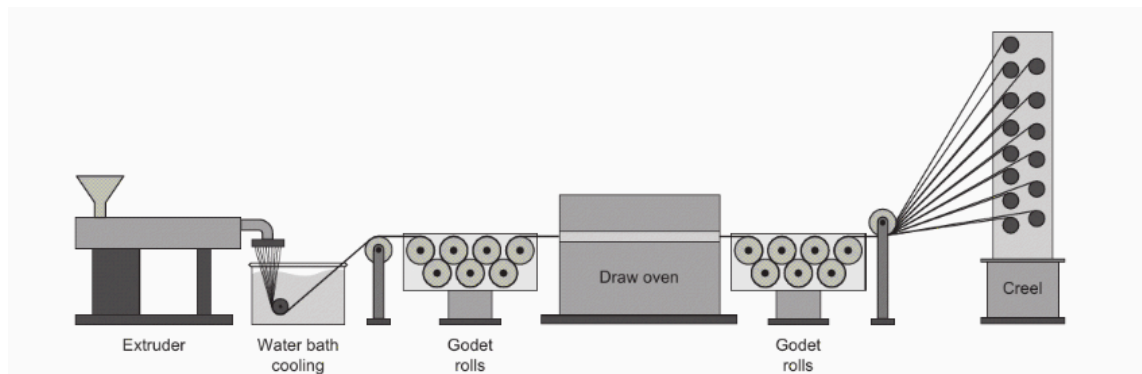
Kalastussiiman valmistuksessa on otettava huomioon raaka-aineen hinta, joka vaikuttaa myös lopputuotteeseen. Tämän lisäksi kuitumateriaalin valmistus on oltava helppoa. Monen teknisen kuidun valmistus on hankalaa esimerkiksi niiden korkean sulamispisteen vuoksi, jolloin niiden muovaaminen saattaa vaatia erityislaitteistoa. Siimamateriaalin muovattavuus on siten oltava mahdollisimman hyvä.

Siiman toimintavaatimuksissa monet piirteet voivat olla ristiriidassa toisiinsa nähden. Kalastussiiman mekaaninen lujuus ei esimerkiksi saa olla liian korkea solmujen tekemiseen tai siiman katkaisemiseen saksilla tai pihdeillä. Lisäksi on huomioitava, että liian huono veden imeytyminen saattaa heikentää siiman biohajoavuutta käytön jälkeen. Tällöin kalastussiima on liian pitkäikäinen. Monet synteettiset kuidut ovat hydrofobisia, minkä vuoksi niiden biohajoavuus on erittäin huonoa. Nämä seikat on otettava huomioon materiaalivalinnan yhteydessä, ja kompromisseja ominaisuuksien välillä on tehtävä.

## 2.2 Kalastussiimatyytit ja niiden vertailu

Vapakalastuksessa käytettävä kalastussiimatyyppi riippuu siiman toivotuista ominaisuuksista, jotka taas vaikuttavat materiaalivalintaan. Eri kalastussiimatyypeillä on eri valmistusprosessit, mikä vaikuttaa myös siimatuotteen lopulliseen hintaan. Materiaalivalinnan yhteydessä on pohdittava, mitä ominaisuuksia tuotteessa korostetaan ja mikä siimatyyppi on sopiva tuotteen käyttötarkoitukseen. Käytännössä eri siimatyypeille on vakiintunut tavalliset valmistusmateriaalit, joilla on sopivat ominaisuudet.

Siima voi olla monofilamenttisiimaa, jolloin se koostuu yksittäisestä kuidusta. Monofilamenttisiiman valmistus suoritetaan monivaiheisessa sulakehruulinjassa, johon kuuluu muun muassa jäähdytysallas, uuni ja monia vetoteloja. [10] Kuvassa 1 on esitetty sulakehruulinja komponentteineen.



**Kuva 1:** Monofilamenttisiiman sulakehruulinja [10].

Monofilamenttikuidussa on oltava pieni halkaisija, jota voidaan säätää muuttamalla ekstruuderin suulakkeen kokoa [10]. Pienempi vapakalastuksen siiman halkaisija tekee siimasta kalalle vaikeamman havaita ja vähentää kitkaa siiman ja virvelin kelan välillä. Tämän lisäksi suurempi määrä siimaa voi mahtua kellelälle.

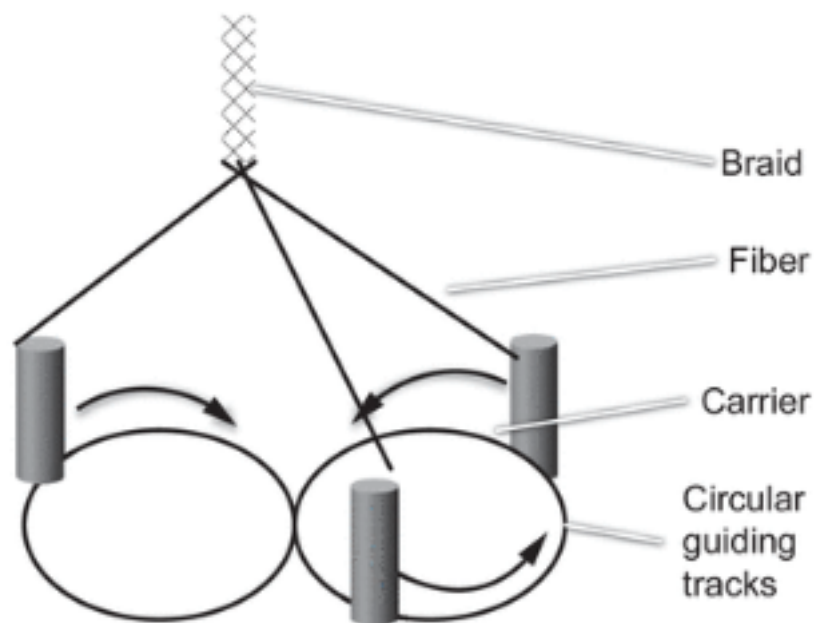
Valitun polymeeriraaka-aineen tasainen syöttö ja paine ekstruuderissa varmistetaan erillisen pumppukomponentin avulla. Ekstruuderin jälkeen yksittäiset kuidut kulkeutuvat pystysuorasti jäähdytysaltaaseen, jossa niiden jäähdytysaika on

lyhyt kuitujen pienten halkaisijoiden ansiosta. Tämän jälkeen kuidut kuljetetaan suureen uunin ja vedetään molemminpuolisin vetoteloin lopullisiin halkaisijoihinsa. Tämän jälkeen monofilamentit rullataan keloihin. [10] Monofilamentin lopullisen halkaisijan määrittäminen on olennaista vetovaiheessa. Kuitumateriaalin tilavuuden pienentyessä myös mahdollisten sisäisten vikojen koot ja määrät pienenevät, minkä vuoksi kuitujen lujuus on kääntäen verrannollinen kuidun halkaisijaan [11, katso 12]. Tämä yhteys on huomattu muun muassa luonnonkuiduissa [13] ja synteettisissä lasikuiduissa [14]. Tämänlainen murtumiskäyttäytyminen ei ole yhtä olennaista synteettisissä polymeerikuiduissa, jotka ovat erittäin sitkeitä materiaaleja. Näin ollen sisäisillä vioilla ei ole yhtä merkittävää vaikutusta kuiturakenteen mekaanisiin ominaisuuksiin. On kuitenkin huomiotava, että monofilamentin valmistuksen vetovaihe pienentää kuidun halkaisijaa ja samalla parantaa kuidun mekaanisia ominaisuuksia molekyyliketjujen orientoitumisen ansiosta.

Vetovaiheessa monofilamentteja lämmitetään paremman polymeeriketjun liikkuvuuden vuoksi. Halkaisijan määrittämisen lisäksi vetoteloille tärkeä tehtävä on nostaa kuitujen myötölujuutta merkittävästi suuntaamalla kuidut konesuuntaan vedon avulla. Yksittäisten monofilamenttien kosketus uunissa aiheuttaa hankkaamista, minkä vuoksi monofilamenttien reittien risteämistä vältetään. Vetovaihe voi sisältää useita vetoteloja ja uuneja peräkkäin tarkempien halkaisijoiden takaamiseksi. Monofilamenttisiimoja myydään pakkauksissa eri siiman kestämiä massa- ja halkaisijaluokituksin. [10] Tämän vuoksi monofilamenttisiiman valmistusvaiheissa otetaan huomioon nämä suureet, jotka ovat kriittisiä vetovaiheessa.

Multifilamentti koostuu monofilamentista poiketen useasta kuidusta tai filamentista [15]. Eräs menetelmä monofilamenttien yhdistämiseen on punominen. Punomisprosessi voi siten toimia eräänlaisena jatkojalostusprosessina edellä kuvatulle monofilamenttisiiman valmistukselle, ja punotut kalastussiimat ovatkin tavallisia käyttökohteita teolliselle multifilamentille. Useimmiten punotut siimat koostuvat neljästä, kahdeksasta tai kuudestatoista monofilamentista. Kohtalaisen uutena multifilamentin valmistusprosessinä on sulautettu siima eli superline, jossa

materiaalit sulautetaan yhteen entistä pienemmän siiman halkaisijan mahdollistamiseksi [16]. Kuitumateriaalien punomista kalastussiimoiksi on hyödynnetty jo esiteollisella ajalla, ja sen käyttö on jatkunut nykyisellä synteettisten kuitujen aikakaudella. Nykyään punomisprosessi on koneistettu.



**Kuva 2:** Ympyrämäisen punonnan toimintaperiaate [12].

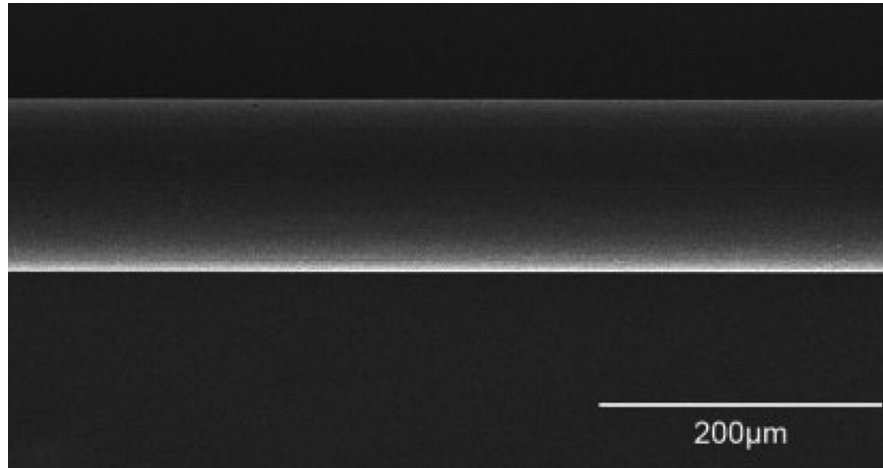
Teollisuudessa on kehitetty useita erilaisia punontatekniikoita. Yleisimmin käytetty punontatekniikka on ympyrämäinen punonta [17], jonka avulla myös punottu kalastussiima valmistetaan. Kuvassa 2 on esitetty ympyrämäisen punonnan toimintaperiaate. Keloja, joihin on rullattu monofilamenttia, asetetaan laitteelle halutun kuitujen lukumäärän verran. Menetelmässä punottavan kuidun akseli on noin 40–60 asteen kulmassa punomatuotteen pystysuoraan akseliin nähden [17]. Punomisprosessissa kelat pyörivät ympyräradalla, ja osa keloista pyörii myötäpäivään ja osa vastapäivään. Kyosev [17] toteaa, että punontaprosessin aikana on ylläpidettävä kuituihin kohdistuvaa jännitystä. Punontakeloissa

on vipu, joka vetää tai vapauttaa kuitua tarpeen vaatiessa jännityksen tasaimiseksi. Punomisprosessin etuna on se, että se voidaan suorittaa mille tahansa kuitumateriaalille [12].

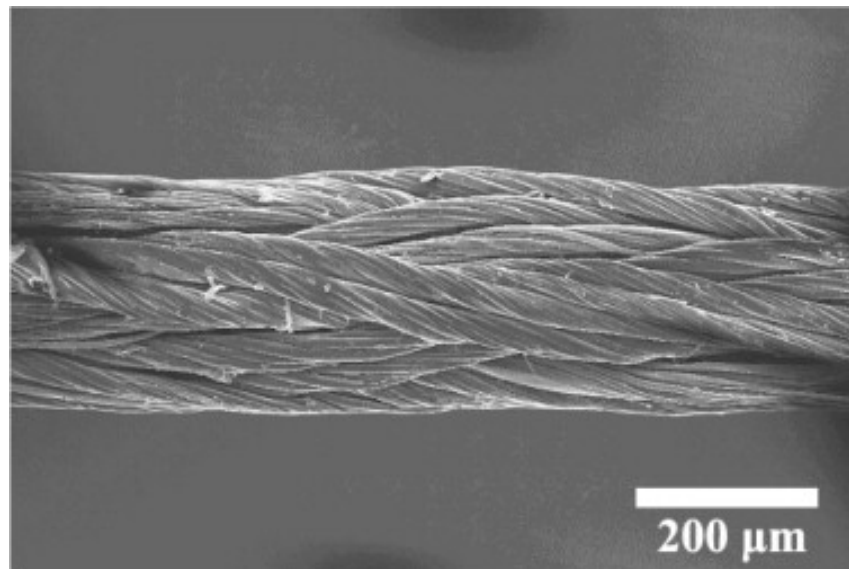
Valmistustavan valitseminen on materiaalivalinnan lisäksi olennaista kalastussiiman suunnittelussa, sillä samasta kuitumateriaalista voi olla useita eri mono- ja multifilamenttisovelluksia. Eighani et al. [18] vertasivat ja tutkivat iranilaisten kalastusverkkojen pyyntimääriä Persianlahdella, kun multifilamenttinailonista siirryttiin monofilamenttinailoniin. Valinta perustui alhaisempiin kustannuksiin, parempaan hankauslujuuteen ja pitkäikäisyyteen. Tiettyjen kalalajien pyyntimäärät kasvoivat monofilamentin avulla huomattavasti, mitä perustellaan monofilamenttirakenteen kaloille heikommalla näkyvyydellä.

Edellä mainitut ominaisuudet ovat tärkeitä myös kalastussiiman yhteydessä. Vapakalastuksen siiman tarkastelussa on kuitenkin huomioitava, että kalastusverkko kattaa suuren pinta-alan vedessä, minkä vuoksi verkossa olevien kuitujen näkyvyys nousee keskeisemmäksi ominaisuudeksi. Kuidun näkyvyys ei ole yhtä merkittävä tekijä kalastussiiman pyyntimäärässä. Monet kalastajat kuitenkin suosivat siimoja, joilla on alhainen näkyvyys.

Siimatyytit ovat usein vakiintuneet eri materiaaleille, ja materiaalin valmistukseen liittyvät ominaisuudet vaikuttavat vahvasti valittuun valmistusmenetelmään. Polyeteenistä valmistetut siimat ovat esimerkiksi pääosin punottuja materiaalin heikon muovattavuuden vuoksi. Kuvassa 3 on esitetty PET-monofilamentin rakenne pyyhkäisyelektronimikroskoopilla ja kuvassa 4 on esitetty vastavasti kolmiulotteinen hiilinanoputkipunos.



**Kuva 3:** PET-monofilamentin SEM-kuva [19].



**Kuva 4:** Punotun hiilinanoputken SEM-kuva [20].

Kuvista 3 ja 4 huomataan mono- ja multifilamenttikuitujen rakenne-erot selvästi. Monofilamenttirakenne koostuu yksittäisestä kuidusta, kun taas multifilamenttirakenne koostuu tiukasti toisiinsa kiinnittyneistä kuiduista. Kuvista huomataan kuitujen pintarakenteiden erot, jotka vaikuttavat yhdessä materiaalin taitekertoimen ja kuidun halkaisijan kanssa näkyvyyteen vedessä. Multifilamentin epätasainen pinta tekee siitä näkyvämmän kuin monofilamentti, jolla on sileä pinta. Epätasainen pinta saa valon heijastumaan monista eri suunnista, mikä tekee siimasta näkyvämmän.

Thomas ja Hridayanathan [2] tutkivat nailonkalastusverkkojen hajoamista UV-säteilyn vaikutuksesta. Tutkimuksessa huomattiin, että paksummat näytteet

kestivät UV-säteilyä paremmin. Tämä johtuu siitä, että UV-säteilyn aiheuttama valokemiallinen hapettumisreaktio tapahtuu pääosin materiaalin pinnalla, joten suuremmalla halkaisijalla säteilyn tunkeutuminen rakenteeseen on suhteellisesti pienempää. Tutkimuksessa kuitenkin huomattiin, että paksumpi multifilamenttinäyte kesti UV-säteilyä heikommin kuin ohuempi monofilamenttinäyte. 180 päivän jälkeen nailonmultifilamentti, jonka halkaisija oli 0,37 mm, säilytti vain 25,3 % alkuperäisestä murtolujuudestaan, kun taas 0,32 mm paksu nailonmonofilamentti säilytti 70,4 %:ia. Tämä voi johtua siitä, että tavalliset UV-säteilyltä suojaavat lisäaineet suojaavat multifilamenttien erittäin ohuita säikeitä heikosti [21].

Taulukoon 1 on koottu edellisten tietojen perusteella mono- ja multifilamenttisii-  
mojen vahvuuksia, kun ei oteta huomioon valmistusmateriaalien ominaisuuksia. Taulukosta huomataan, että multifilamentti kestää UV-säteilyä monofilamenttia huonommin. Monofilamenttisiima näkyy vedessä multifilamenttia vähemmän, koska multifilamenttisiimassa toisiinsa kietoutuneet kuidut muodostavat siimalle epätasaisen pinnan, joka heijastaa valoa useasta eri kulmasta. Tämän lisäksi multifilamentti on monofilamenttia kalliimpaa, koska sen valmistaminen vaatii enemmän työvaiheita ja laitteistoa.

**Taulukko 1:** Kalastussiiimatyyppien vahvuuksia toisiinsa nähden, kun valmistusmateriaali on sama. Käyttäjälle mielisempi ominaisuus on tummennettu [2][18].

	Monofilamentti	Multifilamentti
Hinta	<b>Edullisempi</b>	Kalliimpi
UV-säteilyn kestävyys	<b>Parempi</b>	Heikompi
Näkyvyys vedessä	<b>Heikompi</b>	Parempi

Taulukosta 1 huomataan, että monofilamentti on multifilamenttia parempi tarkasteltujen ominaisuuksien perusteella, kun valmistusmateriaalit ovat samat. On huomioitava, että esitettyihin ominaisuuksiin vaikuttaa vahvasti käytännössä

myös valittu valmistusmateriaali, jolla voidaan kompensoida siimatyypistä aiheutuvia ominaisuuksia. Tämän lisäksi on huomioitava, että siimatyypin vaikutus on rajoitetusti lopputuotteen ominaisuuksiin ja että materiaalivalinta vaikuttaa laajemmin siiman eri ominaisuuksiin.

### **3. KALASTUSSIIMAN MATERIAALIVAIHTOEHDOT**

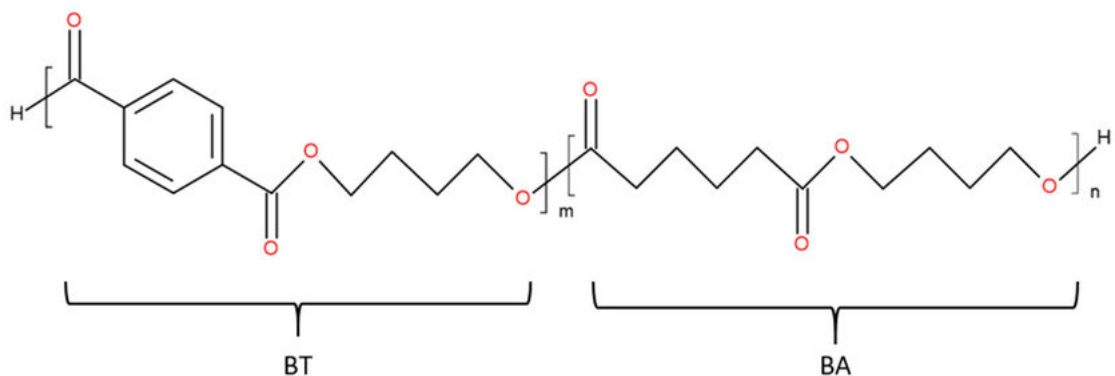
Kalastussiiimassa käytettävät materiaalit ovat yleisimmin synteettisiä polymeerikuituja. Yleisimmät materiaalit ovat polyeteenikuidut (PE) sekä alifaattiset polyamidikuidut eli nailonit. Näiden lisäksi fluorihili (PVDF) eli fluorocarbon, jota on usein käytetty vapakalastuksen perukkeen materiaalina, on yleistynyt myös siimamateriaalina. Peruke on vapakalastuksen siiman ja vieheen välinen osa, joka suojaa siimaa petokalojen hampailta kovuudellaan ja pituudellaan. Edellisten materiaalien lisäksi luvussa käsitellään myös luonnonkuituja materiaalivaihtoehtoina lyhyesti, vaikka ne eivät ole enää yhtä merkittäviä kuin aikaisemmin. Luvussa käsitellään myös biohajoavia kuitumateriaaleja.

#### **3.1 Luonnonkuidut ja biohajoavat materiaalit**

Varhaisimmat kalastussiiimat valmistettiin luonnonkuiduista, jotka ovat materiaaleina monipuolisia. Käytössä oli esimerkiksi kasviperäisiä kuituja, kuten puuvillaa, ja eläinperäisiä materiaaleja, kuten jouhi- ja silkkikuituja. Materiaalivalintaan vaikuttivat merkittävästi maantieteellinen sijainti, valmistuskustannukset sekä itse kuidun pituus. Pidempi kuitu helpotti siiman valmistusta. Jouhi oli esimerkiksi ihmisen hiusta yleisempi siimamateriaali sen edullisuuden ja pituuden vuoksi, vaikka ohuella ihmishiuksella on jouhea korkeampi murtolujuus [22].

Nykyään luonnonkuiduista valmistetut kalastussiiimat ovat erittäin harvinaisia, koska viime vuosisadalla yleistyneet synteettiset polymeerikuidut ovat edullisempia, helpompia valmistaa sekä mekaanisilta ominaisuuksiltaan parempia. Synteettisten materiaalien huonona puolena on kuitenkin niiden huono biohajoavuus, minkä vuoksi kiinnostus luonnonkuituihin ja muihin biohajoaviin kuituihin on kasvanut viime vuosikymmeninä. Tutkimus on kuitenkin vielä melko uutta, eikä biohajoavat materiaalit ole yleistyneet vielä laajaan käyttöön.

Biohajoavien materiaalien tutkimuksissa on kalastusvälineissä käytetty tavanomaisten synteettisten materiaalien sijaan biohajoavien kuitujen seoksia, jotka usein sisältävät polymeerejä, kuten PBS, PBAT ja PBSAT [6][23]. PBS tarkoittaa polybutyleenisukkinaattia, PBAT polybutyleeniadipaatti-tereftalaattia ja PBSAT polybutyleenisukkinaatti-adipaatti-tereftalaattia. Näiden polymeerien kemialliset rakenteet ovat monimutkaisia, ja ne ovat biohajoavia lukuisten esterisidostensa ansiosta, koska esterisidokset ovat alttiita hydrolyysille. Kuvassa 5 on esitetty PBAT-kuidun kemiallinen rakenne, joka sisältää kaksi dimeerityyppiä. Dimeerityypit BT ja BA sisältävät esterisidoksia ja aromaattisen hiilivetysidoksen.



**Kuva 5:** PBAT-kuidun kemiallinen rakenne [24].

On huomioitava, ettei polymeerimateriaalin biohajoavuus välttämättä tarkoita, että materiaalivalinta olisi riittävän ympäristöystävällinen käyttötarkoitukseensa. Hong et al. [23] tutkivat biohajoavan PBS-kuidun käyttöä kalastusvälineissä aavekalastuksen vähentämiseksi. Materiaalin murtolujuus on verrattavissa nyloniin, mutta sen biohajoavuus on liian hidasta vesistöissä ollakseen ympäristöystävällinen. Tämä ratkaistiin valitsemalla materiaaliksi PBAT-kuidut, jotka on pinnoitettu mekaanisesti lujilla PBS-kuiduilla. Tällöin kalastusväline koostuisi suurimmaksi osaksi nopeasti biohajoavasta PBAT-kuidusta ilman, että kappaleen pinnan mekaaniset ominaisuudet kärsivät.

Biohajoavista materiaaleista voi myös olla haastavaa valmistaa mekaanisesti riittävän kestäviä korvikkeita tavanomaisille, biohajoamattomille kalastussii-

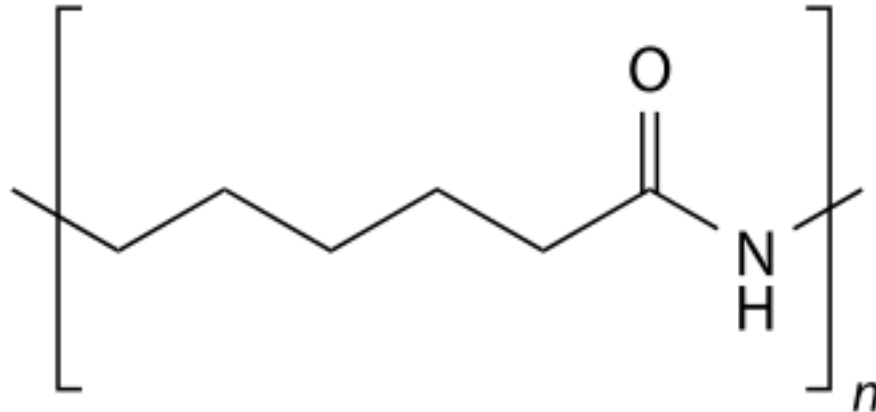
moille. Kim et al. [6] vertasivat nailonmonofilamenttiverkkoa biohajoavaan kalastusverkkoon, jonka koostumus oli 82 % PBS-kuituja ja 18 % PBAT-kuituja. Molempien verkkojen kuitujen halkaisijat olivat noin 0,30 mm, ja mekaanisia ominaisuuksia mitattiin materiaalien ollessa sekä märkiä että kuivia. Tutkimuksessa selvisi, että nailonverkolla oli korkeammat murtolujuudet molemmissa olosuhteissa, vaikka suuruuserot olivat paikoin vähäisiä. Esimerkiksi solmuttoman ja määrän nailonverkon murtolujuus oli alle 3 % suurempi kuin vastaavanlaisen biohajoavan verkon. Molempien materiaalien murtolujuudet laskivat, kun ne olivat märkiä. Tutkimuksessa murtolujuudet ilmoitettiin yksikössä  $\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$ . Materiaaleilla oli kuitenkin samanlaiset pyyntimäärät. Tutkimuksessa todettiin, ettei kyseisen biohajoavan kalastusverkon suhteen voi tehdä lopullisia johtopäätöksiä epävarmuuksien ja puutteellisen tiedon vuoksi. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, etteivät biohajoavat materiaalit ylitä tavanomaisia synteettisiä materiaaleja lujuusominaisuuksillaan. Vaikka ero on suhteellisen pieni, heikompi mekaaninen suorituskyky kalastuskäytössä vaikeuttaa uusien materiaalien vakiintumista etenkin kuluttajien käytössä.

Vaikka nykyiset tutkimukset osoittavat siirtymän biohajoaviin materiaaleihin mahdolliseksi, niistä ei tiedetä vielä tarpeeksi, jotta ne voisivat tällä hetkellä syrjäyttää tavanomaiset kuitumateriaalit. Ongelmia materiaaleille ovat esimerkiksi valmistuskustannukset, mekaaniset ominaisuudet, tiedon puute sekä kuluttajien mielenkiinto vapakalastuksen ekologisuudesta. Koska tutkimustyö biohajoavien materiaalien käytöstä on kesken ja koska nämä materiaalit ovat käytössä harvinaisia, niitä ei tarkastella työssä syvemmin.

### 3.2 Polyamidi (PA)

Polyamidikuidut ovat hyvin vakiintuneita materiaaleja kalastussiimojen valmistuksessa. Siimoissa käytetään alifaattisia polyamideja eli nailonia. Alifaattinen rakenne tarkoittaa hiiliketjua, joka on suora tai haarautunut. Tällöin rakenne ei ole aromaattinen. Tärkeimmät polyamidikuidun esiintymismuodot ovat nailon 6 ja nailon 6,6, jotka kattavat maailmanlaajuisesti 90 % alifaattisen polyamidin

tuotannosta [9]. Kuvassa 6 on esitetty nailon 6:n kemiallinen rakenne, johon kuuluu yksi amidiryhmä ja kuusi hiiliatomeja, joihin on sitoutunut vetyatomeita.



**Kuva 6:** Nailon 6:n kemiallinen rakenne, muokattu [25].

Nailon 6,6:n kemiallinen rakenne on samanlainen kuin kuvassa 6 esitetyn nailon 6:n kemiallinen rakenne, paitsi että amidiryhmä toistuu kahdentoista hiiliatomin välein kuuden sijaan. Valtameristä on löytynyt kumpaakin nailonin esiintymismuotoa kalastusvälineistä irtoavana jätteenä [26]. Tämä tarkoittaa, että kumpaakin nailontyyppiä käytetään kalastussiimoissa ja -verkoissa raaka-aineena.

Polyamidi on tärkeä materiaali monessa eri sovelluksessa ominaisuuksiensa vuoksi. Polyamidikuidun eli nailonin hyödyt muihin synteettisiin kuituihin nähden ovat esimerkiksi värjättävyys, kemiallinen sietokyky ja pitkäikäisyys [27]. Hyvän mekaanisen suorituskyvyn lisäksi pitkäikäisyys ja värjättävyys ovat tärkeitä ominaisuuksia kalastussiiman suunnittelussa. Värjättävyys mahdollistaa kattavan värivalikoiman ja sopivan ulkonäön lopputuotteelle. Edellisten ominaisuuksien lisäksi nailonilla on korkea murtolujuus, hyvä sääolosuhteiden kestävyys sekä erinomainen hankauslujuus [9]. Valmistuksessa nailon on myös erittäin muovattava ja edullinen materiaali [28], joten se soveltuu hyvin kalastussiiman teolliseen tuotantoon. Kalastussiimakäytössä materiaalista valmistetaan pääosin monofilamenttisiimaa sulakehruuprosessin avulla.

Edellä mainituilla nailonin esiintymismuodoilla ei ole merkittäviä eroja toisiinsa nähden kalastuskiiman vaatimuksiin liittyen. Muissa sovelluksissa, kuten esimerkiksi ilma-alusten renkaissa, nailon 6 ei sovellu nailon 6,6:sta poiketen materiaaliksi sen heikompien termisten ominaisuuksien takia [9]. Kalastusvälineiden yhteydessä ei kuitenkaan ole tarpeellista ottaa huomioon korkean lämpötilan olosuhteita, joten näiden nailontyyppien ominaisuudet eivät eroa toisistaan merkittävästi. Taulukossa 2 on esitetty nailon 6:n ja nailon 6,6:n mekaanisia ominaisuuksia. Huomataan, että nailon 6:n mekaanisten ominaisuuksien lukuarvoissa on vain lievästi enemmän vaihtelua nailon 6,6:een nähden. Nailon 6,6:lle on esimerkiksi ilmoitettu pienimmäksi murtolujuuden arvoksi 660 MPa, kun taas nailon 6:lle on ilmoitettu 540 MPa. Maksimimurtolujuus on molemmilla sama. Vastaavasti minimikimmokerroin on nailon 6,6:lla 3,0 GPa ja nailon 6:lla 1,8 GPa. Maksimikimmokerroin on nailon 6,6:lla 5,4 GPa ja nailon 6:lla 6,0 GPa. Koska nailon 6:n lukuarvoissa esiintyy enemmän vaihtelua, työssä käytetään pääosin nailon 6:n lukuarvoja vertailuissa.

**Taulukko 2:** Nailon 6:n ja nailon 6,6:n mekaanisia ominaisuuksia [9].

	Nailon 6	Nailon 6,6
Murtolujuus (MPa)	540–1080	660–1080
Murtovenymä (%)	15–40	15–30
Kimmokerroin (GPa)	1,8–6,0	3,0–5,4

Kalastuskäytössä nailonin heikkouksiin materiaalina kuuluu esimerkiksi mekaanisten ominaisuuksien heikkeneminen auringon UV-säteilyn vaikutuksesta. UV-säteilyn aiheuttamaa valokemiallista hapettumisreaktiota usein minimoidaan lisäämällä nailoniin sopivia UV-stabilointiaineita [9]. Thomas ja Hridayanathan [2] totesivat tutkimuksessaan, että 180 päivän jälkeen nailonmonofilamenttinäytteet säilyttivät keskimäärin 64,6 % alkuperäisistä murtolujuuksistaan, kun taas multifilamenttinäytteet säilyttivät keskimäärin vain 46,6 %:ia. Keskimääräiset lukuarvot laskettiin eripaksuisten näytteiden tuloksista. Näytteitä säilytettiin 45 asteen kulmassa katon päällä ulkoilmassa. Tutkimuksessa ilmoitetuista lukuarvoista näkee, että nailonin mekaaniset ominaisuudet heikkenevät merkittävästi, mikä

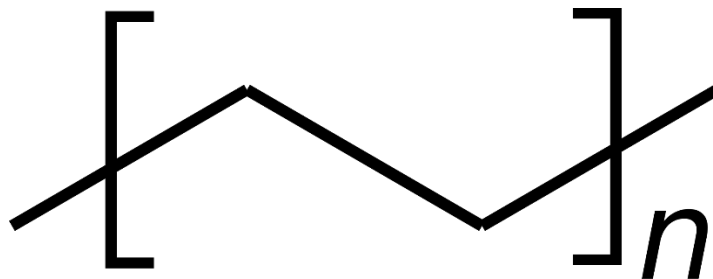
vaikuttaa tuntuvasti kalastussiiman käyttöikänsä. Lujuuden heikkenemisen vuoksi nailonsiiman pitkäikäisyys heikkenee, minkä vuoksi kulunut siima vaihdetaan useammin uuteen siimaan. Nailonsiiman kulumisesta huolimatta materiaali on yleisessä käytössä sen edullisuuden ansiosta.

Toinen nailonin heikkous on sen biohajoamattomuus. Nailon 4:lla on kuitenkin tutkittu esiintyvän erinomaista biohajoavuutta kalastussiimoissa [29], mutta kyseinen nailontyyppi on harvinainen. Tämä johtuu sen heikommista mekaanisista ominaisuuksista yleisempiin nailontyypeihin nähden ja sen valmistuksesta, jota vaikeuttaa materiaalin nopea terminen hajoaminen [30]. Yleisimmät nailontyypit aiheuttavat aavekalastusta vesistöissä heikon biohajoavuuden vuoksi. Brakstad et al. [7] kertovat tutkimuksessaan, ettei nailonmonofilamenteilla ollut merkkejä biohajoamisesta, vaikka niitä tutkittiin merivedessä kolmen vuoden ajan. Tutkimuksessa näytteet käärittiin alumiinifolioon, jotta ne olisivat suojassa valon vaikutukselta. Nailonmonofilamentin lujuus ei heikentynyt tutkimuksen aikana, koska näytteen murtumiseen vaadittu massa pysyi samana. On silti todettava, että nailonin murtolujuus on märkänä pienempi kuin kuivana [6], mikä johtuu nailonin kyvystä absorboida vettä.

### 3.3 Polyetyleni (PE)

Polyeteenistä on olemassa monia eri esiintymismuotoja, joilla on eroavat tiheyden lukuarvot. Matalan tiheyden arvolla polyeteeni on vahamaista ja mekaanisesti heikko. Lisäksi polyeteenin molekyyli-tason liike ei tällöin riitä jatkuvan kuiturakenteen valmistamiseen. Korkeammilla tiheysarvoilla polyeteeniketjun vetolujuus kasvaa merkittävästi. Ultrasuurimolekyylistä polyeteeniä eli UHMWPE:tä käytetään huippusuorituskykyä vaativissa teknisissä sovelluksissa, kuten ballistisissa tuotteissa. UHMWPE-kuidulla on erittäin hyvät mekaaniset ominaisuudet, kuten hyvä kulutuksenkestävyys ja matala kitkakerroin. [31]

Polyeteenikuidun esiintymismuotoa, UHMWPE-kuitua, käytetään nailonin tavoin monissa eri sovelluksissa korkeiden lujuusominaisuuksien vuoksi. UHMWPE-kuidulla on matala tiheys, mikä mahdollistaa eri sovelluksissa erittäin hyvän mekaanisen toimintakyvyn massa suhteutettuna. [32] Polyeteenikuidun matala tiheys johtuu yhdisteen yksinkertaisesta kemiallisesta rakenteesta, joka on esitetty kuvassa 7. Polyeteenin toistuvassa yksikössä on kaksi hiiliatomia, joihin on sitoutunut vetyatomeja.



**Kuva 7:** Polyeteenin kemiallinen rakenne.

Ominaisuuksiensa vuoksi UHMWPE-kuitua käytetään myös kalastussiimoissa ja -verkoissa, ja se on nailonin ohella hyvin yleinen materiaali kalastusvälineissä. UHMWPE-kuituja käytetään pääosin multifilamenttikuituina [32], ja niistä valmistetaan punottua kalastussiimaa usealla eri kaupallisella tuotenimellä, kuten Dyneema® ja Spectra®. Kaupallisten polyeteenikuitujen käyttäminen kalas-

tussiimoissa yleistyi muutama vuosikymmen nailonin vakiintumisen jälkeen. UHMWPE:n käsittely tuotantovaiheessa on haastavaa materiaalisulan korkean viskositeetin ja polymeeriketjujen toisiinsa kietoutumisen vuoksi [31]. Materiaalin käsittely vaatii siten erityislaitteistoa ja -tuotantovaiheita, mikä tekee polyeteeniimoista nailonsiimoja kalliimpia. Tämän lisäksi yksittäisten polyeteenikuitujen punomisprosessi jatkojalostusvaiheena nostaa tuotteen hintaa.

UHMWPE-kuitujen huonon muovattavuuden vuoksi kuiduista tehdään erittäin ohuita ja ne jatkojalostetaan multifilamenteiksi. Bunsell [32] toteaa, että UHMWPE-kuitujen valmistukseen vaikuttaa vahvasti se, etteivät sen molekyylit ole esimuotoiltuja. Monella muulla kuitumateriaalilla molekyyleillä on taipumus muodostaa sauvamaisia rakenteita, joita on vain orientoitava valmistusvaiheessa. UHMWPE:n rakenteessa on hyvin pitkiä ja joustavia molekyylejä, jotka vaativat erillisiä toimenpiteitä molekyylin suoristamiseksi. Sulakehruussa UHMWPE:n vetoprosessi on erittäin rajoitettua molekyylin välisen kietoutumisen vuoksi. UHMWPE-kuidun kehruuprosessissa materiaali liuotetaan siten liuottimeen, minkä vuoksi siitä tulee geelimäinen. Tämä saa UHMWPE-molekyylit erkanemaan tosistaan. Näin ollen molekyylejä on mahdollista vetää erittäin paljon niin sanotulla supervedolla (super-drawing), joka antaa UHMWPE-kuiduille erittäin korkean orientoitumistason ja erinomaiset mekaaniset ominaisuudet. Supervedon jälkeen geelilyhdiste poistetaan kuiduista esimerkiksi haihuttamalla. Edellä kuvattua valmistusmenetelmää kutsutaan geelikehräykseksi, ja se on vakiintunut teolliseksi tavaksi valmistaa UHMWPE-kuituja. Vaihtoehtoisilla menetelmillä UHMWPE-kuiduille muodostuu heikommät mekaaniset ominaisuudet kuin geelikehrätylle UHMWPE-kuidulle.

UHMWPE-kuidun etu nailoniin verrattuna on esimerkiksi suurempi lujuus halkaisijaan nähden. Tämän lisäksi polyeteenikuitu on nailonia merkittävästi jäykempi, jolloin kalastaja huomaa kalan liikkeen aiheuttaman nykäisyn siimassa helpommin. Kaupallisilla Dyneema-kuiduilla kimmokerroin on hyvin korkea, noin 116 GPa. Erinomaisten mekaanisten ominaisuuksiensa vuoksi UHMWPE-kuitu vaatii siten suuren määrän energiaa murtumiseen. [32] Polyeteenikuidun erinomai-

set lujuusominaisuudet mahdollistavat nailonsiimoja pienemmän siiman halkaisijan käytön, millä on monia etuja esimerkiksi siiman heittoetäisyydessä ja näkyvyydessä.

On lisäksi otettava huomioon, että polyeteenistä valmistettu siima kelluu veden pinnalla, koska sen tiheys on veden tiheyttä pienempi. Siiman kellumisesta on hyötyä eri kalastustyyeissä. Bunsell [32] kertoo, ettei polyeteeni ime vettä kuiturakenteen erittäin matalan huokoisuuden vuoksi. Hän silti lisää, että multifilamenttirakenteessa esiintyy huokoisia alueita kuitujen välissä, mikä nostaa veden imeytymistä. On kuitenkin huomattu, että eräät ominaisuudet, kuten kuitujen välinen hankaus multifilamenttirakenteessa, saattavat muuttua suotuisammiksi ja vähentyä kuitujen ollessa kosketuksessa veteen. Tämä on yhdistetty veden voitelevaan vaikutukseen.

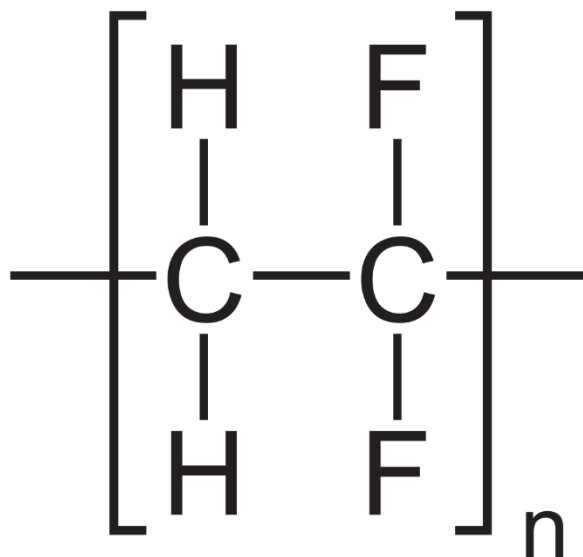
Kun otetaan nämä asiat huomioon, voidaan todeta, että UHMWPE-kuitujen materiaaliominaisuudet, kuten huono veden imeytyminen, toimivat hyvin multifilamenttirakenteen huokoisuutta vastaan. UHMWPE-kuituun imeytyy vettä vain 0,005–0,01 % kokonaismassasta vuorokauden aikana [33], joten materiaalin lujuusominaisuuksien heikkeneminen on erittäin vähäistä siiman kostuttua.

Myös polyeteenistä valmistetut siimat ovat alttiita UV-säteilylle. Zhang et al. [34] tutkivat UHMWPE-kuitujen mekaanisten ominaisuuksien muutoksia UV-säteilyn vaikutuksesta laboratorio-olosuhteissa. Lämpötila säteilytilassa oli  $40 \pm 3$  °C, ja säteilytys kesti 300 tuntia. Tutkimuksessa huomattiin, että kuitujen murtovenymä laski merkittävästi ja että kuitujen orientaatio väheni. Näiden lisäksi myös murtumiseen vaadittava voima laski merkittävästi. Näihin syynä oli polymeeriketjujen katkeaminen. Toisaalta huomattiin, että kuitujen kimmokerroin kasvoi ristisilloittumisen takia. On huomioitava, että säteilytys suoritettiin laboratoriolaitteistolla korotetussa lämpötilassa. Polyeteenisiiman ominaisuudet eivät heikkene yhtä vahvasti käytössä. Koska UHMWPE-kuiduista tehdään multifilamenttisiimoja, joilla on hyvin pienet halkaisijat, pintaan vaikuttava UV-säteily on merkittävämpää kuin paksummilla nailonsiimoilla. Zhang et al. [34] toteavatkin tutkimuksessaan, että kuidun pinta oli vakavasti rappeutunut, kun taas kuidun ydin oli heikentynyt vain vähän.

Nailonin tavoin myös UHMWPE-kuidut ovat biohajoamattomia [33]. Tämä johtuu siitä, että se on kemiallisesti hyvin inertti, koska sillä on yksinkertainen orgaaninen rakenne ilman funktionaalisia ryhmiä, joita veden mikrobit voivat hajottaa.

### 3.4 Polyvinyylideenifluoridi (PVDF)

Polyvinyylideenifluoridi eli fluorihiihi on suhteellisen uusi materiaali kalastussiimoissa, eikä se ole yhtä yleinen kuin polyeteeni- ja nailonsiimat. Materiaalia on käytetty lähinnä vain perukkeissa, mutta sen käyttö kalastussiimoissa on yleistynyt sen poikkeuksellisten ominaisuuksien ansiosta. Kuvassa 8 on esitetty polyvinyylideenifluoridin kemiallinen rakenne. Toistuvaan yksikköön kuuluu kaksi hiiliatomia, joihin on sitoutunut vety- tai fluoriatomeja.



**Kuva 8:** Polyvinyylideenifluoridin kemiallinen rakenne.

PVDF soveltuu muita fluoripolymeerejä paremmin kalastussiimaksi. PTFE-kuidut soveltuvat esimerkiksi paremmin termisesti rasittaviin käyttökohteisiin, koska ne kestävät korkeampia lämpötiloja täysin fluoratun kemiallisen raken-

teen ansiosta [35]. PTFE:llä on kuitenkin liian korkea sulamispiste monofilamenttikuidun valmistamiseen [33][35]. Huonomman muovattavuuden lisäksi muilla fluoripolymeereillä voi olla PVDF-kuituja huonompi mekaaninen suorituskyky, kuten esimerkiksi FEP-kuidulla [33].

PVDF-kuidut soveltuvat käyttökohteisiin, joissa vaaditaan sekä erinomaisia kemiallisia että mekaanisia ominaisuuksia, kuten korkeaa hankauslujuutta. Niistä valmistetaan usein monofilamenttia. PVDF on kemiallisesti inertti materiaali, mikä johtuu sen kemiallisen rakenteen polaarista fluorisidoksista. [35] PVDF-kuidun UV-säteilyn ja veden sietokyvyt ovat erinomaisia [33], minkä vuoksi fluorihilisiiman kemialliset ominaisuudet ovat ainutlaatuiset yleisempiin siimamateriaaleihin verrattuna. Botelho et al. [36] tutkivat kaupallisen  $\beta$ -PVDF:n polymeerirakenteen muutosta, kun näytteitä UV-säteilytettiin kymmenen viikon ajan laboratorio-olosuhteissa. Tutkimuksessa todettiin, että PVDF sopii ulkoilman soveluksiin, koska polymeerin kemiallisessa rakenteessa tai mekaanisissa ominaisuuksissa ei huomattu merkittäviä muutoksia. PVDF-kuidut ovat melko kalliita [35], mutta sen kallis hinta voi kompensoitua siimamateriaalin paremman ympäristöllisten rasitusten kestävyden ansiosta. PVDF-siimat kestävät UV-säteilyn lisäksi biohajoamista [29], mikä ympäristön kannalta on materiaalin kemiallisen inerttiyden huono puoli.

PVDF-kuidun tiheys on noin  $1,78 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  ja taitekerroin 1,42 [33]. Fluorihilisiima on siten puolitoista kertaa nailonsiimaa tiheämpää ja uppoaa veteen nopeammin. Tämän vuoksi fluorihilisiima soveltuu esimerkiksi kalastuksessa syviin vesistöihin. On huomioitavaa, että materiaalin erinomainen hankauslujuus, joka suojaa siimaa kivien aiheuttamista vaurioista, soveltuu uppoavan siiman ominaisuuksiin hyvin. PVDF-kuidun taitekerroin on käsitellyistä materiaaleista lähimpänä veden taitekerrointa. PVDF-kuidun matala näkyvyys vedessä onkin herättänyt kuluttajien mielenkiinnon jo kaupallisten fluorihilisiimojen alkuvaiheessa [37].

## 4. MATERIAALIEN OMINAISUUKSIEN VERTAILU

Luvussa vertaillaan edellä käsiteltyjä kalastussiiman materiaaleja, jotka ovat nykyisin yleisimmin käytössä. Vertailuominaisuudet on valittu luvussa yksi linjattujen toimintavaatimusten perusteella, ja ne on jaettu mekaanisiin, fyysisiin ja valmistukseen liittyviin sekä kemiallisiin ominaisuuksiin. Taulukoitujen ominaisuuksien avulla vertaillaan materiaalikohtaisia lukuarvoja toisiinsa, mutta luvussa otetaan myös huomioon valmistusmenetelmien aiheuttamat muutokset lopputuotteeseen. Tarkastelussa otetaan siten huomioon sekä materiaalien että siimatyyppien kokonaisvaikutus kalastussiiman ominaisuuksiin.

### 4.1 Mekaaniset ominaisuudet

Vertailtavat mekaaniset ominaisuudet ovat murtolujuus, tekstiilimurtolujuus, murtovenymä ja kimmokerroin. Tekstiilimurtolujuus eli tenacity tarkoittaa kuitumateriaalin murtumiseen vaadittavan voiman ja kuidun denierin suhdetta, jossa denieri on 9 000 metrin pituisen langan massa [38]. Denieri on riippuvainen siten kuitumateriaalin tiheydestä ja kuidun halkaisijasta. PVDF-kuiduista on julkaistu niukasti tietoja muihin materiaaleihin nähden [35]. Tämän vuoksi tekstiilimurtolujuutta käytetään vertailusuurena puuttuvien mekaanisten lukuarvojen kompensoimiseksi.

Tämän lisäksi on otettava huomioon, ettei vertailuun oteta mukaan hankauslujuuden lukuarvoja. Saville [39] toteaa, että todisteet hankauslujuuteen vaikuttavista tekijöistä ovat ristiriitaisia, koska kokeissa on ollut hyvin erilaiset olosuhteet ja käytetty eri hankausmuotoja. Tämän vuoksi mittaustulokset ovat olleet joskus ristiriitaisia. On kuitenkin huomattu, että erityisesti sitkeys ja korkea murtovenymä parantavat materiaalin hankauslujuutta. Koska tutkittavat siimamateriaalit ovat erittäin sitkeitä, ei ole tarpeellista tarkastella hankauslujuutta tarkemmin erillisinä lukuarvoina. Taulukossa 3 on esitetty materiaalien mekaanisten ominaisuuksien lukuarvot.

**Taulukko 3:** Kalastussiimamateriaalien mekaaniset ominaisuudet [9][32][33][35][40].

	Nailon 6	UHMWPE	PVDF
Siimatyyppi	Monofilamentti	Multifilamentti	Monofilamentti
Murtolujuus (MPa)	540–1080	3600	-
Tekstiilimurtolujuus ( $\frac{N}{tex}$ )	0,54–1,08	3,70	0,43
Murtovenymä (%)	15–40	3–4	10–50
Kimmokerroin (GPa)	1,8–6,0	116,0	-

Taulukosta 3 huomataan, että UHMWPE-kuidulla on kalastussiimalle suotuisimmat mekaaniset ominaisuudet ja että lukuarvot eroavat merkittävästi muista materiaaleista. UHMWPE-siimalla on selvästi korkein murtolujuus ja kimmokerroin, minkä vuoksi se on erittäin luja ja jäykkä. Huomataan myös, että mekaanisten ominaisuuksien erot PVDF-kuidun ja nailonin välillä ovat pieniä verrattuna punotun polyeteenin lukuarvojen eroihin. Nailonin tekstiilimurtolujuus voi olla PVDF-kuituun nähden jopa kaksinkertainen, mutta sen murtovenymän lukuarvoissa ei ole suuria eroja PVDF-kuituun nähden. Taulukon perusteella voidaan todeta, että monofilamenttimateriaaleista nailonilla on parhaat mekaaniset ominaisuudet, vaikka ero PVDF-kuidun ominaisuuksiin ei ole suuri. Nailonin ominaisuudet ovat silti paljon heikommat kuin punotulla UHMWPE-siimalla.

## 4.2 Fysikaaliset ja valmistukseen liittyvät ominaisuudet

Taulukossa 4 on esitetty kalastussiimamateriaalien fysikaaliset ja valmistukseen liittyvät ominaisuudet, jotka ovat vertailun kohteena. Nämä ominaisuudet ovat materiaalin tiheys, taitekerroin, hinta ja muovattavuus.

**Taulukko 4:** Kalastussiimamateriaalien fysikaaliset ja valmistukseen liittyvät ominaisuudet [33].

	Nailon 6	UHMWPE	PVDF
Siimatyyppe	Monofilamentti	Multifilamentti	Monofilamentti
Tiheys ( $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ )	1 130–1 150	970–980	1 770–1 780
Taitekerroin	1,56–1,57	1,59	1,42
Hinta ( $\frac{\text{€}}{\text{m}^3}$ )	2 120–2 550	1 420–2 420	12 300–16 600
Muovattavuus	Kohtuullinen	Heikko	Kohtuullinen

Taulukosta 4 huomataan, että vain UHMWPE-siima kelluu vedessä matalan tiheydensä ansiosta. Sen sijaan nailon ja PVDF uppoavat, mutta PVDF-siimalla on nailonia suurempi tiheys, minkä ansiosta se uppoaa nailonia nopeammin veteen. PVDF-kuidun näkyvyys vedessä on alhaisin, koska sen taitekertoimen arvo on lähimpänä veden taitekertoimta 1,33. Sen sijaan nailonin ja UHMWPE:n taitekertoimet ovat hyvin lähellä toisiaan. On kuitenkin otettava huomioon, että UHMWPE-siimoissa näkyvyys vedessä on merkittävästi suurempi, vaikka niiden halkaisijat ovatkin tavallisesti nailonsiimojen halkaisijoita pienempiä. Tämä johtuu siitä, ettei punotulla siimalla ole monofilamentin kaltaista sileää pintaa. Monofilamenttisiimat, ja erityisesti PVDF-siimat, ovat siten vaikeampi havaita vedessä.

Taulukosta 4 huomataan myös, että PVDF-kuidun hinta tilavuuteen nähden on suurin taulukon materiaaleista, minkä vuoksi fluorihilisiimat ovat kalliita monofilamenttirakenteestaan ja muovattavuudestaan huolimatta. Materiaalina UHMWPE on halvinta, mutta valmistusvaiheeseen vaikuttaa UHMWPE-kuidun heikko muovattavuus ja myöhempi jatkojalostus multifilamentiksi. Näin ollen polyteenisiima on todellisuudessa nailonsiimaa kalliimpaa. Nailon on halvin siimamateriaali sen monofilamenttirakenteen ja muovattavuuden ansiosta.

Motonet Oy:n verkkokaupasta [41] on mahdollista vertailla edellä esitettyjen siimojen kaupallisia hintoja keskenään. Taulukossa 5 on esitetty siimojen kaupalliset nimet, siimamateriaali, halkaisijat, hinnat, pituudet sekä hinnat pituuteen suhteutettuna.

**Taulukko 5:** Kalastussiimojen kaupalliset hinnat, materiaalit, halkaisijat, pituudet ja suhteelliset hinnat [41].

	Berkley Trilene Sensation	Daiwa J-Braid X8 Grand	Kinetic Waterspeed
Materiaali	Nailon	UHMWPE	PVDF
Halkaisija (mm)	0,22	0,22	0,22
Hinta (€)	9,99	15,90	7,99
Pituus (m)	300	135	20
Suhteellinen hinta ( $\frac{\text{snt}}{\text{m}}$ )	3,33	11,78	40,00

On huomioitava, että taulukon 5 hintoihin vaikuttaa materiaalien lisäksi tuotemerkki ja siiman määrä pakkauksessa. Nailonista valmistettu siima on kuitenkin metrimäärään suhteutettuna halvinta ja fluorihiihi kalleinta, vaikka taulukon 4 arvoissa UHMWPE on halvin materiaali.

### 4.3 Kemialliset ominaisuudet

Taulukossa 6 on esitetty kalastussiimamateriaalien vertailtavat kemialliset ominaisuudet. Nämä ominaisuudet ovat UV-säteilyn kestävyys, veden imeytyminen ja biohajoavuus. Edellä mainitut kemialliset ominaisuudet vaikuttavat materiaalin pitkäikäisyyteen, joka on olennaista käytön aikana, ja tuotteen ympäristöystävällisyyteen käytön jälkeen.

**Taulukko 6:** Kalastussiimamateriaalien kemialliset ominaisuudet [33].

	Nailon 6	UHMWPE	PVDF
Siimatyyppi	Monofilamentti	Multifilamentti	Monofilamentti
UV-säteilyn kestävyys	Kohtalainen	Kohtalainen	Erinomainen
Veden imeytyminen (% vuorokaudessa)	1,900–3,100	0,005–0,010	0,030–0,060
Biohajoavuus	Ei	Ei	Ei

Taulukosta 6 huomataan, ettei mikään siimamateriaaleista ole biohajoava, mikä on nykyisten kalastussiimamateriaalien suurin ongelma. Toisin kuin edellä käsitellyt biohajoavat kuitumateriaalit, eniten käytetyt siimamateriaalit eivät sisällä hydrofiilisiä esterisidoksia. Materiaalin biohajoaminen vedessä vaatii tavallisesti hydrolyysiä ja merkittävää veden imeytymistä rakenteeseen. Veden imeytymisen huonona puolena käytössä on siiman lujuuden heikentyminen, sillä siiman lujuus on märkänä pienempi kuin kuivana. Veden imeytyminen on vähäistä kaikilla materiaaleilla, mutta nailonilla se on selvästi suurinta. UHMWPE- ja PVDF-kuituihin vettä imeytyy erittäin vähän, mikä parantaa siiman lujuutta ja pitkäikäisyyttä.

Taulukosta 6 huomataan lisäksi, että vain PVDF-siimalla on erinomainen kestävyys UV-säteilyä vastaan. Muilla siimamateriaaleilla kestävyys on vain kohtalainen, minkä vuoksi niiden mekaaniset ominaisuudet heikkenevät enemmän valon vaikutuksesta. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että siimat voivat heikentyä, vaikkei niitä käytettäisikään. Edellä todettu PVDF-siiman kallis hinta voi kompensoitua erinomaisten veden ja UV-säteilyn kestävyysominaisuuksiensa ansiosta. On lisäksi todettava, että monofilamenttisiimojen suurempi halkaisija tekee niistä kestävämpiä UV-säteilyä vastaan verrattuna multifilamenttisiimoihin. Näin ollen nailonsiimalla voi olla UHMWPE-siimaa korkeampi UV-säteilyn kestävyys, jos sillä on suurempi halkaisija.

## 5. YHTEENVETO

Työssä käsiteltiin kalastussiiman materiaalivalintaa monipuolisesti eri suureiden avulla ja verrattiin yleisimpiä siimamateriaaleja toisiinsa. Työn tavoitteena oli tarkastella eri siimamateriaalien vahvuuksia toisiinsa nähden ja tutkia nykyisten materiaalien rajoitteita. Kalastussiiman käytössä painottuu etenkin mekaaniset ominaisuudet, mutta työssä tukittiin myös valmistuksen ja käytön jälkeisen vaiheen näkökulmista. Etenkin käytön jälkeiset ominaisuudet ovat ajankohtaisia, koska hylätyt kalastusverkot ja -siimat ovat vesistöille haitallisia. Tämän lisäksi työssä tutkittiin optisia ja käyttöikään liittyviä ominaisuuksia, jotka ovat mekaanisten ominaisuuksien kanssa tärkeitä tuotteen käytön aikana. Siiman valmistus mono- tai multifilamentiksi vaikuttaa lopputuotteen ominaisuuksiin yhdessä materiaalien ominaisuuksien kanssa, kun taas materiaalin muovattavuus vaikuttaa valmistusmenetelmän valintaan.

Työssä todettiin, että yleisimmät siimamateriaalit ovat nailon, UHMWPE ja PVDF. Nämä materiaalit ovat teknisiä ja synteettisiä kuituja, joita käytetään mekaanisesti vaativissa sovelluksissa. Näistä UHMWPE:llä on selvästi parhaimmat mekaaniset ominaisuudet, mutta UHMWPE-siima on näkyvintä sen multifilamenttirakenteen vuoksi. Nailon on PVDF-kuitua lujempi, mutta sen UV-säteilyn ja veden imeytymisen kestävyys ovat PVDF-kuitua heikommät. PVDF-siiman merkittävimminä etuina ovat pitkäikäisyys ja heikko näkyvyys. Nailonin merkittävä etu on sen edullisuus. Nailonsiimalla on siten hintaansa nähden erittäin hyvät ominaisuudet käytön aikana, kun pitkäikäisyyteen vaikuttavia ominaisuuksia ei oteta huomioon.

Rajoituksena työssä oli osittainen lähteiden puute tietyistä materiaaleista tai suureista. PVDF-kuidusta on esimerkiksi julkaistu niukasti mitattua tietoa, mikä voi olla syy materiaalin heikkoihin mekaanisten ominaisuuksien lukuarvoihin verrattuna muihin materiaaleihin. PVDF:n heikot mekaanisten ominaisuuksien lukuar-

vot ovat yllättäviä, koska materiaalia käytetään enemmän kalastussiiman perukeissa, jotka vaativat erinomaista mekaanisten rasitusten kestävyttä. Lisäksi työtä rajoitti puute kattavista lähteistä, jotka käsittelevät eri materiaalien hankauslujuuksien lukuaroja.

Kaikkien edellä esitettyjen materiaalien huonona puolena oli biohajoamattomuus, joka on ympäristölle haitallista. Materiaalien rakenne ei sisällä hygroskooppisia funktionaalisia ryhmiä, kuten esterisidoksia, minkä vuoksi ne hylkivät vettä. Seurauksena materiaalit kostuvat erittäin vähän, minkä vuoksi materiaalin lujuus säilyy paremmin, mutta materiaali ei hajoa vedessä käytön jälkeen. Työssä tarkasteltiin lyhyesti biohajoavia siimamateriaaleja, kuten PBAT, PBSAT ja PBS, jotka sisältävät esterisidoksia. Näiden materiaalien heikkouksiin lukeutuivat esimerkiksi korkeammat valmistuskustannukset ja heikommat mekaaniset ominaisuudet. Nämä heikkoudet voivat estää materiaalien vakiintumista kaupallisesti kuluttajien keskuudessa. Biohajoavia siimoja on tutkittu monipuolisesti erilaisilla seostus- ja pinnoitusvalinnoilla, mikä tekee biohajoavien siimojen materiaalien tarkastelusta monimutkaista. Nykyiset tiedot biohajoavien materiaalien soveltuvuudesta kalastuskäyttöön ovat puutteellisia, minkä vuoksi jatkotutkimukset aiheeseen liittyen ovat tarpeellisia.

## LÄHTEET

- [1] R. Hughes. Prehistoric hooks and sinkers show early humans used advanced fishing techniques. Courthouse News Service, 2021. Saatavissa (viitattu 1.2.2025): <https://www.courthousenews.com/prehistoric-hooks-and-sinkers-show-early-humans-used-advanced-fishing-techniques/>.
- [2] S. N. Thomas, C. Hridayanathan. The effect of natural sunlight on the strength of polyamide 6 multifilament and monofilament fishing net materials. *Fisheries research*. Vol. 81, no. 2, 2006, pp. 326–330.
- [3] R. Shamey, K. Sinha. A review of degradation of nylon 6. 6 as a result of exposure to environmental conditions. *Review of Progress in Coloration and Related Topics*. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd. Vol. 33, 2003, pp. 93–107.
- [4] M. F. Rahman. Effect of ultraviolet radiation induced crosslinking on natural fiber and biomaterials. *UV Radiation: Properties, Effects, and Applications*. 2014, pp. 305–334.
- [5] H. L. Do, C. W. Armstrong. Ghost fishing gear and their effect on ecosystem services – Identification and knowledge gaps. *Marine policy*. Vol. 150, 2023, pp. 105528.
- [6] S. Kim, P. Kim, J. Lim, H. An, P. Suuronen. Use of biodegradable driftnets to prevent ghost fishing: physical properties and fishing performance for yellow croaker. *Animal conservation*. Vol. 19, no. 4, 2016, pp. 309–319.
- [7] O. G. Brakstad, L. Sørensen, S. Hakvåg, H. M. Føre, B. Su, M. Aas, et al. The fate of conventional and potentially degradable gillnets in a seawater-sediment system. *Marine pollution bulletin*. Vol. 180, 2022, pp. 113759.
- [8] R. Correa, F. Stumpf. Design of an apparatus to perform hydrolysis tests in polymeric yarns. *IMEKO-International Measurement Federation Secretariat*. 2014, pp. 24–27.
- [9] A. R. Bunsell. *Handbook of Tensile Properties of Textile and Technical Fibres*. 1st edition. Chantilly: Woodhead Publishing. Vol. 91, 2009, pp. 197–222.
- [10] H. F. Giles Jr, J. R. Wagner Jr, E. M. Mount III. *Extrusion - The Definitive Processing Guide and Handbook (2nd Edition)*. 2nd edition. Chantilly: Elsevier. 2014, pp. 585–591.
- [11] H. Schürmann. *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden 2*. Springer, Berlin. 2007.
- [12] M. Miao, J. H. Xin, editors. *Engineering of high-performance textiles*. Duxford, England: Woodhead Publishing; 2018, pp. 490–505.

- [13] S. N. Monteiro, F. M. Margem, F. de O. Braga, F. S. da. Luz, N. T. Simonassi. Weibull analysis of the tensile strength dependence with fiber diameter of giant bamboo. *Journal of materials research and technology*. Vol. 6, no. 4, 2017, pp. 317–322.
- [14] Q. Zu, W. Song, S. Huang, R. Guo. Influence of Diameter Distribution of High-Strength Glass Fiber on Fiber Mechanical Properties. *Journal of the Chinese ceramic society*, Vol. 50, no. 4, 2022, pp. 957–964
- [15] J. W. Gooch. Multifilament. In: *Encyclopedic Dictionary of Polymers*. New York, NY: Springer New York; 2011, pp. 475–475.
- [16] J. Alfe. How to Choose the Right Fishing Line. Curated., 2023. Saatavissa (viitattu 14.2.2025): <https://www.curated.com/journal/300000/how-to-choose-the-right-fishing-line>.
- [17] Y. Kyosev. Braiding technology for textiles. 1st edition. Cambridge, England: Woodhead Publishing; 2015, pp. 2–12.
- [18] M. Eighani, S. M. Bayse, S. Y. Paighambari, M. K. Broadhurst. Mono- vs multifilament gillnets: effects on selectivity of narrow-barred Spanish mackerel *Scomberomorus commerson* in the Persian Gulf. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*. Vol. 100, no. 2, 2020, pp. 285–290.
- [19] Y. He, S. Fu, J. Huang, Y. Liu, Y. Zhang. Interpreting compression resistance and resilience of spacer fabrics with morphological and mechanical changes of different polymeric spacer monofilaments. *Textile research journal*. Vol. 94, no. 19–20, 2024, pp. 2164–2177.
- [20] A. E. Bogdanovich, P. D. Bradford. Carbon nanotube yarn and 3-D braid composites. Part I: Tensile testing and mechanical properties analysis. *Composites Part A, Applied science and manufacturing*. Vol. 41, no. 2, 2010, pp. 230–237.
- [21] J. E. Bonkowski. Practical Approaches to the Light Stabilization of Polypropylene Multifilaments. *Textile research journal*. Vol. 39, no. 3, 1969, pp. 243–247.
- [22] Z. Hansen. The Past, Present, and Future of Fishing Lines. *Tenkara Angler*, 2023. Saatavissa (viitattu 24.2.2025): <https://tenkaraangler.com/2023/05/24/the-past-present-and-future-of-fishing-lines/>.
- [23] Y. Hong, H. S. Yang, M. H. Lee, S. Kim, S. B. Park, S. Y. Hwang, et al. Fishing gear with enhanced drapability and biodegradability: Artificial, eco-friendly fibers inspired by the mussel byssus. *Chemical engineering journal (Lausanne, Switzerland : 1996)*. Vol. 489, 2024, pp. 151388.

- [24] S. Su. Prediction of the Miscibility of PBAT/PLA Blends. *Polymers*. Vol. 13, no. 14, 2021, pp. 2339.
- [25] D.328, Wikimedia Commons, 2008. Saatavissa muokkaamattomana (viitattu 25.2.2025): [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nylon6\\_and\\_Nylon6,6\\_structure.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nylon6_and_Nylon6,6_structure.svg).
- [26] S. Hongthong, H. S. Leese, M. J. Allen, C. J. Chuck. Assessing the Conversion of Various Nylon Polymers in the Hydrothermal Liquefaction of Macroalgae. *Environments* (Basel, Switzerland). Vol. 8, no. 4, 2021, pp. 34.
- [27] S. M. Burkinshaw. *Physico-chemical Aspects of Textile Coloration*. 1st ed. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons in association with the Society of Ders and Colorists; 2016, pp. 863–871.
- [28] Polyamide (Nylon): How to Select the Right Grade? Omnexus. Saatavissa (viitattu 27.2.2025): <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyamide-pa-nylon>.
- [29] Y. An, T. Kajiwara, A. Padermshoke, T. Van Nguyen, S. Feng, H. Mokudai, et al. Environmental Degradation of Nylon, Poly(ethylene terephthalate) (PET), and Poly(vinylidene fluoride) (PVDF) Fishing Line Fibers. *ACS applied polymer materials*. Vol. 5, no. 6, 2023, pp. 4427–4436.
- [30] T. Nagahama, S. Yagi, H. Yamane, H. Xu. Melt spinning of polyamide 4. *Polymers for advanced technologies*. Vol. 33, no. 10, 2022, pp. 3658–3665.
- [31] G. Bhat, editor. *Structure and properties of high-performance fibers*. Amsterdam, Netherlands: Woodhead Publishing; 2017. pp. 167–185.
- [32] A. R. Bunsell. *Handbook of Tensile Properties of Textile and Technical Fibres*. 1st ed. Chantilly: Woodhead Publishing. Vol. 91, 2009, pp. 437–485.
- [33] Ansys GRANTA EduPack software, ANSYS, Inc., Cambridge, UK, 2022. Saatavissa (viitattu 14.3.2025): <https://www.ansys.com/products/materials/granta-edupack>.
- [34] H. Zhang, M. Shi, J. Zhang, S. Wang. Effects of sunshine UV irradiation on the tensile properties and structure of ultrahigh molecular weight polyethylene fiber. *Journal of applied polymer science*. Vol. 89, no. 10, 2003, pp. 2757–2763.
- [35] J. W. S. Hearle. *High Performance Fibres*. 1st edition. Chantilly: Woodhead Publishing; 2001, pp. 261–266.
- [36] G. Botelho, M. M. Silva, A. M. Gonçalves, V. Sencadas, J. Serrado-Nunes, S. Lanceros-Mendez. Performance of electroactive poly(vinylidene fluoride) against UV radiation. *Polymer testing*. Vol. 27, no. 7, 2008, pp. 818–822.

- [37] J. Merwin. "The Importance of Fluorocarbon." *Field & Stream (South Ed.)*. Vol. 101, no. 12, North Equity, 1997, pp. 96-. [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/176jdv/cdi\\_proquest\\_miscellaneous\\_194408037](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/176jdv/cdi_proquest_miscellaneous_194408037)
- [38] J. W. S. Hearle. *High Performance Fibres*. 1st edition. Chantilly: Woodhead Publishing; 2001, pp. 325–326.
- [39] B. P. Saville, Textile Institute Content Provider. *Physical Testing of Textiles*. Burlington: Elsevier Science; 1999, pp. 195–196.
- [40] J. W. S. Hearle. *High Performance Fibres*. 1st edition. Chantilly: Woodhead Publishing; 2001, pp. 71.
- [41] Motonet Oy:n verkkokauppa. Saatavissa (viitattu 15.4.2025): <https://www.motonet.fi/>.