

**JÄÄKAAPIN OVENKAHVAN RAKENNEANALYSOINTI JA
OPTIMOINTI**



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Riihimäen kampus, Kone- ja tuotantotekniikka, insinööri (AMK)

Syksy, 2020

Tommi Savolainen

Kone- ja tuotantotekniikka
Riihimäki

Tekijä	Tommi Savolainen	Vuosi 2020
Työn nimi	Jääkaapin ovenkahvan rakenneanalysointi ja optimointi	
Työn ohjaaja/t	Jaakko Vasko	

TIIVISTELMÄ

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia UPO-merkkisen jääkaappipakastimen ovenkahvaa ja selvittää miksi se hajoaa niin helposti, sekä pyrkiä löytämään keinoja rakenteen vahvistamiseksi.

Kahvalle suoritettiin rakenneanalyysi sekä FEM-analyysi, joiden perusteella voitiin todeta, että suurin ongelma kahvassa oli sen kaareva muoto ja vino kiinnityspinta. Kahva oli suunniteltu niin, että normaalissa käytössä sen kiinnityskohtiin kohdistuu suurta räsitusta vipuvaikutuksesta johtuen. Hiukan äkäisempi nykäisy kahvasta aiheuttaa helposti kiinnikkeiden hajoamisen.

Kahvasta tehtiin rakenneanalyysin perusteella paranneltu malli, jossa kahvan kiinnikkeitä hiukan lyhennettiin ja niiden kaarevuus käännettiin. Sen lisäksi tehtiin FEM analyysin perusteella topologiaoptimoitu malli. Näistä kahdesta mallista sekä alkuperäisestä mallista tulostettiin 3D-tulostimella kappaleet, joille sitten tehtiin vetokokeet.

Testien perusteella huomattiin, että kahvan kesto nousi huomattavasti, kun sen kiinnikkeiden kaarevuutta vähennettiin tai käännettiin vastakkaiseen suuntaan. Loppupäätelmäksi saatiin, että mikäli kahvan materiaali halutaan pitää samana, eli ABS-muovina, joudutaan alkuperäistä muotoa hiukan muuttamaan. Mikäli taas muoto halutaan pitää samana kuin alkuperäisessä mallissa, pitää kahva valmistaa vahvemmassa materiaalista, kuten alumiinista.

Avainsanat 3D-tulostus, FEM, rakenneanalyysi, topologia, optimointi.

Sivut 36 sivua, joista liitteitä 1 sivu

Mechanical Engineering and Production Technology
Riihimäki

Author	Tommi Savolainen	Year 2020
Subject	Structural analysis and optimization of a fridge door handle	
Supervisors	Jaakko Vasko	

ABSTRACT

The purpose of this thesis project was to examine the handle of a UPO branded fridge, and to find out why the handle was so prone to breaking and also to try to find ways to improve and strengthen its structure.

A structural analysis and FEM analysis were performed on the handle. Based on the results, it was clear that the biggest issue with the handle was its curved shape combined with a slanted attachment face on the door. The handle was designed so that in a normal usage situation, due a leverage, a major force was directed to the proximity of the fasteners. A bit more powerful jerk than average, could easily lead to the breakage of the handle.

Based on the data gathered from the structural analysis, a new design of the handle was created, where the curved shape was reversed and shortened a bit. Also, a topology optimized version of the handle was created. Then these two models were 3D printed along with the original model.

Pull tests were then performed on all these printed parts. The outcome of the pull test was that the strength of the handle was significantly increased when the curvature was reduced or reversed.

The conclusion was, that to increase the durability of the handle, there were basically two options: if the material of the handle was preferred to be kept the same as in the original handle (ABS), then the geometry had to be changed. If it was preferred to keep the geometry unchanged, then the material had to be changed to something more durable, aluminum for example.

Keywords Structural analysis, topology, optimization, FEM, 3D-printing.

Pages 36 pages including appendices 1 page

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	KAPPALEEN ANALYSOINTI	1
2.1	Kappale ja sen käyttötarkoitus.....	2
2.2	Kappaleen materiaali ja valmistustapa	3
2.3	Kappaleen rakenne/geometria	4
2.4	Ongelmakohtia ja parannusehdotuksia	5
3	LUJUUSTARKASTELU	7
3.1	Vapaakappalekuva	7
3.2	Kahvaan kohdistuvat rasitukset eri tilanteissa.....	8
3.2.1	Kahvan vetokulma	8
3.2.2	Vetonopeus	10
3.2.3	Jääkaapin alipaine.....	11
3.2.4	Mekaaniset viat	11
4	FEM-ANALYYSI	12
4.1	Historiaa ja peruseriaate	12
4.2	ANSYS	13
4.3	Kappaleen mallintaminen	13
4.4	Geometrian analysointi.....	14
4.5	Analyysin tulokset	16
5	RAKENTEEN OPTIMOINTI	20
5.1	Kiinnikkeiden topologiaoptimointi.....	20
5.2	Geometrian putsaus.....	22
6	3D -TULOSTUS.....	23
6.1	3D -tulostukset periaate ja edut	23
6.2	Tulostuksen valmistelu.....	25
6.2.1	Mallien tuonti ja asettelu	25
6.2.2	Tulostuksen asetukset	26
6.2.3	Mallin viipalointi ja G-koodin luonti	26
6.3	Tulostus	27
7	KUORMITUSTESTAUKSET.....	28
7.1	Testijärjestelyt.....	28
7.2	Tulokset.....	29
8	JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO	32
	LÄHTEET	34
	Liitteet	
	Liite 1 Kahvan vetokokeet	

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on suorittaa rakenneanalyysi ja optimointi UPO-merkkisen jääkaappipakastimen ovenkahvalle, jonka lisäksi käydään hiukan läpi yleisellä tasolla prosessiin liittyviä teemoja ja käytetyjä tekniikoita.

Työn aihe valikoitui siksi, koska itselläni on kotona jääkaappi, josta kyseinen kahva löytyy ja olen lukemattomia kertoja seissyt kaapin edessä irronnut/hajonnut kahva kädessäni ja miettinyt miten näin huonosti suunniteltu tuote on päästetty tuotantoon? Onko sitä testattu ollenkaan vai onko kahva kenties tehty tahallaan heikoksi, jotta niitä voidaan myöhemmin myydä varaosina 50–100 € kappalehintaan? Vai onko sen suunnittelussa menty vain täysin visuaalisuus käytännöllisyyden edellä?

Työn keskeisenä tavoitteena on siis ensinnäkin selvittää, miksi kahva on niin hajoamisherkkä kuin se on tutkimalla mm. kahvan materiaalia, valmistusmenetelmää, geometriaa ja käyttötapaa. Kappaleelle suoritetaan myös FEM analyysi, josta tarkemmin nähdään mihin kohtiin kappaletta suurimmat rasitukset muodostuvat.

Toisena tavoitteena on löytää keinoja lisätä kahvan kestävyttä, kuitenkin niin, että kahvan muotoilu pysyisi mahdollisimman lähellä alkuperäistä. Eli niin, että kahva on vielä parannustenkin jälkeen visuaalisesti yhteneväinen kaapin kanssa. Kahvan kestoä pyritään parantelemaan rakenneanalyysin pohjalta tehdyillä muokkauksilla, FEM-analyysiin perustuvalla topologia-optimoinnilla ja materiaalivalinnoilla.

Lopuksi parannelluista/optimoituista kappaleista tulostetaan 3D-tulostimella prototyyppit, joille suoritetaan rasiustestit. Rasiustestin tuloksia vertaillaan keskenään ja näiden tulosten pohjalta valitaan paras keino kahvan kestävyden nostamiseksi.

2 KAPPALEEN ANALYSOINTI

Ennen kuin kappaletta voidaan alkaa parantelemaan tai optimoimaan, on sitä ensin syytä analysoida hieman pintapuolisesti, eli selvittää mm. sen käyttötarkoitus, valmistusmateriaali, valmistustapa sekä rakenne/geometria. Analysoinnin tarkoituksena on löytää kappaleen ns. perustiedot, kuten esimerkiksi kappaleen tuennat, voimien suunnat ja materiaalin ominaisuudet. Näitä tietoja voidaan myöhemmin käyttää FEM analyysissä ja kappaleen optimoinnissa. (Comsol Inc, 2017)

Käyttötarkoitusta ja -tapaa tutkimalla voidaan määrittää kappaleeseen tyypillisessä käyttötilanteessa kohdistuvat voimat ja tuennat. Valmistusmateriaalista puolestaan riippuu, minkälaista rasiitusta kappaleen voidaan olettaa kestävän. Valmistustapa taas voi vaikuttaa omalta osaltaan kappaleen kestävyteen ja asettaa rajoituksia sen geometrialle.

2.1 Kappale ja sen käyttötarkoitus

Analysoitavana kappaleena tässä työssä oli UPO-merkkisen jääkaappipakastimen ovenkahva (Kuva 1). Samaa kahvamallia on käytetty useammassa saman valmistajan jääkaappi/pakastinmallissa.

Kahvan käyttötarkoitus on melko yksiselitteinen; sen tarkoituksena on tarjota jonkinlainen tarttumapinta, josta oven saa vedettyä auki. Muita yleisesti käytettyjä vaihtoehtoja kahvalle ovat esimerkiksi oven ”upotetut” lovet tai vaikka erilaiset jalalla painettavat polkimet.



Kuva 1. Analysoinnin ja optimoinnin kohteena oleva kahva.

2.2 Kappaleen materiaali ja valmistustapa

Jääkaapin ovenkahva on valmistettu ABS muovista. Se voitiin helposti todeta kahvan kiinnikkeen sisäpuolelta löytyvästä merkinnästä.

ABS (Akryylinitriilibutadieenistyreeni) kuuluu styreenimuoveihin, mutta sen kemiallinen kestävyys ja iskunlujuus ovat parempia kuin polystyreenin. ABS on jäykkää, iskunkestävää, muotonsa pitävää ja helposti työstettävää, jonka ansiosta se soveltuu hyvin vaativiin ja teknisiin käyttökohteisiin (taulukko 1). Sitä käytetään laajalti mm. tyhjiömuovaukseen. Samasta materiaalista valmistetaan myös muun muassa erilaisia kypäriä, veneitä ja Legopalikoita. (Aikolon, 2019)

Taulukko 1. ABS-muovin ominaisuudet (Aikolon, 2019)

ABS-muovin ominaisuudet

	Arvo	Yksikkö	Testausmenetelmä
Sulamislämpötila	97	°C	DIN EN ISO 11357
Käyttölämpötila (max)	80	°C	
Käyttölämpötila (min)	N/A		
Ominaispaino	1,05	g/cm ³	DIN EN ISO 1183
Kimmomoduuli	1900	MPa	DIN EN ISO 527-2
Vetolujuus	33	MPa	DIN EN ISO 527-2
Taivutuslujuus	55	MPa	DIN EN ISO 178
Murtolujuus	55	%	DIN EN ISO 527-2

Kahvassa käytetty ABS muovi on perusväriltään valkoista, joka on muotonsa valamisen jälkeen maalattu harmaan/hopeisen väriseksi. Tämä voitiin todeta, kun pintaa hiukan raaputettiin, jolloin hopeisen pinnan alta paljastui valkoinen perusväri (Kuva 2).



Kuva 2. Muovityyppimerkintä ja valkoinen perusväri maalin alla.

Kappale on todennäköisesti valmistettu ruiskuvalu-tekniikalla. Tähän viittaa kappaleen koko, tuotantovolyymi, ja erityisesti kahvan ympäri kulkeva sauma, sekä päässä näkyvä ruiskutuskohta.

Ruiskuvaletun muovikappaleen paino voi olla mitä vain jopa alle gramman painoisesta kappaleesta useisiin kiloihin. Kappaleet voivat olla hyvinkin monimutkaisia, eivätkä välttämättä vaadi sen kummempaa jälkityöstöä. Muotti on usein suunniteltu siten, että kappale irtoaa muotin auetessa. Ruiskuvalettua muovikappaletta katsottaessa on usein nähtävissä muotin sauma, ruiskutuskohta ja seinämien pieni päästö siihen suuntaan, johon kappale poistuu. Ruiskuvalun käyttö vaatii suurehkon sarjakoon ollakseen taloudellisesti järkevää. (Muoviyhdistys ry, 2016)

2.3 Kappaleen rakenne/geometria

Vaikka kahva onkin valmistettu yhdestä muovinpalasta, voidaan sen rakenne käytännössä jakaa pyöreään, tankomaiseen kahvaosaan, ja sen ylä- ja alapäistä lähteviin kahteen kiinnitysosaan (Kuva 3).



Kuva 3. Kahvan osat.

Kahvaosa on 21 mm vahvuista tankoa ja se on 345 mm pitkä. Kahvaosassa ei kaikessa yksinkertaisuudessaan ole ihmeemmin analysoitavaa; se on tanko, joka tuntuu sopivan kokoiselta käteen ja siitä saa helposti hyvän otteen. Kevyen vääntelyn ja taivuttelun perusteella se vaikuttaa riittävän vahvalta käyttötarkoitukseensa.

Kiinnitysosat ovat hiukan kaarevia, noin 70 mm pitkiä, 30 mm leveitä ja 15 mm paksuja palikoita. Toinen pää on kiinni kahvaosassa ja toisessa päässä on upotetut 4 mm reiät ruuveille oven kiinnitystä varten. Ruuvireikien etäisyys toisistaan on 256 mm. Kiinnitysosien ns. takapuolelta (eli kahvan ja oven väliin jäävästä osasta) on poistettu ylimääräistä materiaalia, mahdollisesti materiaalin säästötarkoituksessa. Sisäpuolelle on kuitenkin jätetty ruoteita vahvistamaan rakennetta (Kuva 4).



Kuva 4. Kahvan kiinnikkeiden sisäpuoli.

2.4 Ongelmakohtia ja parannusehdotuksia

Kahvan rakenteeseen liittyvät suurimmat ongelmat liittyvät kiinnitysosien rakenteen heikkouteen ja erityisesti kahvan geometriaan. Kohdassa, josta kahva kiinnitetään ruuveilla oveen, on materiaali poikkileikkaukseltaan kaikkein ohuimmillaan ja reikä muodostaa kappaleeseen epä-jatkuvuuskohdan. Perustuen omiin ja nettifoorumeilta kerättyihin muiden käyttäjien kokemuksiin, on juuri tämä kiinnityskohta se paikka, josta kahva pääsääntöisesti pettää (Kuva 5) (Suomi24, 2006).



Kuva 5. Rikkinäinen kahva.

Kiinnikkeet todennäköisesti kestäisivät, jos niihin kohdistuisi ainoastaan kiinnityspinnan suuntaista vetoa, mutta kahvan geometriasta ja kahvan käyttäjästä/käyttötavasta johtuen, siihen saattaa kohdistua reilusti myös taivutusta, jota kahva ei niin hyvin kestä. Tähän pureudutaan myöhemmin tarkemmin luvussa 3 ”Lujuustarkastelu”.

Parannusehdotuksia, joilla kestävyyttä saataisiin nostettua, tulee tässä vaiheessa mieleen kolme vaihtoehtoa:

1. Materiaalin lisääminen kiinnitysosiin, ruuvinreikien läheisyyteen.
2. Kiinnitysosien, tai koko kahvan materiaalin vaihtaminen johonkin kestävämpään, esimerkiksi alumiiniin.
3. Kahvan geometrian muuttaminen niin, että siihen kohdistuisi käytössä mahdollisimman vähän taivutusta.

Näistä vaihtoehdoista ensimmäinen olisi helpoiten toteutettavissa, mutta sen vaikutus kestävyyteen olisi todennäköisesti myös pienin. Ensinnäkin jos muoto halutaan pitää mahdollisimman lähellä alkuperäistä, ei materiaalia pystytä kovin paljoa lisäämään. Toisekseen materiaalin lisääminen kyllä luultavasti lisäisi jonkin verran vahvuutta rakenteeseen, mutta se ei silti poista pohjimmaista ongelmaa, eli kaarevasta muodosta aiheutuvaa vääntävää rasitusta, joka saattaisi silti joissain tilanteissa olla tarpeeksi aiheuttaakseen kiinnikkeen murtumisen.

Toisessa vaihtoehdossa materiaalin vaihtaminen esimerkiksi alumiiniin nostaisi kahvan kestävyyttä karkeasti nelikertaiseksi, riippuen siitä mitä alumiini seosta käytetään (MakeltFrom.com, 2020).

Materiaalin vaihtaminen metalliin vaikuttaisi luonnollisesti materiaalikustannusten lisäksi valmistustapaan ja sitä kautta valmistuskustannuksiin, jolloin koko tuotteen hinta voisi nousta. Tässä vaihtoehdossa vahvempi materiaali tarkoittaisi sitä, että kahvan ulkomuotoa/geometriaa ei tarvitsisi juurikaan muuttaa.

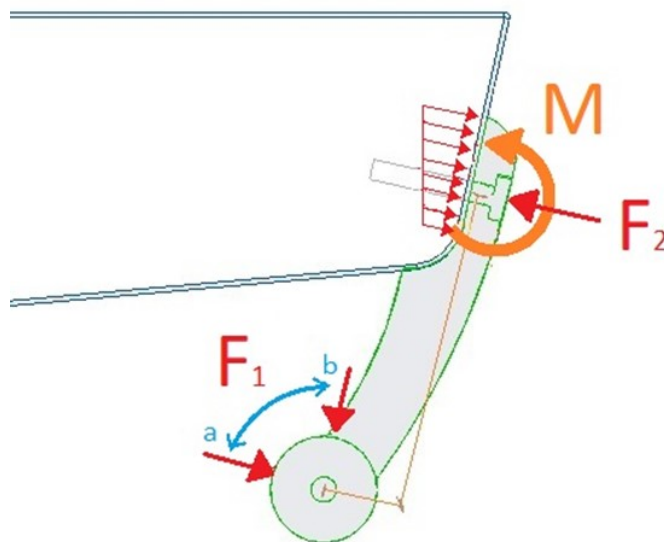
Kolmannessa vaihtoehdossa kahvan hajoamisherkkyyttä pyrittäisiin vähentämään muuttamalla geometriaa siten, että siihen muodostuisi alkuperäistä vähemmän taivutusta. Tämä voitaisiin toteuttaa esimerkiksi tuomalla kahvaosaa eli ”tankoa” lähemmäksi ovea, ja/tai vähentämällä kiinnitysosien kaarevuutta. Näin saataisiin lyhennettyä ”vipuvartta” ja sitä kautta pienennettyä kiinnityspisteeseen syntyvää momenttia. Tämä olisi tehokkain keino kestävyuden nostoon materiaalia muuttamatta, mutta samalla se sotii eniten vastaan tavoitetta, jonka mukaan muoto tulisi pitää mahdollisimman lähellä alkuperäistä.

3 LUJUUSTARKASTELU

Lujuustarkastelussa kappaleelle tehdään ensin vapaakappalekuva, jonka tarkoituksena on tutkia ja havainnollistaa, minkälaisia rasituksia kappaleeseen kohdistuu. Tämän lisäksi mitataan kuinka suuria kappaleeseen kohdistuvat voimat ovat normaalissa käyttötilanteessa. Tässä vaiheessa ei siis vielä etsitä suurimpia voimia, joita kappale kestää hajoamatta, vaan pyritään selvittämään minkälaisia voimia siihen kohdistuu jokapäiväisessä käytössä.

3.1 Vapaakappalekuva

Vapaakappalekuvaan piirretään kappaleen muoto yksinkertaistettuna ja kaikki siihen vaikuttavat voimat vektoreina. Kappaleen muoto ei ole vpk:ssa ole oleellinen ja siitä syystä se monesti esitetäänkin vain pisteenä tai laatikkona. Tässä tapauksessa käytettiin muodon ääriiviivoja, jotka saatiin näppärästi CAD-ohjelmasta (kuva 6).



Kuva 6. Kahvaan vaikuttavat voimat.

Vapaakappalekuvassa (Kuva 6) F_1 kuvaa kahvaa vedettäessä syntyvää voimaa, jonka suunta on pisteiden a ja b välillä ja riippuu täysin siitä mihin suuntaan käyttäjä sitä sattuu vetämään. F_2 kuvaa voimaa, jolla ruuvi pitää kahvaa kiinni ovessa. Tämän voiman vastapuolelle syntyy vastavoima. Kun kahvaa vedetään, toimivat kiinnikkeet kaarevan muotonsa takia vipuvartena ja ruuvi tukipisteenä. Tästä syntyy kahvan kiinnityskohdan ympärille momentti M . Momentin suuruus riippuu taas täysin kahvan vetosuunnasta käytetystä vetovoimasta/-nopeudesta. Jos kahvaa vedetään kuvan tilanteessa hiukan vasempaan alaviistoon, eli pisteen b suuntaan, on tällöin

vipuvarsi kaikista lyhimmillään, ja momentti sen seurauksena pienimmillään. Jos kahvaa vedetään reilusti oikealle/oikeaan alaviistoon, eli pisteen a suuntaan, on vipuvarsi pisimmillään ja näin ollen syntyvä momentti suurimmillaan. Joka tapauksessa suurimmat jännitykset muodostuvat kiinnitysreiän läheisyyteen.

3.2 Kahvaan kohdistuvat rasitukset eri tilanteissa

Jääkaapin tai pakastimen avaamiseen tarvittavaan voimaan, ja sitä kautta kahvaan kohdistuvaan rasitukseen, vaikuttaa muutamia eri tekijöitä. Nämä ovat esimerkiksi:

- kahvan vetokulma
- vetonopeus
- jääkaapin tai pakastimen sisä- ja ulkoilman väliset paine-erot
- erilaiset mekaaniset viat.

3.2.1 Kahvan vetokulma

Oven avaamiseen tarvittava voima mitattiin vetovaa'alla (Kuva 7), joka antaa tuloksen kilogrammoina. Testi suoritettiin niin, että vetovaa'an koukku kiinnitettiin kahvaan ja sitä vedettiin tasaisesti kasvavalla voimalla niin kauan, kunnes ovi aukesi. Tämä toistettiin muutama kertaan, jotta saatiin keskimääräinen avausvoima. Testin tarkoituksena ei ollut saada absoluuttisen tarkkoja lukemia, vaan ainoastaan selvittää tarvittavan voiman suuruusluokka, sekä havainnollistaa vetokulman vaikutusta voimaan.



Kuva 7. Oven avausvoiman mittaus juuri ennen oven avautumista suoraan ulospäin vedettäessä.

Kun ovea vedettiin kohtisuoraa ulospäin, tulokseksi saatiin noin kaksi kiloa, eli karkeasti 20 N. Kun kahvaa vedettiin noin 45 asteen kulmassa, nousi lukema suurin piirtein kolmeen kilogrammaan (Kuva 8), eli lähes 30 Newtoniin.

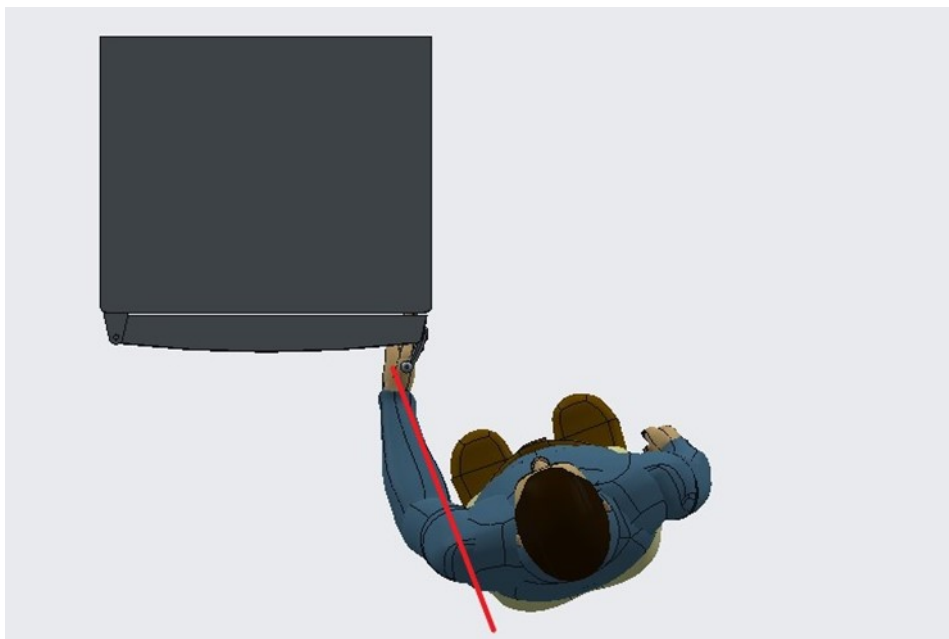


Kuva 8. Oven avausvoiman mittaus kahvaa kulmassa vedettäessä.

Tästä testistä nähtiin, että oven avaamiseen tarvittava voima kasvaa sitä mukaa, mitä suuremmassa kulmassa kahvaa vedetään oveen nähden. Kun kahvaa vedettiin noin 45 asteen kulmassa nousi voiman tarve noin 50 prosentilla.

Todellisessa käyttötilanteessa kahvan vetokulma vaihtelee jonkin verran muun muassa riippuen siitä, kummalla puolella ovea kahva sijaitsee ja kumpaa kättä henkilö avaamiseen käyttää. Lähtökohtaisesti henkilön täytyy seisoa hiukan oven sivussa, että ovi pääsee esteettömästi aukeamaan. Tämän lisäksi luonnollisin ja helpoin liikerata kädelle on vetää sitä suoraan

itseään kohti tai ainakin pitää liikerata mahdollisimman lähellä kehoa (Kuva 9).



Kuva 9. Oven avaustilanne. Käden liikerata havainnollistettu punaisella viivalla.

Jos ajatellaan, että kahva on oven oikealla puolella ja henkilö käyttää oikeaa kättään oven avaamiseen, saattaa hän herkästi vetää kahvaa jopa 90 asteen kulmassa kiinnityspintaan nähden, mikä niin kuin aikaisemmin todettu, aiheuttaa suuren rasituksen kahvan kiinnikkeisiin. Jos taas samassa kohdassa seisova henkilö käyttää oven avaamiseen vasenta kättänsä, on vetokulma huomattavasti pienempi.

3.2.2 Vetonopeus

Huomion arvoista on myös se, että edellisen testin antamat voimat pätevät vain silloin kun kahvaa vedetään rauhallisesti mahdollisimman tasaisella voimalla. Niin kuin voiman kaavasta (1) nähdään; jos kahvaa nykäistään oikein kiukkuisesti, on syntyvä voima F kiihtyvyyden a kasvun takia hetkellisesti paljon isompi.

$$F = ma \quad (1)$$

Kun kahvaa vedetään vauhdilla, kasvaneen avausvoiman lisäksi saattaa käydä niin, että ovi aukeaa ja vetoliike jatkuu vielä hetken, jolloin kahvaa vedetään yli 90 asteen kulmassa kiinnityspintaan nähden. Niin kuin vapaa-kappalekuvasta nähtiin, on kiinnikkeisiin kohdistuva momentti silloin suurimmillaan.

3.2.3 Jääkaapin alipaine

Moni on varmasti joskus törmännyt tilanteeseen, jossa jääkaapin tai pakastimen ovi on tuntunut olevan ”liimautunut” kiinni ja sen avaamiseen tarvitaan huomattavasti enemmän voimaa kuin yleensä. Hetken odottelun jälkeen ovi aukeaa taas normaalisti. Kyseinen efekti johtuu oven tiiviyydestä ja availun ja sulkemisen yhteydessä kaappiin syntyvästä alipaineesta. Alipaineen voi aiheuttaa kaksi eri ilmiötä tai niiden yhteisvaikutus. (AEG, 2020)

Ensinnäkin alipaine voi syntyä, kun oven avaamisen yhteydessä kaapin sisään pääsee virtaamaan lämmintä huoneilmaa, joka sekoittuu kaapin sisällä olevaan kylmään ilmaan. Kun kaapin ovi taas suljetaan, jäädyttää kaapin kylmälaitteisto sekoittuneen ilman nopeasti taas kylmäksi. Kuten kaasun tilayhtälöstä (2) nähdään, koska kaapin tilavuus V ei juurikaan muutu, johtaa ilman lämpötilan T lasku paineen p laskuun.

$$(p \cdot V) / T = \text{vakio} \quad (2)$$

Toinen tapa, jolla alipaine voi syntyä, johtuu kaapin oven tiivisteistä, jotka antavat hiukan periksi, kun kaappia työnnetään kiinni. Kun ovi työnnetään kovaa kiinni, työntyy ovi hiukan syvemmälle kuin missä se normaalisti sijaitsee työntäen samalla ilmaa kaapista ulos. Kun työntäminen loppuu, pyrkii ovi palautumaan normaaliin sijaintiinsa. Nyt kaapin sisällä oleva ilmamäärä pysyy suhteellisen vakiona, mutta oven ”palautumisesta” johtuen kaapin sisätilavuus pyrkii hiukan kasvamaan. Samasta kaasun tilayhtälöstä kuin äskenkin voidaan nähdä, että kaapin sisälle syntyy tässä tilanteessa alipaine. Käytännössä toimintaperiaate on siis sama kuin imukuppeissa.

Todennäköisesti oven ”liimautuminen” johtuu useimmiten näiden kahden asian yhteisvaikutuksesta. Mutta koska kaapit eivät kuitenkaan koskaan ole täysin ilmatiiviitä, pääsee kaapin sisäilman ja ulkoilman välinen paineero tasaantumaan lyhyehkön ajan kuluessa, jolloin avaaminen on taas helppoa.

Jos ovea yritetään avata silloin kun sen sisällä on alipainetta, täytyy kahvaa vetää paine-erosta johtuvan kiinnipitävän voiman verran kovempaa (3).

$$F = (p_1 - p_2) \cdot A \quad (3)$$

3.2.4 Mekaaniset viat

Niin kuin kaikkiin laitteisiin, myös jääkaappeihin voi ilmetä eri vikoja ajan saatossa. Esimerkiksi vioittuneet saranat voivat vaikeuttaa oven avaamista. Vikojen vaikutusta avausvoiman tarpeeseen on kuitenkin vaikea arvioida, koska se on aina täysin tapauskohtaista.

4 FEM-ANALYYSI

Kun kappale oli analysoitu pintapuolisesti, tehtiin sille FEM-analyysi (FEA) käyttäen Ansys -ohjelmistoa. FEM analyysin avulla selvitetään miten rasitukset jakautuvat kappaleeseen. Tätä tietoa käytetään myöhemmin hyödyksi kappaleen optimoinnissa.

4.1 Historiaa ja peruseriaate

FEM:lle (Finite Element Method) on hankalaa sanoa mitään tarkkaa päivämäärää tai edes vuotta, jolloin se olisi keksitty/kehitetty. Sen alkuperää voidaan jäljittää aina 40-luvun alkupuolelle muun muassa Venäläis-Kanadalaisen Alexander Hrennikoffin töihin, jotka osaltaan loivat pohjaa FEM:lle. 70-lukuun mennessä FEM oli kehittynyt useiden eri matemaattikojen ja insinöörien toimesta lähelle nykymuotoaan (Zienkiewicz, Taylor & Zhu, 2013, s. 2).

Kun kappaleita tutkitaan tai analysoidaan käyttäen FEM:a, kutsutaan sitä usein FEA:ksi, eli finite method analyysiksi. Koska tämän metodin käyttö vaatii paljon laskentatehoa tietokoneilta ja tietoa/taitoa niiden käyttäjiltä, oli FEA 90-luvulle saakka lähes yksinomaan puolustusvoimien, sekä muiden suurten resurssien toimijoiden, kuten ilmailu-, autoilu- ja avaruusalan käytössä. Kuitenkin tietokoneiden laskentatehon ja ohjelmistojen nopean kehityksen myötä FEA:n käyttö on nykyään lähes kaikkien saatavilla. (Manor Tool & Manufacturing Company, 2020)

FEA:n toiminta perustuu siihen, että iso, fyysisesti ja matemaattisesti monimutkainen kappale jaetaan tai "hajotetaan" pienempiin, helpommin ymmärrettäviin osiin; elementteihin. Nämä pienemmät osat edustavat materiaalin käyttäytymistä rasituksen alla omalla alueellaan. Kun osat taas yhdistetään, saadaan kohtuullisen tarkka kuva siitä miten isompi kappale reagoi ulkosiin ja/tai sisäisiin rasituksiin. (Manor Tool & Manufacturing Company, 2020)

FEA prosessi alkaa sillä, että aluksi määritellään niin kutsuttujen solmujen paikka ja järjestys kappaleen pinnalla. Solmu (Node) on piste 2D tai 3D kappaleen sisällä. Jokainen piste sisältää tiedon materiaalista ja rakenteesta juuri siinä kohdassa kappaletta. Kun pisteet yhdistetään viivoilla, saadaan aikaiseksi verkko (mesh), joka kattaa koko kappaleen. Mitä tiheämpi verkko on, sitä tarkempia tuloksia saadaan, mutta samalla sitä enemmän tarvitaan laskentatehoa tietokoneelta. Verkon sisään jääneet pienet alueet ovat nimeltään elementtejä; siitä nimi elementtimenetelmä. (Manor Tool & Manufacturing Company, 2020)

4.2 ANSYS

Tässä työssä kappaleen FEM-analysointiin käytettiin Ansys Workbench -ohjelmistoa. Käytössä oli opiskelijaversio, joka on hiukan rajoitettu täysversioon nähden.

Ansys:tä kehittää amerikkalainen, samaa Ansys nimeä kantava yritys, jonka perusti vuonna 1970 Pittsburghissa insinööri John Swanson. Vuosien varrella yritys on kasvanut merkittävästi muun muassa yrityskauppojen myötä ja nykyään se onkin yksi käytetyimmistä simulointi- ja analysointiohjelmistoista maailmassa. Ansyksen ohjelmistoja käytetään yleisesti kappaleiden käyttäytymisen simuloimiseen ja niiden ominaisuuksien, kuten esimerkiksi kestävyuden, kovuuden tai joustavuuden analysointiin. (Lee, 2017, s. 50)

Jääkaapin ovenkahvan analysoinnissa ja optimoinnissa käytettiin Ansyssä opiskelijalisenssillä. Ohjelman käyttöä on opiskelijaversiossa hiukan rajoitettu täyteen versioon nähden. Tärkeimpänä rajoittavana tekijänä on solmujen/elementtien määrän rajoittaminen 32 tuhanteen, tämä vaikuttaa suoraan elementtiverkon kokoon ja sitä kautta tulosten tarkkuuteen (ANSYS Inc, n.d). Näistä rajoituksista huolimatta, näilläkin elementtimäärillä saadaan tähän työhön täysin riittävän tarkat tulokset.

4.3 Kappaleen mallintaminen

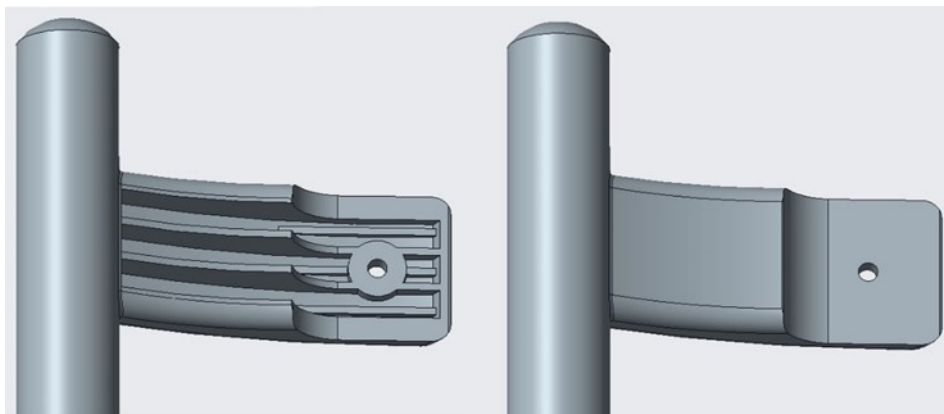
Kappaleen varsinainen analysointi tapahtui ANSYS-ohjelmalla ja vaikka ohjelmistosta löytyvällä SpaceClaim -osalla olisi kappaleen pystynyt myös mallintamaan, käytettiin mallintamiseen tällä kertaa PTC:n Creo Parametric 4.0 -ohjelmaa. Syynä tähän oli yksinkertaisesti se, että Creo oli itselle hyvin paljon tutumpi ja työskentely näin ollen paljon sujuvampaa.

Kappaleen mallintamiseen voidaan käyttää pitkälti mitä tahansa tarkoitukseen soveltuvaa ohjelmaa, kunhan tiedosto tallennetaan johonkin Ansyksen ymmärtämään formaattiin. ANSYS ymmärtää useita yleisimpiä standardiformaatteja, tässä tapauksessa käytettiin STEP-tiedostomuotoa.

Kahvasta mallinnettiin kolme eri variaatiota analysointia ja optimointia varten. Ensimmäisen mallin geometria pyrittiin tekemään mahdollisimman lähelle alkuperäistä kahvaa. Mitat otettiin alkuperäisestä kahvasta työntömitalla ja mallinnettiin ns. ”käsini”, joten mallin muodot eivät varmastikaan kopioituneet sataprosenttisesti oikein, mutta tarkkuus oli kuitenkin tähän tarkoitukseen varmasti riittävä. Yksi vaihtoehto olisi ollut 3D skannata kahva, mutta lisääntyneestä mallintarkkuudesta tuskin olisi ollut merkittävää hyötyä tässä tapauksessa. Toiseen geometriaan jätettiin enemmän materiaalia kiinnitysoosiin, mutta kahvaosa pysyi jotakuinkin ennallaan. Kolmanteen malliin lisättiin reilusti ylimääräistä materiaalia topologianoptimointia varten.

4.4 Geometrian analysointi

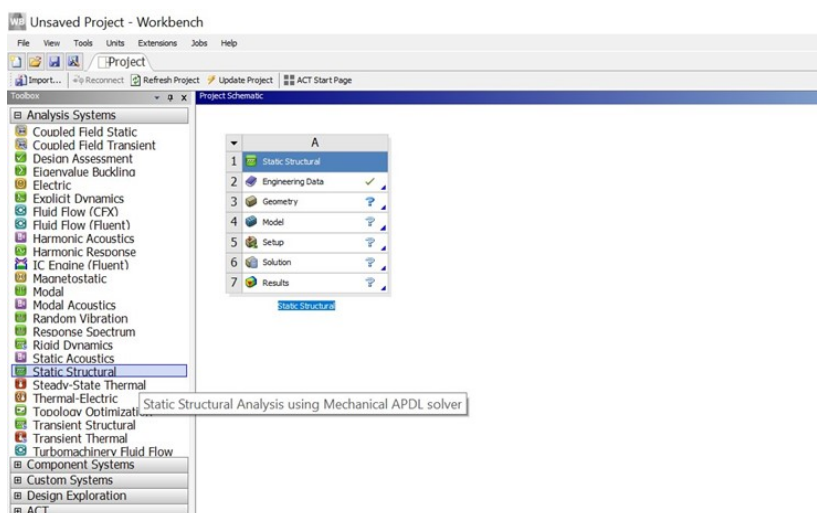
Kun kappaleen malli oli valmis ja tallennettuna STEP tiedostomuotoon, tuotiin malli Ansys workbench -ohjelmistoon ja aloitettiin kappaleen analysointi. Analysointi tehtiin alkuperäisen geometrian ABS-muovisen version lisäksi mallille, jossa kiinnikkeitä oli vahvistettu täyttämällä niiden ”ontot” kohdat (Kuva 10). Tämä ”täytetty” versio analysoitiin muovisena ja alumiinisena.



Kuva 10. Vasemmalla alkuperäinen kiinnike ja oikealla ”täytetty”.

Seuraavassa käydään läpi pääaskeleittain, kuinka kappaleiden analysointi Ansys -ohjelmalla tapahtui, ihan pienimpiin yksityiskohtiin ja säätöihin puuttumatta:

Kun Ansys Workbench oli avattu, ensin valittiin vasemmalta valikosta ”Static Structural” raahaamalla se projekti-ikkunaan (Kuva 11).



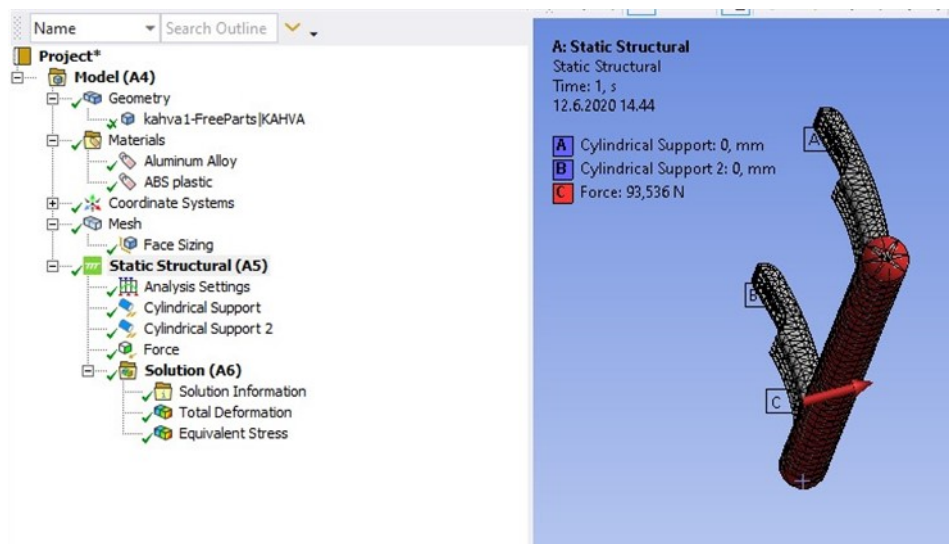
Kuva 11. Ansys workbench projektinäkömä.

Seuraavaksi lisättiin projektissa tarvittavat materiaalit ”Engineering Data” valikosta. Oletuksena ohjelma tarjoaa rakenneterästä, mutta koska kahvan valmistusmateriaali oli ABS, etsittiin se materiaalikirjastosta ja lisättiin

projektiin. Koska yhtenä kahvan parannusehdotuksena oli materiaalin vaihto johonkin kestävämpään, lisättiin myös alumiini projektiin. Oletuksena valittuna ollut rakenneteräs poistettiin projektista, koska siitä ei tässä tapauksessa ollut mitään hyötyä.

Sitten ohjelmaan tuotiin aiemmin Creolla luotu geometria ”Import Geometry” -toiminnolla. Kun malli oli tuotu, siirryttiin ”Mechanical” -puolelle avaamalla malli. Mechanical -ikkunassa näytölle aukeaa valittu geometria ja valikko, josta sille pitää määrittää materiaali, luoda verkko (mesh), sekä asettaa kappaleelle tukipisteet ja sitä rasittavat voimat.

Materiaali vaihdettiin näytön vasemmalla reunalla olevasta projektipuusta (kuva 12). Kohdasta ”Materials” löytyvät kaikki materiaalit, jotka projektiin otettiin mukaan, tässä tapauksessa siis ABS muovi ja alumiini. Materiaalin valinta tapahtui klikkaamalla kohdasta ”Geometry” auki olevan osan nimeä, jonka jälkeen aukeavasta valikosta valittiin Material kohdasta Assignment, jota klikkaamalla saatiin näkyviin valittavissa olevat materiaalit.



Kuva 12. Vasemmalla projektipuusta, oikealla kappale verkotettuna.

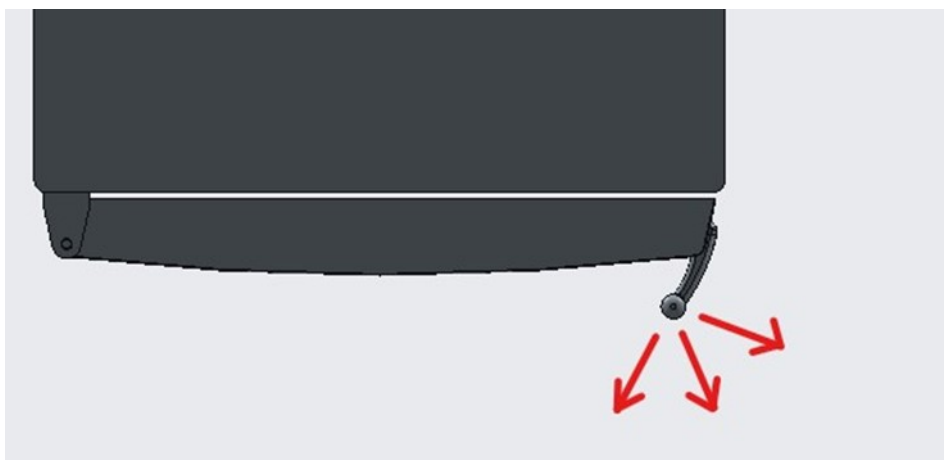
Kun materiaali oli määritelty, luotiin geometrialle verkko, eli mesh. Yleensä mitä pienempi/tiheämpi verkko on, sen tarkempia tuloksia saadaan. Tosin tiheämpi verkko on samalla myös raskaampi koneelle, jolloin laskenta-aika pitenee. Koska analysointiin käytetyssä tietokoneessa oli rajallisesti tehoa, pyrittiin tarpeettoman tiheän verkon käyttöä välttämään. Ansyksen opiskelijaversiossa solmujen ja elementtien määrää on myös rajoitettu (32 000), joten sillä ei kovin tiheää verkkoa ole mahdollista edes tehdä (ANSYS Inc, n.d). Näin ollen tiheämpi verkko keskittyi niihin kappaleen osiin, jotka olivat rasituksen kannalta mielenkiintoisimpia, eli kiinnikkeisiin. Kahvan putkimainen osa ei tässä tapauksessa kiinnostanut niin paljoa kuin kiinnikkeet, koska aiemman analyysin perusteella kiinnikkeet ovat kuitenkin todennäköisin kohta, josta rakenne pettää. Tämän perusteella kahvaosaan riitti hieman suurempi verkko.

Kahvan kiinnikkeisiin määriteltiin kolmen millimetrin ja kahvaosaan 10 millimetrin elementtikoko. Näillä arvoilla koko kahvan solmumääräksi muodostui 19315 ja elementtimääräksi 10425.

Kun verkko oli määritelty, asetettiin kappaleelle tarvittavat tuet. Kahvaan asetettiin sylinterituet kiinnikkeiden ruuvireikien kohdalle, jolla pyrittiin jäljittelemään tilannetta, jossa kahva on kiinni ovesa ehkä hieman löysillä ruuveilla. Löysillä siksi, että ruuvit tuppaavat tosielämässäkin ajan kanssa löystymään ja silloin kiinnikkeet pääsevät vapaammin liikkumaan ruvin ympärillä, joka saattaa osaltaan vaikuttaa kahvan kestävyYTEEN. Sylinteritukien lisäksi kiinnikkeiden päähän laitettiin tuet, joiden tarkoituksena oli estää kiinnikkeiden päiden ”uppoaminen” oven runkoon kahvaa väännettäessä.

Kahvaan kohdistuva voima asetettiin siten, että se jäljitteli normaalia jääkaapin avaamista kädellä niin, että ote on keskeltä kahvaa. Voiman suuntaa vaihdeltiin, jolloin saatiin selville minkälaisen voiman kahvan pettäminen vaatii mistäkin suunnasta vedettäessä.

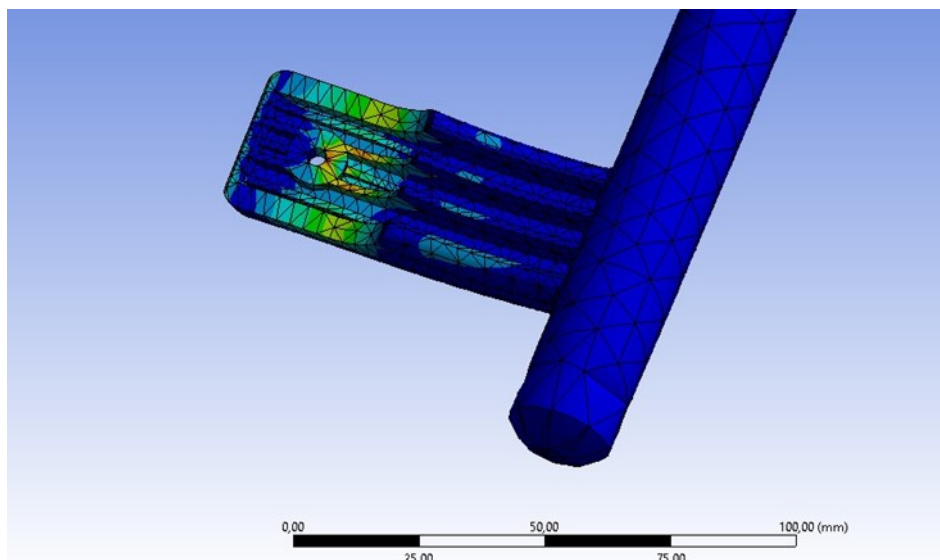
Jokaisesta kolmesta mallista (alkuperäinen, vahvistettu, vahvistettu alumiininen) selvitettiin niiden kesto vähiten ja eniten rasitusta aiheuttavassa vetokulmassa. Näiden lisäksi selvitettiin kesto tavallisessa/keskimääräisessä vetokulmassa (Kuva 13).



Kuva 13. Kahvan vetosuunnat.

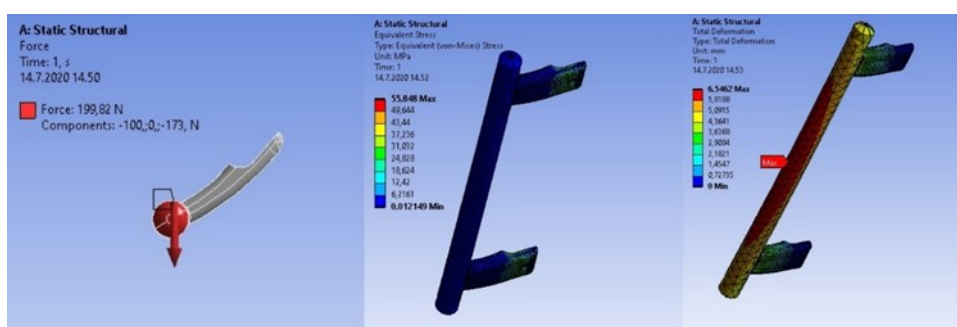
4.5 Analyysin tulokset

Kuten aiemmin vapaakappalekuvasta huomattiin, muodostuivat suurimmat rasitukset pääosin kahvan kiinnityskohtien läheisyyteen (Kuva 14).



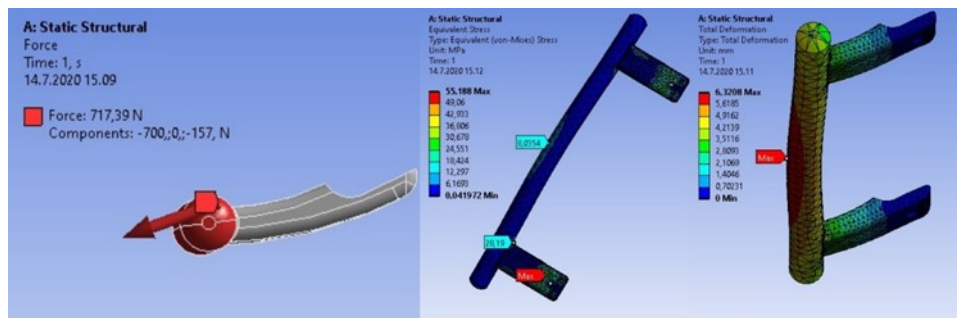
Kuva 14. Kahvaan muodostuvat jännitykset.

Ensimmäisessä testissä voima asetettiin ns. ”tyypilliseen” vetokulmaan, eli noin 45 asteen kulmaan kahvan kiinnityspintaan nähden. Tämä kulma vastaa jotakuinkin sitä, että ihminen seisoo hiukan kaapin sivussa niin, että ovi mahtuu aukenemaan ilman väistöliikkeitä, ja henkilö vetää kahvaa itseään kohti. Tässä pyrittiin siis jäljittelemään keskimääräistä käyttötapaa. Kun kahvaa vedettiin tässä kulmassa, vaadittiin noin 200 Newtonin voima, että jännitykset nousivat sille tasolle, jossa variota voi alkaa syntymään. Tämä on siis noin 10 kertainen voima siihen nähden mikä vaaditaan normaalisti oven avaamiseen (noin 20 N). Jännitysten lisäksi tutkittiin kahvan muodonmuutoksia. Suurimmat muutokset (6,5 mm) muodostuivat odotetusti kahvaosan keskelle, koska testissä kahvaa ikään kuin vedettiin keskeltä (kuva 15).



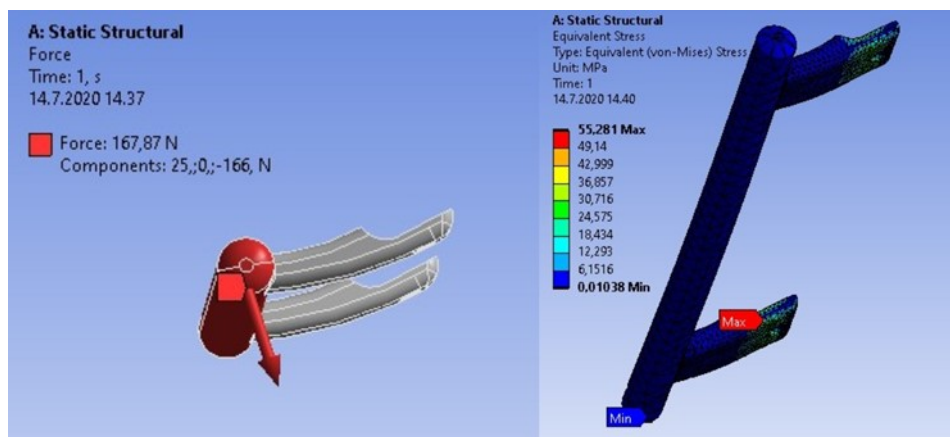
Kuva 15. Analyysin tuloksia normaalissa vetokulmassa.

Toisessa testissä kahvaa vedettiin oletetusti rakenteellisesti kestävämpään suuntaan, eli jotakuinkin samansuuntaisesti kahvan geometrian ja kiinnityspinnan kanssa. Tähän suuntaan vedettäessä tarvittiin vajaa nelikertainen voima, jotta päästiin samoihin jännityksiin kuin ensimmäisessä tilanteessa, eli noin 720 N (Kuva 16).



Kuva 16. Analyysin tuloksia kiinnityspinnan suuntaisesti vedettäessä.

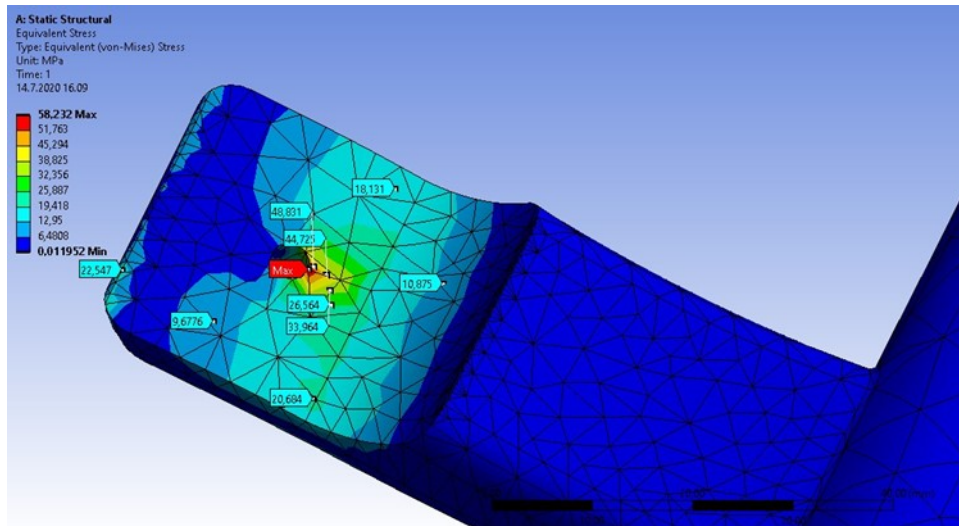
Kolmannessa testissä kahvaa vedettiin rakenteellisesti heikoimpaan suuntaan, eli noin 90 asteen kulmassa kiinnityspintaan nähden. Näin kahvaa vedettäessä, riitti noin 168 Newtonin voima aiheuttamaan mahdollisesti rakennetta vaurioittavia jännityksiä (Kuva 17).



Kuva 17. Analyysin tuloksia heikoimpaan suuntaan vedettäessä.

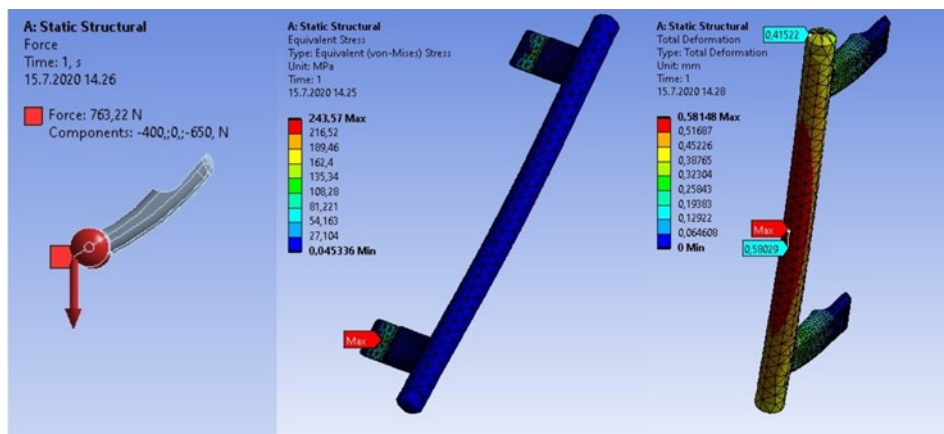
Tuloksista nähtiin, että kun kahvaa käytetään ns. normaalisti, sen kesto ei ole merkittävästi parempi verrattuna tilanteeseen, jossa sitä vedetään rakenteellisesti heikoimpaan suuntaan. Ero kestossa oli ainoastaan reilu 30 Newtonia. Sen sijaan ero vedettäessä rakenteellisesti kestävämpään suuntaan oli huomattava; reilu 500 Newtonia.

Hieman yllättäen materiaalin lisäys kiinnikeosiin ei lisännyt kahvan kestävyttä. Materiaalin lisäys kyllä jäykisti rakennetta hiukan. Alkuperäisessä mallissa kahva jousti 6 mm ja täytetyssä mallissa vain 4 mm. Mutta itse asiassa, kun kahvaa vedettiin samalla voimalla ja samasta suunnasta kuin ensimmäisessä tapauksessa, nousivat jännitykset jopa hiukan korkeammiksi (Kuva 18). Jännitykset myös olivat pienemmällä alueella. Eli materiaalin lisäys tällä tavalla ikään kuin kohdisti jännitykset pienemmälle alueelle ja aiheutti suuremman jännityspiikin kuin alkuperäisessä geometriassa. Tästä voisi päätellä, että "täytetyllä" geometrialla vaurioita voisi alkaa syntymään jo hieman pienemmässäkin rasituksessa.



Kuva 18. Jännityksiä ”täytetyssä” kiinnikkeessä.

Kun kahvan materiaali vaihdettiin alumiiniin, nousi kahvan kesto normaaliin käyttösuuntaan vedettäessä reilusti yli 700 Newtonin (kuva 19). Tällöin jännitys oli vajaa 250 MPa. Koska alumiinin murtoraja liikkuu seoksesta riippuen 200 MPa:n ja 450 MPa:n välillä, voi todellinen kesto voi olla vielä tätä huomattavasti korkeampi (tai myös hiukan matalampi), riippuen tosiaan täysin siitä, mitä alumiiniseosta on käytetty.



Kuva 19. Analyysin tuloksia alumiiniselle kahvalle.

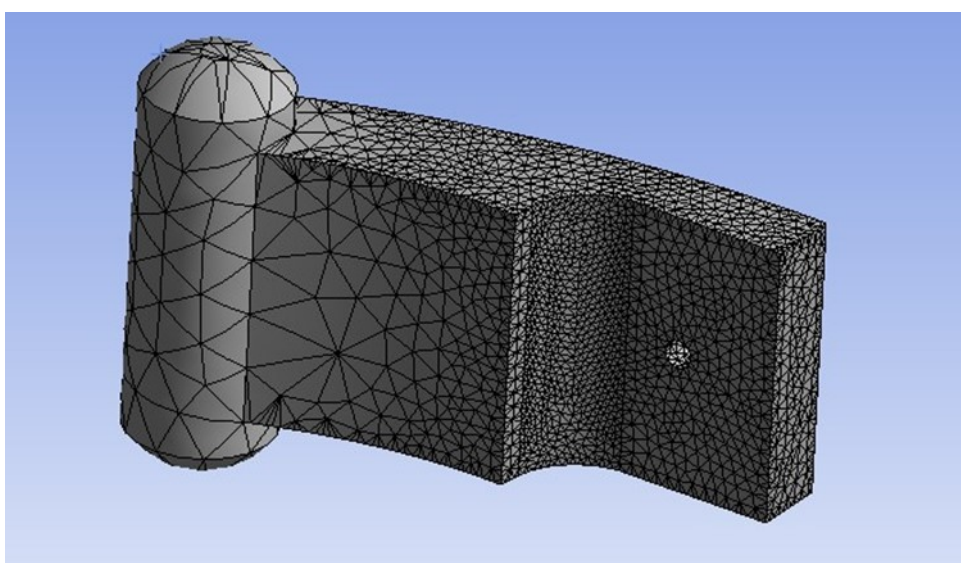
5 RAKENTEEN OPTIMOINTI

Nykypäivänä kaikessa suunnittelussa korostuu ekotehokkuus. Tämä tarkoittaa toimintojen tehokkuuden kasvua suhteessa niihin kuluviin materiaaleihin. Kappaleet tulisi siis suunnitella mahdollisimman kestäviksi ja monikäyttöisiksi, jonka lisäksi tulisi ottaa huomioon materiaalien uusiokäyttö ja kierrätettävyys. Tuotteiden ylimitoittamista on pyrittävä välttämään ja niiden materiaali ja muoto on optimoitava niin, että saavutetaan toiminnallisuuden ja teknisten vaatimusten kannalta paras mahdollinen tuote tai rakenne. (Salmi & Virtanen, 2008, s. 16)

5.1 Kiinnikkeiden topologiaoptimointi

Niin kuin FEM-analyysin tuloksista nähtiin, muodostuivat suurimmat rasituskohdat kahvan kiinnikkeisiin. Kahvan käsiosaankin toki kohdistui rasitusta, mutta ei niin paljon, että sillä olisi juurikaan merkitystä; kiinnikkeet pettävät reilusti ennen kuin kahva hajoaa. Osittain siitä syystä optimointi kohdistettiin vain kahvan kiinnikeosiin. Käsiosasta olisi toki ollut helppoa poistaa ainakin hiukan ylimääräistä materiaalia, mutta koska tämän optimoinnin ensisijaisena tarkoituksena oli lähinnä löytää keinoja lisätä kestävyttä siirtämällä materiaalia sieltä missä se ei rakennetta vahvista, sinne missä siitä on rakenteen kestävyuden kannalta enemmän hyötyä, eikä niinkään vähentää painoa/materiaalia, jätettiin kahvaputki ennalleen.

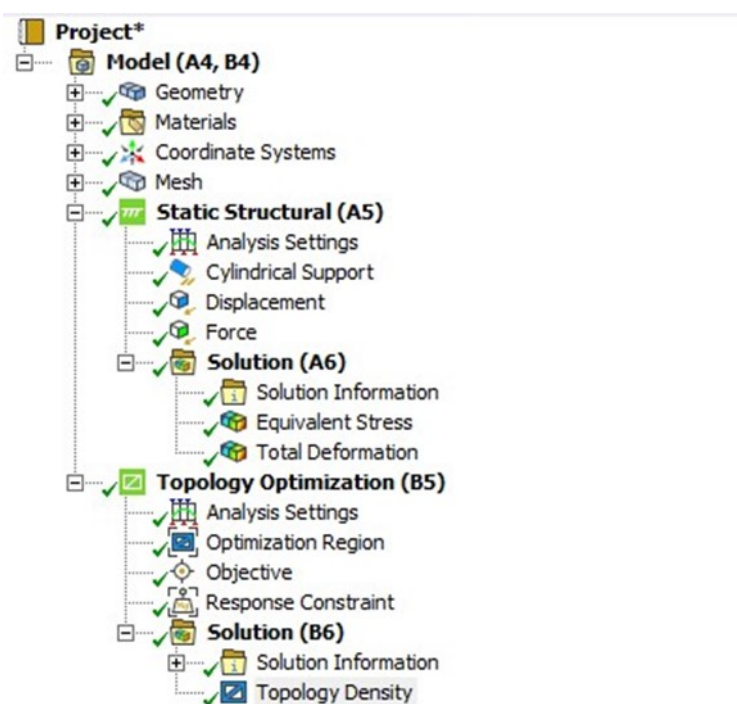
Koska optimoinnissa keskityttiin vain kiinnikkeisiin, ei ohjelmaan kannattanut tuoda koko kahvan geometriaa. Optimointia varten luotiin siis uusi malli, jossa oli vain toinen kiinnike hiukan suurennettuna ja pieni osa kahvaputkea (Kuva 20).



Kuva 20. Kiinnike topologiaoptimointia varten.

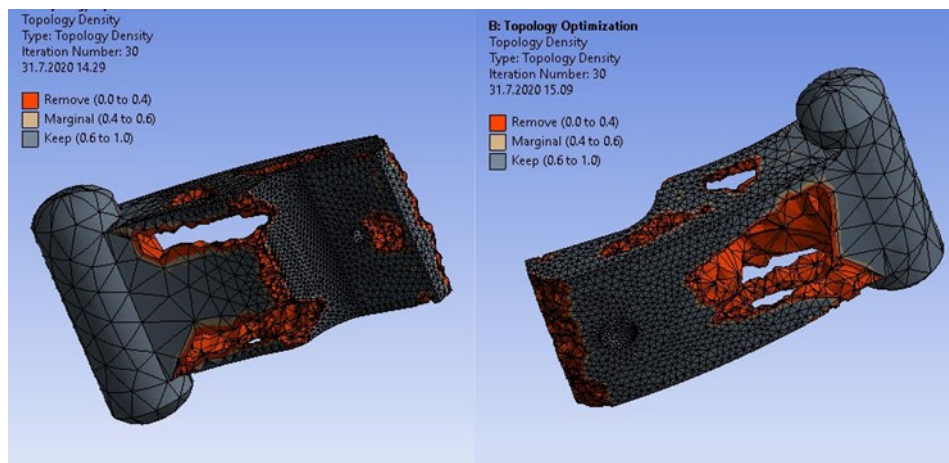
Uusi geometria tuotiin Ansykseen, avattiin "Static Structural" ja kappaleelle asetettiin samat tuennat ja voimat kuin aiemmissa analyysissäkin. Kahvaan kohdistuvan voiman suunnaksi asetettiin noin 45 asteen kulma kiinnityspintaan nähden, joka siis vastaa jotakuinkin tyypillistä kahvan käyttötilannetta.

Topologian optimointi tapahtuu Ansyksessä niin, että pääprojektinäkyvässä raahataan "Topology Optimization" vasemmalta työkalupuusta Static Structural laatikosta löytyvän "Solution" -kohdan päälle. Tämä linkittää analysointi- ja optimointitoiminnot keskenään. Kun ohjelmat on linkitetty, avataan "mechanical" tuplaklikkaamalla kohtaa "Model". Nyt nähdään, että vasemmalla projektipuusta löytyy Static structuralin lisäksi Topology optimization (Kuva 21).



Kuva 21. Projektipuu.

Ennen optimoinnin aloittamista määriteltiin "Optimization Region" kohdasta ne alueet, joita ei haluttu optimointiin sisällyttää. Tässä tapauksessa siis kahvanpätkä ja kiinnitysreikä. Koska optimoitavasta kappaleesta tehtiin jonkin verran isompi kuin alkuperäisestä mallista, asetettiin materiaalin poisto melko suureksi. Muutamien kokeiluiden jälkeen optimoinnin tavoitteeksi asetettiin 60 prosentin materiaalin poisto. Se tapahtui valitsemalla puusta Response Constraint, josta löytyi kohta "Percent to remain". Tähän laitettiin 40 %, eli ohjelma pyrki poistamaan 60 % valitun kappaleen tilavuudesta. Ratkaisemalla malli, saatiin kuvan 22 mukaiset tulokset.



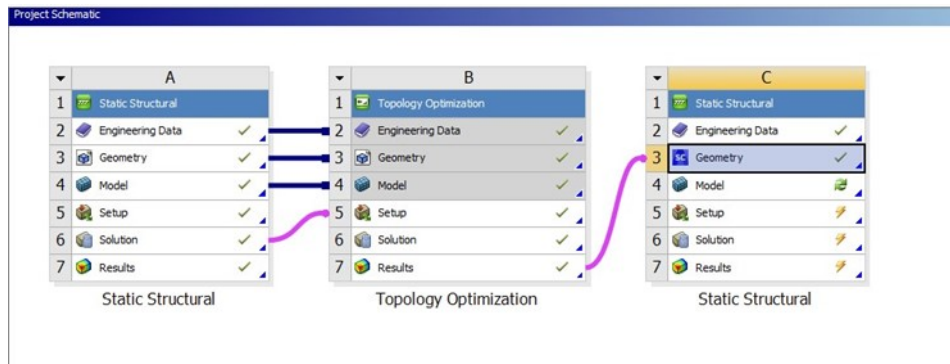
Kuva 22. Topologiaoptimoinnin tulokset.

Topologian optimointi on viime vuosina noussut enemmän esille, varmasti lisäävän valmistuksen kehityksen ja suosion myötä. Kun valmistusmenetelmä ei enää juurikaan rajoita kappaleen muotoa, saadaan optimoinnin edut, kuten rakenteeseen tarvittun materiaalin väheneminen, paremmin hyödynnettyä. (Westerlund, 2017)

Käytännössä topologian optimointi on rakenteiden optimointia lähes ilman rajoitteita. Siinä annetaan ohjelmiston kertoa missä materiaali on hyödyllisimmillään ja missä sitä ei tarvita. Usein tuloksena on verkkomainen kolmiulotteinen rakenne, jossa voimat pyritään kannattelemaan vetoja/tai puristussauvoilla. Tyypillisesti toimitaan niin, että mallinnetaan kappaleesta reilun kokoinen hahmotelma ja kerrotaan ohjelmalle rajoitukset mistä materiaalia ei saa poistaa, käytännössä siis ainakin kiinnityspinnat tarvitsevat materiaalia. Usein optimoitu geometria ei sellaisenaan kelpaa esimerkiksi liian pienistä muodoista tai esteettisistä syistä johtuen, vaan se vaatii vielä hiomista. Lopullinen rakenne voidaan mallintaa optimoitua rakennetta hyödyntäen. (Westerlund, 2017)

5.2 Geometrian putsaus

Kun kappale oli optimoitu, näytti se melko karkean/kulmikkaan näköiseltä. Seuraavaksi se pitikin "putsata", eli tasoitella terävät kulmat ja täyttää turhan pienet kolot yms. Tämä tehtiin klikkaamalla pää projektinäköymässä Topology optimization laatikon viimeistä kohtaa "results" hiiren oikealla ja valitsemalla "Transfer to design validation system". Tämä siirsi topologian optimoinnin seurauksena syntyneen geometrian uuteen static structuraaliin (Kuva 23).



Kuva 23. Näkymä pääikkunassa.

Sen jälkeen päivitettiin geometria ja avattiin SpaceClaim klikkaamalla Geometry ja ”edit in SpaceClaim”. Malliin voitiin nyt tehdä tarvittavat muokkaukset. Koska oma kokemus/osaaminen SpaceClaimin käytöstä on vähäistä, käytin geometrian silotteluun pääasiassa vain ”shrinkwrap” ja ”smooth” työkaluja. Näillä melko yksinkertaisilla keinoilla päästiin kuitenkin siedettävään lopputulokseen. Kun mallista oli isoimmat kuopat ja kumpareet tasoiteltu, tallennettiin se stl -tiedostomuotoon.

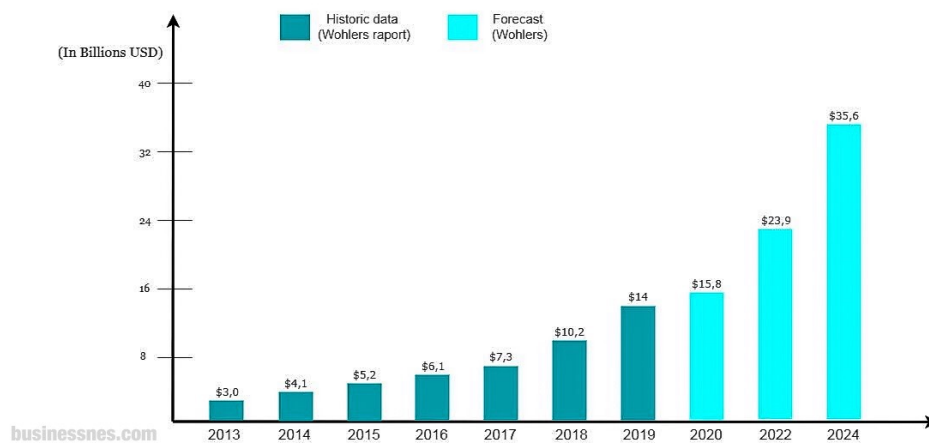
6 3D -TULOSTUS

Kun tarvittavat mallit olivat valmiina, tehtiin niiden perusteella muutamia 3D-tulosteita rasiustestejä varten. Malleja oli kolme erilaista ja niistä tehtiin jokaisesta tulosteet kahdella eri säädöllä.

6.1 3D-tulostuksen periaate ja edut

Lisävä valmistus, tai yleisemmin 3D-tulostus on ollut teollisessa käytössä 80-luvulta lähtien. Siinä kappaleet luodaan printtaamalla kerros kerrokselta, jolloin kappaleeseen siis lisätään materiaalia; päinvastoin kuin perinteisissä valmistustavoissa, joissa kappale muodostetaan poistamalla materiaalia. Teknologia tuli laajemmin kuluttajien käyttöön 2010-luvun kiepeillä, kun avoimeen lähdekoodiin perustuvat printterit alkoivat yleistyä ja kehittyä. Nykyisin 3D-tulostinteollisuus on jo noin 15 miljardin dollarin business ja se kasvaa vuosi vuodelta nopeammin (kuva 24). (Wallach Kloski & Kloski, 2016, s. ix)

3D Printing Market Size & Forecast 2013 - 2024



Kuva 24. 3D-tulostus markkinan kasvu (businessnes.com, 2019)

3D-tulostustekniikoita on olemassa useita, mutta yleisemmin käytettyjä ovat:

- FDM/FFF (Fused deposition modeling/Fused filament fabrication), jossa muovilankaa pursotetaan suuttimen läpi kerros kerrokselta tulostusalustalle. Tulosteissa näkyy yleensä melko selkeät kerrosrajat.
- SLA (Stereolithography), jossa tulostusalusta on upotettuna resiniillä täytettyyn astiaan, jonka pohja on läpinäkyvä. UV-valolla kovetetaan resiniä tulostusalustan pinnalle samalla kun tulostusalusta nousee ylöspäin. Pinnanlaatu on erittäin tarkkaa, mutta tulostusprosessi voi olla sotkuista, jonka lisäksi tuloste vaatii aina kohtuu työlään jälkikäsittelyn.
- SLS (selective laser sintering), jossa tulostusmateriaalina käytetään pulveria. Tulostin levittää ohuen kerroksen pulveria tulostusalustalle, jonka jälkeen hiukkaset sulatetaan toisiinsa laserilla. Tämän jälkeen lisätään uusi kerros pulveria ja se taas sulatetaan edellisen päälle jne. Laitteet ovat suuria ja hintavia, mutta tulosteet ovat yleensä kestäviä eikä tulostuksessa tarvita tukirakenteita.

Jokaisella näistä teknologioista on omat vahvuutensa ja rajoituksensa. Yleisin teknologioista on FDM, johtuen sen helppokäyttöisyydestä ja edullisuudesta. Sen lisäksi sille on saatavilla monipuoleinen materiaalivalikoima. (Maker 3D, 2018)

Lisävän valmistuksen etuja perinteiseen valmistukseen nähden ovat mm. tehokkuus ja joustavuus erityisesti pienten tuotantomäärien kohdalla, geometrinen vapaus ja kappaleiden kustomointimahdollisuudet sekä pienempi materiaalihukka. Näiden lisäksi tuotteita pystytään tuottamaan jopa paikallisesti, jolloin toimitusajat ja -kustannukset pienentyvät. (Alonen, Alonen & Hietikko, 2016, s. 7)

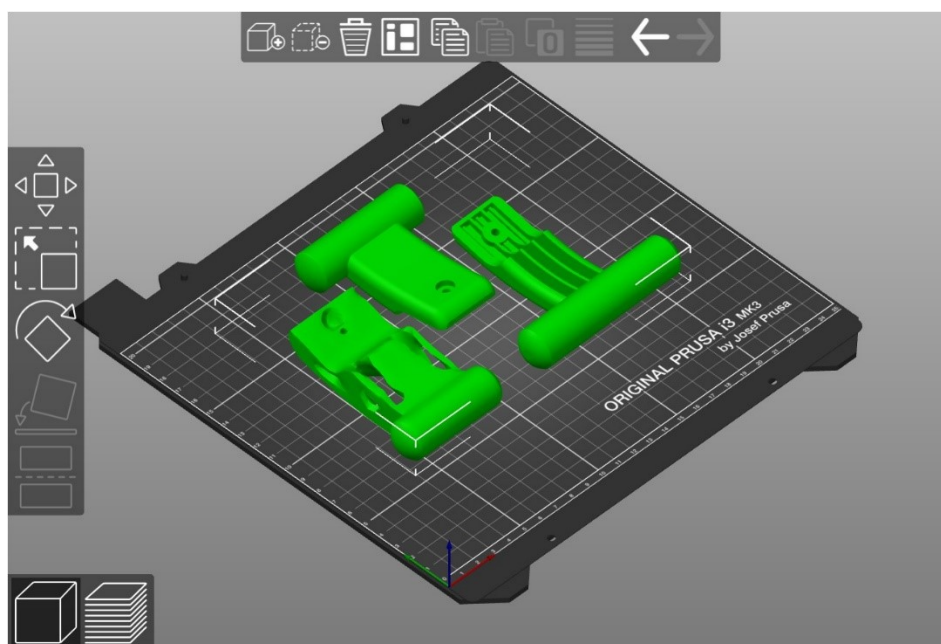
6.2 Tulostuksen valmistelu

Kun kaikki printattavat mallit olivat valmiina ja tallennettuna stl-tiedostomuotoon, tuotiin ne viipalointiohjelmaan (slicer), jossa yleensä säädetään kaikki printtaamiseen liittyvät asetukset, kuten esimerkiksi kappaleen sijoittelu, laatu, täyttö, tuennat jne. Koska mallien tulostukseen käytettiin Prusan i3 MK3S -tulostinta, käytettiin myös viipalointiin Prusan PrusaSlicer -ohjelmaa.

6.2.1 Mallien tuonti ja asettelu

Kun PrusaSlicer ohjelman avaa, näkyy näytöllä virtuaalinen tulostusalusta, johon mallit tuodaan. Mallien tuonti ohjelmaan käy helposti drag and drop-periaatteella tai siihen voidaan toki myös käyttää "import"-toimintoa. Ohjelma on myös kohtuullisen fiksua, ja osaa usein laittaa kappaleen valmiiksi hyvään asentoon. Jos malleja kuitenkin haluaa siirrellä/käännellä/pyörittellä, käy se helposti vasemmalla olevista painikkeista.

Koska kahvamalleja oli kolme erilaista, ja koska ne eivät olleet erityisen suuria, printattiin ne ajan säästön vuoksi kaikki yhdellä kertaa (kuva 25). Tästä tietysti aiheutui riski, että tulosteen epäonnistuessa kaikki kappaleet olisivat olleet pilalla, mutta tällä kertaa ongelmilta vältyttiin. Mallit pyrittiin asettelemaan alustalle niin, että tukirakenteita tarvittaisiin mahdollisimman vähän. Tukirakenteet joudutaan yleensä lopuksi poistamaan käsin, eikä se aina ole kovin helppoa, joten mitä vähemmän tukirakenteita tarvitaan, sen parempi. Ylimääräisen työn lisäksi tukirakenteet heikentävät myös pinnanlaatua niiltä osin missä kohdissa niitä on käytetty.



Kuva 25. Kappaleet slicer-ohjelmassa.

6.2.2 Tulostuksen asetukset

Viipalointiohjelmassa säädetään kappaleen asettelun lisäksi mm. printin laatu eli resoluutio, käytetty materiaali (filament), tukirakenteet, täyttö. Ihan ensimmäiseksi ohjelmaan määritetään tulostimen malli sekä käytettävän tulostuslangan tiedot. Tässä tapauksessa käytettiin oranssia PETG filamenttia, ensinnäkin siitä syystä, että se sopi ominaisuuksiensa puolesta tähän käyttötarkoitukseen ja toisekseen siksi, että se oli printteriin jo valmiiksi asetettuna.

3D-tulostuksessa resoluutioon vaikuttaa suuttimen (nozzle) koon lisäksi printin kerroskorkeus. Tyypillisesti se on jotain 0,05 mm ja 0,3 mm väliltä. Kerroskorkeus vaikuttaa laadun lisäksi tulostusaikaan; mitä parempi laatu, sitä kauemmin tulostaminen kestää, koska tulostin joutuu tekemään enemmän kerroksia.

Kiinnikkeet tulostettiin 0,2 mm kerroskorkeudella, joka on verrattain karkea pinnanlaatu, mutta koska kappaleet ovat tarkoitus myöhemmin rikkoo rasiustestissä ja saatuja tuloksia vertaillaan vain samalla laadulla tulostettujen mallien kesken, ei sillä tässä tapauksessa ollut kovin suurta merkitystä.

Kappaleet pyrittiin asettelemaan niin, että tukirakenteita tarvittaisiin mahdollisimman vähän. Toisin sanoen pyrittiin minimoimaan kohdat, joissa printteri joutuisi tulostamaan "ilman päälle". Ohjelma luo tukirakenteet tarvittaviin kohtiin automaattisesti, mutta tämä voidaan haluttaessa tehdä manuaalisestikin.

Kiinnikkeet tulostettiin kahdella eri täyttöasetuksella; 40 % ja 60 % täytöllä ja "gyroid" täyttökuviolla. Tämä kahdesta syystä: toisaalta mielenkiinnosta, kuinka täyttö vaikuttaa kappaleen kestävyYTEEN ja toisaalta rasiustestien tulosten luotettavuuden kannalta: näin saadaan kaksi ryhmää, joiden vertailutulosten pitäisi olla samankaltaisia. Jos jokin kappaleista on yhdellä täyttöasetuksella verrattain reilusti heikompi kuin toisella, voidaan silloin epäillä, että printissä on ollut jokin rakenteellinen vika.

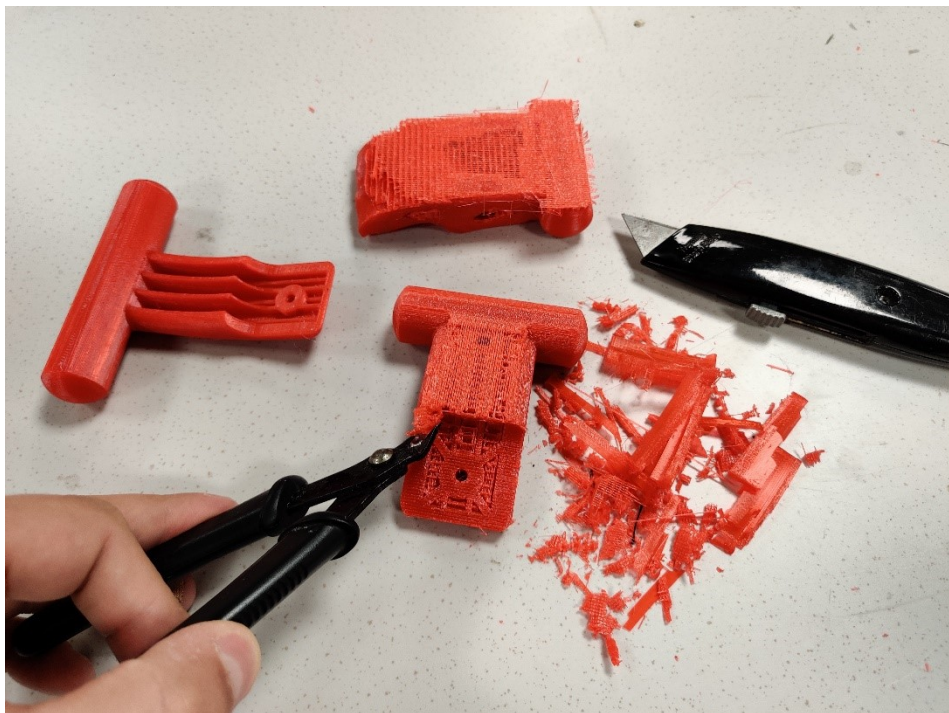
6.2.3 Mallin viipalointi ja G-koodin luonti

Viipalointiohjelma nimensä mukaisesti viipaloi kappaleet pieniksi vaakasuuntaisiksi tasoiksi (layer), joista muodostuu kerroksittainen "kartta", jossa näkyy kohdat joihin ainetta pitää pursottaa. Kerrosten lukumäärä riippuu asetetusta kerroskorkeudesta. Tämän "kartan" pohjalta luodaan lopuksi G-koodi, joka määrittää printterin liikkeitä. Kun G-koodi on luotu, siirretään se printterille. Tässä tapauksessa koodin siirto tapahtui SD-kortilla, mutta tulostimesta riippuen se voi tapahtua myös USB-tikulla tai verkon välityksellä.

6.3 Tulostus

Tulostus itsessään oli suhteellisen helppo toimenpide. Koska printteri oli ollut aktiivisessa käytössä, oli siinä asetukset kohdallaan ja filamenttirulla (PETG) paikallaan. Ennen printtauksen aloittamista ei siis tarvittu tulostusalustan putsaamista kummempia toimenpiteitä. Kun printteri oli kytketty päälle ja esilämmitetty, G-koodin sisältämä muistikortti työnnettiin printteriin ja valittiin näytöltä oikea tiedosto. Tulostin teki alkukalibroinnin ja rupesi tulostamaan. Tulostusaika oli tässä tapauksessa noin 15 tuntia per tiedosto (2 kpl), joten printtaus tapahtui pääosin illan ja yön aikana. Tulostusta vahdittiin kuitenkin aluksi sen verran, että voitiin varmistua, että tuloste oli tarttunut kunnolla tulostinpetiin.

Molemmat tulostukset onnistuivat ensiyrittämällä, eikä tulostuslaadussa ollut valittamista. Vaikka tukirakenteita oli pyritty minimoimaan, oli niitä siitä huolimatta kohtuullisen paljon poistettavana (Kuva 26). Tämä oli joissain kohdissa hiukan hankalaa ja pinnanlaatu jäi osittain vähän karheaksi. Suurimpia karheuksia hiottiin lopuksi hiomapaperilla pois.



Kuva 26. Tukirakenteiden poistoa kappaleista.

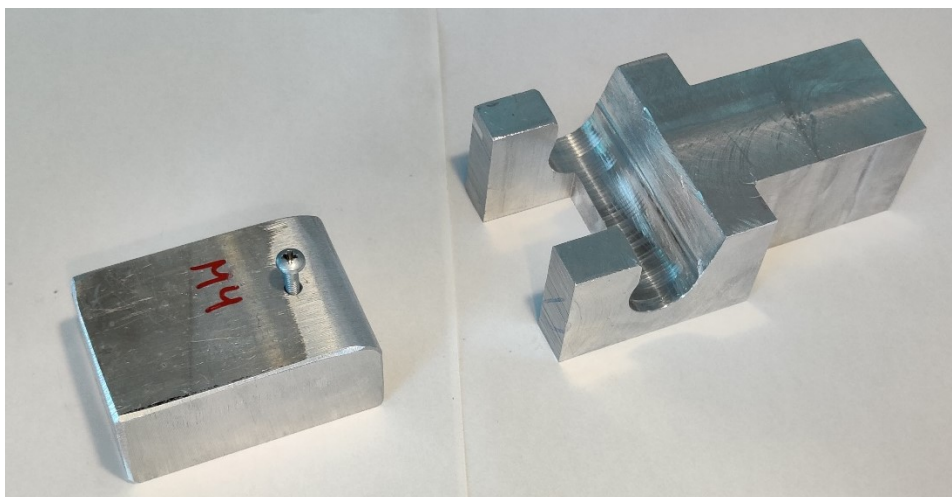
7 KUORMITUSTESTAUKSET

3D-tulostetuille kappaleille tehtiin kuormitustestaukset käyttäen veto-puristuslaitetta. Testimalleja oli kolme erilaista, jokainen kahdella eri tulosasetuksella; eli yhteensä kuusi kappaletta. Kokeen tarkoituksena oli selvittää mikä malleista oli kestävin ja kuinka paljon suhteessa muihin. Samalla voitiin tutkia, olivatko tulokset linjassa aiempien simulointien kanssa.

Simulointimenetelmien kehittyminen on mahdollistanut tuotteiden testaamisen ja toiminnallisuuden tarkastelun jo suunnitteluvaiheessa. Kuitenkin jos käytettävissä on jonkinlainen fyysinen tuote, prototyyppi, jonka avulla voidaan suorittaa tosielämän testejä, voidaan simulaatiosta ja testeistä saatua dataa yhdistellä, jolloin saadaan paljon paremmin todellisuutta muistuttavia simulointimalleja. Prototyyppiä fyysisesti testaamalla voidaan myös vähentää virheiden mahdollisuutta simuloinneissa ja näin helpottaa riskienhallintaa. (Hietikko, 2015, s. 195)

7.1 Testijärjestelyt

Kahvan testilaitteeseen kiinnitystä varten tehtiin alumiinista koneistamalla sekä oven ulkopintaa mukaileva jigi, että kahvan vetoon soveltuva koukkuomainen jigi (kuva 27).



Kuva 27. Jigit vetokoetta varten.

Kahva kiinnitettiin ruuvilla ”ovi”-jigiin, joka puolestaan kiinnitettiin testauslaitteen alempaan puristimeen. Alempi jigi oli alun perin tarkoitus kiinnittää niin, että vetokulmasta olisi muodostunut noin 50 astetta kiinnityspintaan nähden, mutta koska testilaitteessa oli hyvin rajallisesti tilaa jigeille, ei se ollut mahdollista. Vetokulma jouduttiin jättämään suurin piirtein 20–30 asteeseen. Tästä syystä kappaleet kestivät huomattavasti

odotettua enemmän rasiutusta. Koukku-jigi puolestaan kiinnitettiin vetokoneen ylempiin puristimiin (Kuva 28).



Kuva 28. Kappale ja jigit paikallaan vetokoneessa.

Testattavia malleja oli kolme erilaista (suluissa lyhenne):

1. alkuperäinen (A)
2. topologiaoptimoitu (O)
3. analysoinnin perusteella paranneltu (B).

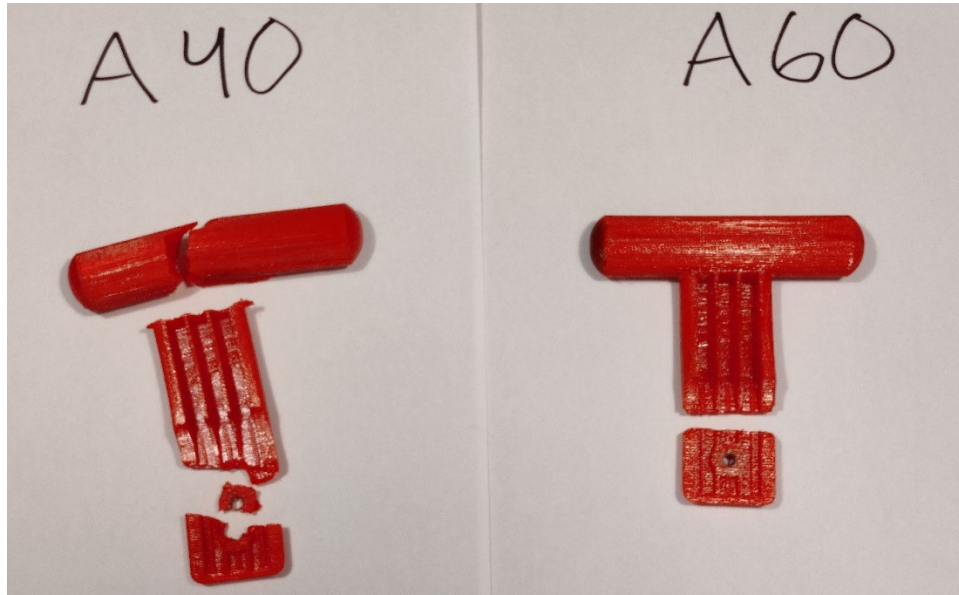
Kappaleet merkittiin testissä lyhenteillä A, B, & O ja kirjaimen perään lukuna tulosten täyttöaste 40 tai 60. Eli esimerkiksi topologiaoptimoitu malli 60 % täytöllä merkittiin lyhenteellä O60.

7.2 Tulokset

Testissä käytetyt asetukset ja tarkemmat mallien testitulokset löytyvät liitteestä 1. Kappaleet testattiin ”pareittain”, eli saman mallin molemmilla täytöillä tulostetut kappaleet peräjälkeen. Näin jigejä ei tarvinnut siirrellä/säätää jokaisen testin välissä.

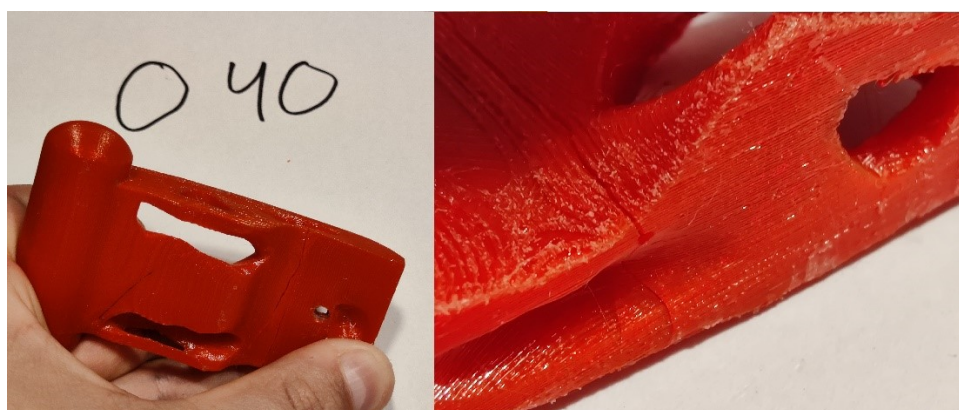
Ensimmäisenä testattiin A40, eli alkuperäinen malli 40 % täytöllä. Se kesti noin 1,92 kN voiman. Kappale oli testatuista ainoa joka ns. pirstaloitui

useampaan osaan (kuva 29), joten heikointa kohtaa on varmuudella vaikea sanoa, mutta todennäköisesti se oli ruuvin reiän läheisyydessä, niin kuin aiemmissa simuloinneissakin. Toisena testattiin A60, joka puolestaan rikkoutui 1,77 kN voimasta, mutta vain yhdestä kohtaa; läheltä ruuvinreikää, jossa materiaalia on vähiten.



Kuva 29. Kappaleet A40 ja A60 rasitustestin jälkeen.

Alkuperäisten kappaleiden jälkeen testattiin topologiaoptimoidut mallit. O40 rikkoutui 0,57 kN voimasta ja O60 puolestaan 0,69 kN voimasta. Kummatkin murtuivat samasta kohtaa (kuva 30). Kappaleet siis eivät hajooneet useampaan osaan, vaan niihin muodostui pieni murtumalinja, joka oli tarpeeksi pysäyttämään testilaitteen. Kappaleita täytyi jonkin verran taivutella ennen kuin murtumia pystyi kunnolla näkemään.



Kuva 30. Murtumalinja kappaleissa O40 ja O60.

Viimeisenä testattiin kappale B40, eli alkuanalyysin perusteella itse paranneltu malli. Tämä kappale osoittautui kaikkein kestävimmäksi, eikä sille

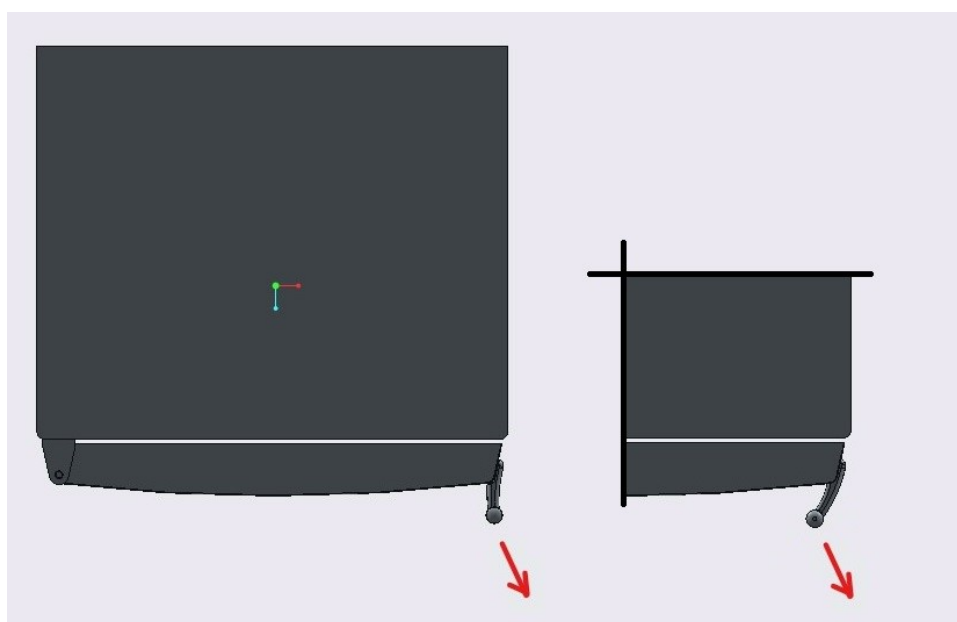
itseasiassa saatu varsinaista kestolukemaa ollenkaan, koska kiinnitysruuvi katkesi vajaan 2,5 kN kohdalla, ennen mallin hajoamista (kuva 31).



Kuva 31. Malli B40 ja katkennut kiinnitysruuvi.

Koska ruuvi katkesi jigin sisään, eikä sitä siihen hätään saatu kaivettua ulos, jätettiin malli B60 testaamatta. Osin siitäkin syystä, että tässä vaiheessa oli jo selvää, mikä geometrioista oli testin kestävin.

Parhaiten testissä pärjäsi siis analysoinnin perusteella itse paranneltu malli, joka ei testissä hajonnut ollenkaan. Tässä mallissa sen geometriaa oli muokattu niin, että siihen kohdistuvaa vääntöä oli pyritty vähentämään, joka todennäköisesti oli suurin tekijä miksi malli kesti niin hyvin (kuva 32).



Kuva 32. Vasemmalla muokattu kahvamalli ja oikealla alkuperäinen.

Toiseksi parhaiten pärjäsikin testin mukaan alkuperäinen malli, joka hajosi pitkälti samasta kohtaa kuin mistä se tosielämässäkin yleisimmin hajoaa. Alkuperäisen mallin kohdalla pienemmällä, eli 40 prosentin täytöllä tulos-tettu kappale oli ehkä hieman yllättäen kestävämpi kuin isommalla täytöllä tulostettu malli.

Huonoiten testissä pärjäsikin topologiaoptimoitu malli. Tosin ensinnäkin testi jäi hiukan näiden mallien kohdalla kesken, koska testilaitte oli säädetty niin, että kohtuullisen pienikin voiman pudotus pysäyttää testin. Tästä syystä jo ensimmäinen pieni murtuma pysäytti vetolaitteen. Toiseen testiin jouduttiin tehdä vähän eri kulmassa kuin mihin malli oli alun perin optimoitu. Huomionarvoista näiden mallien kohdalla kuitenkin oli se, että murtumia ei syntynyt niihin kohtiin, josta optimointiohjelma oli materiaalia poistanut. Sen sijaan murtuma muodostui pitkälti samaan kohtaan kuin alkupe-räisissäkin malleissa.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli suorittaa rakenneanalyysi ja optimointi UPO-merkkisen jääkaappiakastimen ovenkahvalle, sekä samalla käydä läpi ky-seiseen prosessiin liittyviä tekniikoita ja teemoja. Kahvan osalta tavoit-teena oli ensinnäkin selvittää, miksi kahva oli niin hajoamisaltis, ja toiseksi miten siitä saataisiin kestävämpi, kuitenkin muotokieleen liikaa puuttu-matta.

Prosessi aloitettiin kappaleen pintapuolisella analysoinnilla ja lujuustarkas-telulla. Siinä saatiin selville, että kappale oli valmistettu ABS-muovista pai-nevalutekniikalla. Kahvan ongelmakohtaksi osoittautui pääasiassa sen geometria, ei niinkään materiaali; kappaleen heikoin/ohuin kohta oli sa-malla se, johon kohdistui normaalissa käyttötilanteessa suurimmat rasituk-set. FEM-analyysin perusteella kahvaa rakenteellisesti vahvimpaan suun-taan vedettäessä kesti se noin 720 N voiman, kun taas heikoimpaan suun-taan vedettäessä vain 170 N. Normaaliin suuntaan vedettäessä kesto oli noin 200 N.

Vastaus kysymykseen ”miksi kahva on niin hajoamisherkkä?” on yksinker-taisesti siis se, että kahva on huonosti suunniteltu; sen muotoilu ja kiinni-tyskulma aiheuttavat sen, että kahvan normaali käyttösuunta on lähellä sen rakenteellisesti heikointa suuntaa. Hyvin suunnitellussa kappaleessa asia tulisi olla juuri päinvastoin.

Kahvan kesto osoittautui riittäväksi silloin, kun sitä vedettiin rauhallisesti ns. normaalivoimalla suoraan tai pienessä kulmassa ulospäin, mutta mitä isompi vetokulma oli, sitä suurempi rasitus siihen kohdistui ja vaurioiden todennäköisyys kasvoi. Myös esimerkiksi tilanteessa, jossa ovi hetkellisesti ”lukittuu” alipaineen takia, joutuu henkilö käyttämään normaalia

enemmän voimaa oven avaamiseen, joka taas saattaa johtaa kahvan rikkoutumiseen.

Kahvan muotoilua pyrittiin saamaan kestävämmäksi kahdella eri tavalla; topologiaoptimoimalla sekä rakenneanalyysin perusteella tehdyillä muokkauksilla. Näistä kahdesta lähestymistavasta kahvan geometrian muovaaminen ”manuaalisesti” osoittautui reilusti tehokkaammaksi keinoksi. Topologian optimointi ei testien mukaan lisännyt kestävyyttä alkuperäiseen malliin verrattuna. Tosin itselläni jäi sellainen olo, että optimoinnin ja eteenkin mallin jälkikäsitteilyn olisi pystynyt tehdä vielä paremminkin, jonka seurauksena mallin kestävyyttä oli ehkä saatu vielä hieman nostettua. Mutta tuskin yhtä paljon kuitenkaan kuin toisella käytetyllä keinolla.

Alkuperäisen kiinnikkeen mukainen malli, sekä parannellut kiinnikemallit printattiin PETG filamentista 40 ja 60 prosentin täytöillä. Kappaleille suoritettiin rasitustestit vetokoelaitteella. Tulosteiden täyttöasteella ei näyttänyt olevan kovin suurta vaikutusta kappaleiden keston, ainakaan kun ero täytössä oli näin pieni. Malleista itse paranneltu oli testin mukaan kestävin; sitä ei testissä saatu edes rikkottua, vaan ennen kahvan pettämistä hajosi sitä kiinni pitävä ruuvi.

Näin jälkikäteen ajateltuna testi olisi kannattanut tehdä vetämisen sijaan puristamalla. Silloin testaamiseen olisi ollut enemmän tilaa ja siihen olisi riittänyt vain yksi jiggi. Kappaleet olisi silloin pystytty kiinnittämään oikean kulman lisäksi kaikki samaan kulmaan ja tulokset olisivat olleet silloin paremmin vertailukelpoisia.

Miten kahvan kesto sitten pystyttäisiin nostamaan? Tähän olisi analyysien ja testien perusteella kaksi vaihtoehtoa. Jos muoto halutaan pitää mahdollisimman lähellä alkuperäistä, paras vaihtoehto olisi vaihtaa materiaali ABS-muovista alumiiniin. Tässä vaihtoehdossa kahva olisi todennäköisesti riittävän vahva, mutta riskinä on, että kahvan kiinnitysruuvit eivät kestäisi käytöstä aiheutuvaa vääntöä. Toisena vaihtoehtona on muodon muuttaminen niin, että kahvaan kohdistuu vähemmän taivutusta. Tällöin alkupe- räistä muotoa joudutaan hiukan muuttamaan, mutta materiaali voidaan pitää samana. Itse valitsisin näistä kahdesta vaihtoehdosta alumiinisen kahvan. Kestävyuden lisäksi metallinen materiaali antaisi koko jääkaappi- pakastimesta hiukan laadukkaamman kuvan.

LÄHTEET

AEG. (2020). Asiakastuki: AEG. Kylmälaitteen ovea on hankala avata. Haettu 15.6.2020 osoitteesta <https://www.aeg.fi/support/support-articles/kylmasailytys/jaakaappipakastin/kylmalaitteen-ovea-on-vaikea-avata/>

Aikolon. (2019). Muovimateriaalit: ABS. Haettu 2.6.2020 osoitteesta <https://www.aikolon.fi/tuotteet/perusmuovit/abs>

Alonen, A., Alonen, L. & Hietikko, E. (2016) *Lisäävän valmistuksen perusteet*. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu

ANSYS Inc. (n.d.). Academic: Free Student Software Downloads. Haettu 10.7.2020 osoitteesta <https://www.ansys.com/academic/free-student-products>

businessnes.com. (2019). 3D Printing Market Size & Forecast 2013 – 2024. Haettu 9.9.2020 osoitteesta <https://businessnes.com/is-3d-printing-business-profitable-2019-market-analysis/>

Camsol Inc. (2017). Multiphysics: Mesh Refinement. Haettu 18.6.2020 osoitteesta <https://www.comsol.com/multiphysics/mesh-refinement>

Hietikko, E. (2015). *Tuotekehitystoiminta*. Helsinki: BoD – Books on Demand

Lee, H-H. (2017) *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 17*. Mission, Kansas: SDC Publications.

MakeItFrom.com. (2020). Compare: Aluminum vs ABS. Haettu 15.7.2020 osoitteesta <https://www.makeitfrom.com/compare/6061-ALMg1SiCu-3.3214-H2O-A96061-Aluminum/Acrylonitrile-Butadiene-Styrene-ABS>

Maker 3D. (2018) Vertailussa FDM-, SLA- ja SLS-teknologiat. Haettu 3.10.2020 osoitteesta <https://www.3d-tulostus.fi/uutiset/Vertailussa-FDM-SLA-ja-SLS-teknologiat>

Manor Tool & Manufacturing Company. (2020). The Benefits of Finite Element Analysis in Manufacturing. Haettu 1.9.2020 osoitteesta <https://www.manortool.com/finite-element-analysis>

Muoviyhdistys ry. (2016). Tietoa muovista: Muovien työstö: Ruiskuvalu. Haettu 28.8.2020 osoitteesta <https://www.muoviyhdistys.fi/2016/07/18/osa-9-muovien-tyosto-ruiskuvalu/>

Salmi, T. & Virtanen, S. (2008) *Materiaalien mekaniikka*. Tampere: Klingendahl Paino Oy

Suomi24. (2006) Keskustelut: Jääkaapin ovenkahva? Haettu 20.6.2020 osoitteesta <https://keskustelu.suomi24.fi/t/2528129/jaakaapin-ovenkahva>

Wallach Kloski, L. & Kloski, N. (2016). *Getting Started with 3D Printing*. San Francisco: Maker Media Inc.

Westerlund, V. (2017) Topologian optimoinnin hyödyntäminen. Blogijulkaisu 29.5.2017. Haettu 8.9.2020 osoitteesta <https://huld.io/fi/nakemyksia/blogi/topologian-optimoinnin-hyodyntaminen/>

Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. & Zhu, J.Z. (2013) *The Finite Element Method: Its basis and Fundamentals*. Waltham, Massachusetts: Butterworth-Heinemann

KAHVAN VETOKOKEET

Name	Test speed	Pre-load	Test speeds	Date	F_m	S_0	t_{Test}
	1/s	N			kN	mm ²	s
A40	0,01	200	Method B	28.9.2020	1,91617	962,11	11,12
A60	0,01	200	Method B	28.9.2020	1,77280	962,11	9,18
O40	0,01	200	Method B	28.9.2020	0,57470	962,11	5,78
O60	0,01	200	Method B	28.9.2020	0,68712	962,11	6,2
B40	0,01	200	Method B	28.9.2020	2,43120	962,11	12,53

Series	Test speed	Pre-load	Test speeds	Date/Clock time	F_m	S_0	t_{Test}
n = 5	1/s	N			kN	mm ²	s
x	0,01	200		44102,61	1,849596	962,113	8,962
s	0	0		0,006329	1,328128	0	2,96601
v	0	0		1,44E-05	71,80636	0	33,0954

