VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Joonas Tuupanen

SÄHKÖPERÄMOOTTORIN POTKURIN UUDELLEENSUUNNITTELU

Tekniikka
2023

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
Konetekniikka

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Joonas Tuupanen
Opinnäytetyön nimi	Sähköperämoottorin potkurin uudelleensuunnittelu
Vuosi	2023
Kieli	suomi
Sivumäärä	73 + 1 liitettä
Ohjaaja	Juha Hantula

Opinnäytetyössä tutkittiin, onko perämoottorin potkurin uudelleensuunnittelulla mahdollista parantaa lautan huippunopeutta. Opinnäytetyön aihetta tutkittiin valmistamalla suunniteltu potkuri kahdesta eri materiaalista.

Opinnäytetyössä perehdyttiin virtausmekaniikkaan ja lisäävään valmistukseen liittyvään teoreettiseen taustaan eri aineistojen ja kirjallisuuden avulla. Teoriaosuudessa kerrotaan keskeisiä käsitteitä virtausmekaniikasta ja valmistukseen liittyvästä osuudesta. Suunniteltavaan osaan kohdistuvia voimia ja kuormituksia lasketaan tuttujen matemaattisten kaavojen avulla. Valmistukseen liittyvissä materiaali valinnoissa ja valmistusmenetelmissä ohjeisti asiantuntijat.

Fysiikan teoriaosuuden pohjalta saatiin lähtötietoja potkurin eri osista ja niiden toiminnasta sekä kuinka alkuperäistä potkuria voitaisiin parantaa. Lisäävän valmistuksen teoriaosuudessa saatiin tietoa, mitä tulee ottaa huomioon suunniteltaessa tulostettavaa kappaletta. Opinnäytetyössä selvitettiin, että potkurin valmistaminen on mahdollista 3D-tulostamalla huolimatta paikoitellen vaikeastakin geometriasta.

Avainsanat lisäävä valmistus, 3D-tulostus, virtausmekaniikka, perämoottorin potkuri

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
Konetekniikka

ABSTRACT

Author	Joonas Tuupanen
Title	Redesigning of an Electric Outboard Propeller
Year	2023
Language	Finnish
Pages	73 + 1 Appendices
Name of Supervisor	Juha Hantula

The objective of the thesis was to research if it is possible to improve the top speed of a raft by redesigning the propeller. The subject was researched by manufacturing a designed propeller from two different materials.

The theoretical background related to the thesis were fluid mechanics and additive manufacturing. Both topics were studied with the help of various materials and literature. The forces and loads related to the designed part were calculated by using familiar mathematical formulas. Specialists guided in choosing the appropriate materials and methods related to manufacturing.

Based on the theoretical part of physics, basic information was obtained about various parts of a propeller. Also, information about the basic operation of a propeller and how the performance of the propeller could be improved was found. In the theory part of additive manufacturing, information was obtained what should be considered when designing a 3D printable part. It was discovered that it is possible to manufacture a propeller by 3D printing, despite the difficult geometry in some parts.

Keywords Additive manufacturing, 3D-printing, fluid mechanics, and outboard propeller

LYHENTEET

SLS	Selective Laser Sintering, valikoiva laser sulatus
DfAM	Design for Additive Manufacturing, suunnittelu lisäävälle valmistusmenetelmälle
FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä
CAD	Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
rpm	revolutions per minute, kierrosta minuutissa
CEMF	Counter-Electromotive Force, vastasähkömotoristinen voima
FDM	Fused Deposition Modeling, sulatettujen filamenttien valmistus

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1 JOHDANTO 10

1.1 Opinnäytetyön tilaaja ja sidosryhmä 10

2 PROJEKTIN TAUSTA JA TARKOITUS 12

2.1 Käytettävä sähköperämoottori ja lautta 12

2.2 Sähköperämoottorin toiminta 13

2.2.1 Harjattoman sähkömoottorin perustoiminta 14

2.3 Projektin tarkoitus 16

3 VIRTAUSMEKANIIKKA 18

3.1 Virtausmekaniikka yleisesti 18

3.2 Virtausdynamiikka 19

3.2.1 Reynoldsin luku 19

3.2.2 Viskositeetti 20

3.2.3 Newtonilaiset ja ei-Newtonilaiset fluidit 20

3.3 Potkurin virtausdynamiikka 22

3.3.1 Kavitaatio 23

3.3.2 Potkurin nousu 24

3.3.3 Lapojen määrä 25

3.3.4 Lavan kallistuskulma 26

3.3.5 Materiaalin vaikutus 27

4 SUUNNITTELU MATERIAALIA LISÄÄVÄLLE VALMISTUSMENETELMÄLLE 29

4.1 Suunnitteluprosessi 30

4.1.1 Spesifikaatioiden analysoiminen 30

4.1.2 Yhden tai useamman karkean muodon esittäminen 31

4.1.3 Mallien optimoiminen 32

4.1.4 Mallin hyväksyminen 33

4.2 Materiaalia lisäävän valmistusmenetelmän edut ja haasteet 33
4.2.1 Yleisesti 34
4.2.2 Suunnittelijan näkökulmasta 35
4.3 Valikoiva laser sintraus 36
5 PROJEKTIN LÄHESTYMISTAPA JA TOTEUTUS 38
5.1 Projektin aloitus 38
5.1.1 Projektisuunnitelma ja aloituspalaveri 38
5.2 Potkurin mallintaminen 39
5.2.1 Alkuperäisen potkurin mittaus 39
5.2.2 Materiaalin valinta 39
5.2.3 Lapojen mallintaminen 41
5.2.4 Topologian optimointi ja tukien parantaminen 44
5.2.5 Kuormitukset ja FEM-simulointi 50
5.2.6 Tulostettavuuden arviointi 54
5.3 Potkurin valmistaminen 55
5.3.1 Ensimmäinen prototyyppi 56
5.3.2 Toinen prototyyppi 58
5.3.3 Lopullinen potkuri 61
6 PROJEKTIN TUOTOKSET 62
6.1 3D-tulostetut prototyypit 62
6.2 Lopullinen 3D-tulostettu potkuri 63
7 POTKURIEN TESTAUS 64
7.1 Potkurien testaus 64
7.2 Testaustulokset 65
8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA 67
LÄHTEET 69
LIITTEET 74

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Käytettävä lautta. 13
Kuva 2. Sähköperämoottorin pääkomponentit. 14
Kuva 3. Staattorikäämitysten erot vastasähkömotoriseen voimaan. 15
Kuva 4. Kuvaaja Newtonilaisista ja ei-Newtonilaisista fluideista. 21
Kuva 5. Potkurin osat. 23
Kuva 6. Potkurin nousujen erot. 25
Kuva 7. Lavan kallistuskulman erot. 27
Kuva 8. Topologian optimointiprosessi. 32
Kuva 9. Suunnittelurajoitteet 3D-tulostukselle. 35
Kuva 10. SLS-valmistusprosessi. 37
Kuva 11. Alkuperäinen potkuri. 41
Kuva 12. Lavan muoto projisoituna kaarevaan pintaan. 42
Kuva 13. Lopullinen mallinnettu lapa. 43
Kuva 14. Topologian optimoinnille määritellyt asetukset. 45
Kuva 15. Malli topologian optimoinnin jälkeen. 46
Kuva 16. Keskiön päätuet akselista lapoihin. 47
Kuva 17. Keskiön ellipsituki. 48
Kuva 18. Kolmion muotoinen tuki. 49
Kuva 19. Suunnitellut potkurit. 50
Kuva 20. FEM-verkotus. 52
Kuva 21. FEM-mallin voimat ja rajoitteet. 53
Kuva 22. Potkurin siirtymät vasemmalla ja jännitykset oikealla. 54
Kuva 23. Ultimaker Cura s5 3D -tulostin. 55
Kuva 24. Ensimmäisen prototyypin Ultimaker Cura-asetukset. 56
Kuva 25. Ensimmäisen prototyypin tukimateriaalin paikat. 57
Kuva 26. Ensimmäisen prototyypin valmistus. 58
Kuva 27. Toisen prototyypin Ultimaker Cura-asetukset. 59
Kuva 28. Toisen prototyypin tukimateriaalin paikat. 60

Kuva 29. Toisen prototyypin valmistus. 60
Kuva 30. Valmistetut prototyypit. 62
Kuva 31. Valmistettu lopullinen potkuri. 63
Kuva 32. Testauspenkki. 64

Taulukko 1. Testaustulokset. 65

LIITELUETTELO

LIITE 1. Potkurin tekninen piirustus

1 JOHDANTO

Perämoottoreiden historia ulottuu 1900- luvun alkupuolelle asti. Ensimmäiset sarjavalmisteiset perämoottorit saivat alkunsa vuonna 1909 ja valmistajana oli Evinrude Motors. Vesijäähdytteinen yksisylinterinen perämoottori painoi 62 kg ja tehoa oli 1,5 hevosvoimaa.[1] Perämoottorit ovat tämän jälkeen kehittyneet paljon niin koon, painon ja polttoainetehokkuuden suhteen. Sähköperämoottoreiden käyttö on yleistynyt vuosien saatossa. Syinä tähän on kasvihuonepäästöjen alentaminen, korkeat polttoaine kulut ja äänihaitat. Jokaisessa vesistössä ei myöskään ole sallittua ajaa polttomoottorilla toimivalla perämoottorilla.

Verratessa vuosikymmeniä vanhoja ja moderneja perämoottoreita on niissä yksi komponentti, joka on pysynyt vuosikymmenet hyvin samannäköisenä, potkuri. Potkuri on hyvin usein 2–4-lapainen ja suuria eroja muodoissa ei ole.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella sähköperämoottoriin uusi potkuri, jolla saadaan lisää huippunopeutta käytettävään lauttaan. Opinnäytetyössä perehdytään virtausmekaniikkaan ja pohditaan fysiikan näkökulmasta, minkälaisella potkurilla saavutetaan suurin huippunopeus. Potkuri suunnitellaan 3D- suunnitteluohjelmalla ja valmistetaan 3D- tulostamalla.

1.1 Opinnäytetyön tilaaja ja sidosryhmä

Opinnäytetyö tehdään Vaasan ammattikorkeakoululle. Opinnäytetyö on osa AM-akatemiaa. AM-Akatemia on Vaasan ammattikorkeakoulun järjestämä hanke, jonka tavoitteena on ohjata Pohjanmaan alueen yrityksien tuoteideat AM-Akatemian opiskelijoiden jatkokehitettäviksi. Tavoitteena on myös tuoda näkyvyyttä 3D-

[1] Ryder, History of Evinrude

tulostamiselle valmistusmenetelmänä alueen yrityksille, joissa kyseistä valmistusmenetelmää ei vielä hyödynnetä, mutta myös haastaa niitä yrityksiä mukaan, jotka 3D- tulostamista käyttävät valmistuksessa.[2]

Opinnäytetyön tilaajana on Esa Siltaloppi Media, jonka omistama sähköperämoottori on. Yrityksen päätoimialana on mediatoimisto. Vaasassa sijaitseva yritys tuottaa korkealaatuisia mainosvalokuvia ja -videoita.[3]

Opinnäytetyön sidosryhmänä on Merinova. Merinova on EnergyVaasa-klusterin johtava toimija. Merinova tarjoaa erilaisia hanke- ja kehittämispalveluita Vaasan alueen energiateknologiayrityksille. Merinovalaisten tiimissä työskentelee 13 henkilöä.[4]

---

[2] VAMK, AM-Akatemia
[3] Esa Siltaloppi media Oy:n kotisivut.
[4] Teknologiakeskus Oy Merinova Ab kotisivut

2 PROJEKTIN TAUSTA JA TARKOITUS

Tässä luvussa kerrotaan opinnäytetyön taustaa ja tarkoitusta. Opinnäytetyön taustasta kerrotaan käytettävästä sähköperämoottorista teknisiä tietoja ja yleisiä tietoja sähköperämoottorin toiminnasta. Sähkömoottorin perustoiminta käydään myös läpi. Projektin tarkoituksesta kerrotaan mitkä ovat opinnäytetyön päätarkoitukset ja mitä muuta työssä tarkastellaan.

2.1 Käytettävä sähköperämoottori ja lautta

Opinnäytetyössä käytettävä sähköperämoottori on WTR2-Barracuda 86. Perämoottori toimii 24 Voltin tasavirtajännitteellä. Suurin teho, jonka perämoottori tuottaa on 1 164 W. Perämoottorissa on yhteensä seitsemän vaihdetta, joista viisi on eteenpäin ja kaksi taaksepäin sekä perämoottorin kallistuskulmaa on mahdollista säätää. Perämoottoriin on kytkettynä kaksi 12 Voltin akkua sarjaan, jolloin järjestelmän vaatima 24 Voltin jännite taso täyttyy. Akusto riittää normaalissa 3–4 nopeusvaihteen ajossa noin 1–2 h.

Sähköperämoottori ei ole kiinni perinteisessä veneessä vaan lautassa (Kuva 1). Lautta on itsetehty ja sen mitat ovat noin 2 m x 4 m ja se on kärjestä muodoltaan suora. Veden vastus on tällöin myös suurempi ja lautan huippunopeus jää matalammaksi.

Kuva 1. Käytettävä lautta.

2.2 Sähköperämoottorin toiminta

Perinteisessä sähköperämoottorissa voidaan ajatella olevan kuusi pääkomponenttia (Kuva 2). Nämä ovat käsikahva, ohjainyksikkö, akkukaapelit, kiinnitysmekanismi, sähkömoottori ja potkuri. Käsikahvalla saadaan määriteltyä, kuinka kovaa halutaan mennä eli säädetään sähkömoottorin tehoa. Ohjainyksikkö välittää halutun suunnan ja kaasun määrän sähkömoottorille. Monissa sähkömoottoreissa ohjainyksiköstä on myös luettavissa akun kapasiteetti. Akkukaapelit kiinnittyvät akkuun, josta perämoottori saa virtaa. Kiinnitysmekanismista perämoottori kiinnitetään haluttuun ajoneuvoon. Kiinnitysmekanismista saa usein säädettyä perämoottorin asentoa vedessä. Sähkömoottori muuttaa sähköenergian mekaaniseksi energiaksi, eli pyörittää akselia, jossa on kiinni potkuri. Perämoottoreissa olevat sähkömoottorit ovat usein harjattomia sähkömoottoreita niiden pitkän käyttöiän takia. Potkurin avulla ajoneuvo liikkuu eteen tai taaksepäin, riippuen pyörimissuunnasta.

Kuva 2. Sähköperämoottorin pääkomponentit[5].

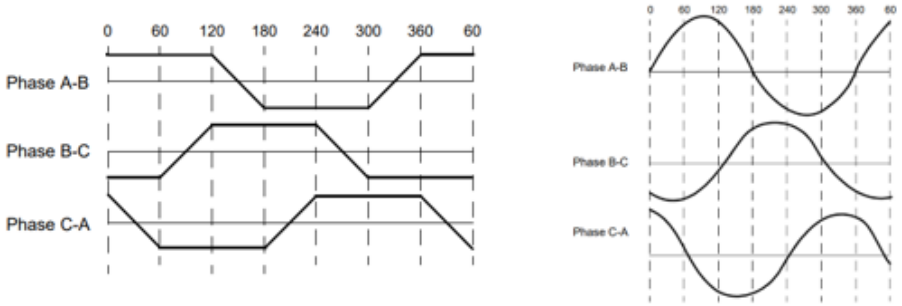
2.2.1 Harjattoman sähkömoottorin perustoiminta

Harjattomassa sähkömoottorissa on sisällä staattori ja kestomagneetilla rakennettu roottori. Näiden avulla sähköenergia saadaan muunnettua mekaaniseksi energiaksi. Harjattomassa sähkömoottorissa staattorin synnyttämä magneetti-

[5] Heinämäki, Miten sähköperämoottori toimii?

kenttä ja roottorin magneettikenttä pyörivät samalla taajuudella. Harjattomia sähkömoottoreita on yksi-, kaksi- ja kolmevaiheisia. Kolmevaiheiset sähkömoottorit ovat näistä eniten käytettyjä.[6]

Staattori koostuu metallisydämestä, jossa on aksiaalisesti uria sisäpinnalla. Näihin uriin on sijoitettuna käämit. Jokaisessa käämissä on useampi kela, jotta saadaan muodostettua käämitys. Käämit ovat jaettu staattorin kehälle muodostaen parillisen määrän napoja. Staattorikäämityksiä on sinimuotoiseksi käärittyjä ja puolisuunnikkaaksi käärittyjä. Ero käämityksissä syntyy, kuinka kelat liitetään toisiinsa. Liitäntä vaikuttaa vastasähkömotoriseen voimaan (CEMF).[7] Kuvassa 3 vasemmalla puolisuunnikkaaksi kääritty käämi ja oikealla sinimuotoiseksi kääritty.



Kuva 3. Staattorikäämitysten erot vastasähkömotoriseen voimaan[8].

Sähkömoottorin roottori on valmistettu kestomagneetista. Yleensä käytetty kestomagneetti roottoreissa on ferriittimagneetti, mutta materiaalin valinta perustuu

[6] Brown. Brushless DC motor control made easy, s. 1
[7] Yedamale. Brushless DC (BLDC) motor fundamentals, s. 1
[8] Yedamale. Brushless DC (BLDC) motor fundamentals, s. 2

vaadittuun magneettikentän tiheyteen. Roottorissa voi olla 2–8 napaparia. Ferriittimagneetit ovat pääsääntöisesti halvempia, kuin seosmateriaalit. Seosmateriaaleilla on kuitenkin parempi magneettivuon tiheys ja näin pienimpi kokoisella roottorilla saadaan sama vääntömomentti, kuin suuremmalla ferriittimagneetti roottorilla.[9]

Sähkömoottori toiminta perustuu käämien positiivisiin ja negatiivisiin jännitysmuutoksiin. Kolmivaiheisissa sähkömoottoreissa yksi käämeistä on jännitetty positiiviseen tehoon, toinen negatiiviseen tehoon ja kolmas on jännitteettömässä tilassa. Tämä toistuu jokaisella kommutointisekvenssillä.[10] Kommutointisekvenssistä puhuttaessa käytetään termiä sähköinen kiertoaste. Sähköinen kiertoaste ei välttämättä vastaa roottorin mekaanista kierrosta vaan sähköinen kiertoaste määräytyy roottorin napaparien mukaan. Kommutointisekvenssit päivittyvät jokaisen 60 sähköisen kiertoasteen välein. Eli sähkösyklin suorittamiseksi alusta loppuun pitää kommutointisekvenssi suorittaa kuusi kertaa.[11]

2.3 Projektin tarkoitus

Projektin päätarkoituksena on suunnitella ja valmistaa potkuri, jolla saadaan korkeampi huippunopeus käytettävään lauttaan. Perämoottoriin tai akustoon ei tehdä muita muutoksia, joilla voitaisiin saada huippunopeutta kasvamaan. Lautta pidetään myös sellaisena kuin se on ollut alkuperäisen potkurin kanssa, jotta tulokset ovat vertailukykyisiä.

Tutkiessa virtausmekaniikkaa pyritään löytämään ratkaisuja uudelle potkurille, joilla päästään opinnäytetyön tavoitteeseen. Teoriaosuudessa löydetyt potkurin

---

[9] Singh ym. State of the art on permanent magnet brushless DC motor drives, s. 1–2
[10] Yedamale. Brushless DC (BLDC) motor fundamentals, s. 5
[11] Yedamale. Brushless DC (BLDC) motor fundamentals, s. 8

muodot, jotka auttavat korkeamman huippunopeuden saavuttamisen viedään tämän jälkeen käytäntöön. Materiaalia lisäävän valmistusmenetelmän takia suunnitellessa vaikeankin geometrian omaava potkuri on mahdollista valmistaa. Nykypäivänä erilaisten materiaalien kirjo on hyvin laaja. Projektissa tutkitaan tästä syystä eri materiaalien vaikutusta potkurin toimintaan.

Opinnäytetyön loppuvaiheessa pohditaan projektin onnistumista kokonaisuutena ja millaisiin tuloksiin päästiin. Työn lopussa myös pohditaan miten potkuria olisi mahdollista jatkokehittää, jotta päästäisiin parempiin lopputuloksiin. Projektin edetessä myös seurataan syntyneitä kuluja ja arvioidaan, kuinka valmistuskelpoinen potkuri on materiaalia lisäävällä valmistusmenetelmällä. Kuluja myös verrataan perinteisellä valmistusmenetelmällä valmistettuihin potkureihin.

3 VIRTAUSMEKANIIKKA

Tässä luvussa kerrotaan opinnäytetyön virtausmekaniikkaan liittyvää teoriataustaa. Virtausmekaniikasta kerrotaan yleisiä asioita, kuten mitä fluidit aineet ovat. Virtausdynamiikan osiossa puolestaan kerrotaan erilaisista virtaustyypeistä ja fluidien jakautumisesta kahteen eri ryhmään. Potkurin virtausdynamiikasta käydään läpi potkurin eri osia ja mikä vaikutus niillä on potkuriin.

3.1 Virtausmekaniikka yleisesti

Virtausmekaniikka on laaja fysiikan osa-alue, joka tutkii fluidien eli nesteiden ja kaasujen käyttäytymistä liikkeessä ja levossa. Virtausmekaniikkaan liittyviä ilmiöitä on lukuisia ja ne voivat olla luonnostaan tapahtuvia tai ihmisten suunnittelemia ja rakennuttamia systeemejä. Näistä esimerkkejä on veren virtaaminen suonissamme tai kotiemme vesiputkistot. Virtausmekaniikka sisältää laajan kirjon erilaisia matemaattisia yhtälöitä ja suureita. Näistä kolme tärkeintä suuretta ovat koko (l), nopeus (V) ja paine (p).[12]

Ennen kun voidaan syvällisemmin tutkia virtausmekaniikan perusteita pitää ymmärtää, mikä ero on kiinteällä ja fluidilla aineella. Tieteellisestä näkökulmasta yleinen ajattelu, että kiinteä aine on kovaa ja fluidi aine pehmeää, ei ole riittävä. Kiinteissä aineissa molekyylit ovat tiheästi toisiinsa nähden. Molekyylien välisten suurien koheesiovoimien takia kiinteä aine pitää muotonsa. Kiinteä aine kestää tällöin myös paremmin siihen kohdistuvaa ulkoista voimaa, tässä tapauksessa leikkausjännitystä. Fluideissa aineissa molekyylit ovat puolestaan kauempana toisistaan, jolloin niillä on enemmän tilaa liikkua. Tämän takia fluidit aineet deformoituvat helposti.[13]

---

[12] Munson ym. Fluid mechanics, Seventh edition, s. 1–2
[13] Munson ym. Fluid mechanics, Seventh edition, s. 4

Virtausmekaniikan ollessa laaja fysiikan aihealue se jakautuu kahteen alalajiin, virtausstatiikkaan ja virtausdynamiikkaan. Virtausstatiikka tutkii fluideja, jotka ovat pysähdyksissä ja virtausdynamiikka puolestaan fluideja, jotka ovat liikkeessä.[14] Tässä opinnäytetyössä keskitytään jälkimmäiseen eli virtausdynamiikkaan, josta kerrotaan seuraavassa kappaleessa.

3.2 Virtausdynamiikka

Merissä ja vesistöissä tapahtuu jatkuvasti veden ja energian siirtymiä, jonka takia tutkimme erityisesti virtausdynamiikkaa emmekä virtausstatiikkaa. Veden siirtymät aiheuttaa Kuun ja Auringon vetovoima sekä Maan pyörimisestä aiheutuva keskipakovoima[15].

3.2.1 Reynoldsin luku

Englantilainen fyysikko Osborne Reynolds (1842–1912) esitti tunnusluvun Re, jolla virtaukset voidaan jakaa laminaariseen ja turbulenttiseen virtaukseen. Virtauksen nopeuden ollessa matala on virtaus laminaarista. Virtauksen nopeuden noustessa muuttuu se turbulenttiseksi. Reynoldsin luku saadaan kaavasta:

$Re = \frac{pvd}{\eta}$, jossa p = aineen tiheys

v = keskimääräinen nopeus

d = putken halkaisija

η = aineen viskositeetti

[14] Munson ym. Fluid mechanics, Seventh edition, s. 9
[15] Stow. Oceans: A very short introduction, s. 58

Putkessa virtaus on laminaarista, jos Reynoldsin luku on pienempi kuin 2 000 ja turbulenttista, jos se on yli 3 000. Laminaarisen ja turbulenttisen virtauksen välissä (Re = 2 000–3 000) virtaus on epästabiilia ja vaihtelee virtausmuotojen välillä.[16] Laminaarinen ja turbulenttinen virtaus eroaa avoimessa kanavassa huomattavasti putkessa olevan nesteen virtaukseen. Avoimessa kanavassa neste pääsee virtaamaan vapaammin, kun ympärillä ei ole virtausta rajoittavaa putkea. Virtauksen erilaisia välimuotoja syntyy tällöin paljon ja niiden kategorioiminen laminaariseen ja turbulenttiseen on haastavaa. Yleisesti ottaen virtaus avoimessa kanavassa on laminaarista, kun Reynoldsin luku on alle 500. Virtaus on turbulenttista, kun Reynoldsin luku on yli 12 500. Muulloin virtaukset ovat epästabiileja.[17]

3.2.2 Viskositeetti

Molekyylien välillä on vetovoimia, joista syntyy ainekerrosten välistä kitkaa. Tätä kitkaa sanotaan sisäiseksi kitkaksi eli viskositeetiksi. Virtauksen jatkuvuuden kannalta on välttämätöntä, että virtauksen voima F on vähintään yhtä suuri kuin sisäinen kitkavoima η. Viskositeetin SI-yksikkönä on Pa*s. Aineiden ominaisuudet muuttuvat lämpötilan mukaan, joten myös nesteiden viskositeetti muuttuu lämpötilan muuttuessa. Riippuen aineesta nämä muutokset saattavat olla suuria ja vaikuttaa oleellisesti aineen käyttäytymiseen.[18] Esimerkiksi moottoriöljyn pitää toimia halutulla tavalla myös korkeissa lämpötiloissa. Vertailuna veden viskositeetti lämpötilassa 0°C on 1,787 (mPa * s) ja puolestaan 40°C 0,654 (mPa * s).

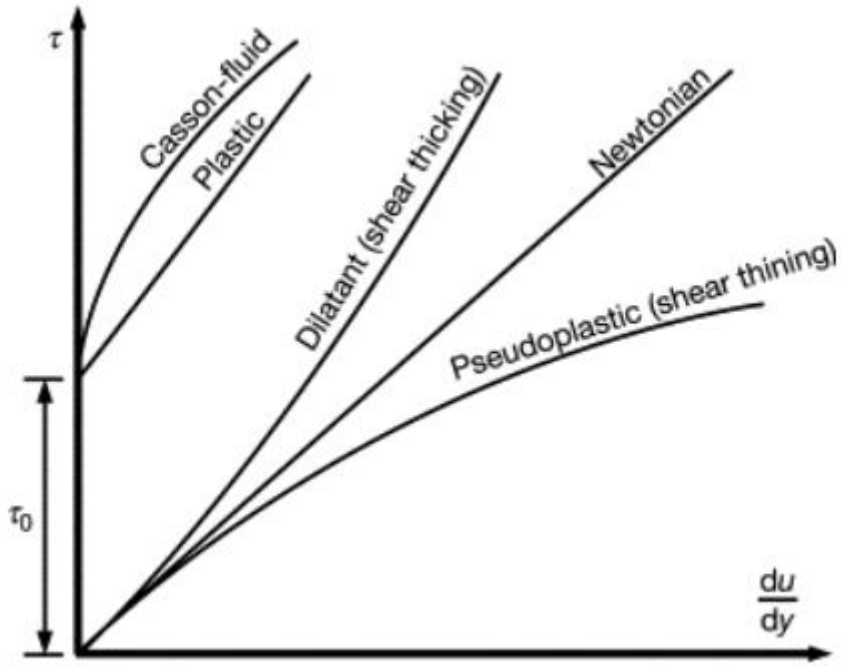
3.2.3 Newtonilaiset ja ei-Newtonilaiset fluidit

Virtausdynamiikassa fluidit jakautuvat Newtonilaisiin ja ei-Newtonilaisiin. Newtonilaisten fluidien leikkausjännitys on lineaarisesti suhteessa leikkausjännityksestä

---

[16] Inkinen ym. Momentti 1, Insinöörifysiikka, s. 335–336
[17] Munson ym. Fluid mechanics, Seventh edition, s. 553
[18] Inkinen ym. Momentti 1, Insinöörifysiikka, s. 334–335

aiheutuvaan kulmamuodonmuutokseen. Fluidit, joilla suhde ei ole lineaarinen ovat ei-Newtonilaisia. Yleisimmät nesteet ja kaasut kuuluvat Newtonilaisiin fluideihin.[19] Kuvan 4 kuvaajassa nähdään, kuinka Newtonilaisen fluidin suora lähtee origosta ja kulkee lineaarisesti eteenpäin.



Kuva 4. Kuvaaja Newtonilaisista ja ei-Newtonilaisista fluideista[20].

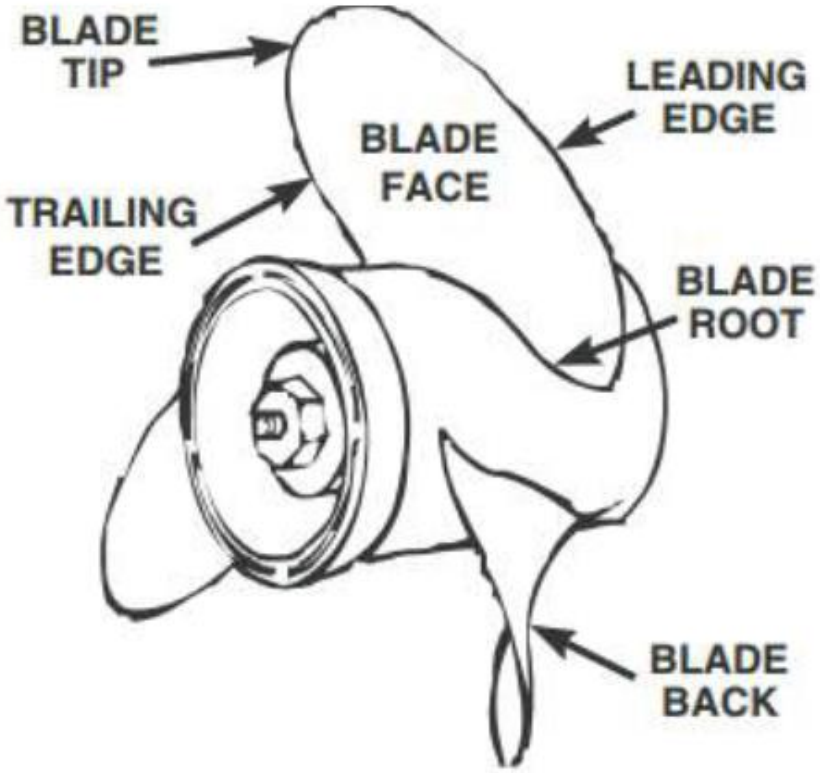
[19] Munson ym. Fluid mechanics, Seventh edition, s. 13–14
[20] Canneyt ym. nonNewtonian Fluids, s. 1

3.3 Potkurin virtausdynamiikka

Potkuri koostuu viidestä eri osasta (Kuva 5). Ensimmäisenä on keskiö, johon potkurin lavat kiinnittyvät. Keskiö ei paranna työntövoimaa, joten potkurin optimoinnin kannalta paras vaihtoehto olisi tehdä siitä mahdollisimman pieni. Keskiön kuitenkin pitää olla riittävän kestävä, jotta se kestää perämoottorin pyörivän akselin voiman.

Toisena osana on potkurin lavat. Lapojen tehtävä on työntää vettä, jonka avulla vene saadaan liikkumaan. Lavat ovat kierrettyjä, jotka ovat kiinni keskiössä. Kolmantena on lavan etu- ja takapuoli. Veneen liikkuessa eteenpäin lavan etupuoli työntää vettä. Etupuolta sanotaan myös lavan korkeapainepuoleksi. Lavan takapuoli on puolestaan matalapainepuoli. Neljäntenä on lavan juuri ja kärki. Lavan juuri on kohta, josta lapa on kiinnitetty keskiöön. Kärki on kohta lavasta, jossa se on kaikista kauimpana keskiön keskipisteestä. Viimeisenä on lavan etu- ja takareunat. Lavan etureuna leikkaa veden, josta se pääsee virtaamaan lavan painepuolta pitkin. Lavan takareunasta vesi virtaa pois.[21]

[21] Gatete ym. A review on marine propeller performance of high speed boat running on an outboard engine, s. 215



Kuva 5. Potkurin osat[22].

3.3.1 Kavitaatio

Potkurin muoto voi hieman riippua käyttötarkoituksesta, joita voi olla esimerkiksi korkeamman huippunopeuden saavuttaminen tai raskaan taakan vetäminen. Oikean potkurin valinta käyttökohteeseen on tärkeää niin suorituskyvyn, kuin perämoottorin kestävyyden kannalta. Potkurin optimoinnissa tärkeimpänä on saavuttaa suurin mahdollinen hyötysuhde. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että mahdollisimman pienellä vääntömomentilla tietyssä nopeudessa saavutetaan suurin

[22] Gatete ym. A review on marine propeller performance of high speed boat running on an outboard engine, s. 215

työntövoima. Erityisesti suurempi tehoisissa perämoottoreissa suurimman hyötysuhteen saavuttamista rajoittaa kavitaatioilmiö.[23] Kavitaatio on ilmiö, joka syntyy potkurin liian korkeasta nopeudesta tai suuresta kuormituksesta. Potkurin pyöriessä liian nopeasti syntyy lapojen takapuolelle tyhjiökuplia, jotka räjähtelevät epämääräisesti potkuria vasten. Tästä seuraa ylimääräistä tärinä- ja äänihaittaa. Lavan takapuolen eli matalapainepuolen paineen tulee olla pienimpi, kuin korkeapainepuolen, jotta vältytään kavitaatioilmiöltä.[24]

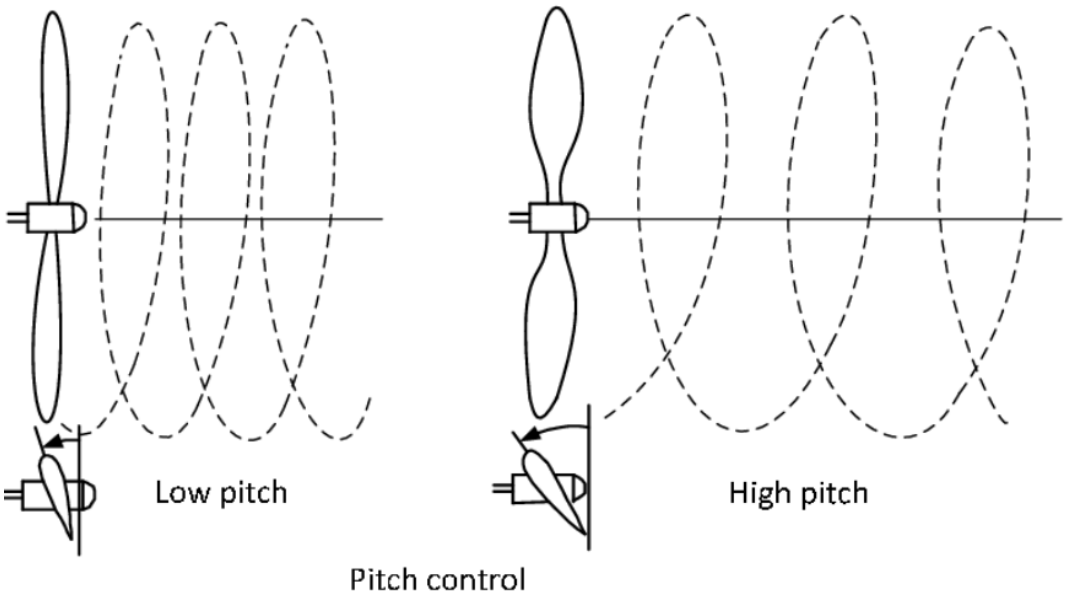
3.3.2 Potkurin nousu

Potkurin nousu on tärkeä termi, jotta ymmärretään potkurin toimintaa tarkemmin. Potkurin nousu on se matka, jonka potkuri etenee pyöriessä yhden kierroksen akselinsa ympäri. Yleisesti potkurin nimellisenä nousuna käytetään r/R = 0,7. Tämä johtuu siitä, että nousu voi muuttua potkurin eri kohdissa. Noususuhde saadaan siten, että keskimääräinen nousu jaetaan sen halkaisijalla.[25]

Kuvassa 6 nähdään kahden erilaisen potkurin nousujen erot. Kuvassa vasemmalla on pienemmällä nousulla oleva potkuri. Pienemmällä nousulla olevan potkurin huomataan etenevät pyöriessä akselin ympäri huomattavasti lyhyemmän matkan, kuin oikealla olevan.

---

[23] Gatete ym. A review on marine propeller performance of high speed boat running on an outboard engine, s. 213–214
[24] Gerr. Propeller Handbook, The complete reference for choosing, installing and understanding boat propellers, s. 43
[25] Babicz. Wärtsilä encyclopedia of ship technology, Second edition, s. 487



Kuva 6. Potkurin nousujen erot[26].

3.3.3 Lapojen määrä

Lähes poikkeuksetta perämoottoreiden potkureissa näkee kolme lapaa. Kaikista optimaalisin lapojen lukumäärä olisi yksi, mutta tällöin potkurin tasapainottaminen olisi mahdotonta. Yksi lapa olisi kaikista paras vaihtoehto siksi, että silloin ei olisi muita lapoja muuttamassa veden virtausta. Yksittäisen lavan täytyisi myös olla pinta-alaltaan erittäin suuri, jotta se tuottaisi riittävän suuren työntövoiman. Sama ongelma pinta-alan suhteen tulee myös vastaan kaksi lapaisen potkurin kanssa. Kolme lapaisen potkurin on täten koettu olevan pääsääntöisesti paras vaihtoehto. Kolme lapaisella potkurilla saadaan riittävän suuri työntövoima ja se saadaan tasapainoiseksi. Useamman kuin kolmen lavan potkureissa ongelmaksi tulee se, että veden virtaus muuttuu jatkuvasti. Työntö pinta-alaa kuitenkin olisi huomattavasti

[26] Zbigniew ym. Wind tunnel performance tests of the propeller with different pitch for the electric propulsion system, s. 2

enemmän, mutta samalla pinta-alaa, joka laahaa vettä eikä lisää työntövoimaa olisi enemmän.[27]

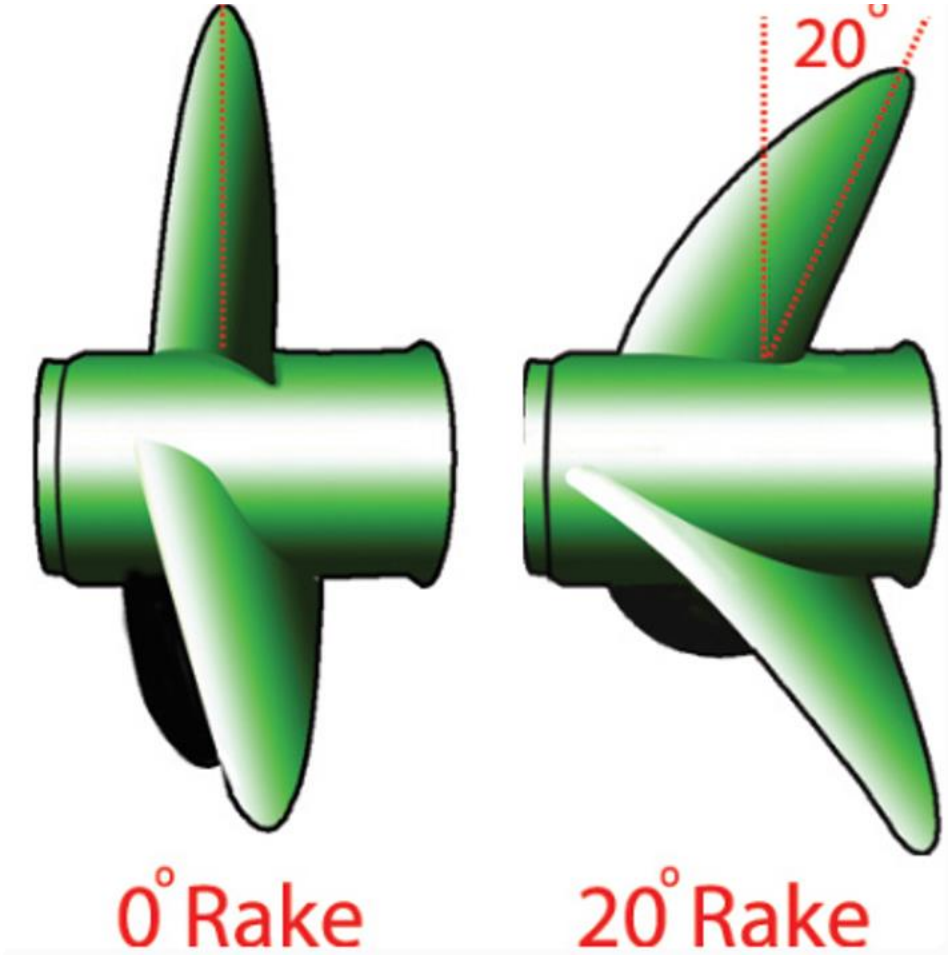
3.3.4 Lavan kallistuskulma

Lavan kallistuskulma on potkurin lavan kulma suhteessa keskiöön sivulta katsottaessa. Kallistuskulmat voivat vaihdella potkureissa aina -5° - 30° välillä. Kohtisuorassa keskiöön olevia lapoja, joiden kallistuskulma on 0° nähdään esimerkiksi tuuliturbiineissa ja ikkunatuulettimissa. Matalatehoisissa perämoottoreissa lavan kallistuskulma on pääsääntöisesti noin 15°. Korkean suorituskyvyn potkureissa sama kallistuskulma voi olla jopa 30°.[28]

Korkeamman kallistuskulman potkurit yleensä parantavat suorituskykyä, koska lapojen kärjet leikkaavat veden paremmin. Näin lapojen laahaamista saadaan vähennettyä ja potkuri saadaan tuottamaan enemmän työntövoimaa. Suurempi kallistuskulma kevyemmissä veneissä myös nostaa keulaa korkeammalle, joka taas vähentää veden vastusta veneeseen lisäten huippunopeutta.[29] Kuvassa 7 esiteltynä kahden eri potkurin lapojen kallistuskulman erot.

---

[27] Gerr. Propeller Handbook, The complete reference for choosing, installing and understanding boat propellers, s. 27
[28] Mercurymarine, artikkeli. Prop blade rake: not easy to explain, but crucial for optimal boating
[29] Mercurymarine, artikkeli. Prop blade rake: not easy to explain, but crucial for optimal boating



Kuva 7. Lavan kallistuskulman erot[30].

3.3.5 Materiaalin vaikutus

Yleisesti polttomoottori toimisissa perämoottoreissa potkuri valmistetaan alumiiniseoksesta tai teräksestä. Molempia materiaaleja on helppo muovata, niillä on hyvä veto- ja murtolujuus sekä ne ovat valmistuskustannuksiltaan halpoja materiaaleja. Sähköperämoottoreissa perinteisen metallisen potkurin tilalla on muovista valmistettu potkuri. Tämä johtuu siitä, että sähköperämoottorit ovat hyvin usein

[30] Solas, artikkeli. Basic propeller info

pienempi tehoisia ja käyttökohteena oleva ajoneuvo on kevyempi. Uusien valmistusmenetelmien yleistyessä on alettu tutkimaan erilaisten kuin perinteisten materiaalien käytettävyyttä potkureissa. Materiaali metallin ja muovin välimaastosta on lupaava, riittävän kestävä ja hyvä hyötysuhde.[31]

Erilaiset komposiittimateriaalit ovat herättäneet kiinnostusta potkurien suunnittelussa. Komposiittien materiaaliominaisuuksia on, että ne ovat kestäviä ja niillä on korkea veto- ja murtolujuus.[32] Sarjavalmisteisten komposiittipotkureiden valmistaminen on kuitenkin vielä suunnitteluvaiheessa, koska kyseessä on verrattain uusi materiaali suunnittelun ja valmistuksen suhteen.

Komposiiteista pystytään myös valmistamaan joustavia tuotteita, esimerkiksi hiiliepoksista. Tutkittaessa joustavia potkureita on huomattu, että niillä voi olla parempi hyötysuhde oikein suunniteltuna ja kavitaatiota alkaa tapahtumaan myöhäisemmässä vaiheessa. Joustavilla propelleilla pystytään teoriassa passiivisesti muuttamaan potkurin geometriaa hydrodynaamisten kuormien vaikutuksesta. Potkurin oikeaan kohtaan lisätessä jäykempää materiaalia veden vastuksen mukaan säätää esimerkiksi potkurin nousua.[33]

---

[31] Hara ym. Performance evaluation of composite marine propeller for a fishing boat by fluid-structure interaction analysis, s. 1
[32] Hara ym. Performance evaluation of composite marine propeller for a fishing boat by fluid-structure interaction analysis, s. 1
[33] Motley ym. Utilizing fluid–structure interactions to improve energy efficiency of composite marine propellers in spatially varying wake

4 SUUNNITTELU MATERIAALIA LISÄÄVÄLLE VALMISTUSMENETELMÄLLE

Materiaalia lisäävä valmistusmenetelmä on sanansa mukaisesti valmistusmenetelmä, jossa materiaalia lisätään, jotta saadaan valmistettua suunniteltu kappale. Kyseistä valmistusmenetelmää on käytetty yli 20 vuotta pääosin prototyyppien valmistuksessa[34]. Materiaalia lisäävän valmistusmenetelmän tekniikka on kuitenkin kehittynyt vuosien saatossa paljon ja nykyään sillä pystytään valmistamaan sarjatuotantona käytettäväksi meneviä tuotteita.

Englannin kielellä materiaalia lisäävä valmistusmenetelmä on Additive Manufacturing tai lyhennettynä AM. AM-menetelmiä on monia ja ne eroavat toisistaan kappaleen valmistuksessa. Ensimmäisenä AM-menetelmänä 1980- luvulla kehitettiin prototyyppien pikavalmistus (Rapid Prototyping). Kyseisellä menetelmällä saatiin luotua prototyyppejä pursottamalla materiaalia kerros kerrokselta. Nykypäivänä kappaleita saadaan valmistettua monesta eri materiaaleista aina muoveista metalleihin.[35]

Suunnittelu on erittäin tärkeä osa materiaalia lisäävässä valmistusmenetelmässä. Oikein suunnitellulla osalla pystytään esimerkiksi optimoimaan kappale käyttötarkoitukseen sopivaksi ja vähentämään sen valmistuskustannuksia. Perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna materiaalia lisäävässä valmistusmenetelmässä suunnittelijalla on vähemmän rajoitteita suunniteltavan kappaleen suhteen.[36] Näin pystytään suunnittelemaan geometrialtaan monimuotoisia kolmiulotteisia kappaleita.

---

[34] Hällgren ym. (Re)Design for additive manufacturing, s. 1
[35] Wong ym. A review of additive manufacturing, s. 1–5
[36] Wiber ym. Design for additive manufacturing – a review of available design methods and software, s.1

4.1 Suunnitteluprosessi

Suunnittelun ollessa tärkeä osa AM-valmistusmenetelmää on sille kehitetty monia eri metodeja ja kategoriointeja suunnittelijan avuksi. Suunnitteluprosessin tavoitteena on hyödyntää materiaalia lisäävän valmistusmenetelmän etuja[37]. Seuraavissa kappaleissa esitetään yksi ehdotettu suunnitteluprosessi, joka koostuu neljästä eri osiosta. Esitetty suunnitteluprosessi sopii parhaiten yksittäisen kappaleen suunnitteluun.

4.1.1 Spesifikaatioiden analysoiminen

Suunnitteluprosessin ensimmäisenä kohta on spesifikaatioiden analysoiminen. Osan jokaisella toiminnallisella pinnalla on jokin tarkoitus. Pinnan tarkoitus voi olla esimerkiksi liittäminen toiseen osaa, mekaanisen voiman tai lämpökuorman siirtäminen. Materiaalin valinta tulee siis jo tässä vaiheessa suunnittelua ajankohtaiseksi. Kappaleen uudelleensuunnittelussa kehotetaan ottamaan huomioon vain pinnat, jotka eivät liittyneet edelliseen valmistusprosessiin. Tällöin uudessa suunniteltavassa kappaleessa ei ole liian rajoitettu geometria.[38] Oikein suunnitellulla osalla saadaan hyvin usein vähennettyä komponenttien materiaalin määrää ja kokoonpanojen komponentti määrää. Näiden seurauksena saadaan vähennettyä kustannuksia ja virheiden mahdollisuutta kokoonpanon toiminnassa.[39] Uuden suunnitellun osan pitää kuitenkin kestää samoja mekaanisia kuormituksia eikä osan maksimisiirtymät saa kasvaa[40].

---

[37] Wiberg, ym. An optimisation framework for designs for additive manufacturing combining design, manufacturing and post-processing, s.91
[38] Vayre, ym. Designing for additive manufacturing, s. 634
[39] Wiberg, ym. An optimisation framework for designs for additive manufacturing combining design, manufacturing and post-processing, s.91
[40] Vayre, ym. Designing for additive manufacturing, s. 634

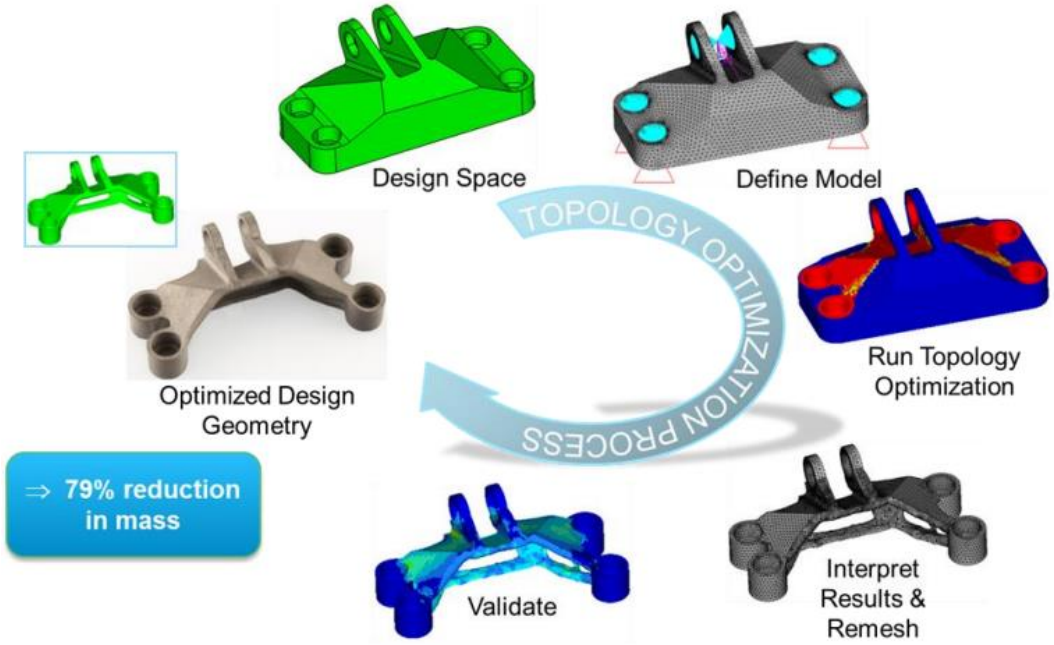
4.1.2 Yhden tai useamman karkean muodon esittäminen

Tämän vaiheen tarkoituksena on löytää uusia innovatiivisia optimoituja muotoja kappaleelle. Tässä apuna suunnittelijalla on topologian optimointityökalu.[41] Topologian optimointi on menetelmä, jossa kappaleen geometria pystytään optimoimaan verkkoelementtien tiheyden muutoksilla. Topologian optimointi on usein käytetty menetelmä, koska se mahdollistaa helposti kappaleen painon optimoinnin. Topologian optimoinnissa määritellään kappaleeseen kohdistuvat kuormitukset, rajoitteet ja tavoitteet.[42]

Kuvassa 8 on esitetty tyypillinen topologian optimointiprosessi. Prosessi alkaa -design space -kohdasta, jossa määritellään kappaleen suunnittelutila. Seuraavaksi luodaan FEM-malli, jonka jälkeen suunnitellulle mallille käytetään topologian optimointi työkalua ja optimointi määritellään. Optimoidun mallin tulokset tutkitaan tämän jälkeen ja mahdollisia epätasaisuuksia/epäjatkuvuuksia mallissa korjataan. Viimeisenä malli hyväksytään, kun se on valmis.[43]

---

[41] Vayre, ym. Designing for additive manufacturing, s. 634–635
[42] Wiberg, ym. An optimisation framework for designs for additive manufacturing combining design, manufacturing and post-processing, s.92
[43] Komi, E. Design for additive manufacturing, s. 8



Kuva 8. Topologian optimointiprosessi[44].

4.1.3 Mallien optimoiminen

Kolmantena kohtana suunnitteluprosessissa on karkeiden mallien optimoiminen käyttötarkoitukseen. Tässä kohdassa suunnittelija määrittelee kappaleen eri parametrit ja viimeistelee mallin[45]. Suunnittelijan pitää myös varmistua, että suunniteltu malli on mahdollista valmistaa halutulla valmistustavalla. Mallin tulostusasentoa pitää myös miettiä, jotta valmistus olisi mahdollisimman optimaalinen. Vaikeasti tulostettavissa kohdissa pitää käyttää tukimateriaalia ja nämä kohdat pi-

[44] Komi, E. Design for additive manufacturing, s. 9
[45] Vayre, ym. Designing for additive manufacturing, s. 635–636

tää selvittää tässä kohdassa suunnitteluprosessia. Tukimateriaalia yleensä tarvitaan ylityskohtiin, jossa alapuolella ei ole materiaalia. Myös terävät kohdat voivat tarvita tukimateriaalia riippuen ylityskulmasta.[46]

4.1.4 Mallin hyväksyminen

Suunnitteluprosessin viimeisenä kohtana on mallin hyväksyminen. Mallin hyväksyntä vaiheessa käytetään yleensä apuna simulointia, jossa voidaan simuloida kappaleen valmistaminen. Tällöin huomataan, jos mallissa on joitakin haastavia kohtia tai jokin kohta tarvitsee lisää tukimateriaalia. Simuloinnissa myös saadaan valittua valmistukseen oikeat lämpötilat ja muut parametrit, jotta lopputuloksesta tulee mahdollisimman hyvä. Tässä vaiheessa myös viimeisen kerran arvioidaan kappaleen tulostettavuus ja päätetään lopulliset tukimateriaalin tarpeet sekä tulostusasennot.[47]

Valmistuksen jälkeen useimmat AM- valmistusmenetelmät vaativat jälkikäsittelyä. Jälkikäsittelyssä valmis kappale poistetaan tulostuspediltä ja se putsataan valmistuksessa mahdollisesti syntyneestä liasta. Tukimateriaali myös poistetaan tämän jälkeen kappaleesta. Kappale myös tutkitaan ja mitataan, että toleranssierot ovat rajoissa ja lopputulos on hyvä.[48]

4.2 Materiaalia lisäävän valmistusmenetelmän edut ja haasteet

Tässä kappaleessa esitellään lisäävän valmistusmenetelmän etuja ja haasteita yleisellä tasolla ja suunnittelijan näkökulmasta. Suunnittelurajoitteista esitetään taulukko suunnittelijan avuksi.

---

[46] Wiberg, ym. An optimisation framework for designs for additive manufacturing combining design, manufacturing and post-processing, s.92
[47] Vayre, ym. Designing for additive manufacturing, s. 636–637
[48] Wiberg, ym. An optimisation framework for designs for additive manufacturing combining design, manufacturing and post-processing, s.92

4.2.1 Yleisesti

Materiaalia lisäävällä valmistusmenetelmällä on paljon hyötyjä verrattaessa perinteisiin valmistusmenetelmiin, mutta myös haasteita. Yleisesti ottaen AM-menetelmällä valmistettu kappale voi olla asiakkaalle kustannustehokkaampi vaihtoehto pieniin eriin. Kappale saadaan myös kustomoitua asiakkaalle käyttötarpeeseen sopivaksi. Valmistajan puolesta säästytään myös kuluissa, koska koneistustyökaluja ja muotteja kappaleen valmistamiseen ei tarvita. Hukkamateriaalia syntyy valmistuksessa myös huomattavasti vähemmän verrattaessa perinteisiin valmistusmenetelmiin. AM-menetelmillä valmistetut kappaleet valmistetaan siten, että materiaalia lisätään vain tarvittava määrä haluttuihin kohtiin ja hyvin usein syntyneet hukkamateriaalit pystytään uusiokäyttämään. Esimerkiksi metallien tulostuksessa syntyneistä hukkamateriaaleista pystytään uusiokäyttämään jopa 95–98 %. Moderneilla AM-koneilla saadaan myös valmistettua lopputulokseltaan laadukkaita kappaleita ja kappaleiden huokoisuus on hyvin matala.[49]

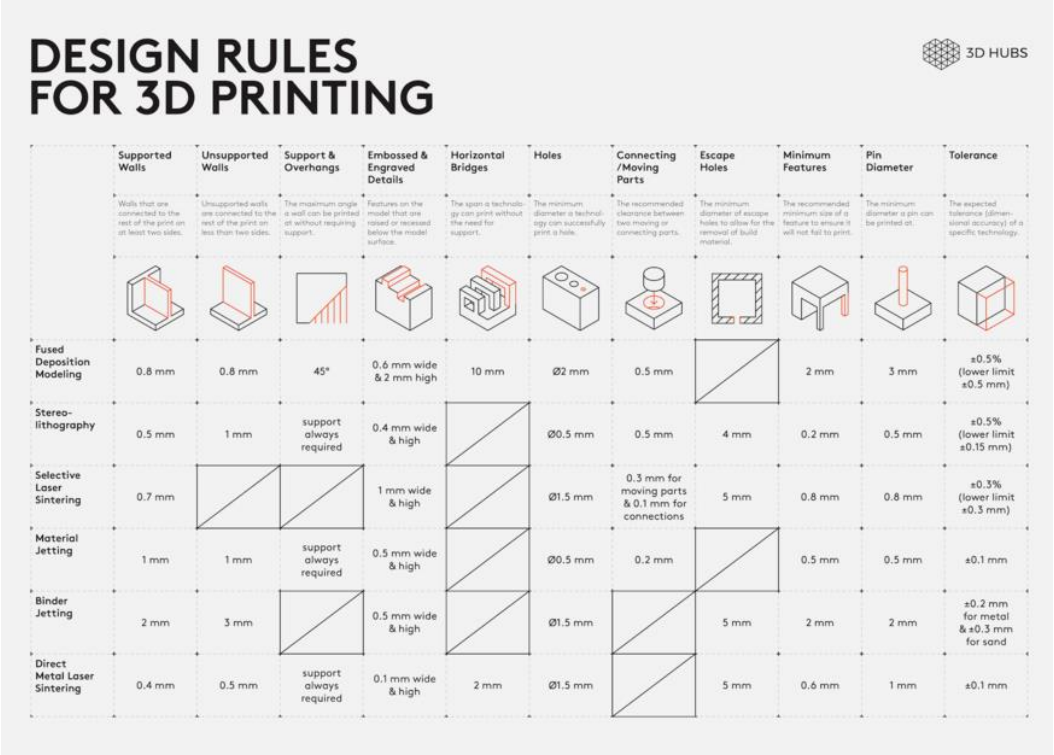
Haasteita materiaalia lisäävässä valmistusmenetelmässä on, että suurien erien valmistaminen voi tulla kalliimmaksi ja valmistaminen voi viedä enemmän aikaa. Uusien materiaalien kehitys ja standardisointi on myös kehitysvaiheessa. Materiaalien mekaaniset- ja lämpöominaisuudet pitää olla täysin selvillä, koska valmistuksessa materiaalia lämmitetään ja sen jälkeen sen annetaan jäähtyä. Valmistusprosessin automatisointia pitää myös parantaa, jotta tuotanto olisi tehokkaampaa. Moni kappale tarvitsee myös tukimateriaalia, kuten edellisissä luvuissa kerrottiin. Tukimateriaalia ei pystytä käyttämään uudestaan vaan sen käyttö pitää saada minimoitua valmistusasennon ja suunnittelun avulla.[50]

---

[49] Ford, ym. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges, s.1575
[50] Ford, ym. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges, s.1575

4.2.2 Suunnittelijan näkökulmasta

Materiaalia lisäävän valmistusmenetelmän valmistusprosesseja on monia ja niissä jokaisessa suunnittelijan pitää huomioida valitun prosessin rajoitteet. Kuvassa 9 on esitettynä eräs taulukko suunnittelijan avuksi. Taulukossa on vasemmalla yleisimmät valmistusprosessit ja näille prosesseille määritetyt rajoitteet.



	Supported Walls	Unsupported Walls	Support & Overhangs	Embossed & Engraved Details	Horizontal Bridges	Holes	Connecting /Moving Parts	Escape Holes	Minimum Features	Pin Diameter	Tolerance
	Walls that are connected to the rest of the print on at least two sides.	Unsupported walls are connected to the rest of the print on less than two sides.	The maximum angle a wall can be printed at without requiring support.	Features on the model that are raised or recessed below the model surface.	The span a technology can print without the need for support.	The minimum diameter a technology can successfully print a hole.	The recommended clearance between two moving or connecting parts.	The minimum diameter of escape holes to allow for the removal of build material.	The recommended minimum size of a feature to ensure it will not fail to print.	The minimum diameter a pin can be printed at.	The expected tolerance (dimensional accuracy) of a specific technology.
Fused Deposition Modeling	0.8 mm	0.8 mm	45°	0.6 mm wide & 2 mm high	10 mm	Ø2 mm	0.5 mm		2 mm	3 mm	±0.5% (lower limit ±0.5 mm)
Stereo-lithography	0.5 mm	1 mm	support always required	0.4 mm wide & high		Ø0.5 mm	0.5 mm	4 mm	0.2 mm	0.5 mm	±0.5% (lower limit ±0.15 mm)
Selective Laser Sintering	0.7 mm			1 mm wide & high		Ø1.5 mm	0.3 mm for moving parts & 0.1 mm for connections	5 mm	0.8 mm	0.8 mm	±0.3% (lower limit ±0.3 mm)
Material Jetting	1 mm	1 mm	support always required	0.5 mm wide & high		Ø0.5 mm	0.2 mm		0.5 mm	0.5 mm	±0.1 mm
Binder Jetting	2 mm	3 mm		0.5 mm wide & high		Ø1.5 mm		5 mm	2 mm	2 mm	±0.2 mm for metal & ±0.3 mm for sand
Direct Metal Laser Sintering	0.4 mm	0.5 mm	support always required	0.1 mm wide & high	2 mm	Ø1.5 mm		5 mm	0.6 mm	1 mm	±0.1 mm

Kuva 9. Suunnittelurajoitteet 3D-tulostukselle[51].

[51] Hubs, Design rules for 3D printing

Esimerkiksi fused deposition modelling eli sulatettujen filamenttien valmistuksessa suurin ylitys saa olla 45°, jotta ei tarvita tukimateriaalia. Saman valmistusprosessin horisontaalisten suorien suurin pituus saa olla 10 mm, jos halutaan välttää tukimateriaalin käyttöä. Pienimmät piirteet, joita pystytään valmistamaan ilman tulostuksen epäonnistumisen vaaraa, on 2 mm. Toleranssi ero on puolestaan ±0,5 %, mutta pienin mahdollinen ±0,5 mm.

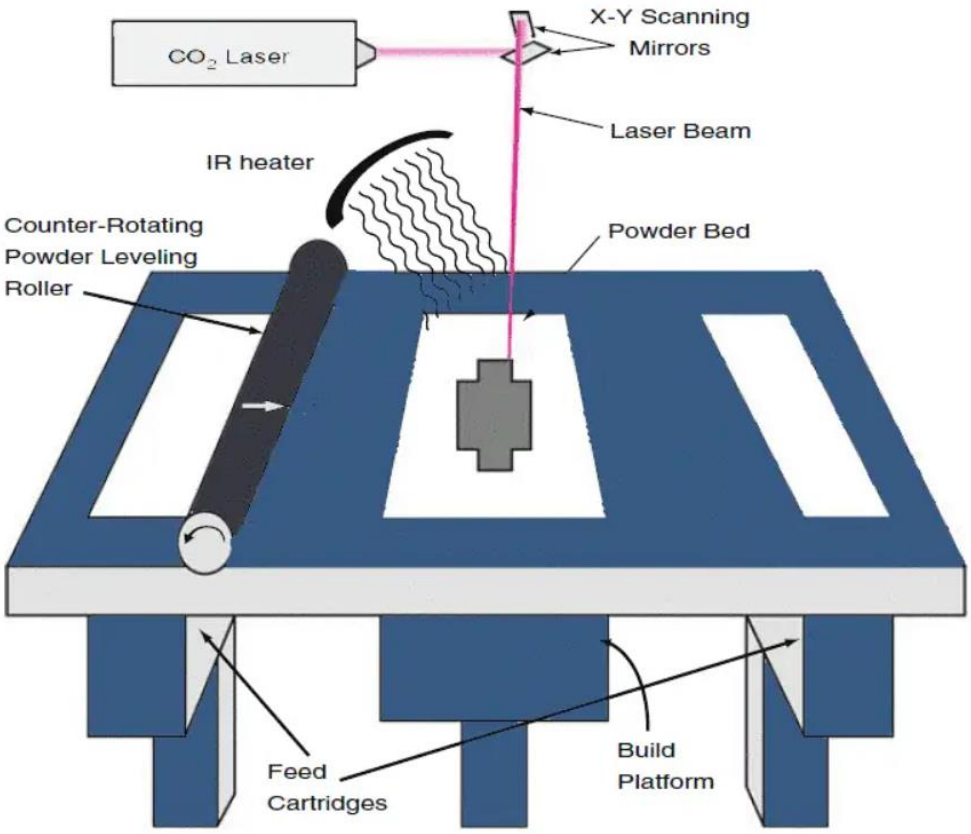
4.3 Valikoiva laser sintraus

Valikoiva lasersintraus (SLS) on yksi suosituimmista materiaalia lisäävästä valmistusmenetelmistä. Menetelmällä on kohtalaisen korkea kesto mekaanisia rasituksia vastaan ja sillä pystytään valmistamaan erittäin vaikealla geometrialla olevia kappaleita.[52]

Valikoivassa laser sintrauksessa valmistusprosessi alkaa CAD-mallin viipaloimisella kerrospaksuuksiin. Tyypillisesti tämä kerrospaksuus on 20–150 µm. Tämän jälkeen valmistusmateriaalia levitetään ohut kerros tulostusalustalle. Materiaalin levittämisen jälkeen suurteholaserilla partikkelit sulatetaan toisiinsa. Tätä prosessia toistetaan niin kauan, kunnes kappale saadaan valmiiksi. Kuvassa 10 nähdään SLS-valmistusprosessi.[53]

---

[52] 3Dmaker, Vertailussa FDM-, SLA- ja SLS- teknologiat
[53] Kruth, ym. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting, s.26



Kuva 10. SLS-valmistusprosessi[54].

Tulostuslaitteet voivat erota siinä, miten valmistusmateriaali kerrostetaan. Se voidaan kerrostaa rullan tai lastan avulla. Myös tulostusatmosfääri voi olla joko argonista tai typestä.[55]

[54] Xometry, Selective laser sintering (SLS) 3D printing: Technology overview
[55] Kruth, ym. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting, s.26

5 PROJEKTIN LÄHESTYMISTAPA JA TOTEUTUS

Tässä luvussa käydään projektin eri vaiheet läpi ja kuinka lopulliseen valmiiseen potkuriin päästiin.

5.1 Projektin aloitus

Opinnäytetyö aloitettiin projektisuunnitelman teolla. Projektisuunnitelman huolellisella teolla saadaan kartoitettua projektin eri vaiheet jo tässä vaiheessa. Projektisuunnitelmalla saadaan myös kuvattua projektin kulku ja mahdolliset riskit pystytään ottamaan huomioon. Projektisuunnitelman jälkeen pidettiin aloituspalaveri työn tilaajan kanssa ja sidosryhmän edustajan kanssa. Seuraavassa kappaleessa käydään tarkemmin läpi projektin aloitukseen liittyviä kohtia.

5.1.1 Projektisuunnitelma ja aloituspalaveri

Projektisuunnitelmassa käytiin läpi työn tavoitteita, tehtäväkokonaisuuksia, organisaatiota ja sidosryhmiä, aikataulutusta sekä projektille tehtiin riskianalyysi. Projektisuunnitelmaa tehtäessä huomattiin jo, kuinka oleellinen osa teoriaosuus on tässä projektissa. Tämän takia projekti päätettiin aloittaa teorian opiskelulla, jotta teoriasta saadut opit saataisiin käytäntöön.

Projektin aikataulutus tehtiin aikajana tyyppisenä, jotta saadaan kaikki projektin eri osuudet näkyviin. Projektin seurantaa on myös tämän takia helpompi tehdä, kun tiedetään mikä osio pitää olla valmiina ennen kuin voidaan edetä seuraavaan vaiheeseen. Aikatauluun tehtiin projektin edetessä pieniä muutoksia ongelmien ja muutoksien ilmaantuessa. Projektin aikataulun pääkohdat kuitenkin pysyivät suunniteltuina.

Riskianalyysissä arvioitiin erilaisten mahdollisten riskien vaikuttavuutta ja todennäkösyyttä. Näiden arvot kertomalla toisillaan saatiin riski-indeksi. Riski-indeksi kertoo riskin toteutuessa vaikutuksen projektiin. Riskianalyysissä arvioitiin esimerkiksi kommunikaatiota, aikataulua, motivaatiota ja muita mahdollisia ongelmia.

Jokaiselle riskille määritettiin toimenpide mitä tehtäisiin, jos kyseinen riski tapahtuisi.

Aloituspalaveri pidettiin projektin alkuvaiheessa. Aloituspalaverissa käytiin läpi aiheen rajausta, alustavaa aikataulua, työn vaatimia resursseja ja työsuhdeasioita. Aloituspalaverissa käytiin läpi projektin pääkohdat mitä työntilaaja ja sidosryhmän edustaja toivoivat projektilta.

5.2 Potkurin mallintaminen

Opinnäytetyön käytännön osuudessa potkuri suunniteltiin 3D-suunnitteluohjelmalla digitaaliseen muotoon. Käytännön osuus aloitettiin alkuperäisen potkurin mittauksella, jotta akselin kiinnityskohdat ja keskiön ulkoreuna saadaan sopimaan perämoottoriin. Tämän jälkeen edettiin 3D-suunnitteluun, joka toteutettiin Siemens NX 12 -suunnitteluohjelmalla.

5.2.1 Alkuperäisen potkurin mittaus

Potkurin mittauksessa tärkeimpänä kohtana oli keskiö. Keskiöstä otettiin päämittoja, jotka olivat oleellisia, että potkuri sopii perämoottoriin. Keskiön akselin kiinnityskohta sekä akselin pituus oli myös tärkeä mitoittaa oikein.

Potkurin mittauksessa käytettiin vain perinteisiä mittausvälineitä, koska keskiössä ei ollut vaikealla geometrialla olevia piirteitä. Mittausten jälkeen mallista tehtiin paperille piirustus, johon merkattiin piirteiden mitat. Mittauksessa ei keskitytty lapojen mittoihin, koska lavat mallinnetaan opitun teoriaosuuden pohjalta.

5.2.2 Materiaalin valinta

Potkurista valmistettiin ensin prototyyppejä, jolla varmistettiin keskiön mittojen paikkansa pitävyys. Prototyyppi valmistettiin PLA-muovista. PLA on biohajoava polymeeri, jota saadaan esimerkiksi maissitärkkelyksestä ja sokeriruokosta. PLA:n ympäristövaikutukset verrattuna öljypohjaisiin muoveihin on huomattavasti pienemmät. PLA-muovia pystytään kierrättämään, kompostoimaan ja polttamaan.

Näistä kierrättäminen on paras vaihtoehto, koska näin vältytään hiilidioksidin tuottamisesta ilmakehään.[56] PLA-muovin kerrosten välinen leikkauslujuus kierrättämättömällä filamentilla on 119.1 ± 6.6 MPa. Kerran kierrätetyllä filamentilla sama leikkauslujuus on 106.8 ± 9.0 MPa ja kaksi kertaa kierrätetyllä 108.5 ± 9.9 MPa. Kolme kertaa kierrätetyllä filamentilla leikkauslujuus laskee jo huomattavasti eli 75.0 ± 16.2 MPa tasolle.[57] Tuloksista huomataan, että kaksi kertaa kierrätetyllä PLA-muovi filamentilla mekaaniset ominaisuudet ovat lähes samanlaiset, kuin kierrättämättömällä filamentilla. PLA valittiin prototyypin materiaaliksi matalien valmistuskustannuksien, ympäristöystävällisyyden ja riittävien mekaanisten ominaisuuksien takia.

Lopullisen potkurin materiaaliksi valittiin polyamidi 12-pohjainen nylon PA2200 ja PA3200GF. PA2200 määritellään 3D-tulostuksessa standardimateriaaliksi. PA2200 on materiaalina jäykkää ja sillä on suuri lujuus sekä hyvä kemiallinen kestävyys. Materiaalia käytetään yleensä prototyyppien ja ruiskuvalettujen tuotteiden pienempien erien valmistamiseen. Hyvien mekaanisten ominaisuuksien ansiosta myös täysin toimivien lopputuotteiden valmistaminen onnistuu.[58]

PA3200GF käyttää samaa raaka-ainetta, kuin PA2200. PA3200GF-rakennetta on jäykistetty pienien lasikuulien avulla. Lasikuulat antavat kappaleelle paremman jäykkyyden lisäksi sileämmän pinnan. Vertailuna PA3200GF-vetomoduuli on 3200 MPa ja PA2200 1650 MPa. Vetolujuus puolestaan PA3200GF-materiaalilla on 51MPa ja PA2200 48MPa.[59] Lopullisen potkurin materiaalin valinnassa auttoi 3D Formtechin asiantuntijat.

---

[56] Lanzotti, ym. A comparison between mechanical properties of specimens 3D printed with virgin and recycled PLA, s.1, s.144
[57] Lanzotti, ym. A comparison between mechanical properties of specimens 3D printed with virgin and recycled PLA, s.144-145
[58] Materflow, PA2200
[59] Materflow, PA3200GF

5.2.3 Lapojen mallintaminen

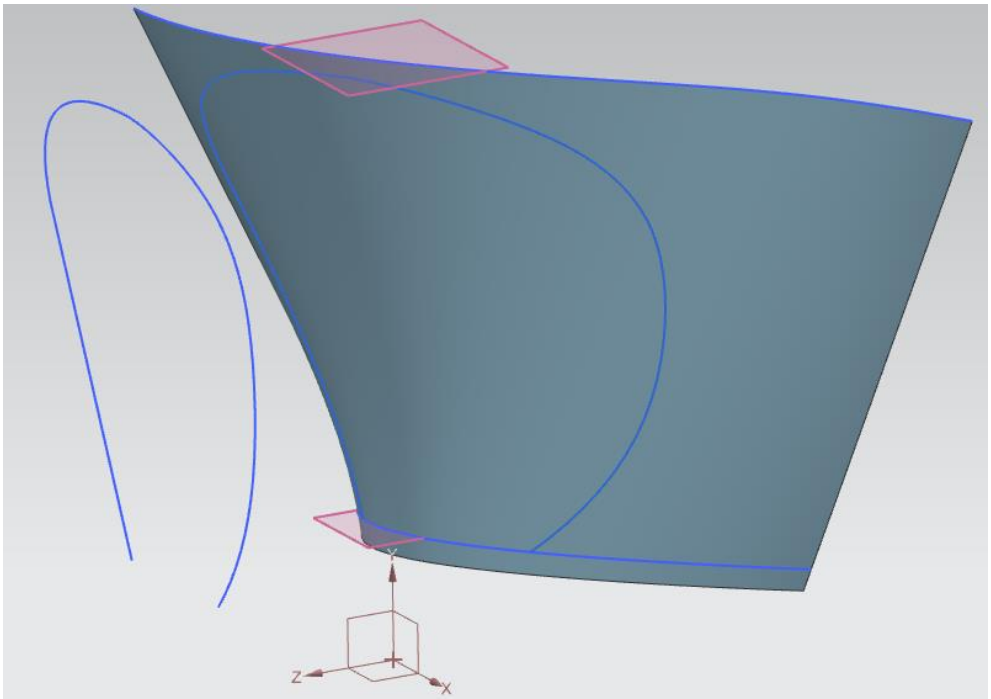
Lapojen mallintamisessa käytettiin hyödyksi teoriaosuudessa saatuja oppeja. Näitä olivat esimerkiksi se, että useampi lapa ei takaa sitä, että potkurilla olisi parempi työntövoima. Potkurin nousulla on myös suuri vaikutus sen toimintaan, mutta nousu pitää suhteuttaa oikein moottorin tehoihin, jotta vältytään moottoririkoilta. Lapojen kallistuskulmien eroista saatiin myös tietoa.

Alkuperäisestä potkurista (Kuva 11) huomataan, kuinka potkurin nousu on erittäin pieni. Lavat ovat myös muodoltaan hyvin terävät ja pinta-alaltaan pienet.

Kuva 11. Alkuperäinen potkuri.

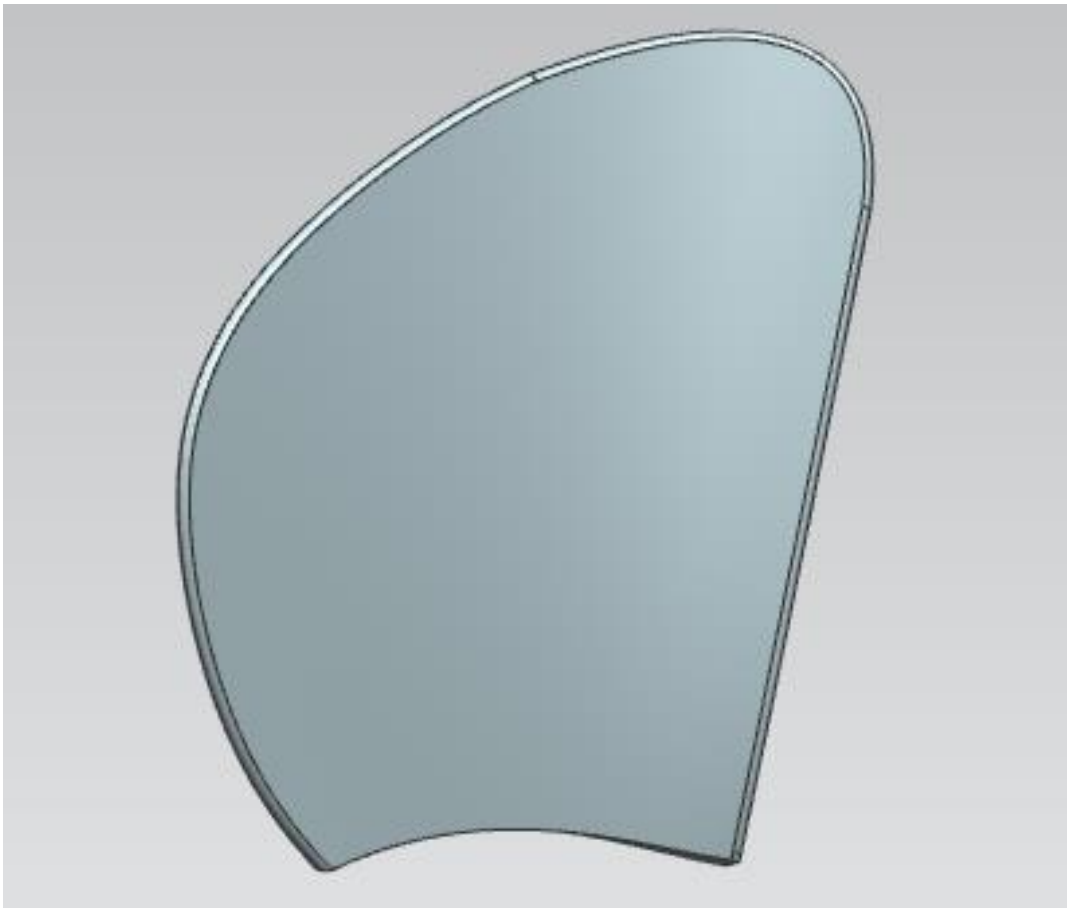
Lapojen mallintaminen aloitettiin sketsiin hahmottelemalla lavan muotoa. Lavan etureuna, joka leikkaa veden tehtiin suoraksi ja muut piirteet studio spline -työkalulla. Näin piirteistä saatiin muokattua sellaiset, kuin haluttiin. Lavan muodosta tehtiin kaarevampi ja pinta-alaltaan suurempi, kuin alkuperäisestä. Lavan kallistuskulman vaikutus potkurin laahaamiseen ja ajoneuvon keulan nostamiseen pidettiin lapaa suunniteltaessa myös mielessä. Keulaa nostamalla veden vastusta saataisiin pienennettyä johtaen suurempaan huippunopeuteen.

Lavan muodon ollessa selvillä alettiin pohtimaan potkurin nousua ja lavan kaarevuutta. Lavan juureen, joka kiinnittyy keskiöön, tehtiin yksi piirre ja lavan kärkeen toinen. Piirteiden välille tehtiin ruled -työkalulla kaareva pinta. Näin lavan muodosta saatiin kaareva ja geometrialtaan jatkuva. Tämän jälkeen aikaisemmin mallinnettu lavan muoto projisoitiin Project curve -työkalulla kaarevaan pintaan kuvan 12 mukaisesti.



Kuva 12. Lavan muoto projisoituna kaarevaan pintaan.

Tämän jälkeen piirteiden ulkopuolella olevat osat poistettiin Trim sheet -työkalulla ja lapaa paksunnettiin haluttuun paksuuteen Thicken-työkalulla. Viimeiseksi lapaan tehtiin pyöristykset teräville reunoille veden virtaamisen ja lavan kestävyyden takia. Kuvassa 13 nähdään valmiiksi suunniteltu potkurin lapa.



Kuva 13. Lopullinen mallinnettu lapa.

Teoriaosuudessa kerrottiin, kuinka lapojen lukumäärä vaikuttaa potkurin toimintaan ja kuinka kolme lapaa on yleisesti ottaen todettu olevan paras määrä lapoja lukumääräisesti. Tämän perusteella tässäkin potkurissa päätettiin käyttää kolmea lapaa. Kahta muuta lapaa ei tarvinnut mallintaa uudestaan vaan ne saatiin Pattern feature -työkalulla monistettua keskiön ympärille.

5.2.4 Topologian optimointi ja tukien parantaminen

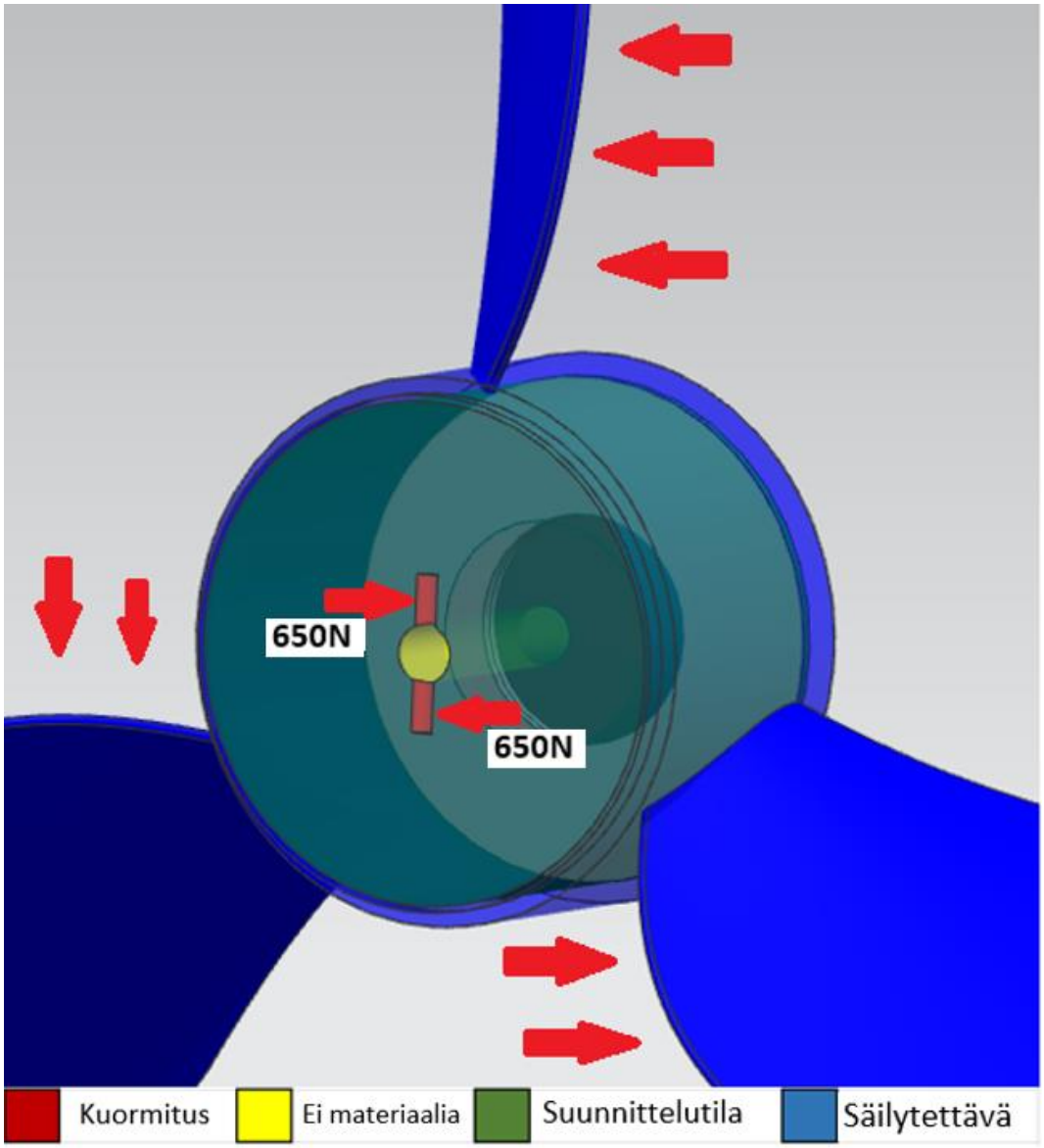
Potkurille suoritettiin topologian optimointi, josta saatiin optimoitu malli jatkokehitettäväksi. Optimoitu malli ei ollut sellaisenaan valmis vaan sitä käytettiin vain mallina keskiötä suunniteltaessa. Tässä kappaleessa kerrotaan topologian optimointiprosessi ja käytetyt määritykset.

Topologian optimoinnissa määriteltiin ensin suunnittelutila, johon materiaalia halutaan muodostuvan. Kappaleeseen kohdistuvien voimien ja rajoitteiden avulla suunnittelutilaan saatiin muodostumaan oikeanlaisia tukia. Kuvassa 14 on esitettynä topologian optimoinnille määritellyt asetukset. Kuvasta on myös nähtävissä suunnittelutila, johon materiaalia halutaan muodostuvan sekä alueet, jotka halutaan säilyttää.

Akselin kiinnityskohdan seinämien paksuutta pystyttiin säätämään shell-toiminnon avulla. Akselin seinämä paksuudeksi määritettiin 3 mm. Materiaalina topologian optimoinnissa käytettiin ABS- muovia. ABS-muovin vetolujuus on 44 MPa[60]. Tulostettavien potkurien materiaalien vetolujuudet ovat 48 MPa ja 51 MPa[61]. Vallitseva lämpötila pidettiin oletuksena, eli huoneenlämpötilana. Lapoihin kohdistuviksi voimiksi määritettiin 200 N. Akseliin kohdistuviksi kuormituksiksi määriteltiin 650 N molempiin pyörimissuuntiin. Seuraavassa luvussa kerrotaan ja lasketaan, kuinka näihin tuloksiin päästiin.

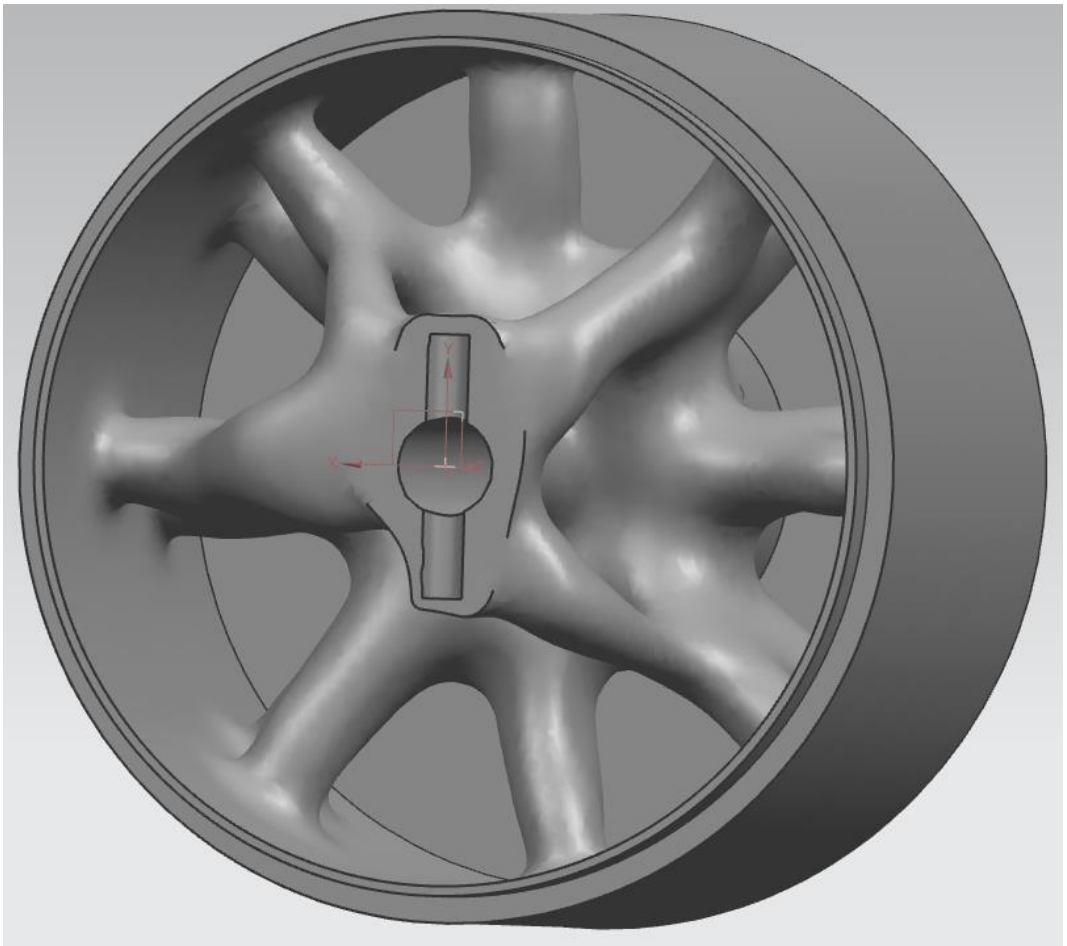
---

[60] Filamentti, tekniset tiedot ABS
[61] 3D Formtech, Materials in 3D printing



Kuva 14. Topologian optimoinnille määritellyt asetukset.

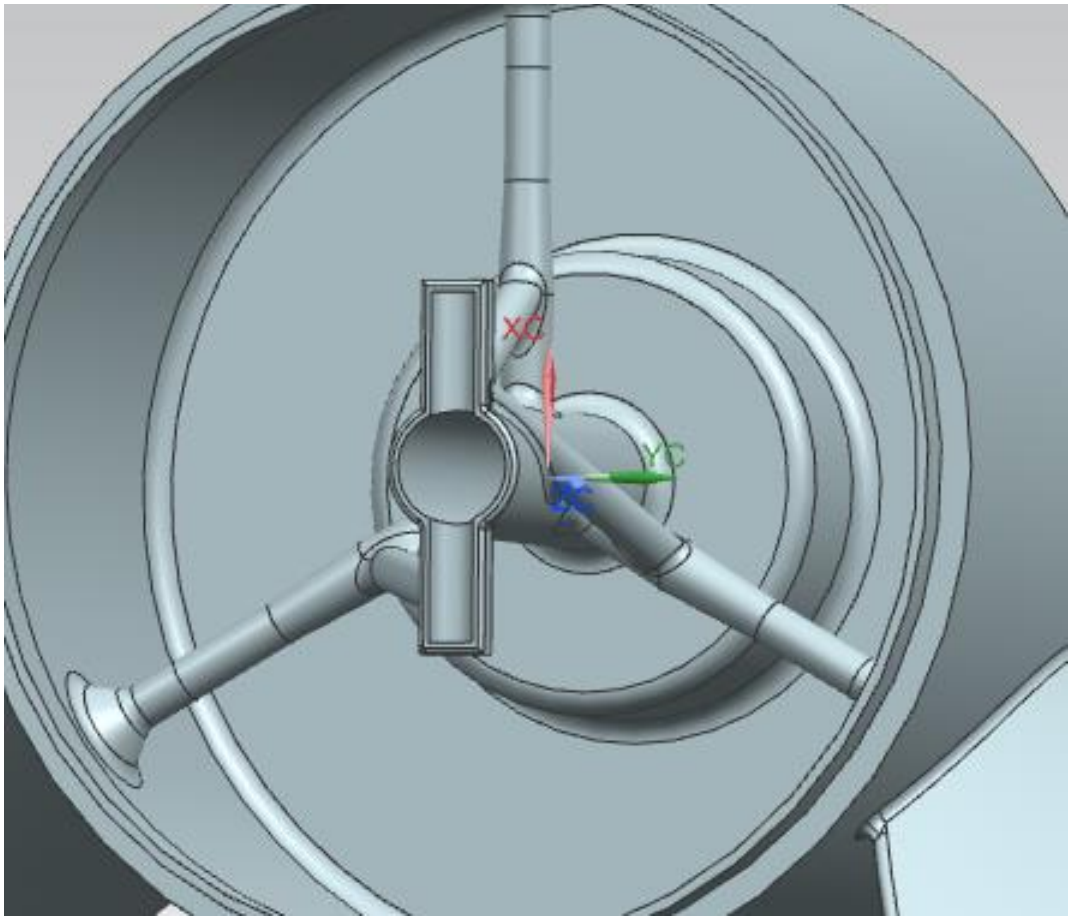
Näiden topologian optimoinnin määritysten lopputuloksena saatiin kuvan 15 mukainen optimoitu malli. Topologian optimoinnissa jäykisteitä muodostui akselin kiinnityskohdasta lapojen kiinnityskohtiin. Optimoidussa mallissa on kuitenkin paljon materiaalia ja jäykisteet eivät ole muodostuneet tulostettavuuden kannalta parhaalla mahdollisella tavalla. Tukimateriaalien poisto valmistuksen jälkeen olisi myös haastavaa.



Kuva 15. Malli topologian optimoinnin jälkeen.

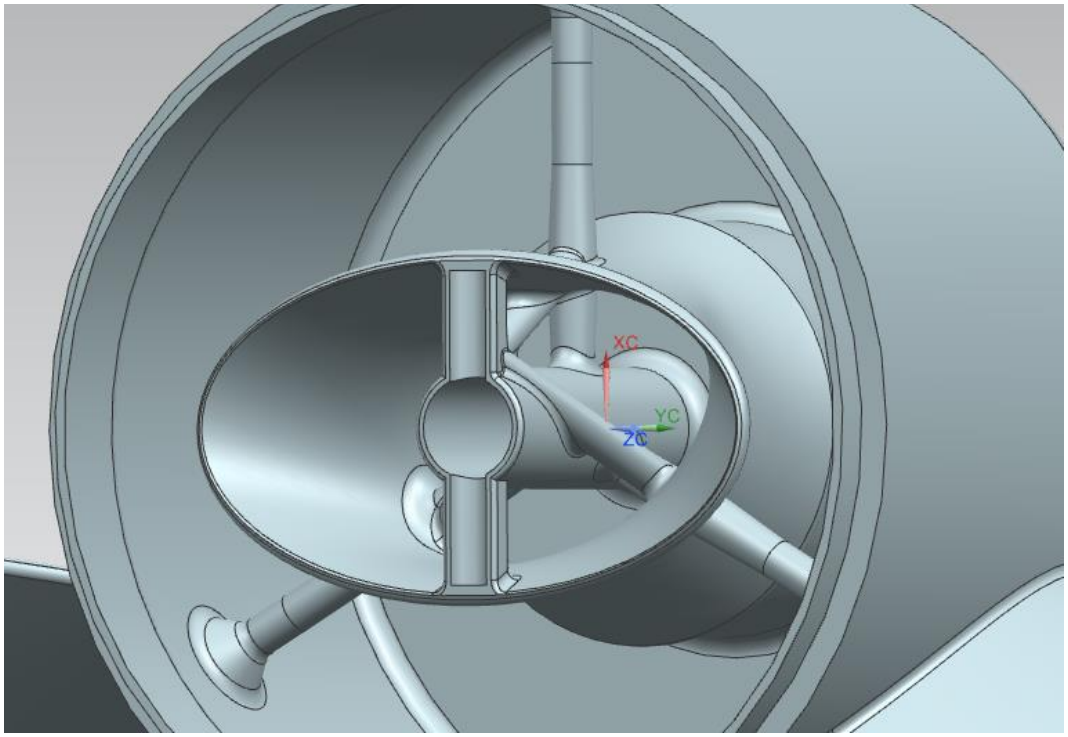
Topologian optimoinnin jälkeen keskiötä aloitettiin mallintamaan ja optimoitua kappaletta pidettiin mallina. Suunnittelussa pyrittiin vähentämään materiaalimenekkiä ja parantamana tulostettavuutta. Keskiön suunnittelussa syntyi kaksi erilaista versiota, joista valmistetaan prototyypit.

Keskiön tukien mallintaminen aloitettiin päätuista, jotka kiinnittyvät akselin keskikohdasta lapoihin (Kuva 16). Päätukien paksuudeksi tehtiin 4 mm. Keskiön ulkoreunalla päätukia paksunnettiin 8 mm paksuuteen. Päätukia paksunnettiin 5 mm paksuuteen kohtiin, joista tehtiin sivutuet. Sivutuet kiinnittyvät uriin, joihin kohdistu moottorin pyörivä voima. Mallin jokaiselle terävälle reunalle tehtiin pyöristyksiä auttamaan tulostettavuutta ja tekemään kohdista kestävämpiä.



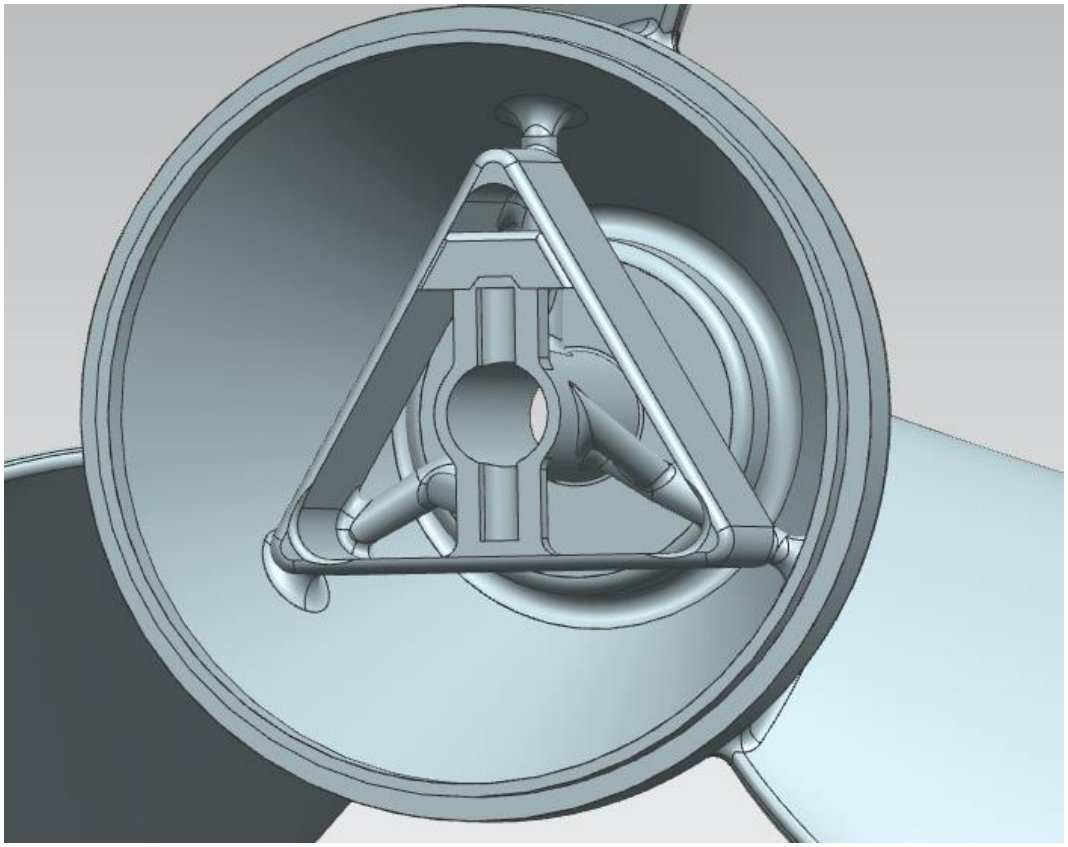
Kuva 16. Keskiön päätuet akselista lapoihin.

Päätuet ei kuitenkaan riittänyt sellaisinaan tukemaan riittävästi keskiötä. Keskiöön tämän jälkeen mallinnettiin ellipsin muotoinen piirre lisäämään kestävyyttä (Kuva 17). Ellipsin muotoinen piirre tehtiin keskiön pohjalta asti ja sitä kavennettiin päätukien kohdalla. Ellipsin muotoinen piirre antoi hyvin lisätukea keskiölle. Ellipsi tuen jälkeen mallista haluttiin kuitenkin symmetrisempi. Näin vältytään pyörimisestä aiheutuvat ylimääräiset tärinähaitat.



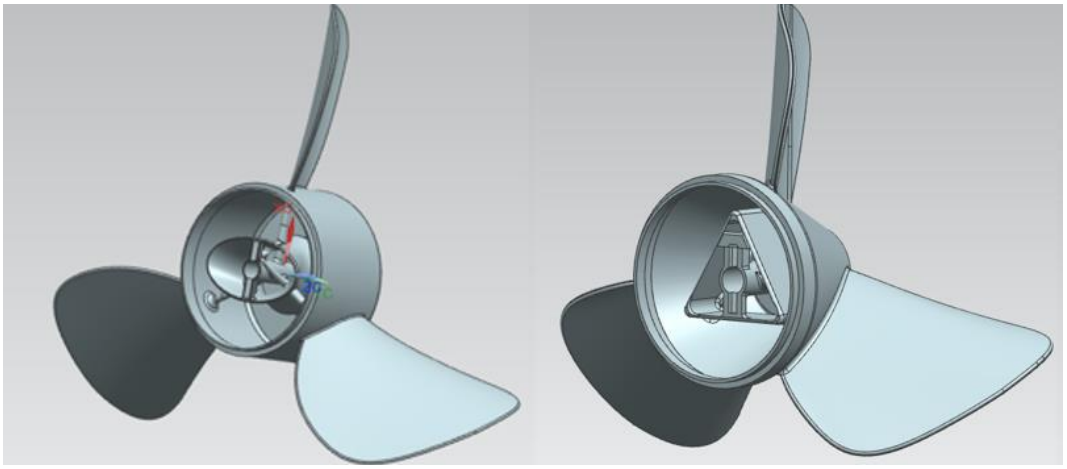
Kuva 17. Keskiön ellipsituki.

Keskiön ollessa lieriön muotoinen haluttiin siitä tehdä paremmin virtaava ja pienempi. Teoriaosuudessa myös kerrottiin, että keskiön tulisi olla mahdollisimman pieni, koska se ei lisää työntövoimaa. Ratkaisuna tähän oli, että siitä tehtiin kartion muotoinen. Näin säilytetään mallin kestävyys- ja tulostettavuusominaisuudet. Ellipsin muotoisen tuen tilalle mallinnettiin kolmiotuki, joka on nähtävissä kuvassa 18. Kolmiotuki kiinnittyy päätukiin ja akselin kiinnityskohtiin. Kiinnityskohtien seinämäpaksuutta lisättiin myös verrattuna edelliseen malliin.



Kuva 18. Kolmion muotoinen tuki.

Suunnittelun tuloksena saatiin kaksi erilaista keskiötä erilaisilla tuilla (Kuva 19). Vasemmanpuoleisessa mallissa lapojen kiinnityskohdan todettiin olevan heikko. Oikeanpuoleiseen malliin lapojen kiinnitystä ja kestävyyttä parannettiin siten, että lapojen paksuutta lisättiin 0,5 mm symmetrisesti molemmille puolille. Lapojen asentoa myös muutettiin 5° akselin kiinnityskohtaan päin ja lapojen kiinnityskohtaa levennettiin. Kiinnityskohtaan myös tehtiin suuremmat pyöristykset. Lapojen kokoa myös skaalattiin 10 % suuremmaksi oikeanpuoleisessa potkurissa.



Kuva 19. Suunnitellut potkurit.

5.2.5 Kuormitukset ja FEM-simulointi

Kuvan 19 potkureista oikeanpuoleinen valittiin jatkokehitettäväksi. Potkurille laskettiin siihen kohdistuvat voimat ja potkurille tehtiin FEM-simulointi. FEM-simuloinnista saadaan suuntaa antavat tiedot potkurin siirtymistä ja jännityksistä.

Alla olevalla kaavalla saatiin laskettua sähkömoottorin välittämä vääntömomentti akselille.

$P = \tau\,\omega$, jossa P = teho

τ = vääntömomentti

ω = kulmanopeus

Vääntömomentin selvittämiseksi kaava muutettiin muotoon: $\tau = \frac{P}{\omega}$

Sähkömoottorin teho (P) = 1164 W

Kulmanopeus (ω) = 3000 rpm (2π/60) = 314,16 (rads/sec)

Arvot sijoitettuna: $\tau = \frac{1164\ W}{314{,}16\ (\mathrm{rads/sec})}$ = 3,70 Nm

Akselilta välittyvä voima potkurille saadaan laskettua kaavalla:

$\tau = \mathrm{Fd}$, jossa τ = vääntömomentti

F = voima

d = akselin pituus

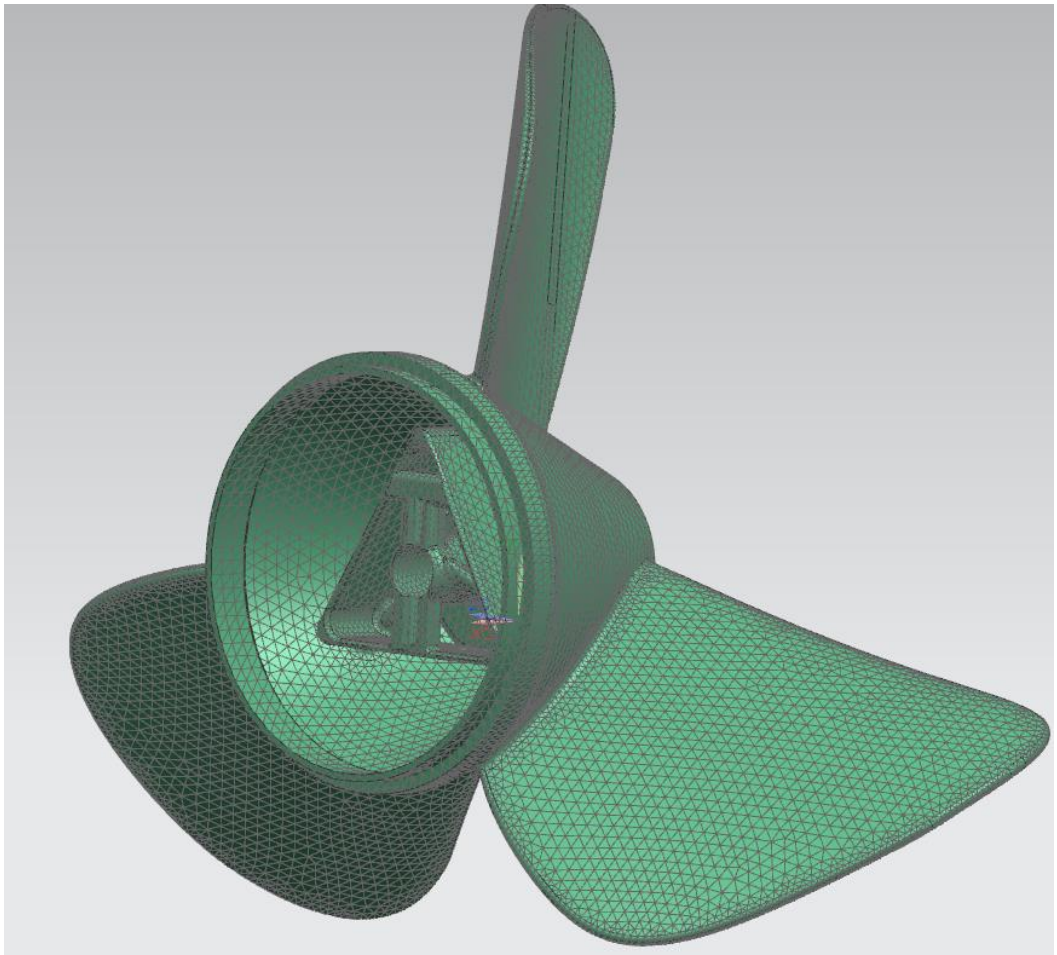
Voiman (F) selvittämiseksi kaava muutettiin muotoon: $\mathrm{F} = \frac{\tau}{\mathrm{d}}$

Edellisessä laskussa laskettu vääntömomentti τ = 3,70 Nm

Akselin pituus moottorin pyörittävältä akselilta d = 0,01 m

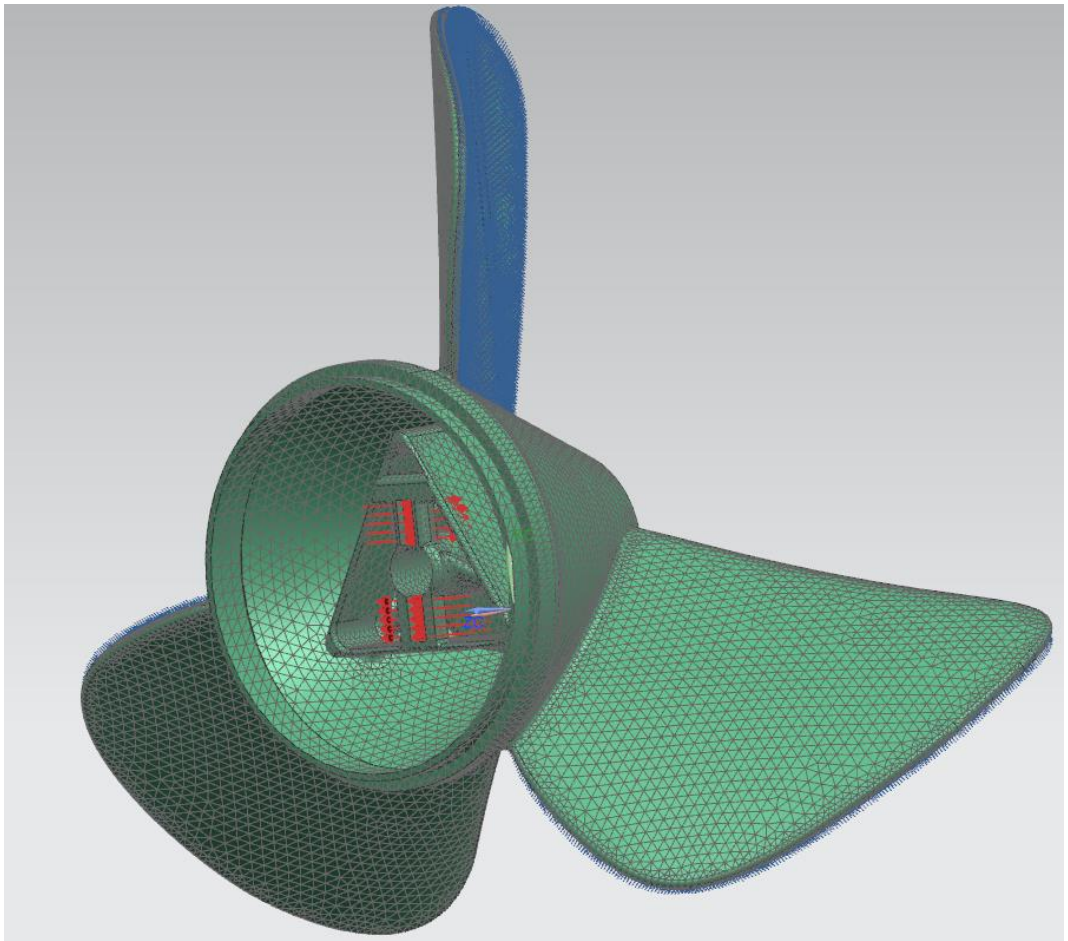
Arvot sijoitettuna: $\mathrm{F} = \frac{3{,}70\ \mathrm{Nm}}{0{,}01\ \mathrm{m}}$= 370,5 N

Voiman laskettua suoritettiin FEM-simulointi. FEM-simuloinnissa ensiksi verkotetaan malli. Tämä suoritettiin 3D Tetrahedral -komennolla (Kuva 20), elementtien kooksi määritetiin 3 mm. Materiaaliksi määritettiin tässä vaiheessa ABS-muovi.



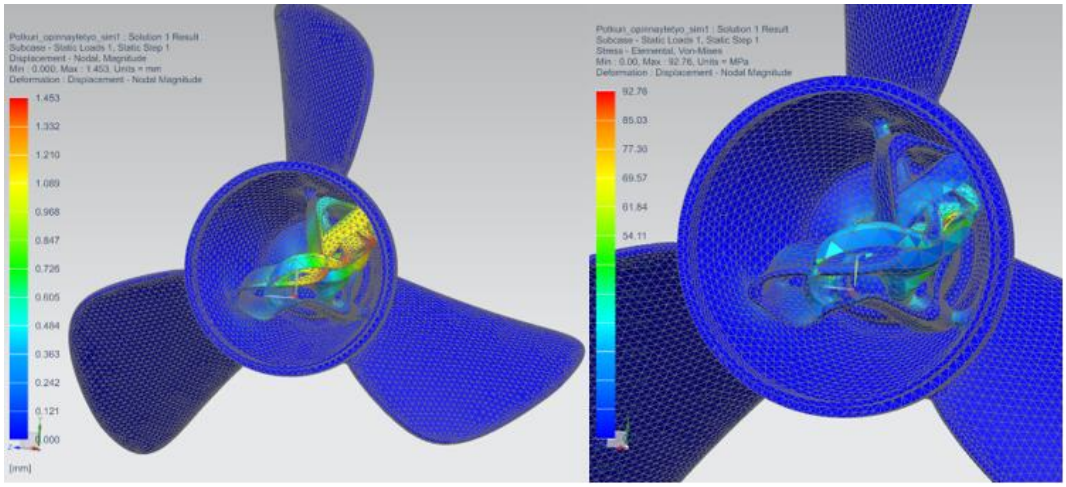
Kuva 20. FEM-verkotus.

Verkotuksen jälkeen mallille määriteltiin siihen kohdistuvat voimat ja rajoitteet. Lavat kiinnitettiin fixed-komennolla. Tällä pyrittiin saada luotua pahin mahdollinen tilanne. Tämä olisi esimerkiksi, että potkuri osuu pohjaan kiinni ja eikä pysty pyörimään. Turvakertoimena käytettiin 1,75, jolloin keskiön pyöriviin osiin määritettiin 650 N voimat. Kuvassa 21 nähdään määritetyt voimat ja rajoitteet.



Kuva 21. FEM-mallin voimat ja rajoitteet.

Voimien ja rajoitteiden määrittämisen jälkeen FEM-laskenta ratkaistiin solve-komennolla. Kuvasta 22 nähdään näillä arvoilla ratkaistun mallin siirtymät ja jännitykset. Siirtymät sijoittuvat potkurin keskiöön ja suurimmat siirtymät ovat 1,453 mm. Jännityksiä potkurin keskiöön syntyi 92,76 MPa.



Kuva 22. Potkurin siirtymät vasemmalla ja jännitykset oikealla.

FEM-simuloinnin avulla pyrittiin saamaan kuvattua pahin mahdollinen tilanne ja saatiin suuntaa antavaa tietoa. Valmistuksessa käytetään hieman jäykempää materiaalia. Lopullinen potkurin toiminta ja kestävyys selvitetään myöhemmässä vaiheessa testauksessa.

5.2.6 Tulostettavuuden arviointi

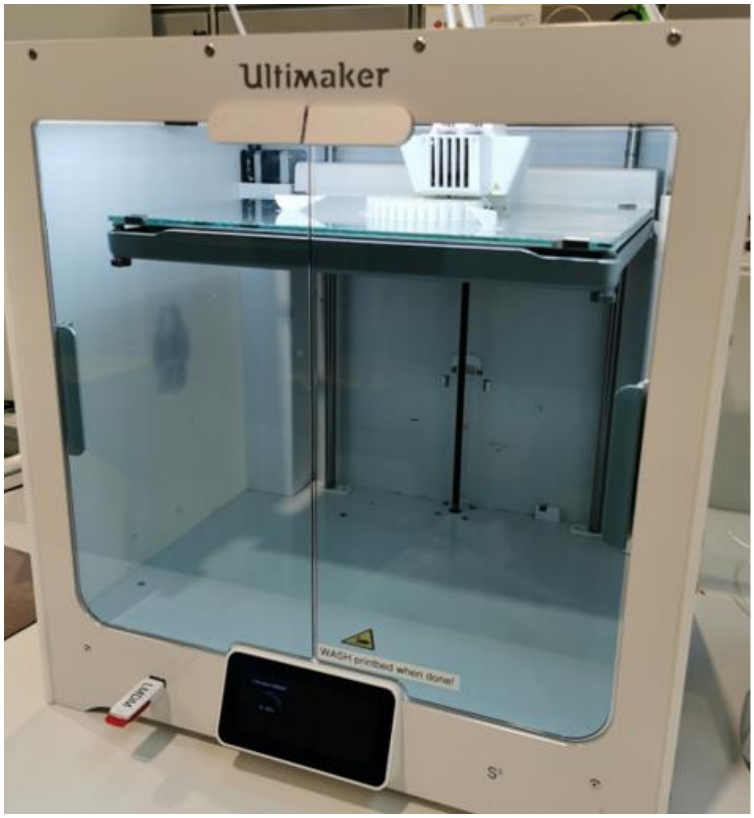
Ennen potkureiden valmistamista niiden tulostettavuutta arvioitiin. Tulostettavuuden arvioinnissa käytettiin apuna aiemmin esitettyä taulukkoa (Kuva 9), jonka avulla pystyttiin minimoimaan tulostuksen epäonnistuminen. Taulukosta seurattiin prototyypin valmistuksessa valmistusprosessia fused deposition modelling. Lopullisen potkurin valmistuksessa seurattiin valmistusprosessia selective laser sintering.

Prototyyppien haastavin osuus valmistaa ovat lavat. Lapojen ylityskulmat suhteessa keskiöön ovat juuri 45° rajalla joudutaanko niihin lisäämään tukimateriaalia. Keskiössä on kolme pitkää tukea ja akselin kiinnityskohdat, jotka ovat 90° kulmassa. Näiden alle valmistuksessa lisätään tukimateriaalia. Myös keskiön alapuolelle tulee tukimateriaalia, koska lapojen kärjet ylittävät keskiön.

Taulukkoa seuraamalla huomataan, että SLS-menetelmällä on vähemmän rajoitteita valmistuksen suhteen. Ylityskulmilla ei SLS-menetelmässä ole väliä, joten lapojen valmistaminen onnistuu hyvin verraten fused deposition modelling -valmistusprosessiin. Horisontaalisilla ylityspituuksilla ei myöskään ole rajoituksia valmistuksen suhteen. SLS-menetelmällä myös toleranssitarkkuus on parempi verrattuna prototyypin valmistusprosessiin. SLS-menetelmällä ± 0,3 % (minimissään ± 0,3 mm) ja fused deposition modelling ± 0,5 % (minimissään ± 0,5 mm).

5.3 Potkurin valmistaminen

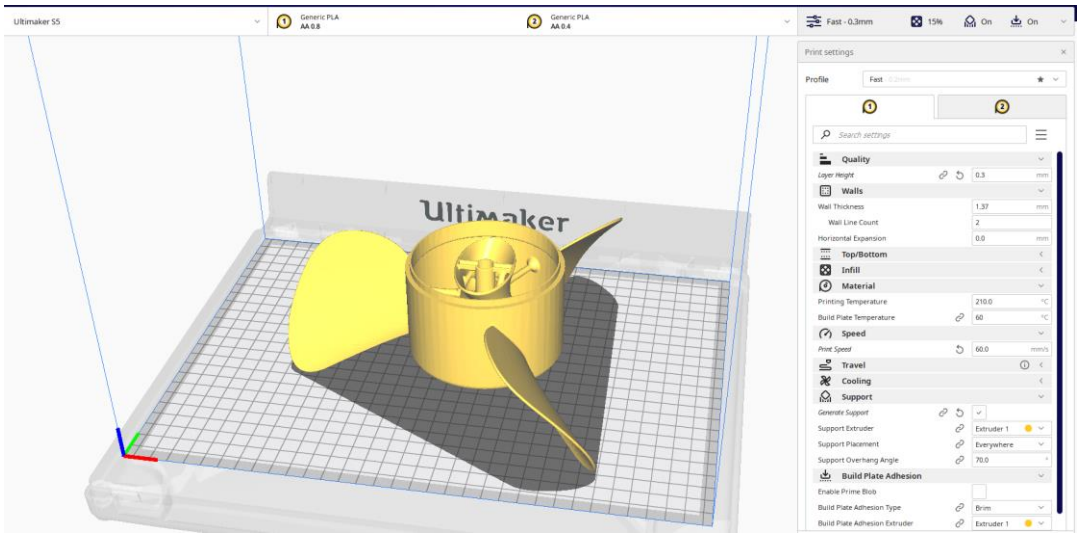
Tässä luvussa kerrotaan potkurin valmistusprosessi. Prototyypit valmistettiin Technobothnian laboratoriotiloissa ja 3D-tulostimena käytettiin Ultimaker s5 -tulostinta (Kuva 23). Lopullisen potkurin valmistamisesta vastasi Jyväskylässä sijaitseva 3D Formtech.



Kuva 23. Ultimaker Cura s5 3D -tulostin.

5.3.1 Ensimmäinen prototyyppi

Ultimaker 3D-tulostimissa käytetään Ultimaker Cura-sovellusta, jossa pystytään määrittämään tulostusasetukset. Ensimmäiseksi 3D-malli pitää muuttaa STL-tiedostomuotoon. Tämän jälkeen STL-tiedosto siirretään Cura-sovellukseen, jossa kappaleen tulostusasennon ja muut asetukset voidaan asettaa halutuiksi. Kuvassa 24 ensimmäinen prototyyppi on siirrettynä sovellukseen ja siihen on laitettu halutut tulostusasetukset.

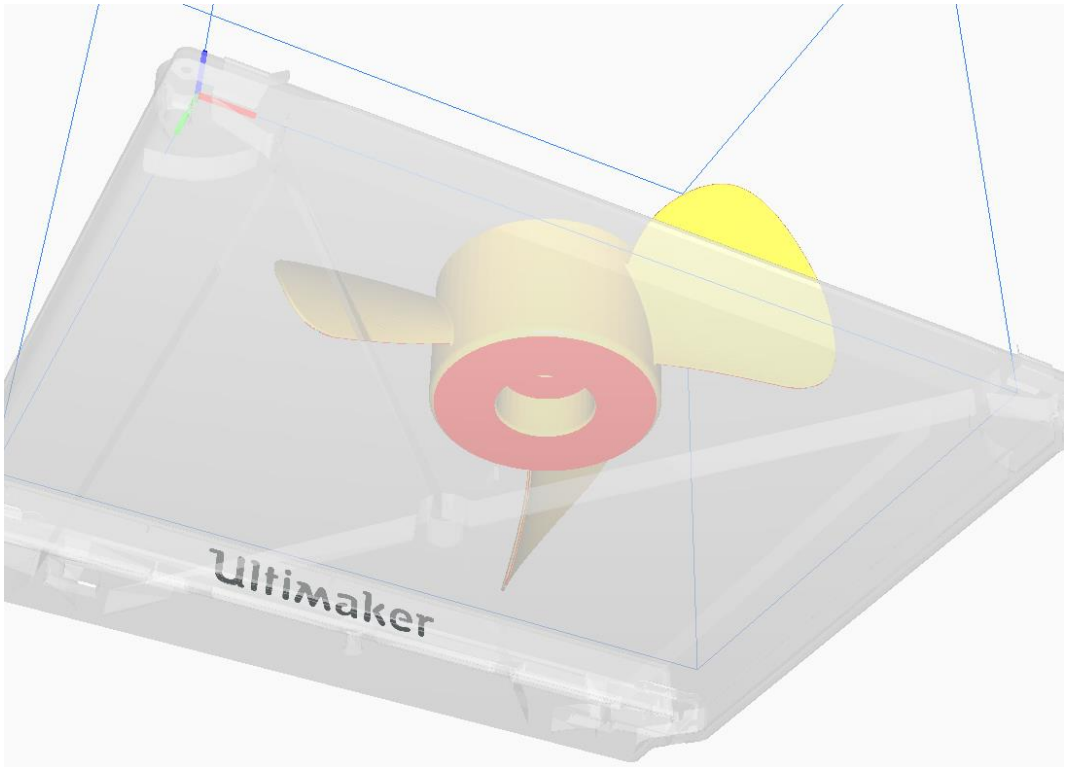


Kuva 24. Ensimmäisen prototyypin Ultimaker Cura-asetukset.

Tulostuksessa käytettiin materiaalina PLA:ta ja tukimateriaalina myös PLA:ta. Tukimateriaali saadaan mekaanisesti työstettyä pois kappaleesta tulostuksen valmistuttua. Tulostuksen keston ja materiaalin käytön kannalta tulostusasennolla on erittäin paljon vaikutusta. Kuvan 24 tulostusasennolla päästiin lyhyimpään valmistusaikaan ja siihen jouduttiin tässä asennossa käyttämään vähiten materiaalia. Layer height-kohdassa määritetään tulostuskerroksen paksuus. Mitä paksummaksi tulostuskerros laitetaan, sitä nopeammin tulostus tulee valmiiksi, mutta tu-

lostusjälki on epätasaisempaa. Tässä tulostuksessa käytettiin 0,3 mm kerrospaksuutta. Tällä paksuudella kappale saatiin valmistettua nopeasti, mutta tulostusjälki oli siistiä ja tarkkaa.

Ultimaker Cura-sovellus määrittää itse kohdat, joihin tarvitaan tukimateriaalia, kun support placement-kohtaan laitetaan arvoksi ”everywhere”. Kuvassa 25 Nähdään punaisella mallin alapuolelle tehtävät tukimateriaalit. Tukimateriaalia tuli myös keskiön sisällä oleviin kohtiin, jotka olivat alle 45° kulmassa. Prototyypin tulostuksessa kului aikaa 4h 30min. PLA:ta käytettiin tulostukseen 136 g, joka on filamentin pituudessa 17,19 m.



Kuva 25. Ensimmäisen prototyypin tukimateriaalin paikat.

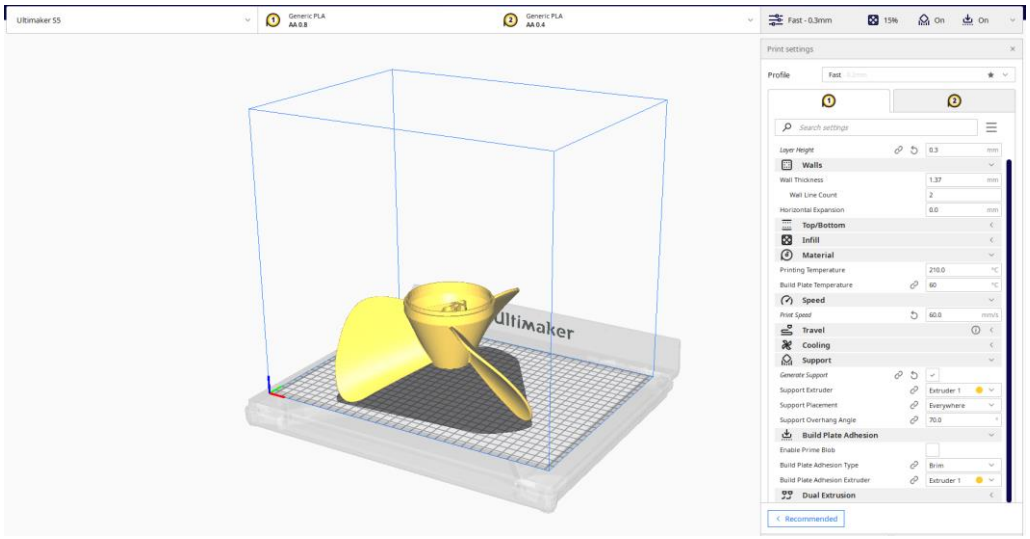
PLA-muovilla tulostaessa tulostuspedin päälle ei ole välttämätöntä lisätä liimaa, että kappale pysyisi pedissä kiinni. Tulostusta yritettiin aluksi ilman liiman lisäämistä, mutta yksi lapojen kärjistä irtosi paikaltaan ja tulostus epäonnistui. Tämän jälkeen tulostus toistettiin samoilla asetuksilla, mutta tulostuspedille lisättiin ohut kerros liimaa. Tämä riitti ohuiden vaikealla geometrialla olevien lapojen pysymisen tulostuspedissä kiinni valmistuksen ajan. Ensimmäisen prototyypin tulostuksessa lapojen alapuolelle ohjelma ei määrittänyt tukimateriaalia (Kuva 26). Kuvassa keskellä nähdään keskiölle tehdyt tuet.

Kuva 26. Ensimmäisen prototyypin valmistus.

5.3.2 Toinen prototyyppi

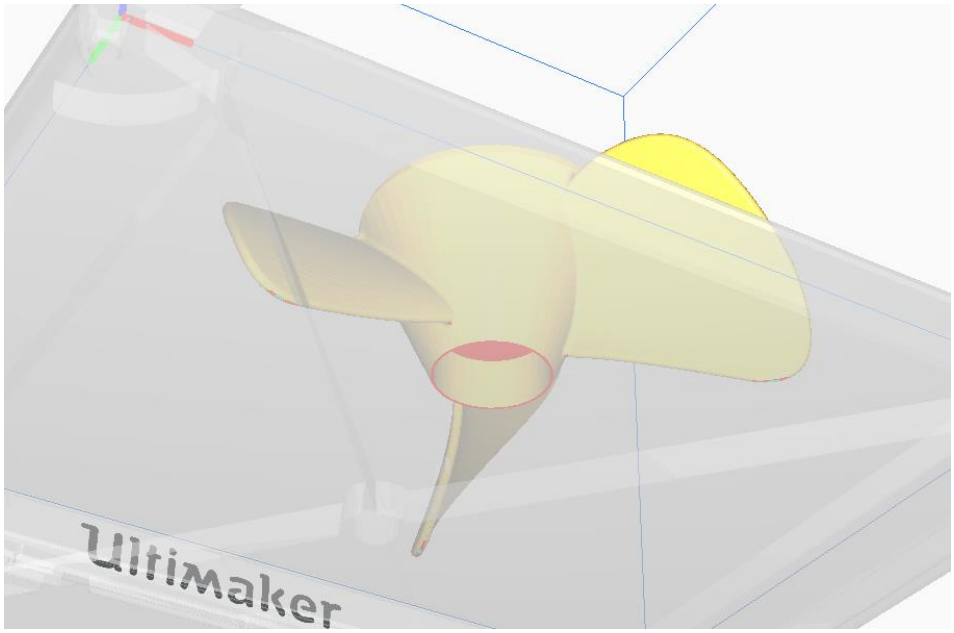
Toisessa prototyypissä tulostusasetukset (Kuva 27) pidettiin samanlaisena, kuin ensimmäisessä tulostuksessa. Tulostusaika ja materiaalin määrä kuitenkin laskivat. Toisen prototyypin tulostuksessa kesti 3 h 20 min ja materiaalia käytettiin 116

g, joka tarkoittaa filamentin pituudessa 14,70 m. Materiaalia kului tähän tulostukseen siis noin 15 % vähemmän, kuin ensimmäiseen tulostukseen.



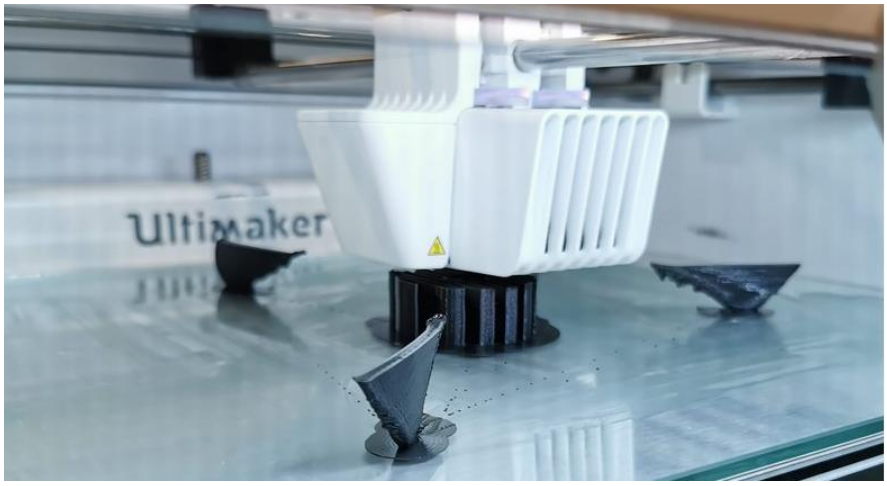
Kuva 27. Toisen prototyypin Ultimaker Cura-asetukset.

Nopeamman tulostusajan selittää keskiön muoto, koska siihen käytettiin vähemmän valmistus- ja tukimateriaalia. Kuvasta 28 huomataan, kuinka ensimmäiseen prototyyppiin verrattuna tukimateriaalin määrä on huomattavasti pienempi.



Kuva 28. Toisen prototyypin tukimateriaalin paikat.

Kuvassa 29 on esitettynä toisen prototyypin valmistus. Materiaali on sama PLA, kuin ensimmäisessä prototyypissä, mutta väri on musta. Keskellä huomataan keskiöön muodostuva tukimateriaali.



Kuva 29. Toisen prototyypin valmistus.

5.3.3 Lopullinen potkuri

Lopullinen potkuri valmistettiin tilaustyönä Jyväskylässä sijaitsevalla Formtech Oy:llä. Suunniteltu potkuri lähetettiin yritykselle .prt ja .stl-tiedostomuodoissa, joista he pystyvät lopullisen potkurin valmistamaan. Lopullisia potkureita valmistettiin yhteensä kolme kappaletta. Yksi kappale valmistettiin PA2200-materiaalista ja kaksi jäykemmästä PA3200GF-materiaalista. Kaikille kolmelle potkureille tehtiin myös jälkikäsittelynä mikropinnoitus. Mikropinnoitus antaa kappaleelle täydellisen suojan vedelle ja lialle[62]. Valmistusmenetelmänä käytettiin aiemmin esiteltyä valikoivaa lasersintrausta (SLS).

[62] 3D Formtech, jälkikäsittely

6 PROJEKTIN TUOTOKSET

Tässä luvussa esitellään opinnäytetyön tuotokset aikajärjestyksessä. Ensimmäisenä käydään läpi valmistetut prototyypit ja kuinka prototyyppejä korjattiin, että päästiin lopulliseen potkuriin. Potkureiden valmistuskustannuksista on myös laskettu suuntaa antavia hintoja.

6.1 3D-tulostetut prototyypit

Työssä prototyyppejä tulostettiin kaksi kappaletta (Kuva 30). Prototyyppien suurimpina eroina olivat keskiöiden muoto ja akselin tuet. Ensimmäisen prototyypin (kuvassa oikealla) keskiö todettiin valmistuksen jälkeen suureksi suhteessa lapoihin. Teoriaosuudessa todettiin, että keskiö ei lisää potkurin työntövoimaa, jonka takia sitä muutettiin pienemmäksi ja paremmin virtaavammaksi.

Kuva 30. Valmistetut prototyypit.

Molemmat prototyypit tulostettiin samalla materiaalilla ja tulostimella. Ensimmäiseen prototyyppiin kului materiaalia 136 g ja toiseen 116 g. Ultimaker PLA kela 750

g maksaa 0 % arvonlisäverolla 33,00 €[63]. Näillä tiedoilla laskettaessa ensimmäiselle prototyypille tulee valmistus hinnaksi pyöristettynä 6 €. Toiselle prototyypille valmistus hinnaksi tulee pyöristettynä 5,1 €. Paremmin suunnitellulla potkurilla pystyttiin siis säästämään 15 % valmistuskustannuksissa.

6.2 Lopullinen 3D-tulostettu potkuri

Projektin lopputuotoksena valmistettiin kolme potkuria jauhepetimenetelmällä. Kuvassa 31 on PA2200-materiaalista valmistettu potkuri. Jauhepetimenetelmä sopi potkurin valmistamiseen paljon paremmin, kuin materiaalin pursotus. Pinta on huomattavasti tasaisempi ja lopputulos yleisesti parempi, kuin prototyypeissä. Kerrosten välisiä eroja on hankala erottaa, joka tekee potkurista hienomman näköisen, mutta myös kestävämmän.

Kuva 31. Valmistettu lopullinen potkuri.

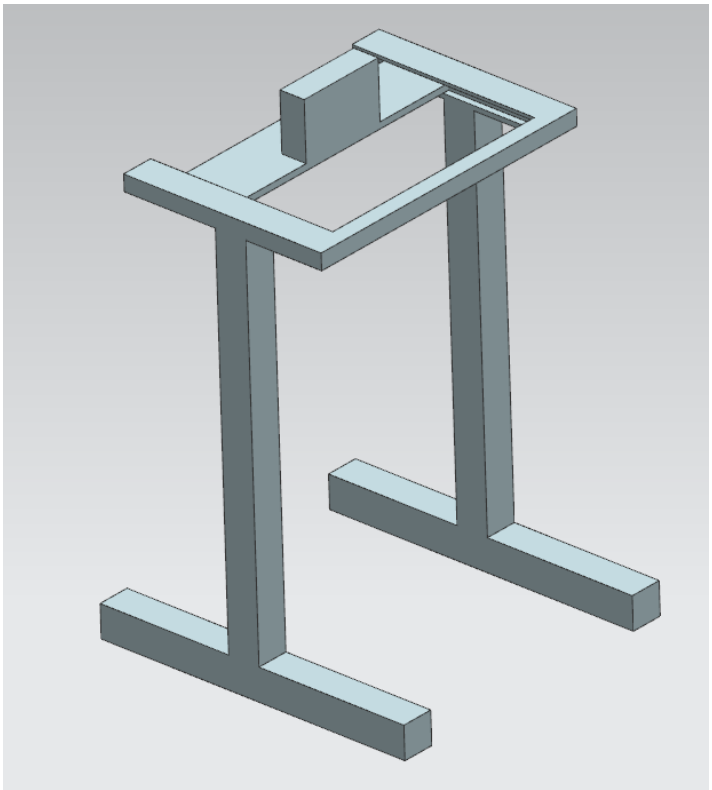
[63] Maker 3D, PLA Ultimaker 750 g kela

7 POTKURIEN TESTAUS

Tässä luvussa kerrotaan, kuinka potkurin testaus suoritettiin ja mitä mittalaitteita käytettiin. Luvussa kerrotaan myös testaustulokset ja vertaillaan alkuperäisen ja suunnitellun potkurin tuloksia.

7.1 Potkurien testaus

Potkurien testaus suoritettiin laboratoriotiloissa. Vertailtavina potkureina käytettiin alkuperäistä potkuria ja PA3200GF-materiaalista valmistettua potkuria. Testausta varten valmistettiin testauspenkki (Kuva 32), jossa testi suoritettiin.



Kuva 32. Testauspenkki.

Testauspenkki valmistettiin puusta, jossa on kiskoilla vapaasti liikkuva taso. Tähän tasoon perämoottori kiinnitetään. Testauspenkin jalkojen väliin sijoitettiin vesiallas. Vapaasti liikkuvan tason ja sivuttaistukipalkin väliin sijoitetiin mittauslaite, jolla saadaan mitattua työntövoima. Testauspenkin toiminta perustuu siihen, että potkurin pyöriessä perämoottori pyrkii eteenpäin vapaasti liikkuvalla tasolla. Taso ei kuitenkaan pääse eteenpäin mittalaitteen takia. Mittalaite mittaa, kuinka suurella voimalla perämoottori pyrkii eteenpäin, eli mitataan työntövoimaa.

Testauksessa käytetyt laitteet:

- Testauspenkki
- Vesiallas
- WTR2-Barracuda 86 sähköperämoottori
- 12V 100Ah akku
- Mittauslaite.

7.2 Testaustulokset

Perämoottorissa on viisi vaihdetta eteenpäin ja kaksi taaksepäin. Testaus suoritettiin yhdellä akulla eli 12 Voltin jännitteellä. Testissä myös otettiin työntövoima ainoastaan ensimmäiseltä eteenpäin menevältä vaihteelta. Nämä tehtiin siitä syystä, että suunnitellulla potkurilla altaan ylimenevä veden määrä oli erittäin suuri. Testaustulokset esitettynä taulukossa 1.

Taulukko 1. Testaustulokset.

Sähköperämoottorin suurin ilmoitettu työntö-voima (lbs / N)	Alkuperäinen potkuri, työntövoima (lbs / N)	Suunniteltu potkuri (PA3200GF), työntö-voima (lbs / N)
382,7 N	51,11 N	62,28 N

Taulukossa vasemmalla on esitettynä valmistajan ilmoittama suurin työntövoima perämoottorille käytettäessä 24V akustoa ja suurinta vaihdetta. Keskisarakkeessa on ilmoitettu alkuperäisen potkurin työntövoima ja oikealla suunnitellun potkurin. Testitulokset ovat huomattavasti pienemmät, kuin valmistajan lupaamat pienemmän jännitteen ja ainoastaan yhden vaihteen käytön takia. Käytetty mittalaite mittasi 10 g tarkkuudella siihen kohdistuvaa voimaa.

Tuloksista huomataan, että suunnitellulla potkurilla työntövoimaa saatiin parannettua verrattuna alkuperäiseen potkuriin. Työntövoima parani suunnitellun potkurin avulla noin 21,9 %. Potkurien käyttäytymisessä huomasi testissä myös eroja. Suunniteltu potkuri oli huomattavasti aggressiivisempi ja potkurin työntämä vesimäärä oli suurempi.

Testitulosten luotettavuuden kannalta testissä olisi ollut hyvä päästä vertailemaan työntövoimaa jokaisella vaihteella ja oikealla akun jännitteellä. Tämä ei kuitenkaan tällä testauspenkillä ja vesialtaalla ollut mahdollista.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, pystytäänkö uudelleensuunnittelemalla perämoottorin potkuri lisäämään vedessä kulkevan ajoneuvon huippunopeutta. Ennen suunnitteluvaiheeseen etenemistä tutustuttiin aiheeseen liittyvää fysiikan osa-aluetta eli virtausmekaniikkaa. Virtausmekaniikasta edettiin tutkimaan virtausdynamiikkaan liittyvää teoreettista taustaa. Virtausdynamiikan osa-alueella tutkittiin tarkemmin potkurin toimintaan ja suorituskykyyn liittyviä asioita. Teoria-osuudessa saadut suorituskykyä parantavat opit pyrittiin viemään käytäntöön suunnittelun muodossa.

Opinnäytetyössä oli tarkoituksena päästä kokeilemaan suunniteltua potkuria käytännössä, mutta käytännön kokeilua ei päästy suorittamaan. Potkurin testaus kuitenkin suoritettiin laboratorio-olosuhteissa, josta saatiin tärkeää tietoa potkurin toiminnasta.

Potkurin testausten perusteella opinnäytetyön tavoitteisiin päästiin. Perämoottorin työntövoimaa saatiin parannettua yli 20 % testauksen perusteella. Potkuri todettiin testissä myös riittävän kestäväksi. Potkurin lopullinen kestävyys ja suorituskyvyn parantuminen selviää pidemmässä käytössä. Kavitaation syntyminen aikaisemmassa vaiheessa voi tulla eteen suurempien vesimäärien virtaamisesta potkurin läpi.

Opinnäytetyössä myös hieman tutkittiin potkurin valmistuskustannuksia. Alkuperäinen potkuri on todennäköisesti valmistettu ruiskuvalamalla sarjatuotantona, joten sen valmistuskustannukset ovat erittäin pienet. Näin pieniin kustannuksiin potkurin valmistamisessa 3D-tulostamalla on hankala päästä. Potkurista olisi kuitenkin mahdollista tehdä parametrinen malli. Parametrisen mallin avulla pystyttäisiin kuluttajalle räätälöimään halutun akselin koon, lapojen nousun ja muiden haluttujen parametrien mukainen malli helposti. Näin saataisiin valmistettua kustomoituja potkureita eri perämoottori merkeille ja malleille.

Opinnäytetyön aihe oli erittäin mielenkiintoinen. Erityisesti virtausmekaniikka aiheena oli hyvin laaja, joten työtä oli rajattava. Tutkimustietoa aiheeseen liittyen löytyi hyvin. Työ koostui monesta eri osa-alueesta ja opetti paljon niin virtausmekaniikasta, suunnittelusta lisäävälle valmistusmenetelmälle ja 3D-tulostamisen eri valmistusprosesseista.

LÄHTEET

3D Formtech, Materials in 3D printing. Viitattu 6.12.2022. https://3dform-tech.fi/en/materials-in-3d-printing/

3D Formtech, jälkikäsittely. Viitattu 10.12.2022. https://3dformtech.fi/jalkikasit-tely/

Artikkeli, mercurymarine. 2020. Prop blade rake: not easy to explain, but crucial for optimal boating. Viitattu 1.11.2022. https://www.mercuryma-rine.com/en/us/dockline/prop-blade-rake-not-easy-to-explain-but-crucial-for-optimal-boating/

Artikkeli, Solas. Neil Mullen. 2022. Basic propeller info. Viitattu 1.11.2022. https://solaspropellers.com/index.php/about/6-basic-propeller-info

Babicz, J. 2015. Wärtsilä encyclopedia of ship technology, Second edition

Esa Siltaloppi media Oy. Kotisivut. Viitattu 11.8.2022. https://esasiltaloppi.fi/

Filamentti, tekniset tiedot ABS. Viitattu 10.12.2022. https://www.fila-mentti.com/tekniset-tiedot/

Ford, S., Despeisse, M. 2016. Additive manufacturing and sustainability: an explor-atory study of the advantages and challenges. Viitattu 20.7.2022. https://rea-der.elsevier.com/reader/sd/pii/S0959652616304395?to-ken=7C43470205B410777467359C31A5831A3686D69BE5428DF6E82C5170DD01 07B298526FA739679E3EE4A93ED9E5EC4545&originRegion=eu-west-1&originC-reation=20220719151148

Gatete, E., Hiram, M., Ndiritu & Kiplimo, R. 2018. A review on marine propeller performance of high speed boats running on an outboard engine. Viitattu 9.6.2022. https://sri.jkuat.ac.ke/jkuatsri/index.php/sri/article/view/156/140

Gerr, D. 1989. Propeller Handbook: The complete reference for choosing, installing and understanding boat propellers

Hara, Y., Yamatogi, T., Murayama, H., Uzawa, K., Kageyama, K. 2022. Performance evaluation of composite marine propeller for a fishing boat by fluid-structure interaction analysis. Viitattu 16.6.2022. http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM18proceedings/data/2.%20Oral%20Presentation/Aug22(Monday)/M27%20Applications%20of%20Composites/M27-6-IF1726.pdf

Heinämäki, A. 2022. Miten sähköperämoottori toimii?. Viitattu 6.8.2022. https://projektiloota.fi/2022/04/15/miten-sahkoperamoottori-toimii/

Hubs, Design rules for 3D printing poster. Viitattu 1.11.2022. https://www.hubs.com/get/3d-printing-design-rules/

Hällgren, S., Pejryd, L., Ekengren, J. 2016. (Re)Design for additive manufacturing, 26th CIRP design conference. Viitattu 28.6.2022. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116303900

Inkinen, P., Tuohi, J. 2006. Momentti 1: Insinöörifysiikka. Keuruu. Otava.

Komi, E. 2016. Design for Additive Manufacturing. Viitattu 12.7.2022. https://publications.vtt.fi/julkaisut/muut/2016/VTT-R-03159-16.pdf

Kruth, J-P., Mercelis, P., Vaerenbergh, V., Froyen, L., Rombouts, M. 2005. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. Viitattu 27.11.2022. https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/13552540510573365/full/pdf?title=binding-mechanisms-in-selective-laser-sintering-and-selective-laser-melting

Lanzotti, A., Martorelli, M., Maietta, S., Gerbino, S., Penta, F., Gloria, A. 2018. A comparison between mechanical properties of specimens 3D printed with virgin and recycled PLA. Viitattu 22.9.2022. https://reader.elsevier.com/rea-

der/sd/pii/S2212827119301441?to-
ken=54AD02EF58AC6A0A793BEA1F9C9CFF8E91BD863C057CC37B98E43DA75B7
235EFF46E0A3773E8F9008E8FA9ACF04FCD88&originRegion=eu-west-1&originC-
reation=20220922075910

Lohilahti, J. 2018. Maker 3D, Vertailussa FDM-, SLA- ja SLS- teknologiat. Viitattu 27.11.2018. https://www.3d-tulostus.fi/uutiset/Vertailussa-FDM-SLA-ja-SLS-teknologiat

Maker 3D, PLA Ultimaker. Viitattu 30.10.2022. https://www.3d-tulostus.fi/epages/3dtulostus.sf/fi_FI/?ObjectPath=/Shops/20131018-11092-264846-1/Products/ult-pla-285

Materflow, PA2200 General information. Viitattu 6.12.2022. https://www.materflow.com/tuotanto-materiaalit/pa2200/#1645476605937-8c711360-6e655db5-63f4

Materflow, PA3200GF General information. Viitattu 10.12.2022. https://www.materflow.com/tuotanto-materiaalit/pa3200gf/#1645476605946-b2c762b8-d1eee17c-b8e5

Motley, M.R., Liu, Z., Young, Y.L. 2009. Utilizing fluid–structure interactions to improve energy efficiency of composite marine propellers in spatially varying wake. Viitattu 27.6.2022. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822309000853

Munson, B. R, Okiishi, T. H, Huebsch, W. W, & Rothmayer, A. P. 2013. Fluid mechanics, seventh editon

Ryder, B. 2019. History of Evinrude: All for a Scoop of Ice Cream and Clean Air. Viitattu 1.6.2022. https://www.outdoorhub.com/stories/2019/07/18/history-of-evinrude/

Singh, B., Singh, S. 2009. State of the art on permanent magnet brushless DC motor drives. Viitattu 7.8.2022. https://koreascience.kr/article/JAKO200906942466561.pdf

Stow, D. 2017. Oceans: A very short introduction

Teknologiakeskus Oy Merinova Ab. Kotisivut. Viitattu 11.8.2022. https://www.merinova.fi/

VAMK. AM-Akatemia. Viitattu 11.8.2022. http://www.puv.fi/en/com/projects/am-akatemia/

Van Canneyt, K., Verdonck, P. 2014. nonNewtonian Fluids. Viitattu 29.8.2022. https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/nonnewtonian-fluids

Vayre, B., Vignat, F., Villeneuve, F. 2012. Designing for additive manufacturing, 45th CIRP conference on manufacturing systems. Viitattu 5.7.2022. https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2212827112002806?token=12AD65139FE77248C011856EB136807BEBE284DECC94EE49592EDE345796B414246CA4A0D1F6EF6F5F980B7830A380D1&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220705152722

Wiber, A., Persson, J., & Ölvander, J. 2019. Design for additive manufacturing – a review of available design methods and software. Viitattu 28.6.2022. https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/RPJ-10-2018-0262/full/pdf?title=design-for-additive-manufacturing-a-review-of-available-design-methods-and-software

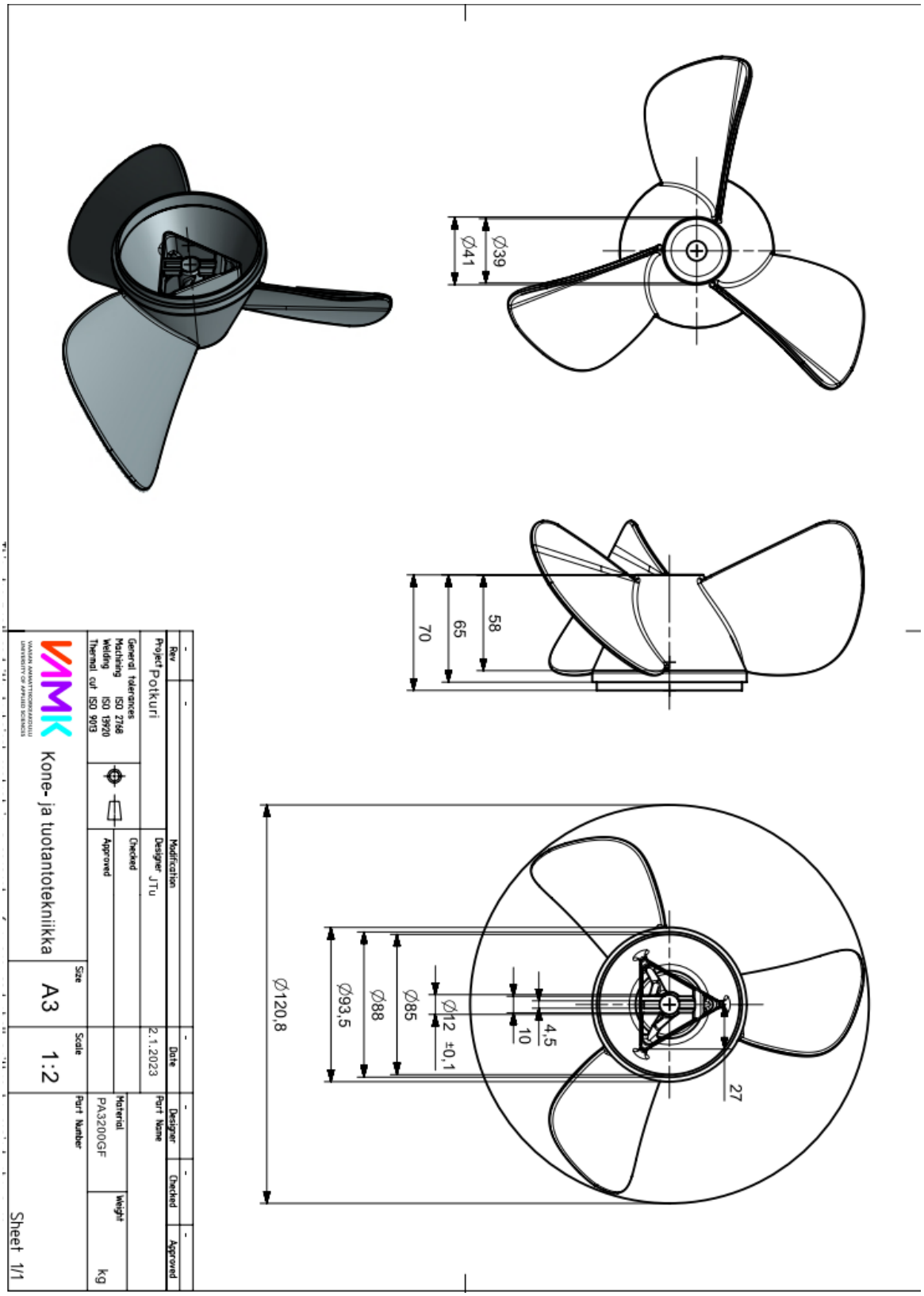
Wiber, A., Persson, J., & Ölvander, J. 2021. An optimisation framework for designs for additive manufacturing combining design, manufacturing and post-processing. Viitattu 12.7.2022. https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/RPJ-

02-2021-0041/full/pdf?title=an-optimisation-framework-for-designs-for-additive-manufacturing-combining-design-manufacturing-and-post-processing

Xometry. 2021. Selective laser sintering (SLS) 3D printing: Technology overview. Viitattu 27.11.2022. https://xometry.eu/en/selective-laser-sintering-sls-3d-printing-technology-overview/

Yedamale, P. 2003. Brushless DC (BLDC) motor fundamentals. Viitattu 7.8.2022. http://electrathonoftampabay.org/www/Documents/Motors/Brushless%20DC%20(BLDC)%20Motor%20Fundamentals.pdf

Zbigniew, C., Karpinski, P., Krzysztof, S., Wendeker, M. 2021. Wind Tunnel Performance Tests of the Propellers with Different Pitch for the Electric Propulsion System. Viitattu 29.8.2022. https://www.researchgate.net/publication/357234152_Wind_Tunnel_Performance_Tests_of_the_Propellers_with_Different_Pitch_for_the_Electric_Propulsion_System

LIITTEET

LIITE 1