



KOTELOINTI CNC-KONEELLE

Tommi Chan

Metropolia Opinnäytetyö

Teollinen muotoilu

KXE16S1TM

2020

OPINNÄYTETYÖN AIHE

CNC-KONEEN KOTELO

Passiivinen
Äänen vaimennus

2.0 koteloratkaistu

Aktiivinen
Äänen vaimennus

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyökseni suunnittelen CNC-koneelle koteloinnin, aiheeni tulee keskittymään kahdenlaiseen äänenvaimennusratkaisuun, passiiviseen ja aktiiviseen. Lopuksi luon näiden kahden ratkaisun parhaita puolia yhdistelemällä 2.0-kotelosuunnitelman.

TEKIJÄ	Tommi Chan
OTSIKKO	KOTELOINTI CNC-KONEELLE
SIVUMÄÄRÄ	57
PÄIVÄMÄÄRÄ	4.5.2020
KOULU	Metropolia Amattikorkeakoulu
TUTKINTO	Muotoilija(AMK)
KOULUTUS- OHJELMA	Muotoilun koulutusohjelma
SUUNTAUS	Teollinen muotoilu
OHJAAJAT	Mika Ihanus, Ville-Matti Vilkkä

ABSTRACT

As my thesis, I plan a casing for a CNC-machine. I will investigate both active and passive noise cancelling, and finally combining the best parts of both, I make a plan for a casing 2.0

AUTHOR	Tommi Chan
TITLE	KOTELOINTI CNC-KONEELLE
NUMBER OF PAGES	57
DATE	4.5.2020
UNIVERSITY	Metropolia University of applied science
DEGREE	Bachelor of Culture & Art
DEGREE PROGRAMME	Design
SPECIALISATION	Industrial Design
INSTRUCTORS	Mika Ihanus, Ville-Matti Vilkkä

SISÄLLYS

PASSIIVINEN ÄÄNENVAIMENNUS

AIHEENESITTELY

Johdanto

1.1 Aikataulu	4
1.2 Desibeli	5
1.3 Tavoitteet	6
1.4 Mitä ollaan tekemässä?	7
1.5 Koteloinnin hyödyt	8

Tutkimus

2.1 Taustatieto äänialloista	9
2.2 Muotoilunajurit	10
2.3 Opinnäytetyön rakenne	11
2.4 Aiheen rajaus	12
2.5 Viitekehys	13
2.6 Miten toimin?	14
2.7 Kohteet mistä äänisyntyä	15
2.8 Rajoittavat tekijät	16
2.9 Benchmark & Kotelotyypit	17

Suunnitteluprosessi

3.1 Kotelo 1.0 prosessi	21
3.2 Rakentaminen	26
3.3 Kokoaminen	27
3.4 Mittaustulokset	28
3.5 Purunpoisto	29
3.6 Korvausilma	32
3.7 Näkyvyys	35

Paranneltu kotelo 1.5

4.1 Runko	37
4.2 Ovi suunnittelu	38
4.3 Yhteen veto	39
4.4 Kokonaismelutaso	40
4.5 Valmis kotelo	41

AKTIIVINEN ÄÄNENVAIMENNUS

Tutkimus

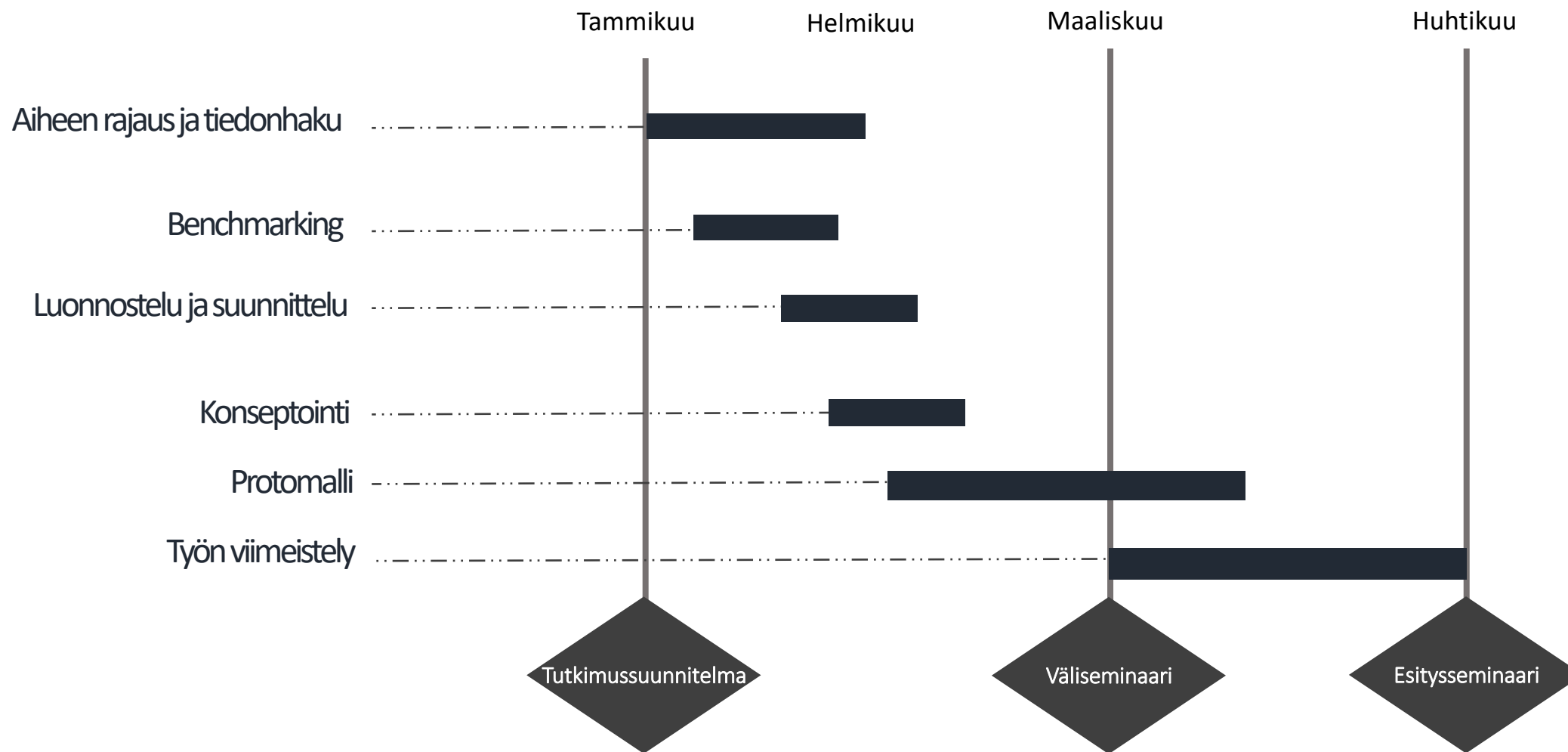
5.1 Ääniaaltojen vaiheet	43
5.2 Testialustan suunnittelu	44
5.3 Resonaattorien toimintakaavio	45
5.4 Testialusta 0.1v	46
5.5 Testin suorittaminen	47
5.6 Testauksen ongelmakohtat	48
5.7 Kokonaiskustannus	49

2.0 ÄÄNENVAIMENNUS

Mihin suunnitelma perustuu?

6.1 Kolme pääkohtaa	51
6.2 Kotelon suunnittelu	52
6.3 Ohjauselektronikan sijoitus	53
6.4 Laitekotelo sijoitus	54
6.5 Oheislaitteiden sijoitukset	55
6.2 Loppusanat	56
Lähteet	57

1.1 AIKATAULU



1.2 DESIBELI

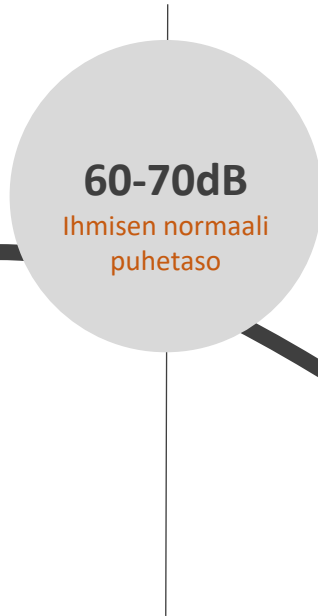
CNC on lyhenne Computer Numerical Controllista, joka tarkoittaa tietokoneella toimivaa numeerista ohjausjärjestelmää. Kone voi olla esimerkiksi sorvi tai jyrsin, jolle syötetään tietokoneelta numeroita (G-koodia), joiden perusteella laitteisto toimii. Tässä tapauksessa laitteisto on numeerisesti ohjattu jyrsin, jonka pääsääntöinen tehtävä on työstää puuta, mutta tarvittaessa myös alumiinia maltillisilla nopeuksilla.

(Wikipedia.org 2020.)



Tavoite

Hyväksyttävä äänitaso laitteistolle, kun samassa tilassa pystytään vielä puhumaan, ettei laitteiston ääni häiritse taustalla merkittävästi keskustelua. Näin ollen pystytään tilaa yhä käyttää muuhunkin tarkoitukseen.



Yleistä tietoa Desibeleistä

”Ääni on pituussuuntaista mekaanista aaltoliikettä eli värähtelyä, jolla on kaksi keskeistä ominaisuutta: • äänen voimakkuus (dB) ja • äänenkorkeus (Hz). Äänenvoimakkuutta mitataan desibeli-asteikolla. 0:n desibelin ääniä ihmiskorva ei pysty kuulemaan, kun taas yli 85 desibelin äänet saattavat aiheuttaa vaurioita korvaan. Kaikki pinnat imevät eli absorboivat ääniä, jolloin ne vähitellen vaimenevat. Suora ääni vaimenee noin 6 dB, kun matka kaksinkertaistuu. Äänen voimistumisen kuuloaisti arvioi noin kaksinkertaiseksi, kun äänenpainetaso on noussut noin 10 dB.”

(SIT 05-610038 Ohjetiedosto 2006.,2.)

1.3 TAVOITTEET

Tavoitteena on saada rakennettua koteloratkaistu, jonka avulla CNC-koneen melutaso saadaan maltilliseksi. Tällöin koneen soveltuva käyttöympäristö voidaan laajentaa tiloihin, johon laitteistot eivät ole soveltuneet aikaisemmin.

1.4 MITÄ OLLAAN TEKEMÄSSÄ?

Tarkoitus olisi parannella jo olemassa olevaa suljettua koteloa CNC-koneelle, erityisesti äänenvaimennuksen suhteen. Suurimpana painoarvona on edullisuus, sillä projekti on täysin omakustanteinen.

Äänenvaimennus vaikuttaa tilan käyttäjien mielekkyyteen. Tämä kokoonpano sijaitsee asuinympäristössä, vaikka tavallisissa olosuhteissa CNC-koneet sijoittuvat työpajoille ja autotalleihin. Tällöin äänenvaimennus ei ole niin kriittistä, ellei samassa tilassa tehdä jotain muuta keskittymistä vaativaa työtä. Edullisimmat CNC-kokoonpanot saattavat pitää 80-100 dB:n ääntä, jolloin kuulosuojainten käyttö samassa tilassa on välttämätöntä.

Tavoitteena on saada vaimennettua koteloinnin avulla CNC-kone mahdollisimman hiljaiseksi, jotta sen käyttö ei häiritse naapureita tai saman tilan käyttäjiä. Alla olevasta linkissä on esimerkki tavallisen jyrsimen tyhjäkäyntiääntä vastaan vesijäähdytteinen karamoottorin pajatilassa. Videolla mitattiin lähietäisyydeltä ja noin 6 metrin etäisyydeltä, vesijäähdytteisen karamoottori vaimeni huomattavasti kauemmas siirtyessä. Joka on yksi syy miksi lopulta päädyin vaihtamaan ilmajäähdytteisen vesijäähdytteiseksi

<https://youtu.be/sAUYFsiuY-8> (katsottu 12.1.2020).

1.5 Mitä hyötyä koteloidusta laitteesta on?



Kuva 2. Hiljaisuus logo. Tommi Chan

Hyvä kotelointi mahdollistaisi CNC-koneen sijoittamiseen kouluihin, joissa ei ole pajatiloja käytössä jo entuudestaan. Opiskelijoille se mahdollistaisi uuden tavan toteuttaa ideoita sekä tutustumisen varhaisessa vaiheessa automaatioteknologiaan. Ajatusmalli ei suinkaan ole uusi vaan sitä on jo pidemmän aikaa rakennettu FabLab-nimen alla.

Esimerkkinä Espoossa sijaitseva Ison omenan kirjasto tarjoaa FabLab-mallista ympäristöä, jossa pystytään laserilla leikkaamaan asioita, 3D-tulostamaan, käyttämään vinyylileikkuria. Nämä laitteistot ovat hiljaisia käytössä toisin kuin CNC-koneet. Sen voisi äänivaimennetun kotelon avulla tuoda samoihin tiloihin, se avaisi uuden tavan valmistaa asioita.

FabLab tarkoittaa digitaalista valmistuslaboratoriota, ja sen tarkoituksena inspiroida ihmisiä ja sijoittajia ympäri maailmaa ideoiden luomiseen, luomalla heille mahdollisuus päästä käyttämään kehittyneitä digitaalisia valmistusteknologioita. Idea sai alkunsa Professori Neil Gershenfeldiltä, jonka pohjimmaisena ajatuksena oli luoda ympäristö, jossa olisi mahdollista tehdä halvalla ja nopeasti asioita missä päin maailmalla vain. Ajatusmalli on levinnyt ympäri maailmaa ja yli 150 FabLabia on luotu yhdistämään ihmisiä.

<http://www.fablabni.com/what-fablab.html> (Katsottu 12.1.2020)

2.1

TAUSTATIETO

Ääntä voidaan vaimentaa kolmella eri tavalla tai niiden sekoituksella, materiaalin tiheydellä eli massalla, rakennejäykkyydellä tai imeytymisellä. Tässä tapauksessa se tarkoittaa pehmeää materiaalia seinämissä, jonka seurauksena heijastuu vähemmän ääntä takaisin. <Randall D. Knight, 2008. Physics For Scientists And Engineers A Strategic Approach Second Edition: Adam Black, Ph.D., 280,284>.

Ääni kulkeutuu mekaanisesti ilman mukana, jos tilassa ei ole ilmaa eikä myöskään ole mekaanisesti välittävää ainetta, jonka avulla ääni pääsisi syntymään. Tässä tapauksessa ilmatiivis kotelo takaa sen, ettei niiltä osin ääni pääse vuotamaa kotelon ulkopuolelle. <Randall D. Knight, 2008. Physics For Scientists And Engineers A Strategic Approach Second Edition: Adam Black, Ph.D., 616>.

Voidaan kuvitella tasainen veden pinta ja siihen tipahtaa yksi vesipisara, joka synnyttää ympärilleen aaltoja. Kun nämä aallot osuvat seinämään, osa siitä imeytyy ja osa heijastuu takaisin vaimeampina aaltoina. Kaikki energia ei imeydy seinämään vaan jatkaa siitä seinän toiselle puolelle. Kun kaksi aaltoa kohtaavat eri vaiheessa, korkealla ja matalalla oleva, ne kumoavat hetkellisesti toisensa, kunnes matkaavat toistensa ohitse <Pekka Tuomela, 1999. tee itse HIFI kaiuttimet: WSOY, 16,18>, <Randall D. Knight, 2008. Physics For Scientists And Engineers A Strategic Approach Second Edition: Adam Black, Ph.D., 636,637,648>.

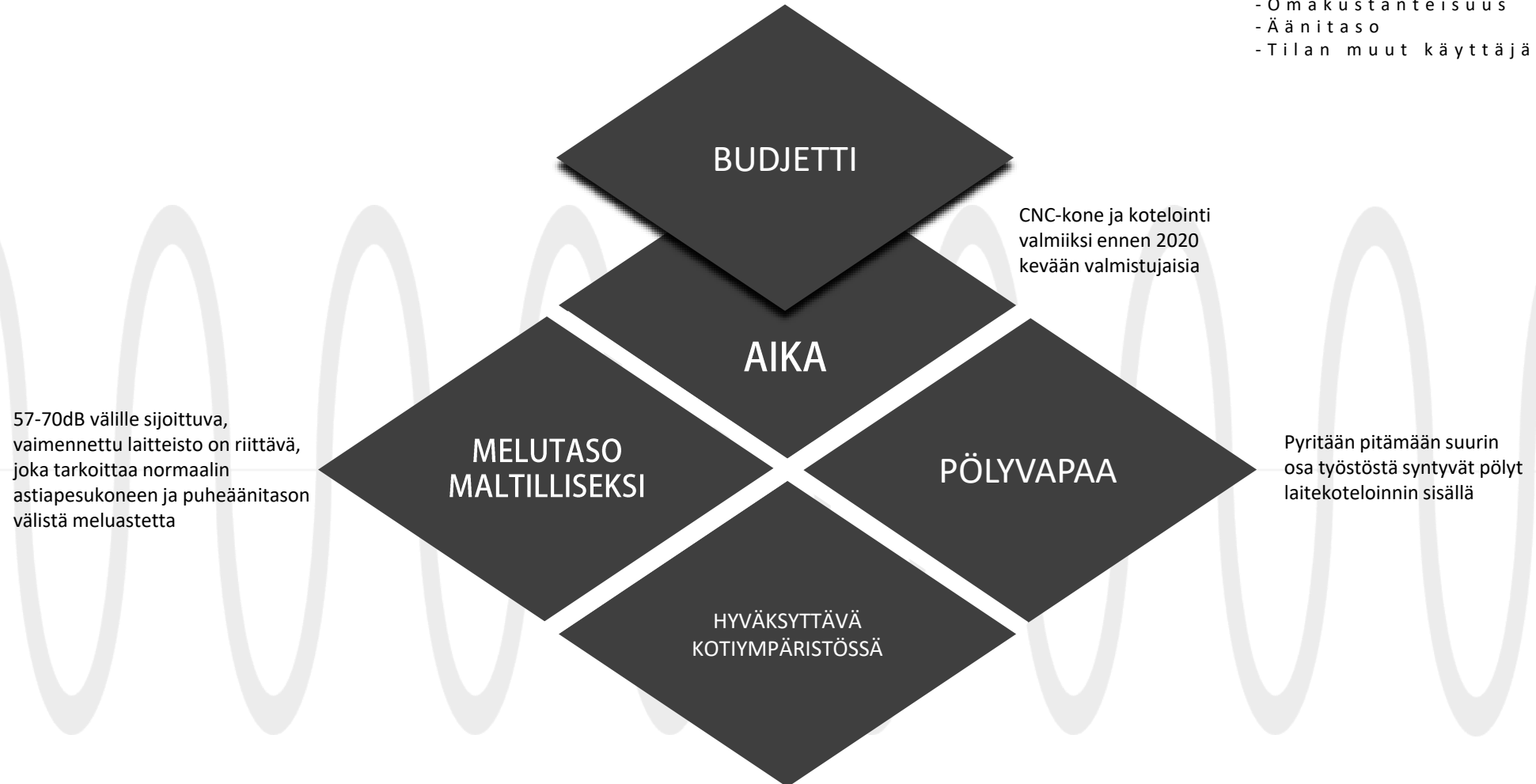
Tässä tarkastellaan, kuinka pystytään pitämään suljetun kotelon sisällä epämieluisat CNC-koneen työstöäännet. Voidaan siis materiaalivalinnoilla sekä seinämäpaksuuksilla vaikuttaa, kuinka paljon ääntä pääsee kotelon seinien ulkopuolelle (RT-kortisto, RT 07-10881, 2006. Huoneakustiikka).

2.2 MUOTOILUNAJURIT

Mahdollisimman alhainen, tällöin se vaikuttaa myös suunnitteluun

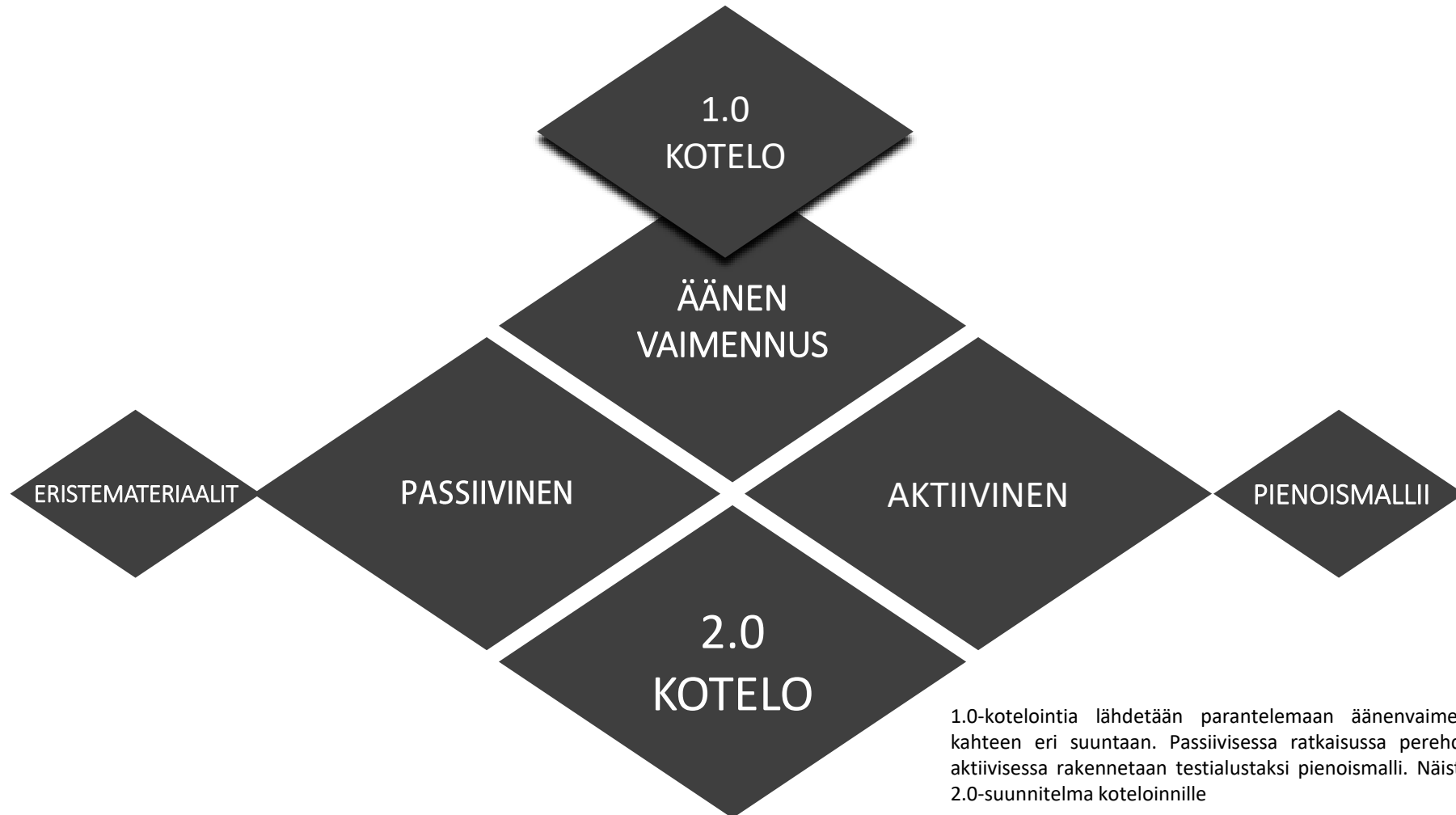
Kuvassa olevat Muotoilunajurit ovat johdettu alla olevista avainsanoista

- Asuinympäristö
- Omakustanteisuus
- Äänitaso
- Tilan muut käyttäjät



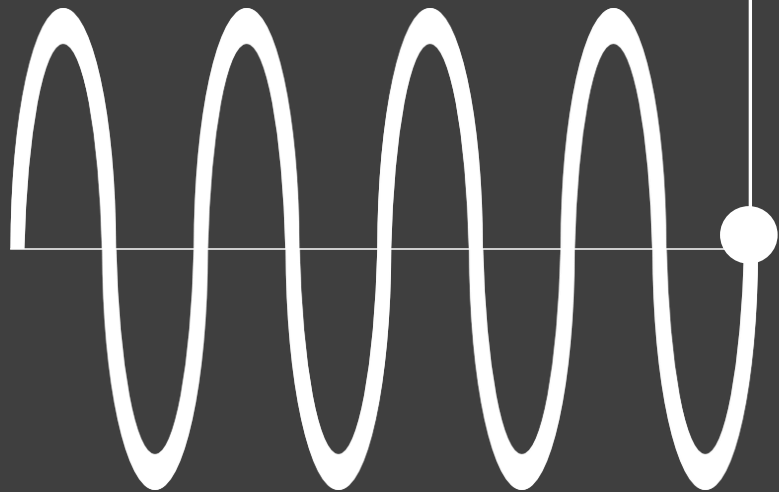
Laitteisto sijoittuu kotiympäristöön, tällöin on otettava saman tilan käyttäjät huomioon. Tässä tapauksessa avopuoliso, noin vuoden ikäinen lapsi ja marsu

2.3 OPINNÄYTETYÖN RAKENNE



1.0-kotelointia lähdetään parantelemaan äänenvaimennusta, josta se haarautuu kahteen eri suuntaan. Passiivisessa ratkaisussa perehdytään eristemateriaaleihin ja aktiivisessa rakennetaan testialustaksi pienoismalli. Näistä kahdesta ratkaisusta syntyy 2.0-suunnitelma koteloinnille

2.4 AIHEEN RAJAUS



Kuva 6. Aallot. Tommi Chan

Aiheessani aion perehtyä passiiviseen ja aktiiviseen äänenvaimennusratkaisuihin rakentamalla kotelon, jossa voidaan empiirisesti verrata mittaustuloksia eri materiaali- ja tyyppiratkaisujen välillä. Tutkimuksessani tarkastelen vain kokonaismelutason vaimentumaa dB. Joten tarkat laskennalliset osuudet jäävät pois. Aktiivisessa äänenvaimennuksessa tehdään kokeellisia tutkimuksia.

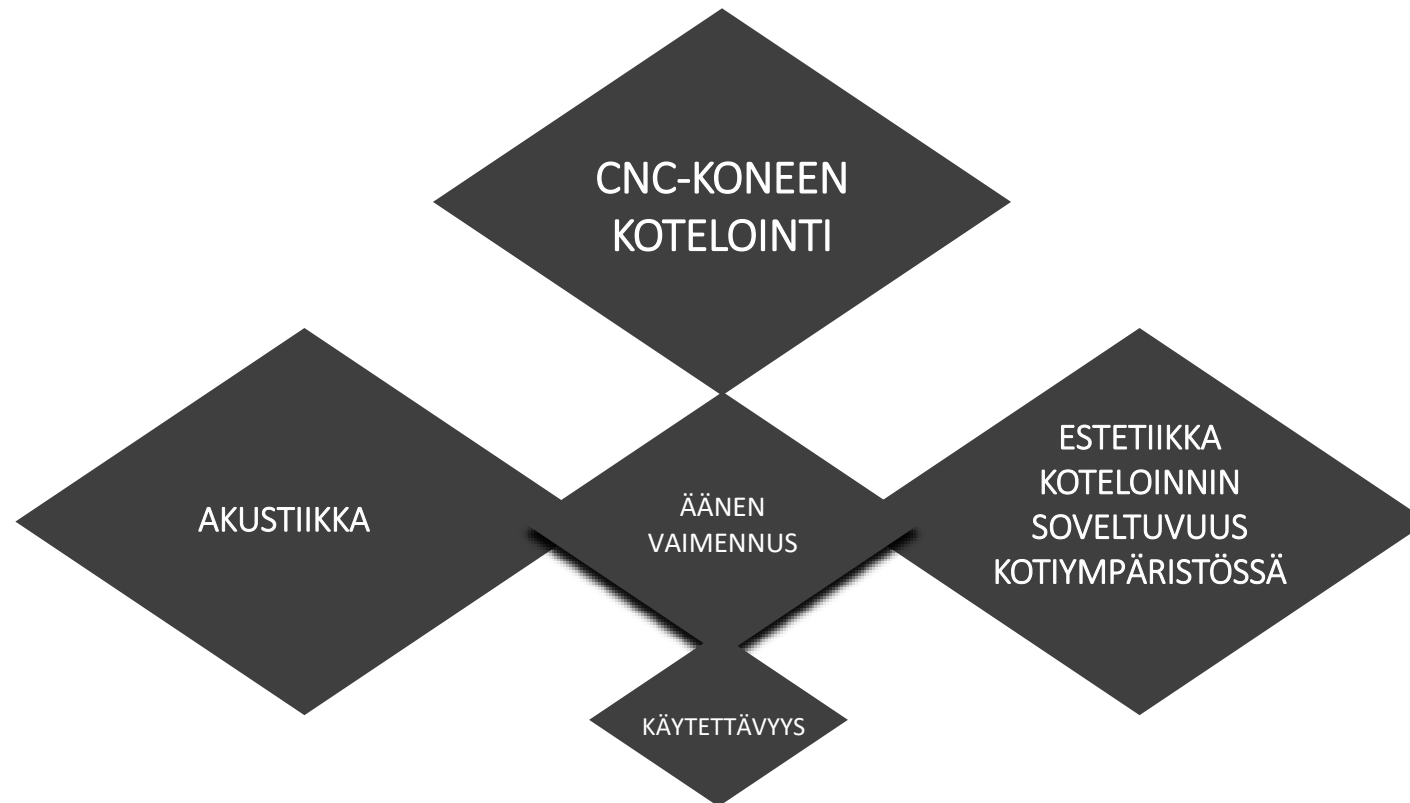
2.5 VIITEKEHYS

Kuvassa olevat kohdat
Ovat näkökulmia joista
lähdin tarkastelemaan

Tutkin akustiikkaa hyvin yleisellä tasolla huoneistossa RT-kortisto ohjeistuksista ja artikkeleista, jossa puhutaan vanhojen rakennusten akustiikasta ja uusien talojen äänenvaimennuksesta, koska käytän osittain myös samoja vaimennusrakenteita kuin talon rakentamisessa.

Havainnoin vaimennusratkaisujen muutoksia aistinvaraisesti ja tukena käytän puhelimen desibelimittaria, koska sillä pystytään osoittamaan äänen tason muutos desibeleinä.

Havainnoin myös aistinvaraisesti miltä ääni kuulostaa ympäristössä aistinvaraisesti, koska eri taajuudet kuulostavat ihmiskorvaan erilaisilta, toiset aallonpituudet ovat toisia ikävämpiä vaikka äänenpaine olisi sama.



Kotelo eli tässä tapauksessa kaapistoksi naamioitu laitteisto, on hyväksyttävä kotiympäristössä, jos lähtökohtaisesti ihmiset ovat ostaneet asuntoonsa kalustekaappeja silloin se on yleisesti hyväksytty, kokonaisuus. Hyvänä esimerkkinä on Ikean kaapisto tai mikä tahansa muu, jossa runko on mallistossa sama mutta erilaisilla kaluste ovilla on muutettu kaapiston ulkonäkö, jotta se sopisi erilaisten sisustusten kanssa yhteen. Periaate on tässä sama, runkokotelo koostuu tavallisesta kalusterungosta, ja erilaisilla kalusteovimalleilla pystytään esteettisesti soveltamaan jo olemassa olevien huonekalujen kanssa.

Käytettävyyden näkökulmasta pohdin laitteistostani seuraavia seikkoja,
-Mitä toimenpiteitä laitteiston käynnistys edellyttää?
-Turvallisuutta, jos laitteisto syttyy tuleen, miten sitä voidaan ennalta ehkäistä, tai miten silloin pitää toimia?
-Millaisia työvaiheita on ennen varsinaisen työstön aloittamista?
-Kuinka turvallista on laitteiston lähellä oleminen kun se on päällä?

2.6 MITEN TOIMIN



1 Äänenvaimen
nukseen
perehtyminen

2 Häiriö
äänien
kartoitus

3 Vaimennus
ratkaisun
suunnittelu

4 Koteloinnin
parantaminen

Lähden ensimmäisenä kartoittamaan aistinvaraisesti häiriöäänien lähteitä, jonka perusteella voidaan määrittää parhaat ratkaisut kotelon vaimennuksen suhteen. Mittaan puhelimen mikrofonilla yleistä äänitasoa eri etäisyyksiltä kotelosta koneen ollessa päällä. Tavoite on saada vaimennettua vähintään 3 dB:n kokeellisilla muutoksilla. Mittaustuloksia vertaamalla saadaan todennettua tavoitteiden onnistuminen.

Lisään vaimennusmateriaaleja nykyiseen koteloratkaisuun ja mittaan samoilta etäisyyksiltä ääntä, jotta mittaustuloksia voidaan verrata toisiinsa.

Kaikki yllä mainitut toimenpiteet liittyvät passiiviseen äänenvaimennukseen. Tutkin myös opinnäytetyössäni aktiivista vaimennusratkaisua hyvin kokeellisesti. Teen tämän rakentamalla pienoismallin kotelosta ja sijoittamalla siihen viidelle seinämällä resonaattorit, jotka toimivat äänilähteen kumoajina. Toisin sanoen ne toimivat samalla tavalla kuin vastamelukuulokkeet.

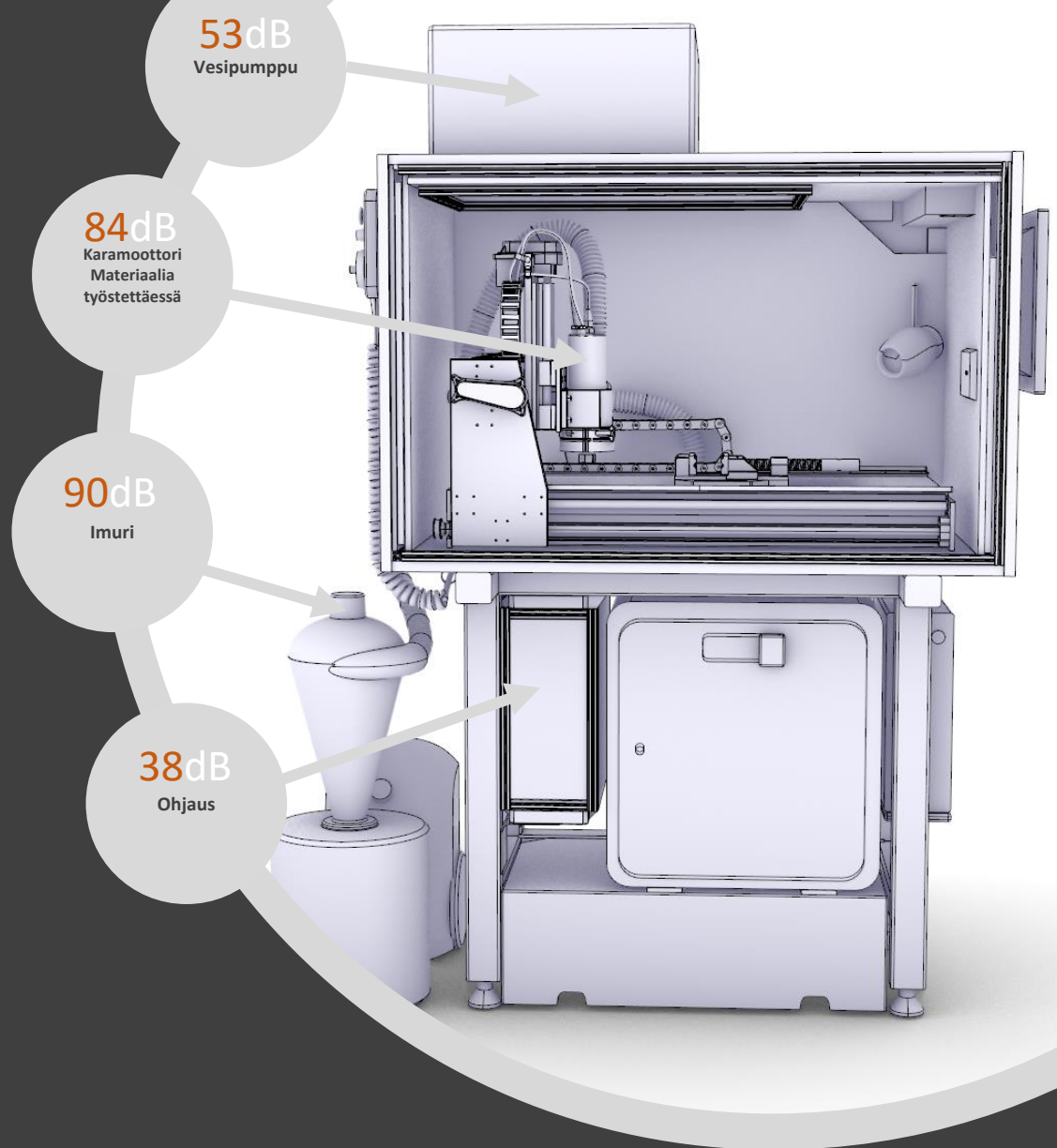
2.7 KOHTEET JOISTA ÄÄNTÄ SYNTYY

Lähdin ensin kartoittamaan, mistä kaikista lähteistä syntyy häiritsevää ääntä. Tämän jälkeen yritin löytää vaimennusratkaisuja niihin, joko sijoittamalla kotelon sisä-/ulkopuolelle tai lisäämällä/vähentämällä asioita mahdollisuuksien mukaan. Omien havaintojeni ja mittausten perusteella CNC-koneesta lähtevät äänet syntyvät, joko ohjauksesta, pyörivästä karamoottorista, rungon värähtelystä, työstettävästä materiaalista, karamoottorinmuuntajasta materiaalia työstettäessä, imurista tai vesipumpusta.

Karamoottorista lähtevään ääneen vaikuttaa työstönopeus, terän pituus ja paksuus sekä materiaali.

Muuntajasta lähtevää ääntä ei voida vaimentaa, ellei sitä erilliskoteloida. Tämä on hankalaa, koska se sijaitsee ohjainlaatikon sisällä, jossa lisäksi on useita lämpöä tuottavia komponentteja. Jolloin muuntaja määrittelee laitteistokokonaisuuden äänitason alarajan, joka on metrin etäisyydeltä mitattuna 38 dB. Vertailun vuoksi hiljaisessa makuuhuoneessa on yöllä 20-25 dB, ja 30-40 dB on ilmastoinnin taustamelu (RT-kortisto, RT 07-10881, Huoneakustiikka, 2006,2).

Vesipumppu on suhteellisen hiljainen, kun se on sijoitettuna kotelon sisäpuolelle, jotta siitä olisi mahdollisimman vähän häiriöksi. Vesisäiliön koon täytyy olla hyvin pieni, koska se olisi muutoin rajoittanut CNC-koneen liikerataa, joten päätin siirtää sen kotelon ulkopuolelle ja rakentaa erilliskotelointi vesisäiliölle. Tämän tein paksusta MDF-levystä ja Aquapanelista, jota käytin sisäseinien vaimennukseen (kosteuden kestävä sementtilevy). Rungon jäykkyyteen en pysty vaikuttamaan, mutta massaa lisäämällä (painavat kumimatot) pystytään hieman vaimentamaan värähtelyjä. Karamoottoria pystytään vaimentamaan vaihtamalla ilmajäähdytteinen vesijäähdytteiseksi, jolloin suuremmilla nopeuksilla tuulettimesta lähtevä ääni poistuu. Tosin tilalle tulevat vesipumpusta syntyvät äänet.



Kuva 8. Yllä olevasta kuvasta voidaan havaita, mistä kohteet aiheuttavat eniten ääntä CNC-koteloinnissa. Tommi Chan

2.8 RAJOITTAVAT TEKIJÄT

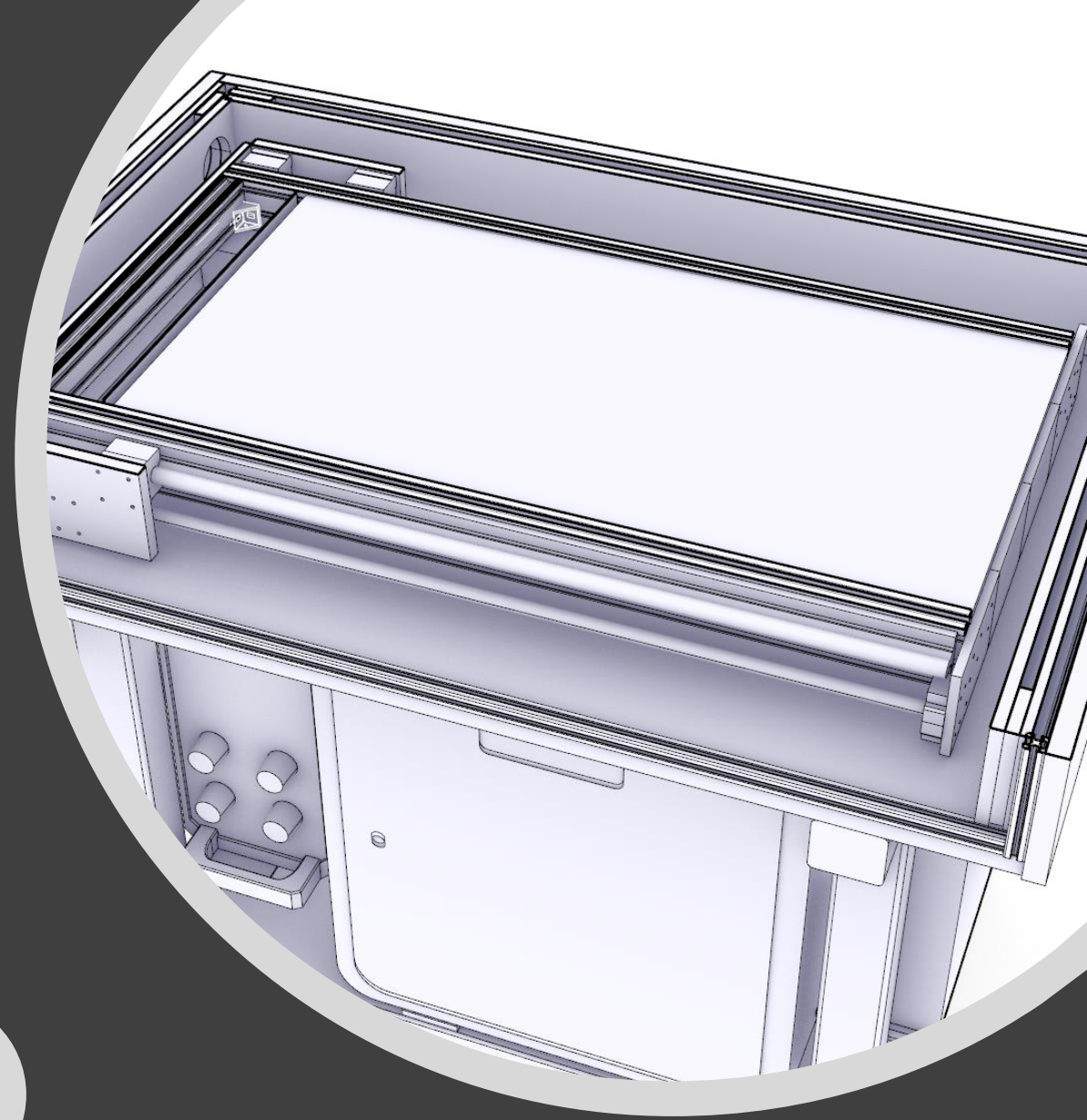
Nykyisen kotelon äärimitat rajoittavat äänieristysmateriaalikerrosten lisäämistä tiettyyn pisteeseen, jotta kotelon sisälle vielä mahtuisi itse CNC-kone. Kun otetaan huomioon tämän hetkiset ulkomitat, jotka sallivat vielä kantamisen ulko-ovesta koteloä purkamatta. Budjetti on toinen merkittävä määrittäjä, minkä vuoksi kotelon eristysratkaisuihin on päädytty. Kotelon täytyy olla purettavissa, jos sitä halutaan siirtää vielä.

Kotelon
ulkomitat
mitat

Budjetti

Purettavuus

CNC-
koneen
koko



Kuva 9. Rajoittavat tekijät. Tommi Chan

2.9 BENCHMARK



Kuva 64. Tavallinen kaluste kaappi. Matti Chan

Tavoitteena oli upottaa kalusteisiin CNC-kone, koska laitteisto ei ole kovinkaan kaunis kotiympäristössä. Oikealla olevasta kuvasta nähdään kuinka takan yläpuolelle on liukuoven taakse piilotettu televisio. Tässä tapauksessa CNC-kone ei ole yhtä litteä, joten se vaatii kaappimaisen ratkaisun mahtuakseen. Voidaan siis rakentaa kaappikaluste ja piilottaa CNC-kone sen sisälle, tarvittaessa voidaan valita sellaiset kaapin ovet, jotka sopivat muiden kalusteiden kanssa.



Kuva 65. Televisio kalusteisiin integroituna. Matti Chan

2.9 BENCHMARK

Etsin internetin syövereistä kotitekoisia koteloiteja CNC-koneelle. Suurin osa malleista perustui perinteiseen kaappiratkaisuun, jossa on yhdestä kahteen avautuvaa ovea. Matalimmissa koneissa oli ylöspäin avautuva luukku. Päädyin lopulta helpoimpaan ratkaisuun eli perinteiseen kaappiin, jossa kaksi ovea, koska se oli edullisin ratkaisu, sekä kalusteeksi naamioiminen olisi helppoa. Koska lopullinen sijoituspaikka koneelle on tavallisen, pajatilan sijaan kodin olohuone, joka edellyttää puolison hyväksynnän kokonaisuudelle. Tavoitteena on saada koteloite näyttämään kalustekaapilta, joka on mahdollisimman yhtenäinen jo olemassa olevien kalusteiden kanssa. Myös äänieristyksen suhteen on helpompaa asentaa neliskanttisia vaimennuslevyjä kotelon sisäpuolelle.

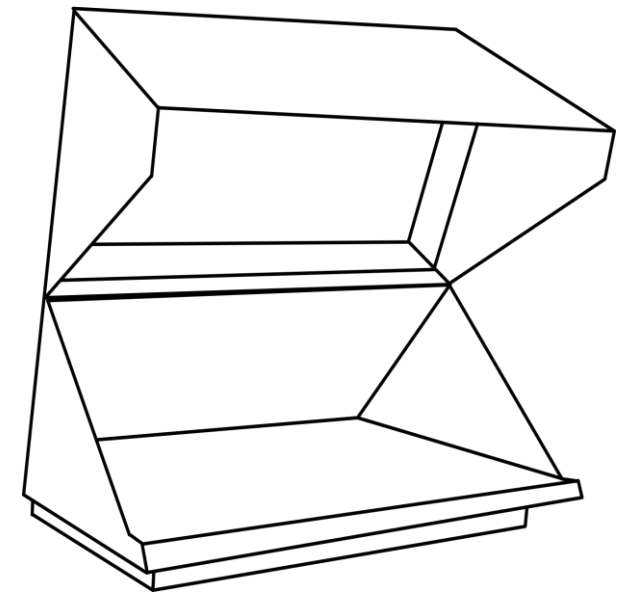
Koko

Budjetti

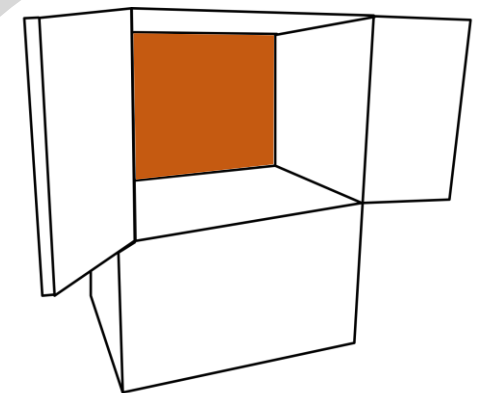
Paino

Kalusteeksi
naamioiminen

Eristysmateriaalien
asennus



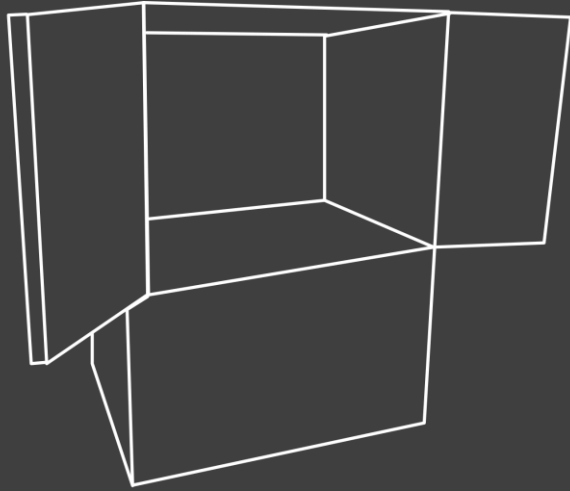
Kuva 10. CNC-koneen koteloite, joka avautuu ylöspäin, vaativat myös kaasujouset, jotta kansi pysyy turvallisesti ylhäällä. Matti Chan



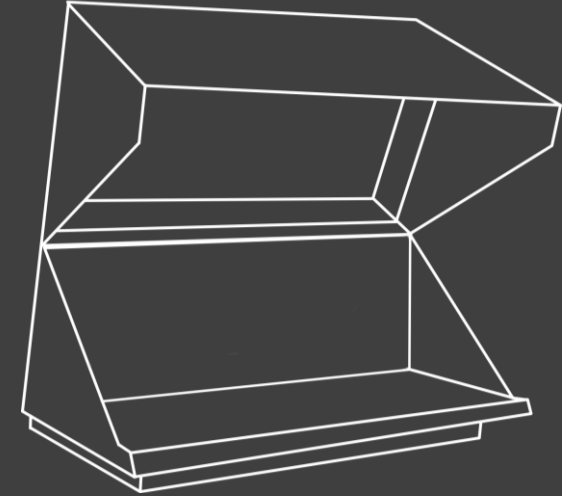
Kuva 11. CNC-koneen koteloite, joka avautuu sivuille. Matti Chan

KOTELOTYYPIT

Alla olevien ominaisuuksien perusteella valitsin sivulle avautuvan kotelotyyppin.



Kuva 12. Sivuille avautuva kotelo. Matti Chan



Kuva 13. Ylös avautuva kotelo. Matti Chan

Sivuille avautuva kotelointi

Negatiiviset puolet

- Ovet avattuina rajoittavat ympärillä liikkumista
- Ovien lukitseminen vaatii jonkinlaisen lukitus-salpamekanismin
- Kahden oven väliin jäävän raon ilmatiiviiksi saaminen on haastavaa

Positiiviset puolet

- Vaimennusmateriaalin asennus helppoa neliskanttisten muotojen vuoksi
- Rakentaminen ja kotelon suunnittelu suoraviivaista, jolloin säästyy aikaa
- Laitteiston päälle voidaan sijoittaa asioita hyvä/huono
- Soveltuu korkeammillekin laitteille
- Kotelon pystytään helposti naamiomaan kalusteeksi

+ Budjetti

+ Kalusteeksi naamiointi

+ Eristysmateriaalien asennus

Ylöspäin avautuva kotelointi

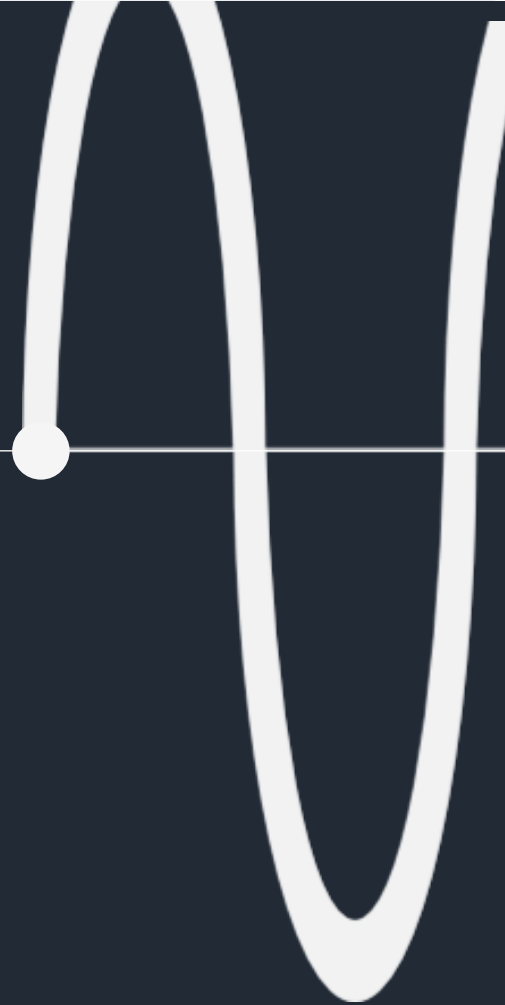
Negatiiviset puolet

- Vaimennusmateriaalien asennus haastavaa kolmiomaisten seinämien vuoksi
- Rakentaminen olisi vienyt enemmän aikaa kotelokannen vuoksi
- Haastavaa toteuttaa laitteistolle jotka ovat korkeampia
- Kotelon päällä ei voida säilyttää tavaraa Hyvä/huono asia

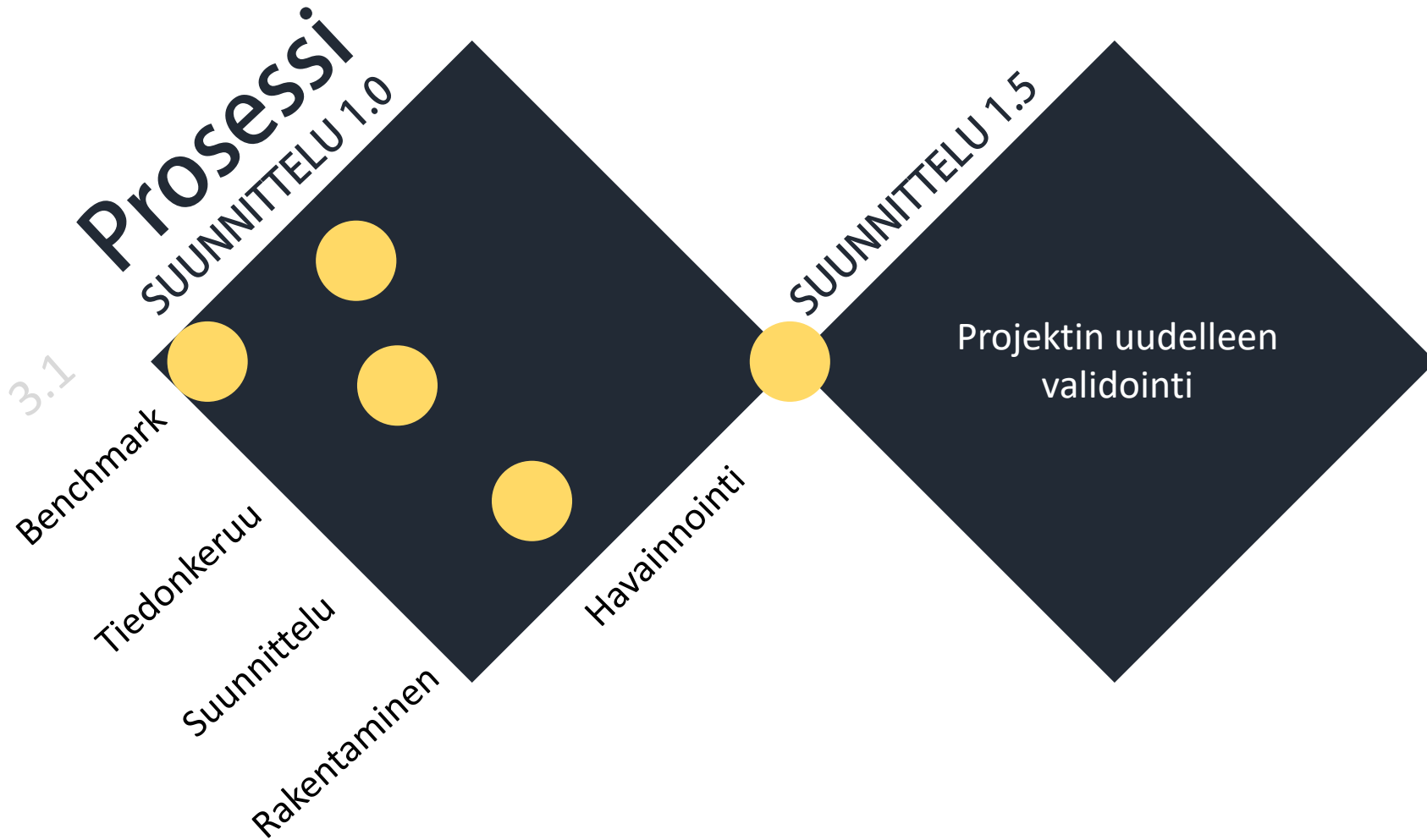
Positiiviset puolet

- Kotelon saaminen ilmatiiviiksi olisi ollut helpompaa yhden yhteneväisen oven vuoksi
- Kotelon ovi ei avattuna rajoita ympärillä liikkumista
- Oven lukitsemista ei tarvitse murehtia, kannen oma paino pitää luukun kiinni

3.1 PASSIIVINEN KOTELO VAIMENNUS



Pyritään vaimentamaan CNC-kone koteloinnilla, peruseriaate on sama kuin talonrakennuksessaakin, kun pyritään huoneisto saamaan rakennusmääräysten mukaisesti eristettyä/vaimennettua. Tällöin yritetään vaimentaa huoneistosta kantautuvia ääniä toiseen huoneistoon, jolloin samat säännöt pätevät. Kaikki ikkuna-aukot, patterit, ilmastointiputket ovat kohtia, josta ilma pääsee karkaamaan. CNC-koteloinnissa on myös seinien eristysmateriaali, vaihtoilma-aukotus ja ovien tiivistäminen. Sen jälkeen tulee vasta seinämäpaksuudet ja tiivistämiset, joiden avulla pystytään saavuttamaan tavoitellut hiljaiset huonetilat.



Kuva 15. Prosessi suunnittelu 1.0. Tommi Chan

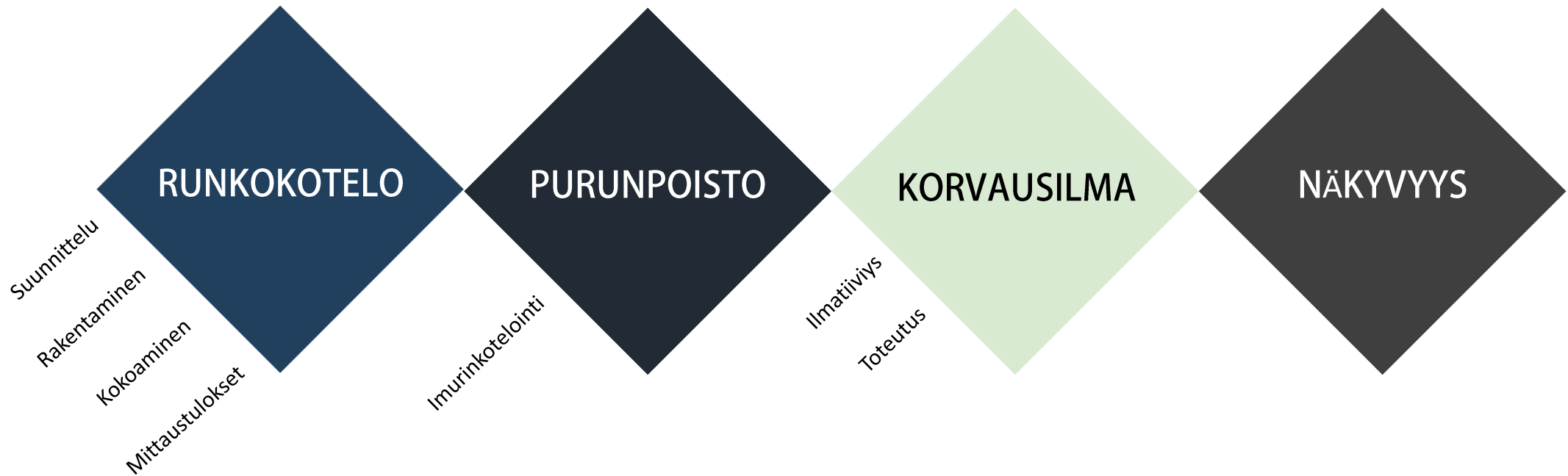
Kotelo 1.0 -suunnittelussa kartoitin jo olemassa olevia koteloiteja puutyöstämiseksi. Näiden perusteella suunnittelin kotelarakenteen. Koteloitua suunnitellessa täytyi ottaa huomioon koko, liikuteltavuus, ilmatiiviyys sekä käytettävyys, koska rakensin kotelon eri tilassa kuin mihin se olisi tullut lopulta. Havainnoinnilla pystytään tuoma esille käytettävyyteen liittyviä seikkoja, kuten koteloinnin korkeus, ettei otsaa lyö vahingossa joka kerta konetta käytettäessä. Eikä laitteiston käyttöönotto edellyttää monimutkaisia toimenpiteitä, jotka olen yrittänyt yksi kerrallaan minimoida, jottei laitteiston käyttäminen olisi se suurin kynnys aloittaa projektia. Näistä ongelmakohtien perusteella voidaan suunnitella hieman parempi koteloinnin 1.5-versio, käyttäen pohjana edellistä suunnitelmaa.

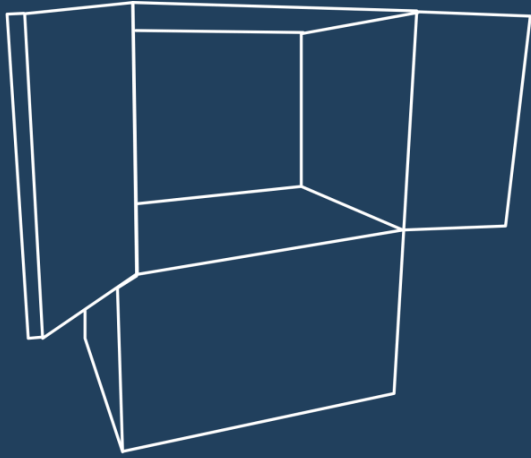


◆ 1.0 KOTELOINTI

MUODOSTUU NÄISTÄ OSIOISTA

Kotelointia suunnitellessa on otettava neljä pääkohtaa huomioon joihin viittaa alla olevassa kuvassa.





Kuva 17. Kotelo. Tommi Chan

RUNKOKOTELO

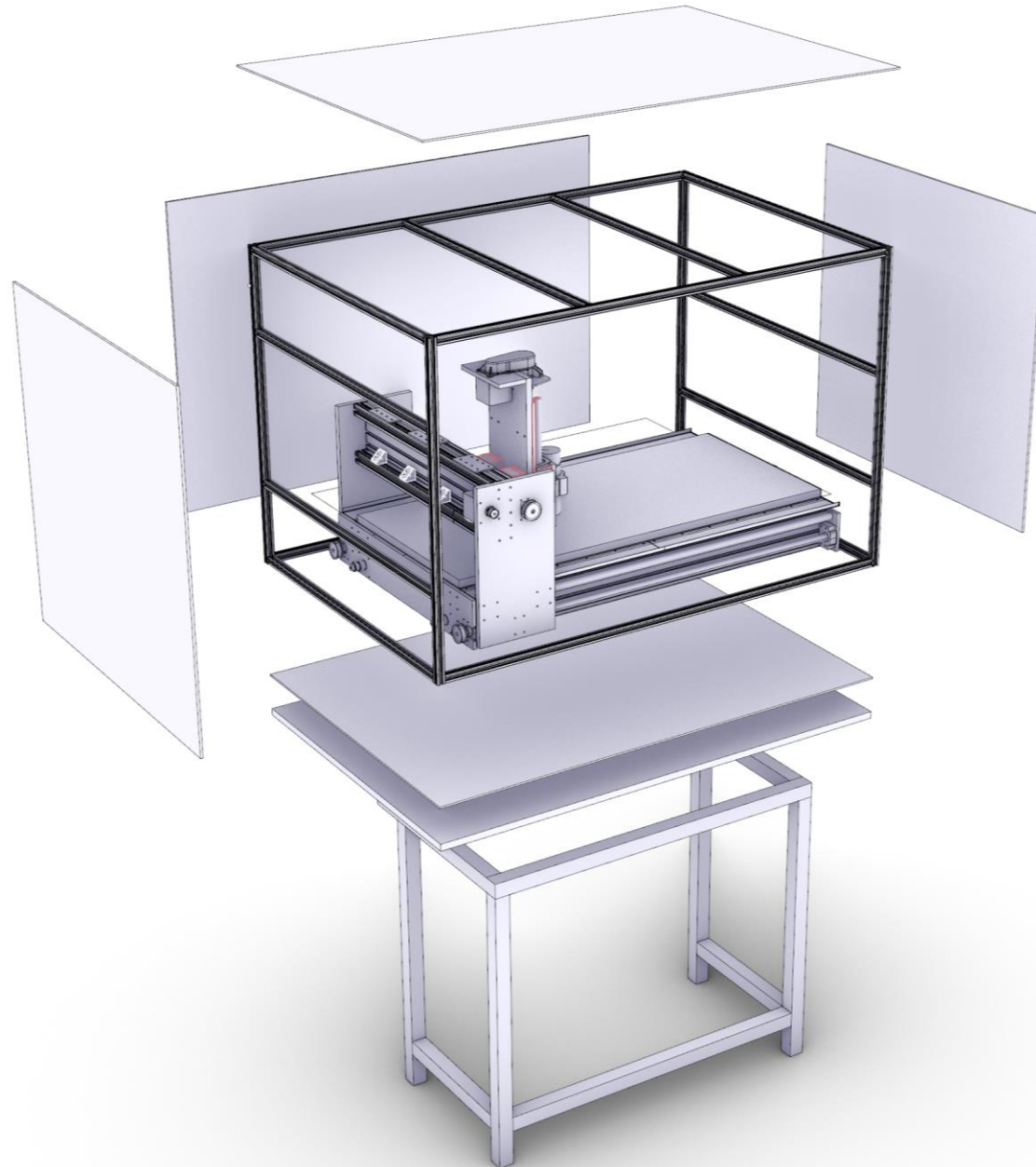
Koostuu kolmesta tärkeästä vaiheesta: rakennus, kuljetus ja kasaus. Nämä pitää ottaa huomioon, kun kotelointi kootaan osittain valmiiksi ennen siirtoa kohteeseen, jossa se varsinaisesti rakennetaan loppuun. Tästä syystä runko on suunniteltu moniosaiseksi, jotta sen kuljettaminen olisi helpompaa.

PUR

55dB

Laitekoteloinnin
äänitaso kappaleita
työstettäessä

KOTELON SUUNNITTELU 1.0



Koteloinnin mittoihin vaikuttivat kriittisesti itse CNC-koneen koko. Alkuperäisessä suunnitelmassa koteloruko koostui alumiiniprofiileista, jotka tilasin Saksasta samalla kun tilasin CNC-koneeseen osat. Tarkoituksena kiinnittää vaneriset seinämät ankkureilla profiiliuriin, mutta sainkin Metropolialta kotelointiin vanhan työpöydän. Siitä sainkin leikattua sopivan kokoiset palat, jolloin seinämistä tuli suunniteltua vahvemmat. Tästä syystä alumiinista tukikehikkoa ei enää tarvittu.

Suunnitteluprosessi

Kotelon rakensin koululla mutta siihen ei ollut kuin noin muutama viikko aikaa, sillä tilaa sen säilyttämiselle ei ollut. En myöskään halunnut vuokrata kahdelle eri kerralle pakettiautoa, koska rakensin samanaikaisesti CNC-konetta. Siinä vaiheessa olisin tarvinnut kaksi viikkoa lisäaikaa, mutta onnistuin kumminkin samaan kaikki valmiiksi yhden viikon sisällä. Teräksiset jalat ja pöytä olivat yksi kokonaisuus ja toisessa kokonaisuudessa oli kotelon seinämät. Koteloä siirrettäessä havaitsimme, että kotelo mahtuu nippinapin tavallisesta oviaukosta. Onneksi sitä ei jouduttu purkamaan. En suunnitelmassa osannut ottaa tavallisen oviaukon mitoitusta huomioon.

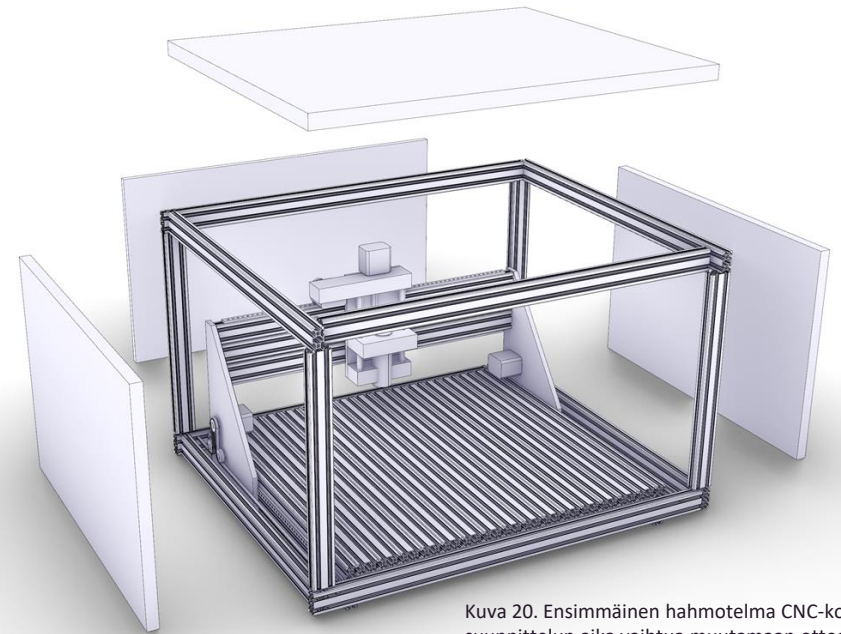
Huonona puolena paksuista vanerilevyistä seurasi paino, joka vaati hyvin paljon voimaa kahdelta ihmiseltä, jotta he jaksoivat nostaa kotelon paikoilleen. Siitä syystä kokonaisuus koostui kolmesta eri kasausvaiheesta, huoneen nurkkaan asetettiin teräsjalat pöytälevyn kanssa, sen päälle tuli itse CNC-kone sekä lopuksi haastavimpana osuutena oli nostaa puinen koteloitiläiteiston yli. Itse kotelon sijoittui olohuoneen nurkkaukseen, jossa se vähintään häiritsee (puolison hyväksymä paikka).

Sain kuulla osakseni anopilta, ettei laitteisto miellyttänyt yhtään häntä, jonka vuoksi jouduin kiirehtimään kalusteovien kanssa, jotta ei tarvinnut kuunnella keskeneräisen työn kritisointia pitkien työpäivien jälkeen. Voidaan sanoa, että anoppi toimi jonkinlaisena projektin valmistumisen vauhdittajana.

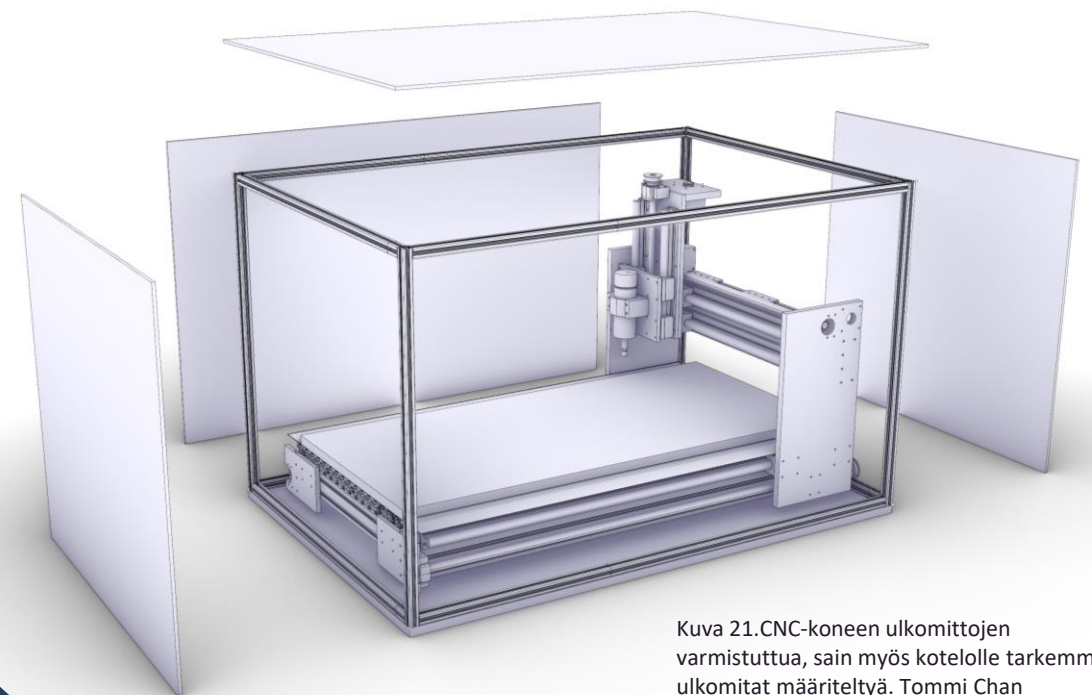
Kotelon
rakennus
koululla

Kotelon
Kuljetus

Kotelon
Kasaus
kohteessa



Kuva 20. Ensimmäinen hahmotelma CNC-koneesta, mitat ehtivät suunnittelun aika vaihtua muutamaan otteeseen, jolloin kotelon tilavuuskin mukautui sen mukaan. Tommi Chan



Kuva 21. CNC-koneen ulkomittojen varmistuttua, sain myös kotelolle tarkemmat ulkomitat määriteltä. Tommi Chan

3.2

KOTELON RAKENTAMINEN

Runko on rakennettu paksuista vanerilevyistä, jotka imevät ääntä itseensä jo jonkin verran, mutta kovat pinnat heijastavat ääniaaltoja takaisin, jolloin kannattaa käyttää pehmeää materiaalia. Tämän avulla pystytään imemään osa heijastuvista ääniaalloista. Olen myös lisännyt paksut kumimatot seinille, jotka lisäävät kotelon massaa. Tärkeintä tässä tapauksessa on kumminkin ilmatiiviskotelo, jolloin ääniaallot pysyvät hallitusti kotelon sisäpuolella. Haasteeksi muodostuvat kotelon avattavat ovet ja vaihtoilma-aukotus. Ne ovat kohtia, jossa ilma pääsee karkaamaan.

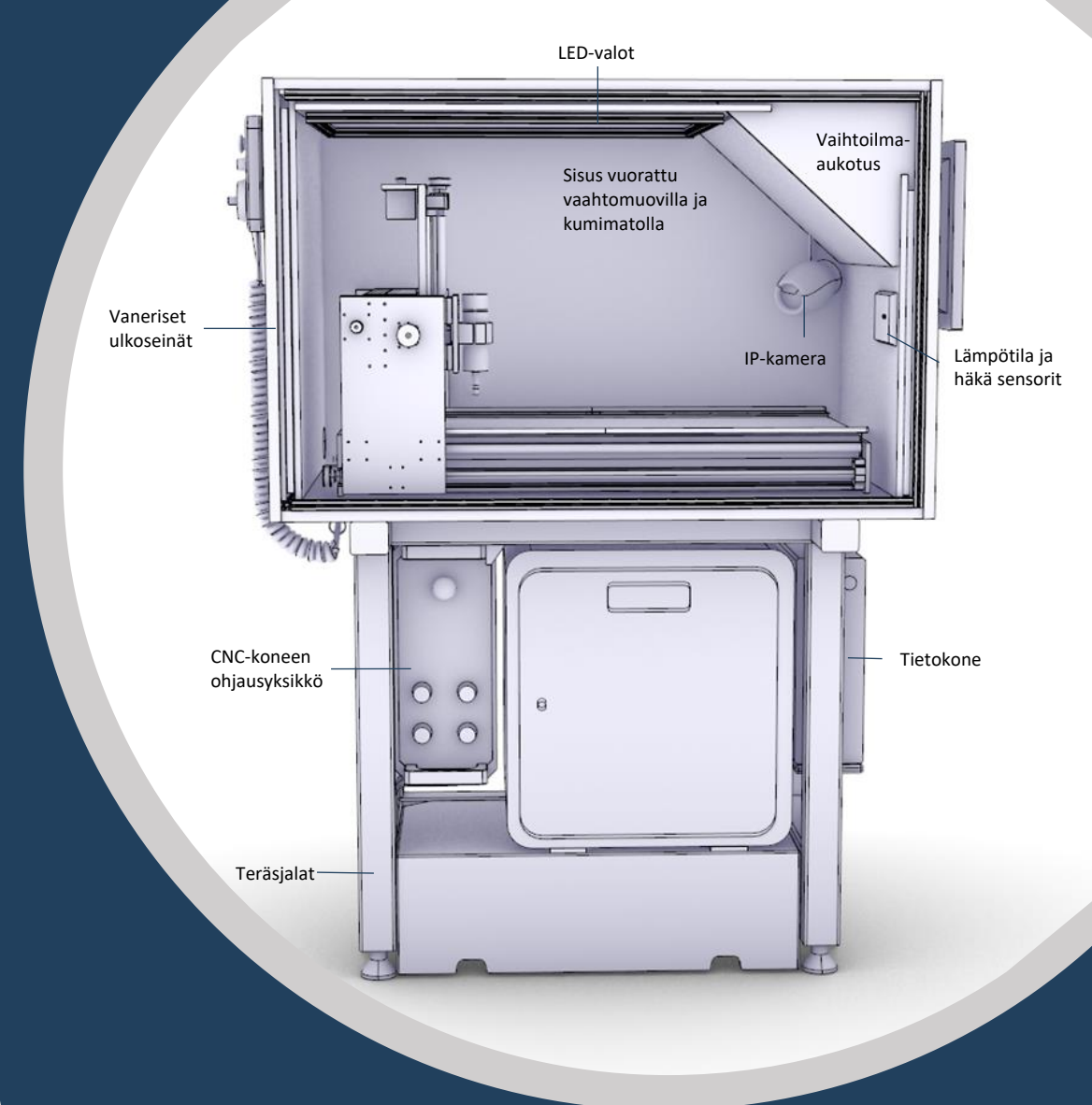
Lisäsin kotelon seinämille ohutta eristemateriaalia, jonka löysin rakennustyömaan roskalavalta. Sen tarkoituksena on vähentää kotelon seinämistä heijastuvaa ääntä. Kuitenkin koneen valmistuttua ja sitä käytettäessä havaitsin, ettei äänieristys ollutkaan riittävä omasta mielestäni. Riippuen mitä materiaalia työstän sekä mitä terää käytän, niin työstöäänät vaihtelevat hieman 200-1000 Hz:n välillä. CNC-kone ei tässä kokoonpanossa edes ollut se, mistä lähti eniten ääntä, vaan ystävältäni saatu tuhkaimuri, jonka äänitaso oli noin 90dB tienoilla. Niinpä rakensin ääntä vaimentavan koteloinnin vanhasta pihalaatikosta ilman sisään- ja ulostulolle, jonka jälkeen ääni taso vaimeni 64 dB:iin. Sen seurauksena imuteho heikkeni huomattavasti, jolloin se ei enää soveltunutkaan CNC-koneen purunpoistoon. Lopulta jouduin hylkäämään vanhan suunnitelman ja päätin vain hankkia mahdollisimman hiljaisen kotikäyttöön suunnatun imurin.

Vanerilevyt

Vaahtomuovi
eriste

Kumimattoa

Teräsjalat



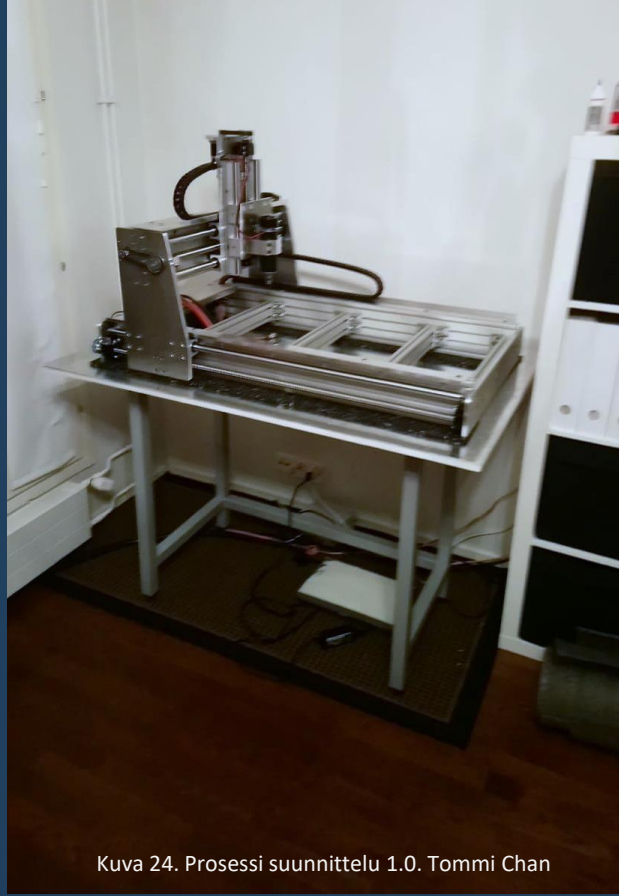
Kuva 22. Oikeassa ylänurkassa olevan palan sisällä on vaihto ilma-aukotus, jonka vuoksi se on muotoiltu kyseisen muotoiseksi, mutta se osoittautui ongelmalliseksi. Koska se rajoitti CNC-koneen liikerataa, jolloin jouduin purkamaan osittain rakennettua vaihtoilma aukotusta. Tommi Chan

3.3

KOTELON KOKOAMINEN



Kuva 23. Prosessi suunnittelu 1.0. Tommi Chan



Kuva 24. Prosessi suunnittelu 1.0. Tommi Chan



Kuva 25. Prosessi suunnittelu 1.0. Tommi Chan



Kuva 26. Prosessi suunnittelu 1.0. Tommi Chan

1

Puisen Työstöpöydän päällä on alumiinilevy suojaamassa leikkuunesteitä, sekä paksut kumimatot vähentääkseen koneen työstön värinöitä

2

CNC-kone piti ensin nostaa pöydälle ja vasta sitten itse kotelo, painon vuoksi

3

Kotelolla on sen verran painoa, ettei se nouse edes kahden nuoren miehen voimin

4

CNC-rungon ja pöydän väliin tuli vanhoista autonrenkaista valmistetut kumimatot jotka vaimentavat rungon värähtelyjä

3.4

MITTAUSTULOKSET

1.0-koteloversiosta oli käytetty paksuja vanerilevyjä ja vaahtomuovia seinämissä. Mittalaitteena toimi puhelimeen asennettu desibelimittari, jonka tarkkuus on tähän tarkoitukseen riittävä. Haasteeksi muodostuivat kuitenkin työstöstä lähtevät äänet, joihin vaikuttaa moni seikka. Esimerkiksi työstettävä materiaali, terän halkaisija työstönopeus. Alla olevat mittaustulokset ovat ovet suljettuina mitattuna. Työstömateriaalina on ollut MDF ja leikkaava terä 6 mm ja koneen nopeus on ollut noin 1000 mm/min. Havaitsin myös, että laitteistosta lähtee huomattavasti kovempi ääni silloin, kun on käytössä pidempi terä. Yllä olevat asetustiedot siitä syystä, että testi olisi toistettavissa samankaltaisilla asetuksilla, äänenvaimennusten lisäysten jälkeen.

16mm vaneri ja 10mm vaahtomuovilla CNC-äänitaso

55dB
1m

40dB
5m

37dB
Yläkerta

25dB
Makuuhuone

Kuva 17. Alla olevassa kuvassa on CNC-koneen alumiininen runko, kotelolon sisusta on vuorattu eristysmateriaalilla. Tommi Chan



Kuva 28. CNC-koneen vanerinen koteloitus ennen valkoiseksi maalaamista. Tommi Chan



Kuva 29. Purusäiliö. Tommi Chan

3.5 PURUNPOISTO

Koteloinnissa yhtenä merkittävänä tekijänä on purun poisto, jos halutaan, että laitteiston huoltovälit pysyvät kohtuullisina ja eikä haluta purun/pölyn leijailevan ulkopuolelle kotelon ovia avatessa. Tarvitaan siis tyhjennettävä astia, jonne työstöstä syntyvät purut kerätään, ettei imurin säiliö tukkeudu välittömästi. Miksi ei sitten valittaisi pölypussitonta imuria tähän tarkoitukseen? Ne ovat huomattavasti äänekkäämpiä tai kalliimpia pölypussillisiin imureihin verrattuna.

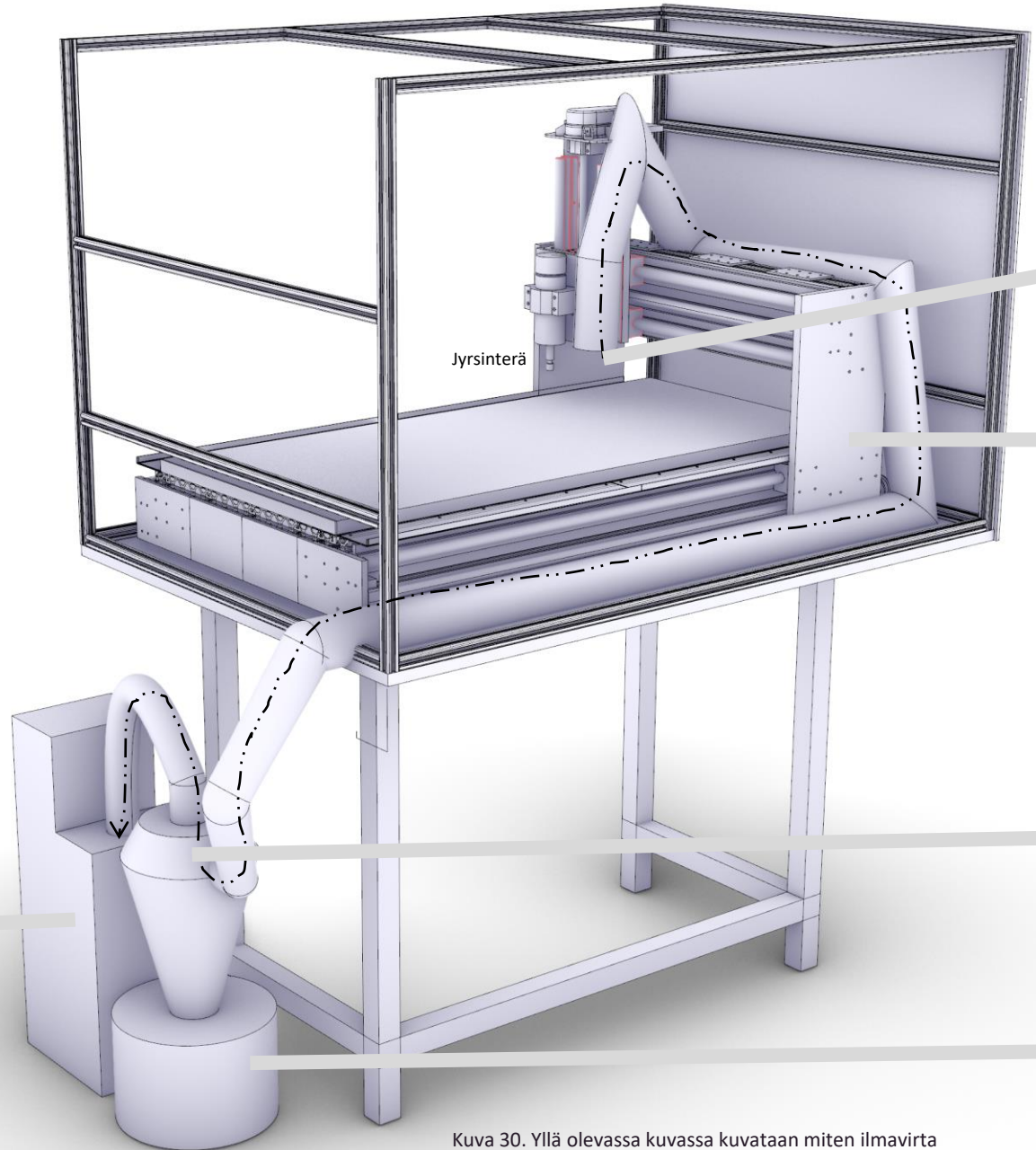
KORV

PURUNPOISTO

CNC-koneen työstäessä puumateriaaleja syntyy purua, joka pyritään poistamaan, jotta työstön päätyttyä, ovia avatessa huoneilmaan ei päätyisi niin paljon pölyä, sekä CNC-kone toimii mahdollisimman hyvin kun puupölyä ei päädy liikkuviin osiin, jolloin huoltoa ei välttämättä tarvitsisi niin usein tehdä.

Kuvassa imuriletku on kiinnitetty CNC-koneen liikkuvaan portaaliin, joka liikkuu jysinterän mukana, missä syntyy pölyä ja purua. Joka kulkeutuu pitkää imuriletkua pitkin Cyclon:lle, jonka tarkoituksena on luoda pyörre imuvirralle, jonka seurauksena ilmaa painavampi puru ja pöly laskeutuvat suppilomaisen muodon vuoksi alla olevaan purusäiliöön, sen sijaan, että päätyvät imurinpussiin

5
Koteloitu
imuri



1
Työstöstä
syntyvä puru

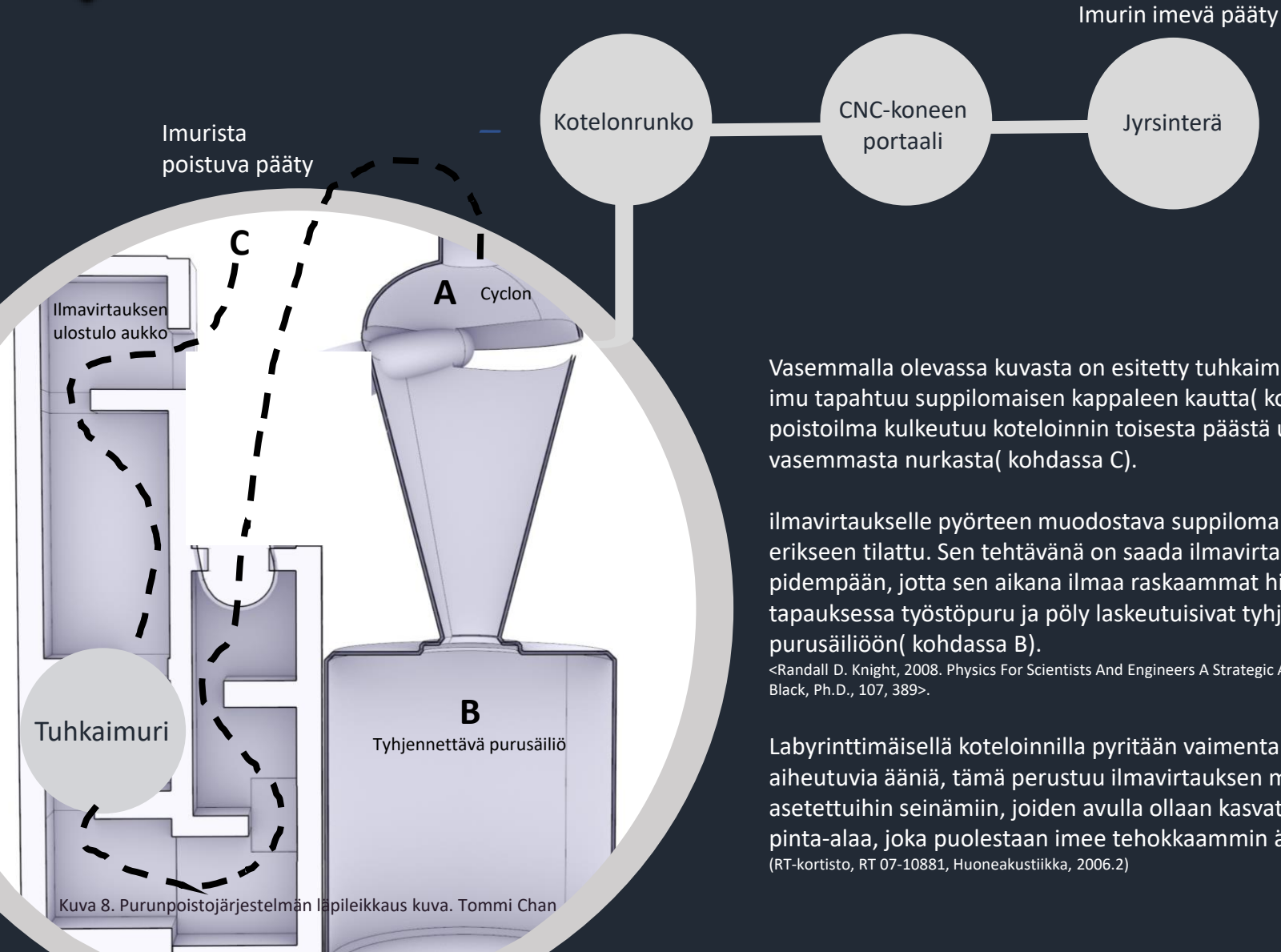
2
CNC-koneen
porttaali

3
Cyclon

4
Purusäiliö

Kuva 30. Yllä olevassa kuvassa kuvataan miten ilmapirta kulkeutuu koteloitulle imurille. Tommi Chan

KOTELOITU IMURI



Kuva 8. Purunpoistojärjestelmän läpileikkaus kuva. Tommi Chan



Kuva 32. On tuhkaimuri koteloituna oikealla ja vasemmalla on pyörteen muodostaja Cyclonosa, joka on kytketty väärin. Tommi Chan

Vasemmalla olevassa kuvasta on esitetty tuhkaimurin kotelointi, jossa imu tapahtuu suppilomaisen kappaleen kautta(kohdassa A). Puolestaan poistoilma kulkeutuu koteloinnin toisesta päästä ulos, kuvan vasemmasta nurkasta(kohdassa C).

ilmavirtaukselle pyörteen muodostava suppilomainen kappale on erikseen tilattu. Sen tehtävänä on saada ilmavirtaus viipymään pidempään, jotta sen aikana ilmaa raskaammat hiukkaset, eli tässä tapauksessa työstöpuru ja pöly laskeutuisivat tyhjennettävään purusäiliöön(kohdassa B).

<Randall D. Knight, 2008. Physics For Scientists And Engineers A Strategic Approach Second Edition: Adam Black, Ph.D., 107, 389>

Labyrinttimäisellä koteloinnilla pyritään vaimentamaan imurista aiheutuvia ääniä, tämä perustuu ilmavirtauksen matkan varrelle asetettuihin seinämiin, joiden avulla ollaan kasvatettu ääntä heijastavaa pinta-alaa, joka puolestaan imee tehokkaammin ääntä.

(RT-kortisto, RT 07-10881, Huoneakustiikka, 2006.2)



Kuva 33. Ilmavirta. Tommi Chan

3.6 KORVAUSILMA

Toimintaperiaate on sama kuin tuhkaimurin vaimentimessa, puinen koteloitua labyrinthimäisesti ja korvausilma kulkeutuu väylää pitkin kotelon sisään

Haasteena oli saada suljettuun koteloon ilmaa niin, ettei pääse ääntä ulos, joten tämä oli se helpoin ratkaisu

NÄ

ILMATIIVIYS

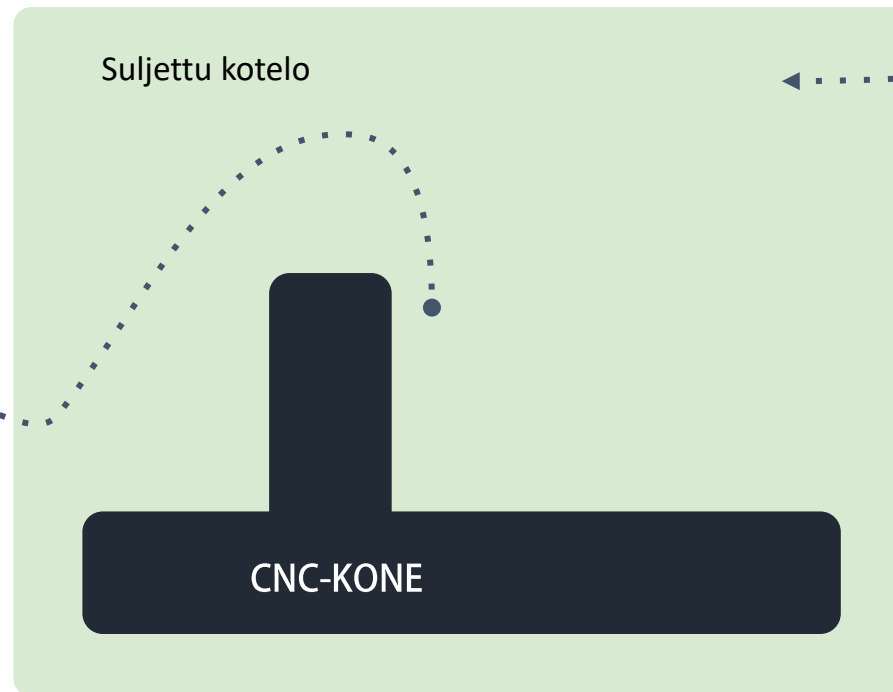
Miten alipaine syntyy?

Tällainen tilanne syntyy, kun on suljetun kotelon sisältä imetään imurilla ilmaa jatkuvasti pois. jolloin kotelon ulkopuolella on enemmän ilmaa. Se pyrkii tasoittumaan kotelon sisällä olevan ohuemman ilmassan kanssa, jolloin ilma pyrkii jatkuvasti kotelon sisälle painaen samalla ovet tiukasti kiinni. Tämä tarkoittaa myös sitä, että työstöstä irtoava pöly ei pöllähdä heti ovien avautuessa kotelon ulkopuolelle.

<Randall D. Knight, 2008. Physics For Scientists And Engineers A Strategic Approach Second Edition: Adam Black, Ph.D., 446>.

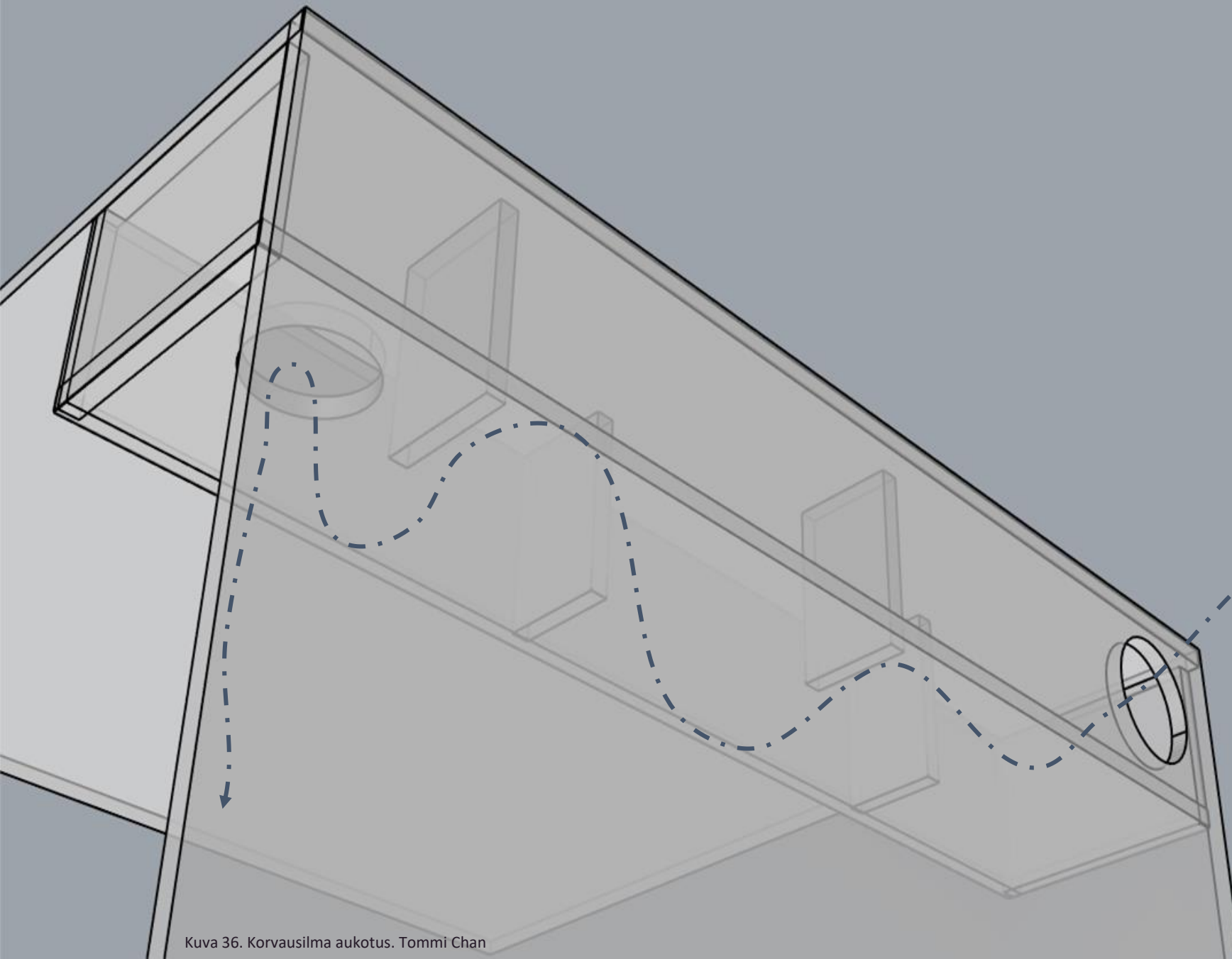


Imuri



Kuva 35. Ilmvirtausta kuvaava. Tommi Chan

Suljettu ilmatiivis kotelo, jonne syntyy alipaineistettu tila, kun imuri imee työstö pölyn lisäksi ilmaa kotelon sisältä, jolloin tarvitaan korvausilma aukko

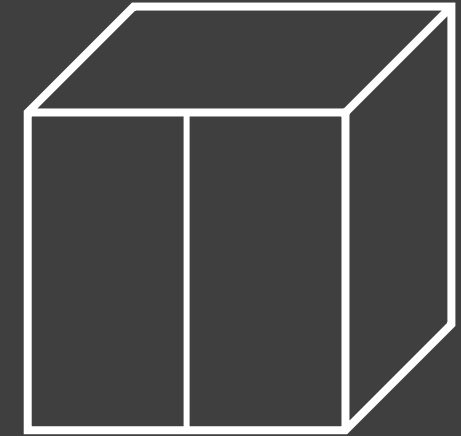


KORVAUSILMA TOTEUTUS

Kotelon sisälle on vedetty imuriletku, jonka tehtävänä on poistaa työstöstä irtoava pöly, jolloin tarvitaan myös korvausilma, kun tilasta imeytyy tarpeeksi ilmaa pois, tulee kotelosta alipaineistettu, jolloin imuteho heikentyy. Joka vuoksi tarvitaan korvausilma-aukotus mutta tässä tapauksessa se on huono asia, koska reikä kotelon rungossa tarkoittaa, että ääni pääsee sitä kautta karkaamaan ja suuri työ vaimennukselle valuu täysin hukkaan. Siitä syystä aukotusta varten täytyy tehdä kotelo, jonka sisällä käytävä mutkittelee, jotta mahdollisimman vähän ääntä pääsisi kotelon ulkopuolelle. Jokainen mutkitteleva seinä, joka tulee vastaan, imee itseensä matkalla ulos hieman ääntä, jolloin ääni vaimenee

(SIT ohjetiedosto, SIT 05-610038, 2006, 4).

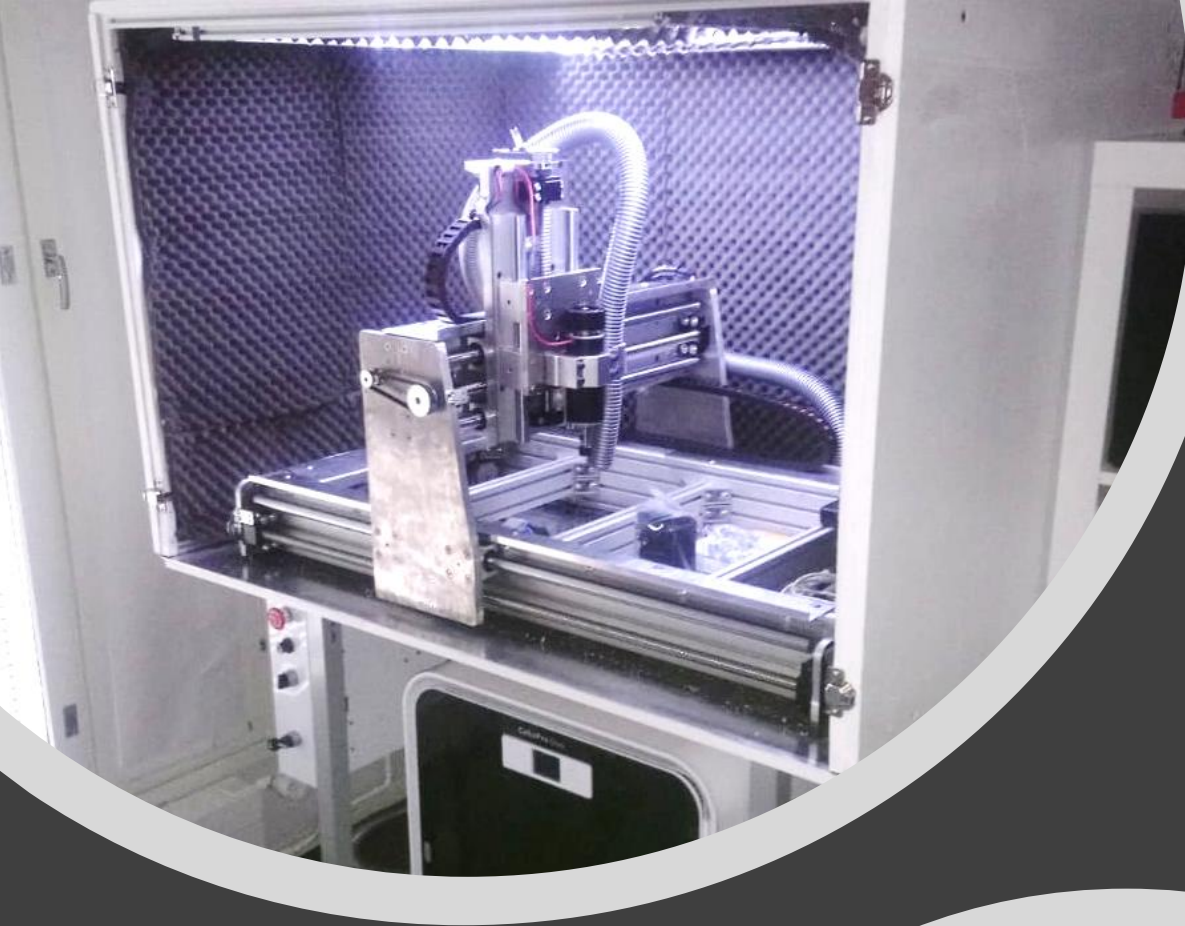
ILMA



Kuva 37. Suljettu kotelointi. Tommi Chan

3.7 NÄKYVYYS

Tällä viitataan laitteiston operoinnin näkyvyyteen. Kun halutaan kotiolosuhteisiin tuoda laitteisto, joka ei yleensä ole sellaisessa tilassa. Siksi laitteisto on naamioitu kalusteeksi, ja tässä tapauksessa kaapiksi. Siitä syystä kaapin sisällä olevaa jyrsiä käytettäessä tarvitaan hyvä valaistus

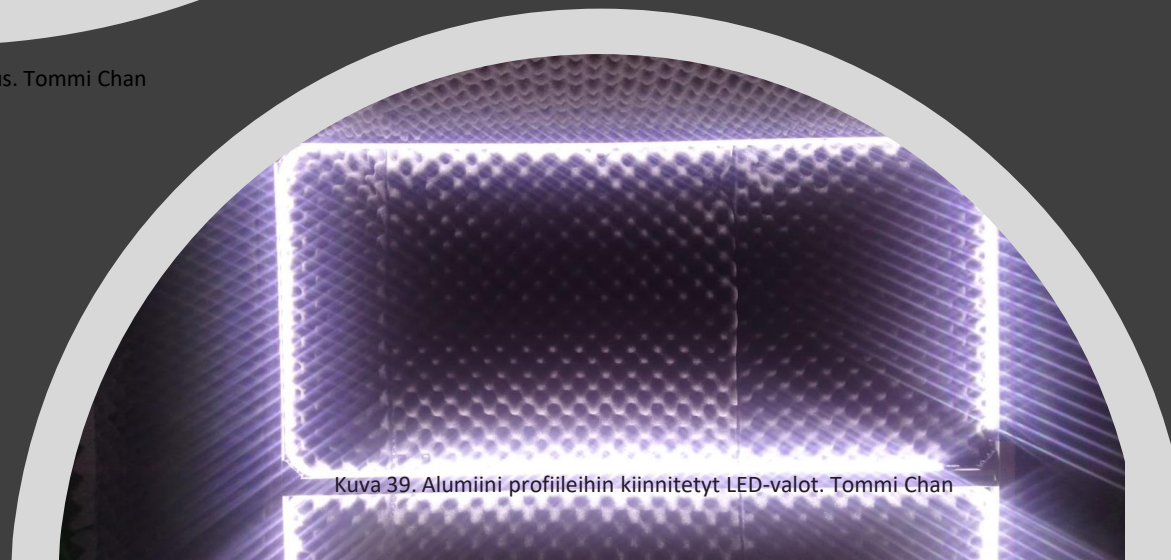


Kuva 38. CNC-koneen valaistus. Tommi Chan

◆ NÄKYVYYS

Valaistus on toteutettu alumiinikehikkoa pitkin kiertävällä LED-nauhalla, joka on sijoitettu kotelon katto-osaan, josta se valaisee työtasolle. Koska kotelon sisusta on päällystetty pehmeällä vaahtomuovilla, johon tarra pintaista LED-nauhaa on hyvin hankalaa kiinnittää, jonka vuoksi se on kiinnitetty alumiinikehikkoon. Myöskään 180cm pituinen henkilön silmille ei suoraan kirkkaat LED-valot paista, alumiinikehikon ansiosta.

Vasemmasta laitekuvasta puuttuvat ovet vielä, mutta kun ne ovat asennettuna, täytyy laitteen toimintaa voida päästä näkemään ilman, että avaa ovia muutoin pöly- ja äänieristeisiin käytetty työ valuu täysin hukkaan. Eikä tässä tapauksessa ikkunoiden asentaminen ollut mahdollista, koska laitteistoa ei saanut näkyä olohuoneessa, se oli yksi ehdoista avopuolison hyväksynnästä kotiympäristöön. Joten asensin kotelon sisäpuolelle IP-kameran, joka on internettiin yhdistettynä, jolloin pystyn tarkkailemaan laitteiston toimintaa etäältä, jollain internettiin yhdistetyllä laitteistolla.



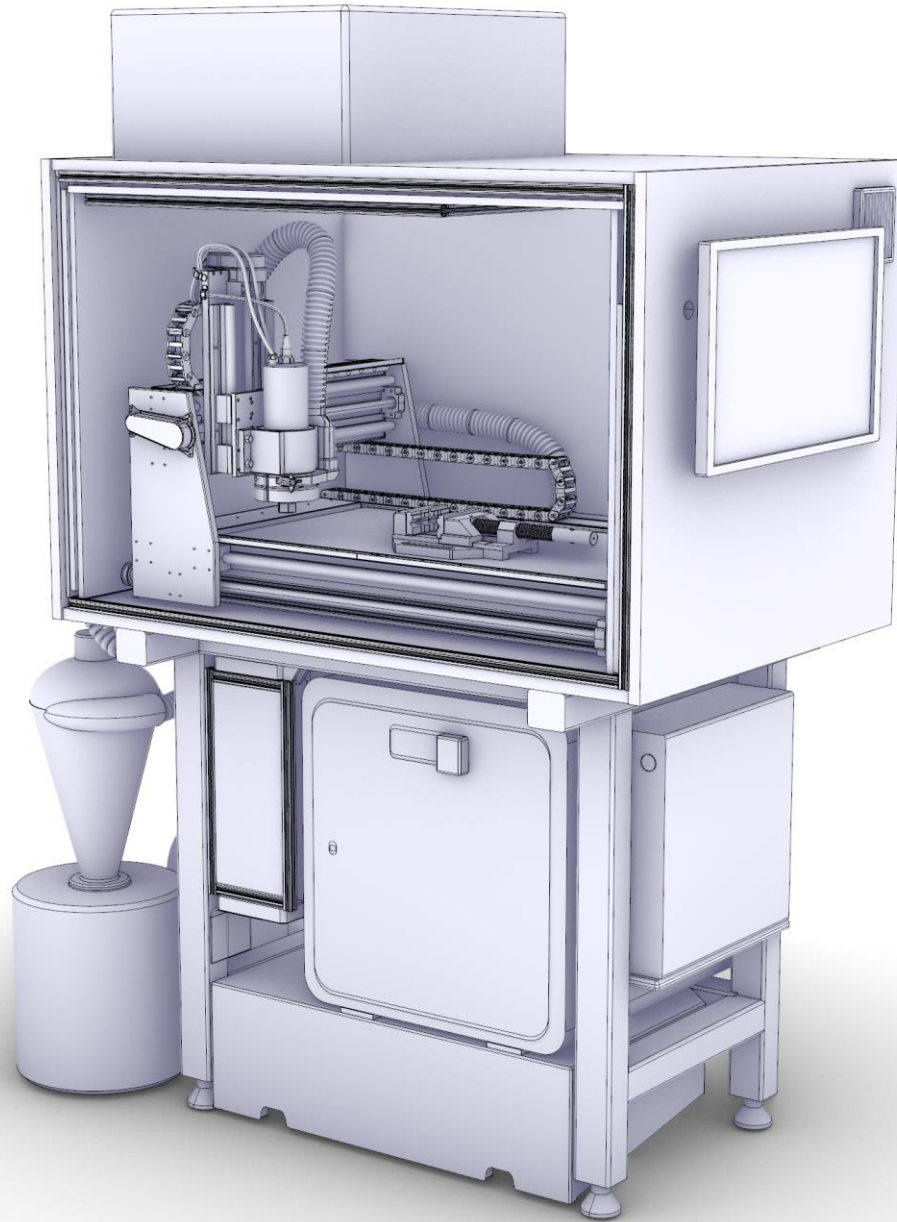
Kuva 39. Alumiini profiileihin kiinnitetyt LED-valot. Tommi Chan

50dB

Laitekoteloinnin
äänitaso kappaleita
työstettäessä

4.1

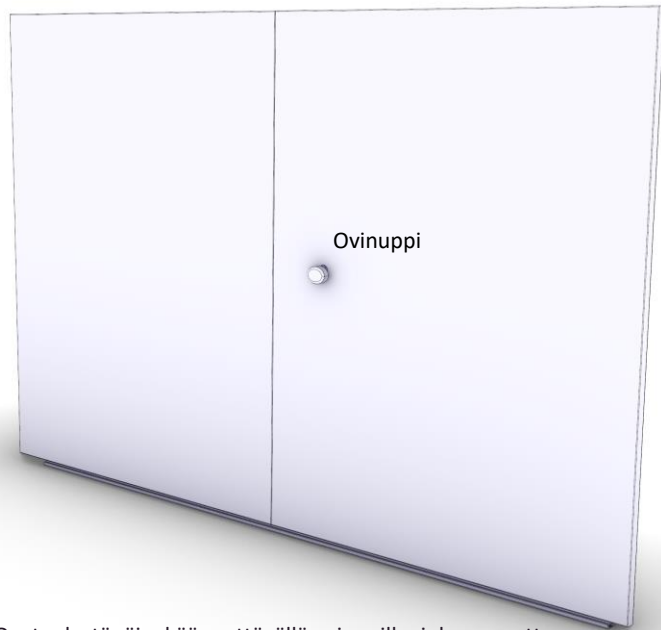
KOTELON SUUNNITTELU 1.5



Lähdin koteloa parantelemaan lisäämällä kotelon massaa ja ilmatiivyyttä. Käytin tavallista kipsilevyä ja ohutta vaahtomuovia. Pelkästään lisäämällä paksut kumimatot seinämille eivät vaimentaneet koneen työstöäänä, joten päätin lisätä kipsilevyseinämät ja ilmatilaa niiden välille

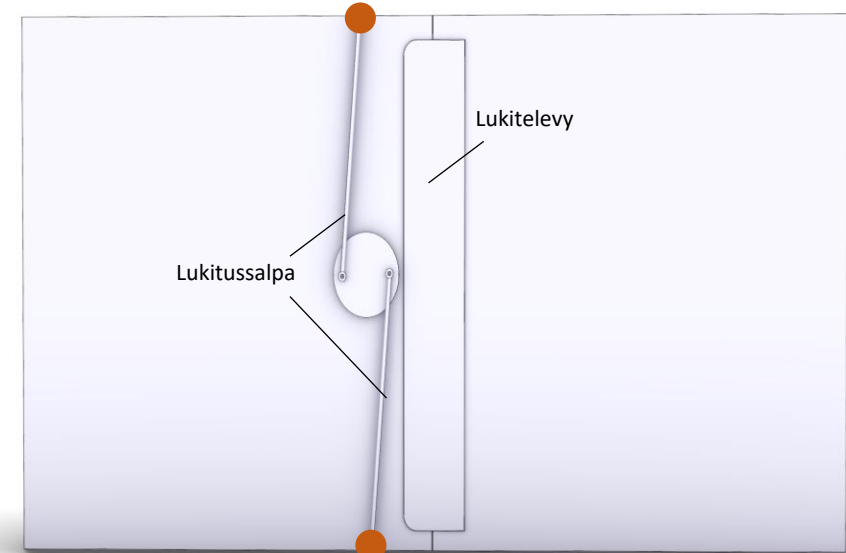
(https://www.omataloyhtio.fi/artikkelit/15212/paras_tapa_aanieristaa_.htm).

Kahden seinämän välillä oleva ilmatila vaimentaa tehokkaasti, tietysti ilmatilan täytyy olla mahdollisimman ilmatiivis, jotta siitä on hyötyä. Samaa rakennusmenetelmää käytetään huoneiden väliseinien rakentamisessa, mikä on todettu toimivaksi. (SIT ohjetiedosto, SIT 05-610038, 2006. 6)



Kuva 42. Ovet edestäpäin, käännettävällä ovinupilla, joka vapauttaa kuvan 43. punaisella merkityt lukitus-salvat. Tommi Chan

4.2 OVI SUUNNITTELU



Kuva 43. Ovet takaapäin kääntyvät lukitus salvat, jotka kiilautuvat alumiini uriin, täten ovet pysyvät kiinni. Toisella puolella ovea on lukitelevy, jonka avulla se pysyy lukittuna. Tommi Chan

Ovet toimivat normaaleilla ovisaranoilla, joista toisessa on käännettävä lukkosalpa, jonka avulla molemmat ovet lukittuvat kotelorunkoon. Tähän ratkaisuun päädyin, koska se oli helpoin ja esteettisin ratkaisu, jolloin rungon ulkopuolelle jää vain näkyviin pieni ovennuppi. Sen sijan, että olisi käytössä useita näkyviin jääviä lukitussalpoja. Itse kotelo on sijoitettu olohuoneeseen, jonka vuoksi se on naamioitu kalusteeksi, useammat vieraat eivät edes tiedä koko laitteiston olemassaolosta, ellei sitä erikseen mainita. Vaneriset ovet ovat päällystetty sisustusmuovilla, joka on yhtenäinen puukuvioltaan olohuoneessa olevien kalusteiden kanssa. Runkokotelon ja ovien väliin jäävä reunus on tiivistetty ikkunatiivisteellä, joka estää tehokkaasti ilmanvuodon, mikä merkitsee tässä tapauksessa, ettei ääni pääse karkaamaan kotelon ulkopuolelle.

Imurin päällä ollessa saatiin aikaan vakuuminen kotelo tila, kun peitin vaihtoilmakotuksen väliaikaisesti teipillä, jolloin pystyin aistinvaraisesti kuuntelemaan kotelon saumoista, että mistä kaikkialta kotelointi mahdollisesti vuoti ilmaa.

Havaintojen mukaan

- seuraavista;
- saranoista
- ovien nurkista
- päätyseinän alanurkasta
- kahden oven välisestä saumasta

Lisään ilmaa vuotaviin kohtiin joko saumaustaastia, silikonilla tai ikkunatiivistettä, jonka jälkeen teen uudelleen kuulohavaintotestin, kyseisiin kohtiin. Havaintotesti suoritetaan niin useasti kuin on tarpeellista saavuttaakseen mahdollisimman ilmatiiviin lopputuloksen.

Usean tiivistämiskerran jälkeen sain kotelon riittävän ilmatiiviiksi, kun imuri on päällä ovia ei saa auki vetämälläkään, koska kotelo on alipaineistettu. Pientä ilmavirtaa on vielä havaittavissa ovien nurkissa, jota en saanut tiivistenauhalla/silikonilla tiivistettyä.

4.3 YHTEENVETO VAIMENNUKSESTA

Vesipumppu saatiin vaimennettua 21dB, lopulliseen sijoituskohteeseen päädyttiin vesisäiliön tilavuuden vuoksi.

Vesipumppu
Ilman koteloa
53dB

Vesipumppu
CNC-kone koteloinnin kanssa
43dB

32dB
Vesipumppu

Teknisten ja taloudellisten syiden vuoksi en pystynyt tavoite aikaan mennessä mittaamaan karamaattorin äänentasoa.

Karamoottori
Koteloimattomana,
materiaalia työstettäessä
84dB

Karamoottori
Koteloituna 1.0
55dB

??dB
Karamoottori
Koteloituna
1.5

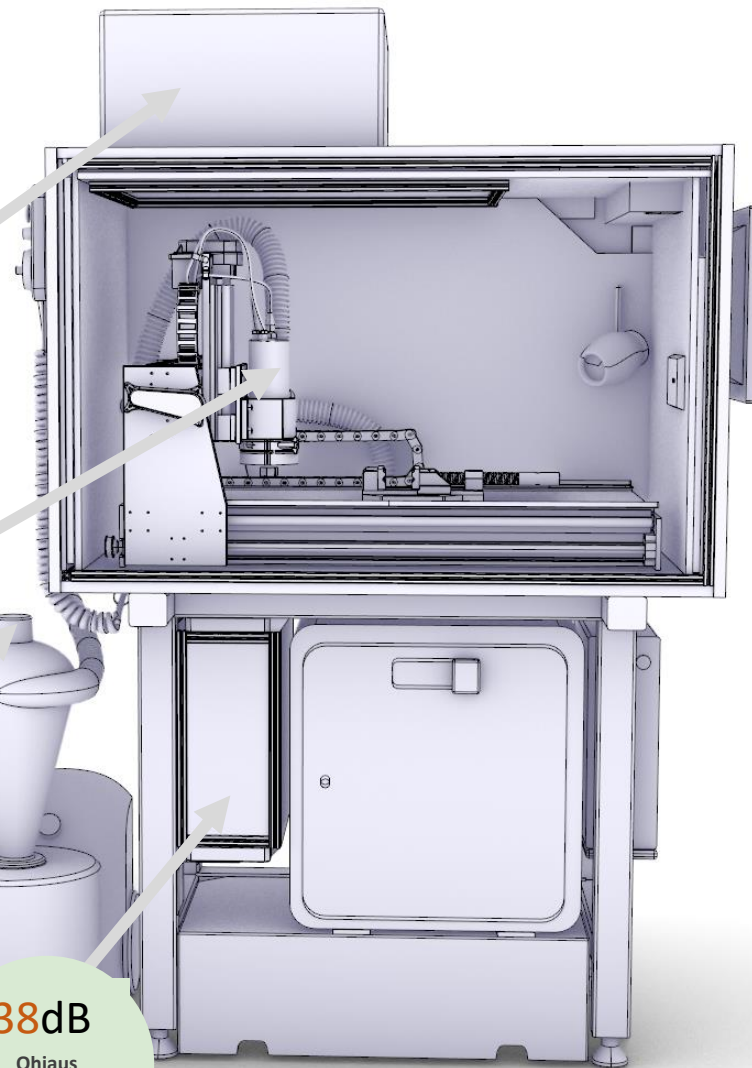
Imurissa päädyin lopulta tuhkaimurin sijaan hiljaiseen koti-imuriin, jossa päästiin parhaimmillaan 44dB vaimennukseen lähtökohtaan verrattuna.

Tuhkaimuri
Ilman koteloimattomana
90dB

Tuhkaimuri koteloituna
64dB

46dB
Hiljainen
koti-imuri

38dB
Ohjaus



Kuva 44. Äänilähteet. Tommi Chan

4.1 KOKONAIS MELUTASO

Havainnekuvasta nähdään, että koteloimattoman CNC-koneen yleinen työstömelu ylittää lähes 90dB. Kun taas vaneriseinämillä ja vaahtomuovilla päästiin 55dB joka on noin vähän hiljaisempi kuin ihmisen normaali puhetaso.

Parannellulla koteloratkaisulla päästään lähemmäksi 50dB tai alle riippuen työstöstä, joka vastaa tavallisen astiapesukoneen äänen tasoa. Alle tämän lukeman on vaikea päästä, ellei käytetä tehokkaampia äänenvaimennusratkaisuja, joissa budjetti kasvaa huomattavasti nykyiseen ratkaisuun verrattuna.

20-25dB

Makuuhuoneen taustamelu yöllä

53dB

Astiapesukone huoneistossani

??dB

CNC-koneen työstö ääni 1.5 koteloinnilla

??dB

CNC-koneen työstö ääni 1.0 koteloinnilla

60-70dB

Ihmisen normaali puhetaso

90-110dB

Disco tai Rock-konsertti

CNC-koneen ilmankotelo

Mikä vaimennustaso on riittävä?

Vaimennustaso on riittävä silloin kun ollaan vähän alle ihmisen normaalin puhetason, toisaalta jos tarkastelun alla on kotiympäristö niin laitteiston olisi hyvä olla siitä vielä hiljaisempi, koska yleinen melutaso tilassa on alhaisempi kuin julkisissa tiloissa. Kokonaismelutasoon vaikuttaa myös kotelointia ympäröivä tila, jota pystytään myös vaimentamaan, mutta se tulee hyvin nopeasti kalliiksi, kun heijastuvaa pinta-alaa on runsaasti.

4.5 VALMIS KOTELO 1.5

Kotelon ovet ovat yhtenäiset olohuoneen muiden kalusteiden kanssa, jolloin kalustekaappi sulautuu hieman paremmin ympäristöönsä. Koteloinnin alapuolella sijaitsee CNC-koneen ohjauksen lisäksi myös ulos vedettävä 3D tulostin. Työpisteen edustalle on asetettu akryylinen lattiasuoja, jotta välillä käsistä putoilevat työkalut ja terät eivät vahingoittaisivat koneen edustaa. Pääsy kaikille ohjaukseen liittyville näppäimille on suojattu, jolloin se on myös lapsiturvallinen. Huoneistossa ei ole televisiota, joten koneen seinässä oleva näyttö luulla usein miten pieneksi televisioksi. Purunpoistonurkkaus on hieman kesken näissä kuvissa vielä.

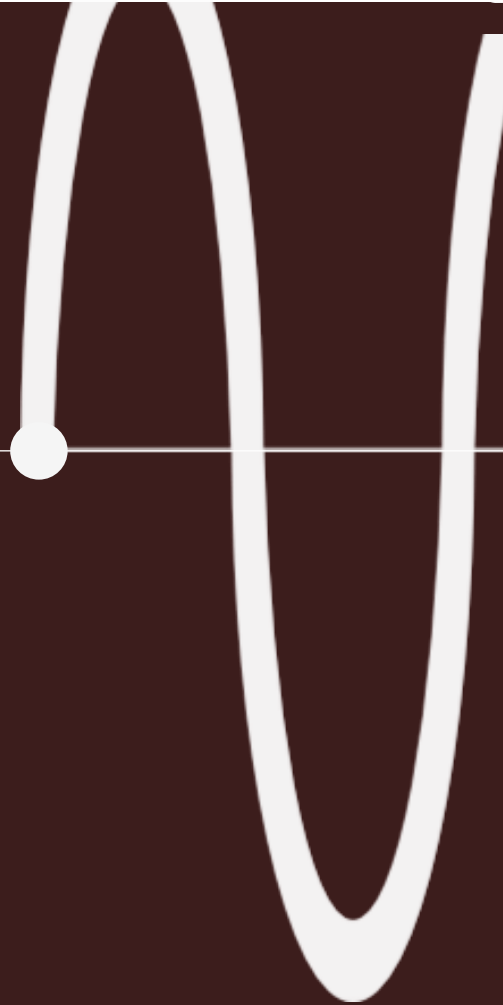


Kuva 45. Kotelointi 1.5 versio edestäpäin.



Kuva 46. Kotelointi 1.5 versio sivusta päin.
Tommi Chan

5.1 AKTIIVINEN KOTELO VAIMENNUS

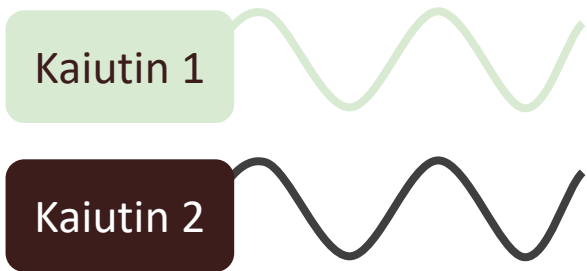


avulla pystyttäisiin rakentamaan ohutseinäisempi tai läpinäkyvästä materiaalista oleva kotelointi, joka olisi melkein yhtä hyvä äänieristysominaisuuksiltaan, kuin tavallinen suljettu laatikko, jonka sisälle ei näe. Tavoitteena on opinnäytetyössä saada rakennettua pienoismalli kotelosta, joka toimisi testialustana. Näin ollen sitä voidaan soveltaa täysikokoisessa mallissa. Läpinäkyvyydellä pyritään parantamaan turvallisuutta, kun nähdään mitä kone oikeasti tekee suljetun kotelon sisällä.

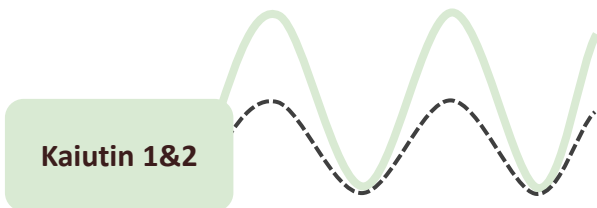
Kuva 47. Aalto. Tommi Chan

5.1 HAVAINNEKUVAT ÄÄNIAALTOJEN VAIHEISTA

SAMASSA VAIHEESSA



Yllä olevasta kuvasta Kaiutin 1 ja 2 toistavat samaa aallon taajuutta samassa vaiheessa, jolloin alla olevasta kuvasta havaitaan, että ne voimistavat toisiaan



Kuva 48. Aallot samassa vaiheessa. Tommi Chan

VASTAKKAISESSA VAIHEESSA



Kun laitetaan Kaiutin 1 ja 2 toistamaan vastakkaisessa vaiheessa toisiinsa nähden, aallot kumoavat toinen toistaan. Teoreettisella tasolla tällä saadaan tuotettua äänen vaimentuma.



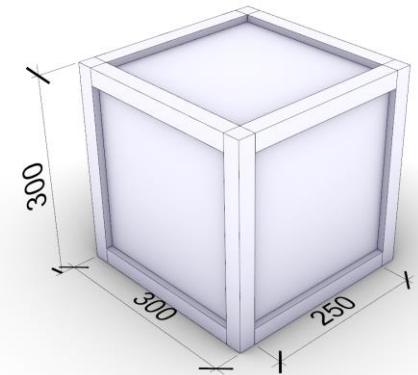
Kuva 49. Aallot vastakkaisessa vaiheessa. Tommi Chan

<Randall D. Knight, 2008. Physics For Scientists And Engineers A Strategic Approach Second Edition: Adam Black, Ph.D., 636,637,648>

5.2 TESTIALUSTAN SUUNNITTELU

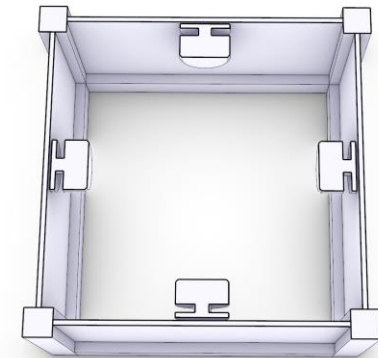
Testialustana toimiva pienoismallikotelo on 30cm kuutio, jonka viidelle seinämälle on asennettu resonaattorit. Runkona on alumiiniprofileista rakennettu kehikko, jonka seinämät ovat ohutta vaneria. Resonaattorit toimivat samalla lailla kuin tavallisetkin kaiuttimet paitsi että ne tarvitsevat pinnan, jonka avulla ääni syntyy, toisin kuin tavallisissa kaiuttimissa, joissa on ohut paperinen kalvo valmiiksi kiinnitettynä. Kaiuttimet tarvitsevat vahvistimet toimiakseen, joten olen tässä käyttänyt kolmea erillistä vahvistinta viidelle resonaattorille, mikä mahdollistaa äänen vahvistustason säätelyn. Äänen vahvistustaso on riippuvainen kotelon sisältä olevasta äänen tasosta, jos halutaan ääntä kumota äänellä.

Alkuperäisessä suunnitelmassa oli tarkoitus saada tuotettua taajuuksia Arduinolla, joka on avoimeen ohjauselektroniikkaan pohjautuva ohjelmointiympäristö, jota ohjelmoidaan C ja C++ kielellä.



Kuva 50. Testikotelon mitat. Tommi Chan

Läpileikkauskuva



Kuva 51. Läpileikkaus kuva testikotelosta. Kotelon jokaisella seinämällä on yhdet resonaattorit, jotka toistavat vastakkaista aallontaajuutta, mitä kotelon sisältä syntyy. Tommi Chan

5.3 Resonaattorien

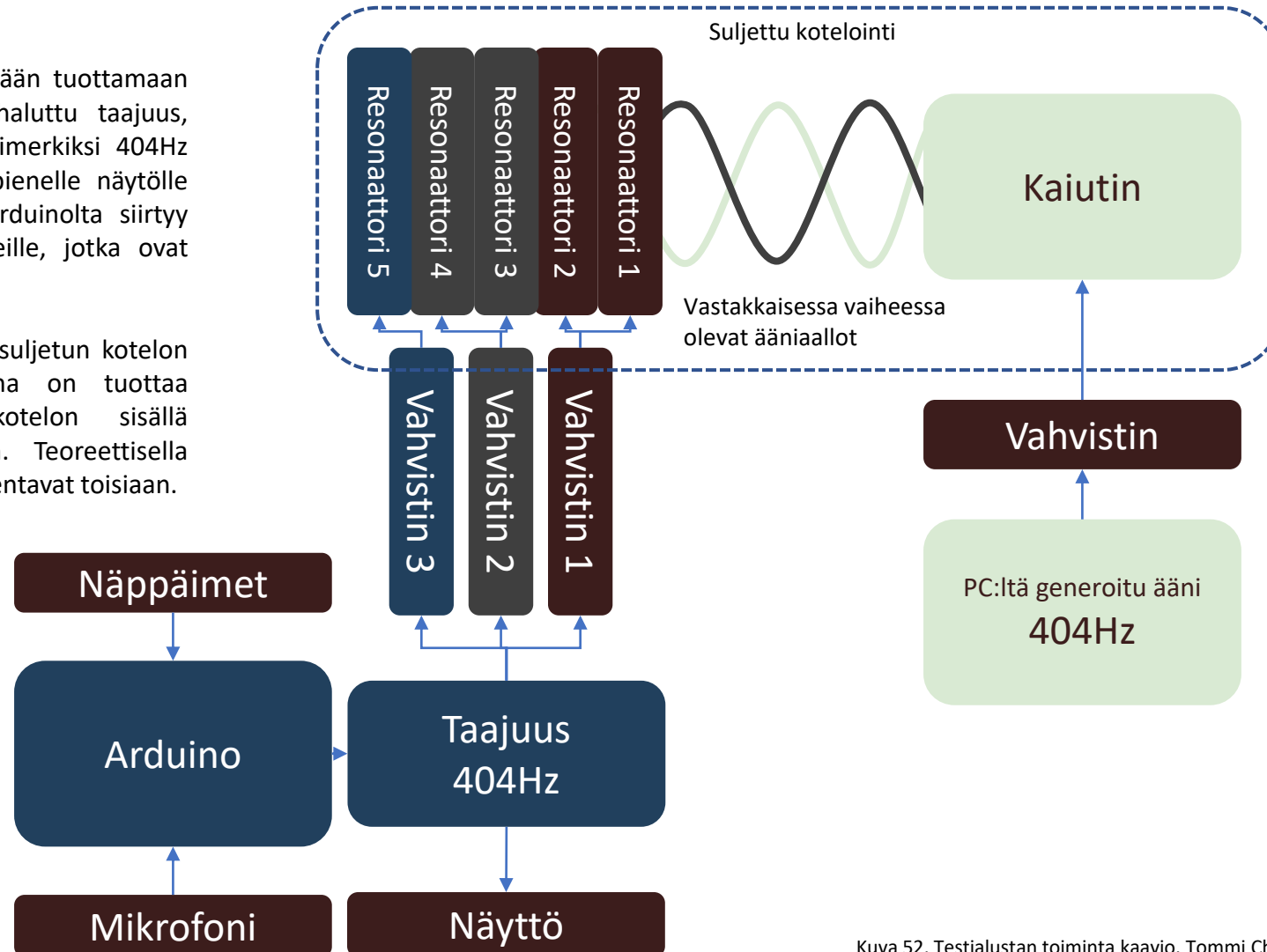
Toimintakaavio

Suunnittelin käyttäväni
Arduinoa ohjauksessa ja
äänentuottamisen hallinnassa.

Kaaviolla kuvataan kuinka pystytään tuottamaan manuaalisesti näppäinvalikolla haluttu taajuus, joka tulee näkyviin näytölle. Esimerkiksi 404Hz valitaan näppäimillä, se tulee pienelle näytölle näkyviin ja välittömästi tieto Arduinolta siirtyy vahvistimen kautta resonaattoreille, jotka ovat kytketty vastakkaiselle vaiheelle.

Resonaattorit ovat kiinnitettynä suljetun kotelon seinämille, joiden tarkoituksena on tuottaa kumoavaa aallontaajuutta, kotelon sisällä toimivaan kaiuttimeen nähden. Teoreettisella tasolla näin ollen ääniaallot vaimentavat toisiaan.

<Randall D. Knight, 2008. Physics For Scientists And Engineers A Strategic Approach Second Edition: Adam Black, Ph.D., 636,637,648>

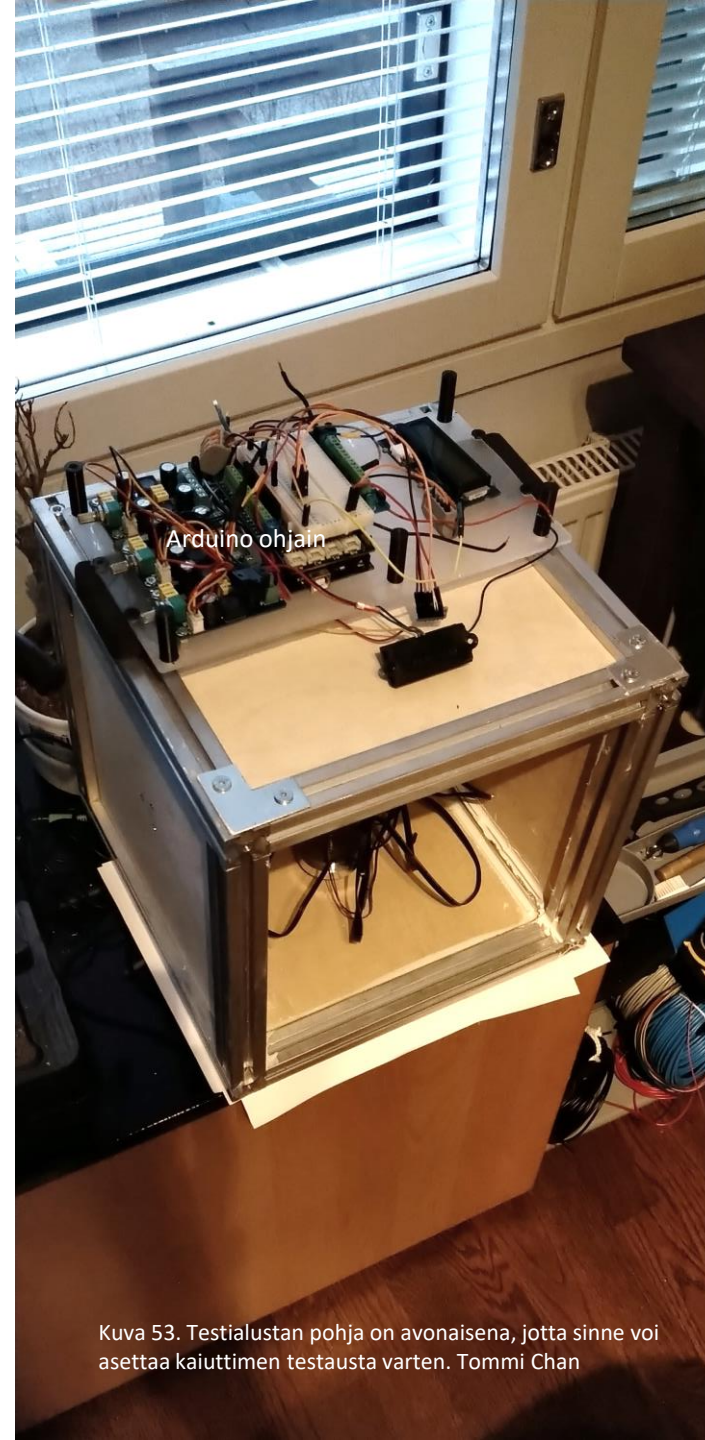


Kuva 52. Testialustan toiminta kaavio. Tommi Chan

5.4

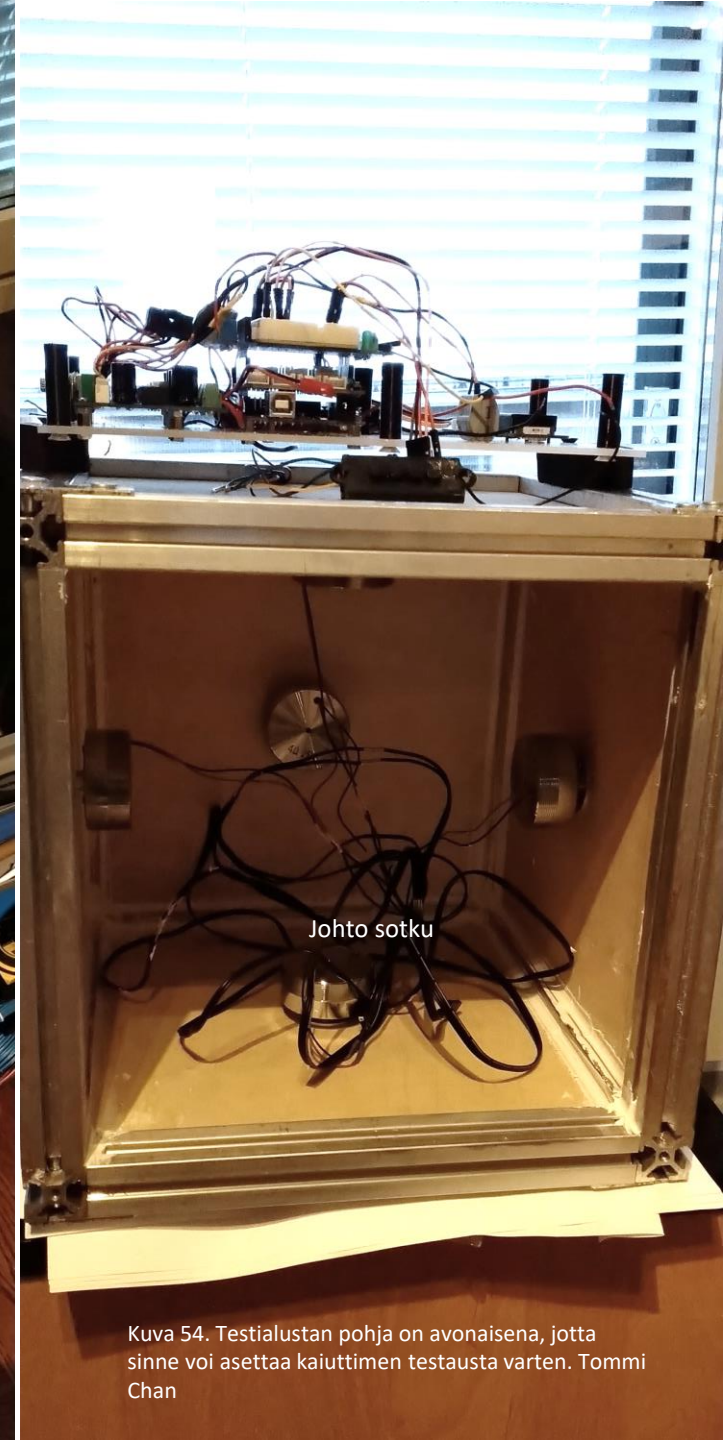
Testialusta 0.1v

Prototyyppi testialusta on rakennettu 25x25mm alumiiniprofiileista, joiden uriin on liu'utettu 6.5mm vanerilevyt. Niihin puolestaan on kiinnitetty kuvan mukaiset pyöreät resonaattorit kotelon sisäpintoihin. Kotelon ulkopuolella oleva johto sotku sisältää kaiutin vahvistimen ja Arduino pohjaisen prototypointilevyn, jolla pystytään mahdollisesti ohjaamaan värähdysselementtejä



Arduino ohjain

Kuva 53. Testialustan pohja on avonaisena, jotta sinne voi asettaa kaiuttimen testausta varten. Tommi Chan



Johto sotku

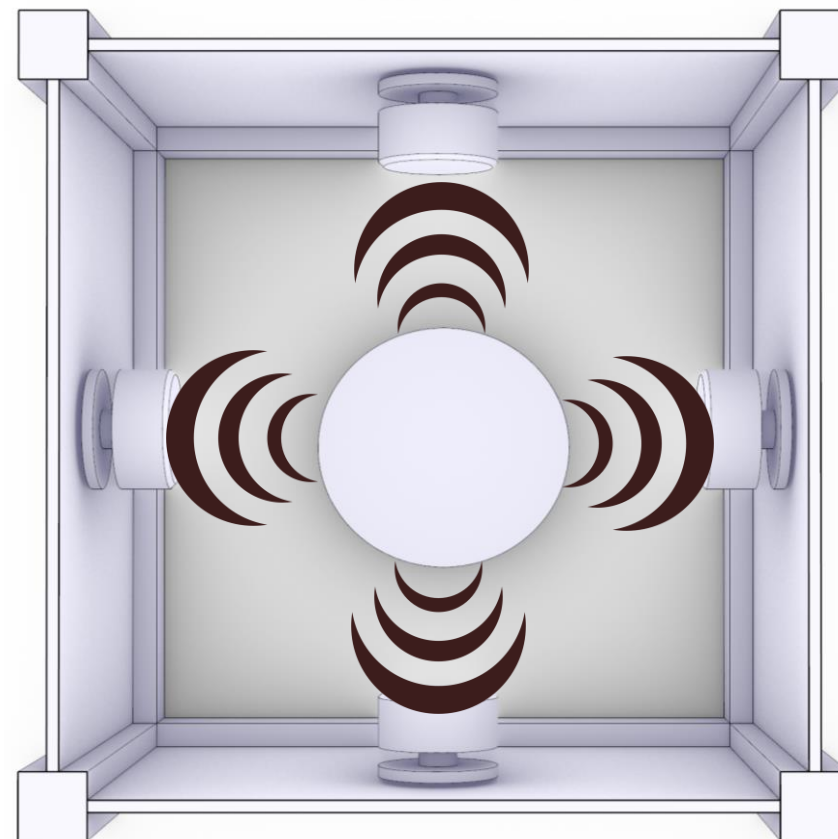
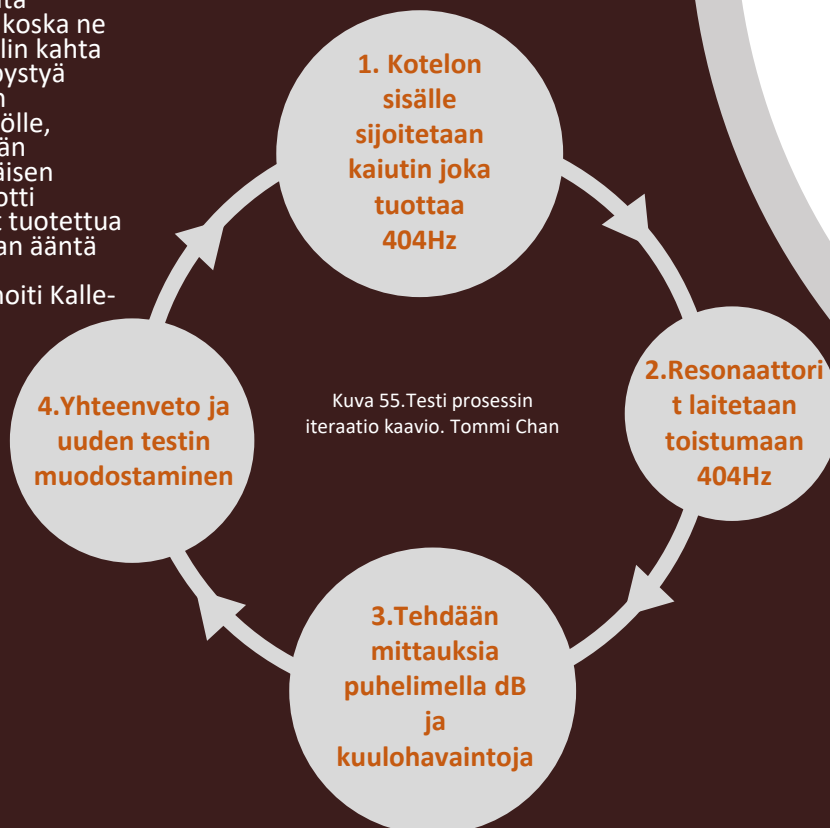
Kuva 54. Testialustan pohja on avonaisena, jotta sinne voi asettaa kaiuttimen testausta varten. Tommi Chan

5.5

TESTIN SUORITTAMINEN

Testi toteutettiin seuraavasti, kotelon sisäpuolelle asetetusta kaiuttimesta toistettiin 404Hz taajuutta ja vastaavasti resonaattoreille syötettiin 404Hz vastakkaisessa vaiheessa, jolloin teoreettisella tasolla niiden olisi pitänyt kumota toisensa, mutta kokeellisessa testissä näin ei ollut. Tarkempiin analyysiin olisi tarvittu oskilloskooppia ja mikrofonia.

Muitakin haasteita mahtui matkan varrelle kuten tietyn taajuuden tuottaminen osoittautui lähes mahdottomaksi tehtäväksi pelkästään koodauksen avulla, vaikka käytimme pohjana muiden projektien koodipohjia, jotka lopulta jouduimme kirjoittamaan lähestulkoon uudestaan, koska ne eivät soveltuneet tähän käyttötarkoitukseen. Kokeilin kahta erilaista Arduino ohjainkorttia, joiden olisi pitänyt pystyä tuottamaan haluttua taajuutta, mutta ensimmäisen ohjainkortin kohdalla liitännät, eivät riittäneet näytölle, äänentuottamiseen sekä näppäimille, joilla pystytään säätelemään tuotettavaa äänentaajuutta. Jälkimmäisen ohjainkortin kohdalla, jostain syystä 404Hz sijan tuotti mittaustulostenperusteella noin 1000Hz. En saanut tuotettua haluttua taajuutta, joten lopulta päädyin tuottamaan ääntä selainpohjaisella ohjelmalla (<http://onlinetonegenerator.com/>). Koodiosuutta hoiti Kalle-Petteri Pihlastie.



Kuva 56. Yllä olevassa kuvassa on testikotelon läpileikkaus kuva, jossa keskeltä lähtee ääniaaltoja kaiuttimesta, jotka osuvat seinämiin. Kotelon seinämiin on kiinnitetty resonaattorit, joiden avulla näitä ääniaaltoja olisi tarkoitus kumota. Tommi Chan

TESTAUKSEN ONGELMAKOHDAT

Ongelmaksi syntyy äänilähteen etäisyys kustakin seinämästä, vaikka toistettava taajuus onkin 404Hz niin tämä taajuus saapuu murto-osasekunneissa eri aikaan jokaiselle seinämälle, jolloin kumoavaa vaihetta ei välttämättä synny. Ilman mittalaitteita ei voida hienosäätää taajuuden vaihetta kovinkaan tarkasti.

Ratkaisuna tähän yllä olevaan ongelmaan voisi olla kotelon sisällä toimivat mikrofonit, jotka mittaavat kunkin seinämälle saapuvaa ääntä ja toistavat sen vastakkaisessa taajuudessa. Mikrofonien lisääminen kotelon sisälle tuo lisäongelmia kuten mahdollista häiriösignaalia aiheuttava karamoottori, ja mikrofoni äänen kiertäminen, kun se asetetaan liian lähelle resonaattoria.

Miksi 404Hz?

Ensimmäisten mittaustulosten perusteella nimenomaisella taajuudella äänenpaine desibeleinä oli huomattavasti korkeammalla työstettäessä MDF-materiaalia, joten tavoitteena on saada vaimennettua yleisenäänen tason lisäksi myös 200-1000 Hz:n aluetta. (Mittaustulos piikkejä löytyi edeltä mainitulta alueelta.)

Taajuuden vaihe on millisekunneista kiinni

Ei pystytä mittaamaan tuloksia tarkasti

Kovista seinistä syntyvät heijastukset muuttavat vaihetta

Mikrofoni?

San pidettyä budjetin mahdollisimman alhaisena käyttämällä pois menossa olevia / menneitä materiaaleja. Tästä syystä pyritään näiden reunaehtojen sisällä tekemään mahdollisimman hyvä kotelointiratkaisu. Vanerilevyt sain Metropolialta ilmaiseksi tätä projektia varten, ne sahattiin vanhoista pöytälevyistä. Kotelon jalat sain Aallon muuttaessa pois vanhoista tiloista: ne oli jätetty lojumaan pois heitettäväksi. Rakennuseristeen löysin rakennustyömaan roskalavalta, joten sekään ei maksanut mitään. Kipsilevyt sain ilmaiseksi jonkun talon rakennusprojektin päätyttyä Tori.fi:stä.

5.7 Kokonaiskustannus

Passiivinen

äänenvaimennus

-Alumiiniprofiili lukitukselle ja valoille	10€
-Valot	7€
-Nuppi	6€
-Ruuvit	30€
-Niitit	4€
-Jäähdytysastian pidikkeet	40€
-Paksut kumimatot	100€
-Rakennuskitti	7€
-Valkoinen maali	20€
-Silikoni	5€
-Ikkunatiivisteet	30€
yht.	259€

Aktiivinen

äänenvaimennus

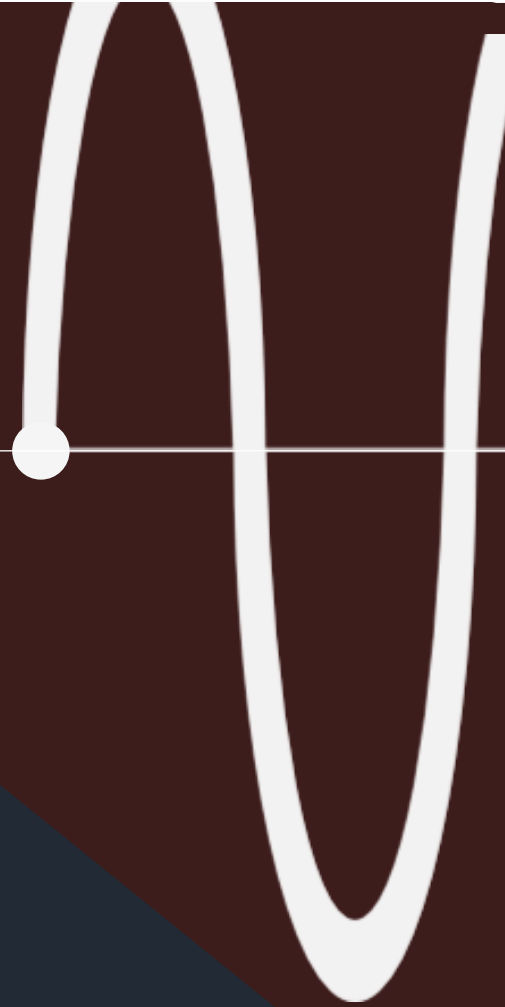
-Frequency generator	10€
-Arduino shield	10€
-Arduino lcd	10€
-Vahvistimet (3x)	23€
-Resonattorit	65€
-Vaneri	15€

yht. 133€

392€

6.0

2.0 KOTELO VAIMENNUS



Konseptiratkaisussa on käytetty hyväksi edellisiä koteloversioita suunnittelun pohjana. Ainoana erona on, että kotelo sijoittuu FabLab- maiseen tilaan, joka on erilainen asuinympäristöön nähden Siksi koteloa ei tarvitse naamioida kalusteeksi vaan se saa olla laitekotelo, jonka tehtävänä on luoda mahdollisimman hiljainen ja turvallinen käyttöympäristö. Tässä tapauksessa tarkastelun painopisteessä on äänenvaimennus, jolloin pyritään hiljentämään kokonaismelutaso mahdollisimman hiljaiseksi. En myöskään rajoita suunnittelua budjetilla.

Kuva 57. Aalto. Tommi Chan



6.1

2.0 KOTELOINTI

ÄÄNEN VAIMENNUS

Koteloinnin äänenvaimennuksen suunnittelussa on otettava kolme pääkohtaa huomioon, joihin viitataan alla olevassa kuvassa. Niistä kohdista syntyvät eniten ääntä havainnoinnissa.

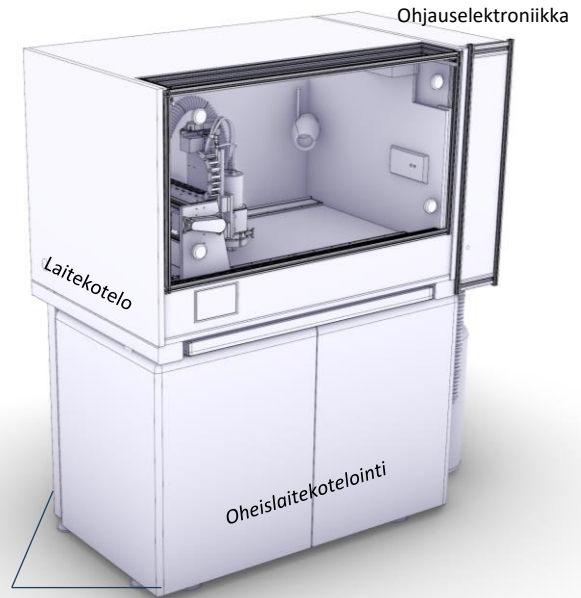


50dB

Laitekoteloinnin
äänitaso kappaleita
ostettaessa arvio

6.2

KOTELON SUUNNITTELU 2.0



Teräksiset
pöydänjalat

Kotelo 2.0 pienille ja äänekkäälle laitteistolle

Uudelle koteloinnille tärkeimpänä painoarvoina olisi mahdollisimman alhainen äänentaso laitteistoa käytettäessä. Tässä suunnittelussa en rajoita budjetilla suunnittelua. Koteloinnin on tarkoitus sijoittua FabLab-tyyppiseen ympäristöön, jossa koteloinnin ulkonäöllä ei ole yhtä tarkkaa merkitystä kuin asuinympäristössä, minkä vuoksi on mahdollista käyttää läpinäkyviä ovia. Koteloitu laitteisto koostuu kolmesta eri koteloinnista

- Ohjauselektronikan
- Laitteiston
- Oheislaitekoteloinnista

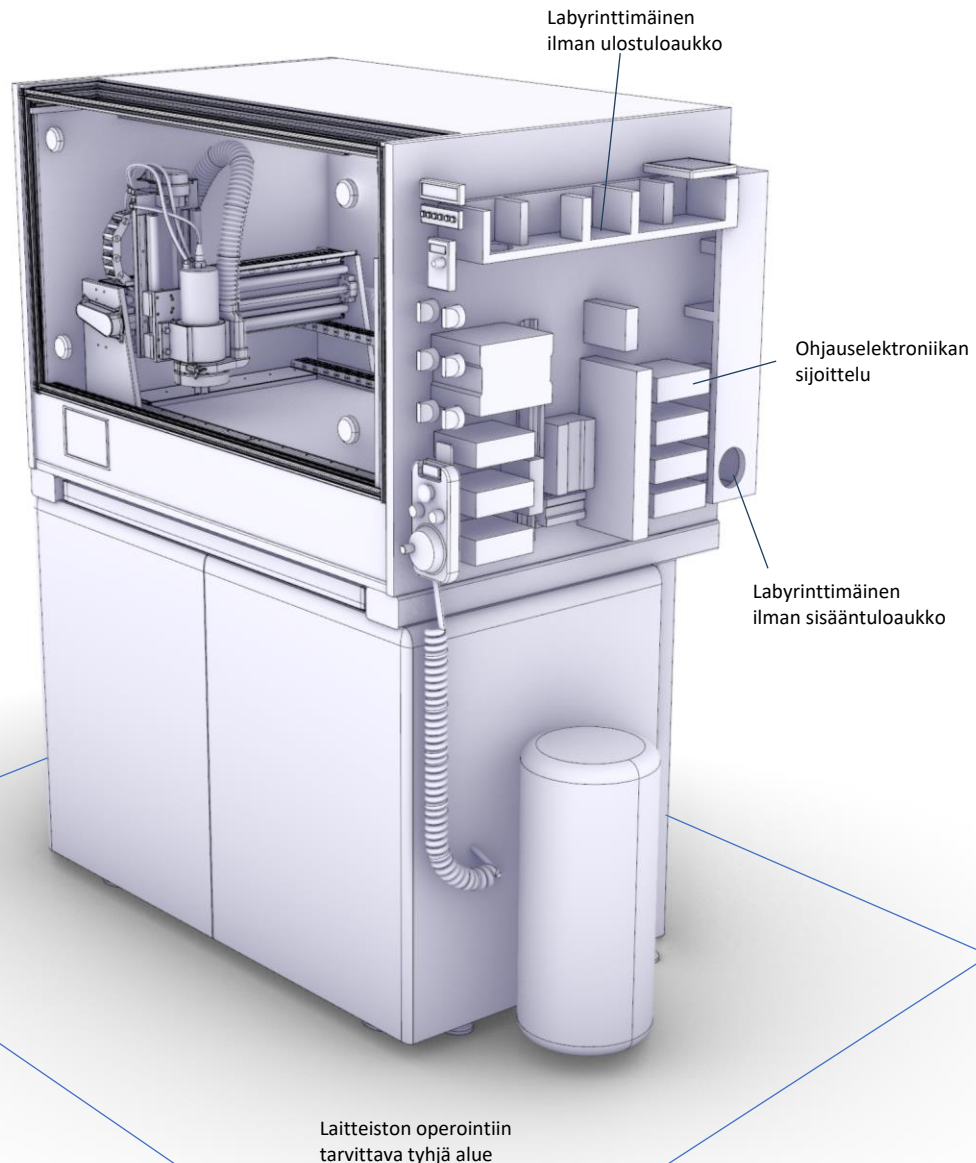
Ohjauselektronikka

Laitteisto

Oheislaiteista

32dBOhjauselektronikan
äänitaso

Aikaisemman ohjauselektronikan kotelointi metrin etäisyydeltä mitattuna 38dB, jolloin 32dB on realistinen arviointi, paremmin koteloidusta laitteesta

**Ohjauselektronikka**

Paranneltua koteloa varten lähtisin ensimmäisenä tarkastelemaan tilaa, miten mahdollisesti laitteisto sijoittuisi. Laitteisto voidaan sijoittaa joko huoneen nurkkaan tai keskelle. Kuitenkin huomioitavaksi tulee laitteiston ympärille tulevat kalusteet tai laitteistot. Asettamalla koteloinnille reunaehdon, ettei kotelon runkoon kiinni voida sijoittaa muita kalusteita, se antaa vapauksia suunnittelulle. Tällöin tietokonekomponenttien ja CNC-koneen ohjaukseen vaadittavat elektronikat voidaan koteloida rungon pätyyn, johon pääsee tarvittaessa käsiksi. Tähän johtopäätökseen tulii, koska ensimmäisessä koteloratkaisussa tietokone ja CNC-ohjaus olivat erillisinä, siitä syystä vaativat luonnollisesti erilliset koteloinnit melunpoistoon, vaihtoehtoisena ratkaisuna olisi ohjauselektronikan sijoitus alakaappeihin, mutta tila on jo varattu työstökeskuksen muille laitteille.

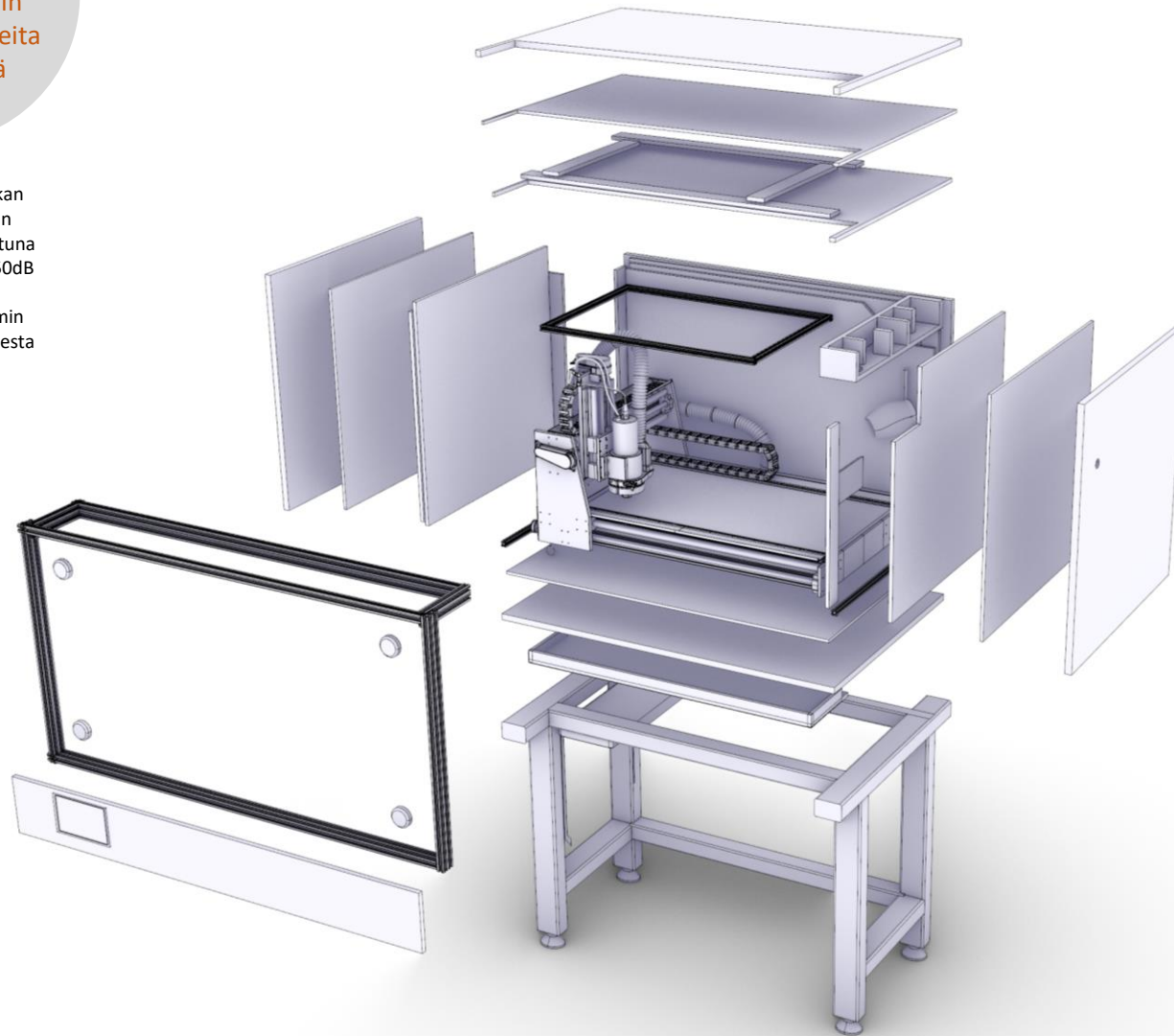
Kosketusnäyttöllinen paneeli olisi myös samassa yhteydessä upotettuna pätyyn, jossa kaikki operointi tapahtuisi. Koteloinnin yläosaan sijoittuu labyrinttimäinen ilman sisääntuloaukko ja ulostulo, joka on saman kaltainen ratkaisu kuin tuhkaipurin koteloinnissa. Tällöin saadaan vaimennuttua jäähdytysilmavirtaus.

Kotelon etupuolella on irrotettava paneeli, johon on ohjaukseen liittyvät kytkimet asennettuna, siitä syystä, että kytkimien lisääminen olisi tulevaisuuden kannalta vaivatonta, vain pienen paneelilevyn vaihtaminen ja siihen poraaminen on helppoa. Näin ollen kotelointi tarjoaa äänivaimennetun laitteiston, johon on helppo päästä käsiksi tarvittaessa. Tämä kokonaisuus olisi erillinen osa, jonka voi liittää kotelon kumpaan tahansa pätyyn, jolloin se antaa enemmän vapauksia valita miten laitteiston sijoittaa. Kotelointimateriaalina voisi toimia vaneri ja elektroniikalle ohut metallinen aluslevy, jotta sähkölaitteistoa ei tarvitsisi suoraan puurunkoon kiinnittää.

X<50dB

Laitekoteloinnin
äänitaso kappaleita
työstettäessä

Aikaisemman
ohjauselektronikan
kotelointi metrin
etäisyydeltä mitattuna
55dB, jolloin alle 50dB
on realistinen
arviointi, paremmin
koteloidusta laitteesta



Laitteistorunko

Paksu vanerilevy toimii hyvin ääntä eristävänä materiaalina, mutta tässä versiossa ei tarvitse ottaa huomioon WAF-arvoa (Wife Approval Factor), koska laitteisto voidaan sijoittaa tilaan, joka ei ole kotiympäristö. Laitteisto itsessään ei ole mitenkään veistoksellinen, joten kalusteeksi naamiointi oli ainoa ratkaisu ensimmäisen version kanssa. Siitä syystä läpinäkyvät akryylliset ovet olivat pois suljetut ensimmäisen version kohdalla, toisin kuin tässä uudessa ratkaisussa ei sellaisia rajoitteita ole. Läpinäkyvästä akryyllilevystä tehdystä ovesta pystytään näkemään laitteiston toiminta suljetun kotelon sisältä toisin kuin umpinaisessa, ainoaksi ongelmaksi syntyy akryyllilevyt kyky pitää työstöstä syntyvät äänen kotelon sisällä. Tässä olisi ratkaisuna erittäin tiiviit ovet ja useita akryyllilevykerroksia, joiden avulla pystytään vähentämään melua. Näihin oviin voidaan asentaa vastamelu resonaattoreita, joita aikaisemmin tutkin, jolloin ohuetkin akryyliovet riittäisivät.

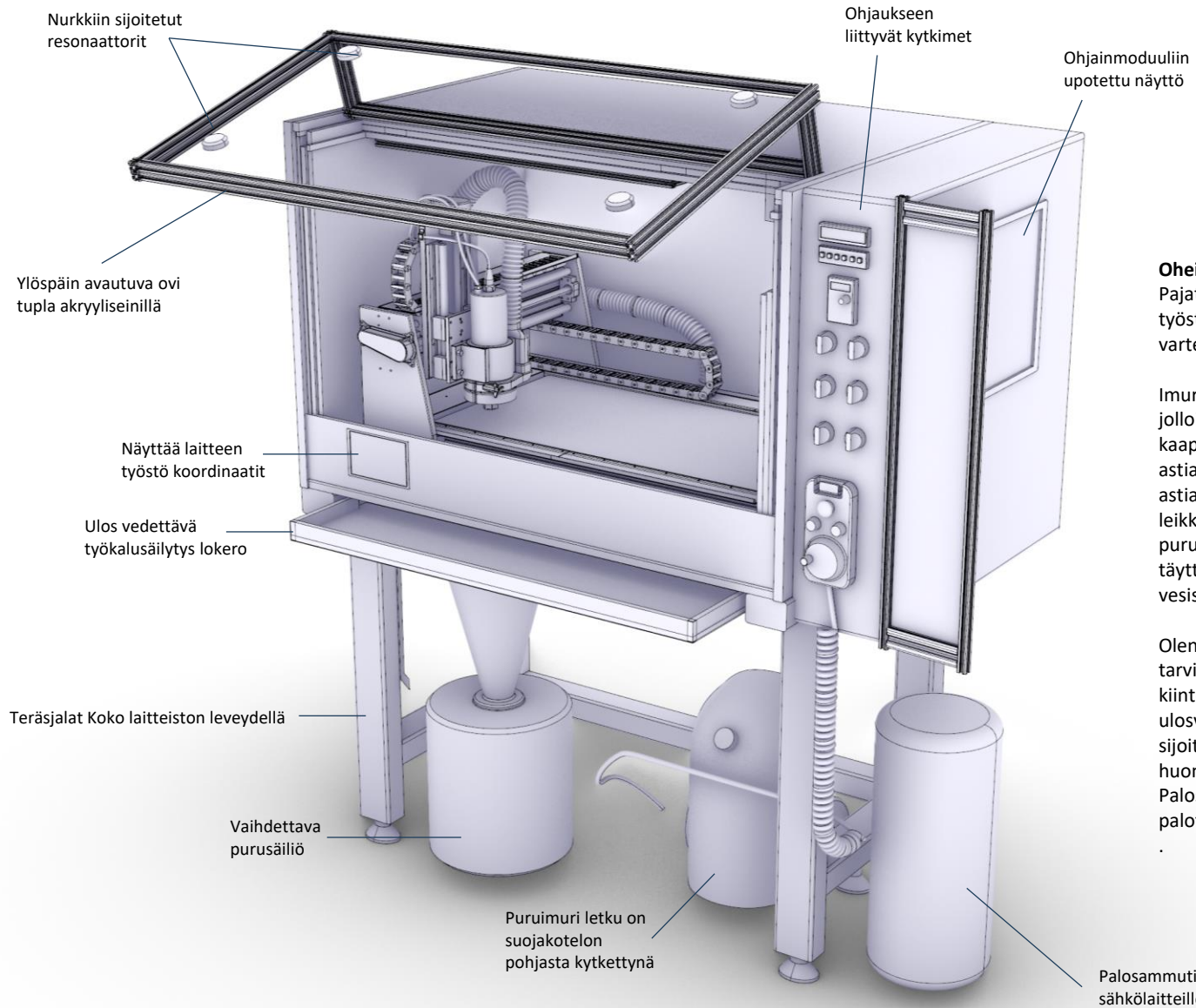
Itse kotelointi olisi vanerikoteloitu mutta sisusta olisi maalattuna veden kestäväällä maalilla, jolloin leikkuunestettä käytettäessä puupintoihin ei imeydy, vaan on helppo puhdistaa. Myös ohut kerros kuitu Aerogeeliä voitaisiin koteloinnissa käyttää ohut kerros, joka riittää vallanmainiosti vaimentamaan ääntä. Sen erinomaisen eristysominaisuuden vuoksi. Jolloin pystytään rakentamaan kevyempi kevytkotelointi. Aerogeelin erinomainen eristysominaisuus perustuu huokoiseen rakenteeseen, kun ilmahiukkasten täytyy kulkea useiden metrien matka 10 mm:n paksuisessa Aerogeelissa. Tässä tapauksessa ilma toimii äänivärähdyksen välittäjäaineena, jonka kulkua yritetään pysäyttää pidentämällä sen matkaa. Aerogeeli ei myöskään pala kovinkaan helposti, joten paloturvallisuuden suhteen täydellinen materiaali laitteistojen koteloinnissa (<https://youtu.be/qnOoDE9rj6w>).

Uusi kotelointi muodostuu 20 x 20:n alumiiniprofiileista, joiden kanssa ohuet 6,5 mm:n vanerilevyt tuplaseininä ja niiden väliin Aerogeeli materiaalina.

40dB

Oheislaiteiden
äänitaso

Aikaisemman oheislaitteita erillään metrin etäisyydeltä mitattuna 32-46dB, jolloin 40dB vaimennus aste on realistinen arviointi, paremmin koteloidusta laitteesta



Oheislaitekotelointi

Pajatiloihin soveltuvat imurit kestävät pidempiäkin työstösessioita, kun ovat suunniteltu niitä tehtäviä varten, toisin kuin tavalliset kotikäyttöön suunnatut.

Imurin kotelointi voidaan sijoittaa laitteiston alapuolelle, jolloin sen sisälle tulee myös pieni purusäiliö. Samaan kaappiin voitaisiin myös sijoittaa vesijäähdytystä varten astia sekä leikkuunesteelle oma astiansa. jokaiselle astialle olisi oma mitta-anturi, joka kertoisi esimerkiksi leikkuunesteen määrän, jäähdytysveden lämpötilan ja purusäiliön määrän. Esimerkiksi anturien raja-arvojen täytyessä voisi työstoordinaattien näyttö ilmoittaa vesisäiliön lämpötilan tai purusäiliön tilan.

Olen myös havainnut, että laitteistoa käytettäessä tarvitaan muun muassa jyrksinterille, holkeille ja kiintoavaimille säilytystilaa Näin ollen päädyin ulosvedettävään työkalujen säilytyslokeroon, joka sijoittuu laitteiston etuosasaan. Se helpottaa huomattavasti työskentelyä. Palosammutin on sijoitettu laitteiston lähietäisyydelle paloturvallisuussyistä.

Kuva 63. Oheiskomponentit ilman kotelointia. Tommi Chan

5.7 LOPPUSANAT

Koteloitavat laitteistot vaihtelevat, joten ei voida toteuttaa yhtä täydellistä ratkaisua kaikille pienikokoisille CNC-konetyypeille. Koteloitintilanteiden ympärille saattaa edullisimmissa laitteissa maksaa enemmän kuin itse kone, joten usein miten se jätetään tekemättä mutta jos samaa tilaa käyttävät muutkin johonkin muuhun tarkoitukseen niin silloin on kriittistä, että ilmanlaatu on tarpeeksi puhdasta, ettei puupölyä leijaile sakeasti ympäri huonetta, sekä työstöä tehdessä CNC-koneella aiheutuu meluhaittaa. Pahimmissa tapauksissa mennään yli 85dB, jolloin tilassa on pakko käyttää kuulosuojasta välttyäkseen kuulovaurioilta.

Edullisia kotelonrakennusmateriaaleja käytettäessä, joudutaan lisäämään seinämäpaksuutta huomattavasti, jotta saavutetaan riittävä vaimennus taso, toisin jos olisi suurempi budjetti niin pystyttäisiin käyttämään uusia edistyneitä materiaaleja kuten Aerogeeliä, jolla on erinomaiset, ellei jopa uskomattomat eristeominaisuudet.

Laitteiston turvallisuus ja käytettävyys jäävät usein miten toissijaisiksi kotitekoisissa koteloinneissa. Niihin aletaan kiinnittää vasta huomiota, kun itse laitteisto on saatu vaimennettua maltilliselle äänitasolle. Käytettävyyteen liittyvät ongelmat tulevat vasta esille kokonpanoa käytettäessä.

Laitteistosta lähtevän meluäänänen mittaaminen on todella vaikeata, koska siihen liittyy niin moni tekijä pelkästään karamoottoriin, esimerkiksi työstönopeus, työstönsyvyys kierrosnopeus, terän halkaisija, terätyyppi, työstettävä materiaali. Näin ollen mitatut tulokset ovat vain suuntaa antavia, jotka kertovat kokeellisten muutosten perusteella äänen vaimentumaa.

Olen päässyt opinnäytetyön ohella rakentamaan myös täysin alumiiniprofiileista koostuvia kotelokokonaisuuksia, jotka ovat

akvaariomaisia ratkaisultaan. Tein myös mittaustuloksia hallitilassa, jossa oli 42dB taustamelua ja CNC-kone ilman suojaseiniä työstettäessä liimalevyä piti ääntä noin 80-86dB. Alumiinisella koteloinnilla, jossa oli 3mm akryyliseinämät samanlaisella työstöllä ääntä lähti 68-76dB, joka on todella hyvä vain 3mm paksuisilla seinämillä. Tämä sai minut miettimään, että kuinka ohuilla seinämillä pystyttäisiin vaimentamaan laitteisto noin 60dB, joka vastaa huoneistoni astianpesukonetta.

Itse olen 1.5 koteloitimiin tyytyväinen, koska se on puolison ja anopin hyväksymä ratkaisu. Onnistumisesta kertoo myös se, etteivät vieraat osaa arvata CNC-koneen olemassaoloa, kun laitteisto on kalusteeksi naamioituna, joka on yhtenäinen säilyttään muiden kalusteiden kanssa. Laiteturvallisuuteen olen joutunut kiinnittämään huomattavasti enemmän perheenisäyksen jälkeen.

Olen havainnut ristiriitaisen tilanteen, koska muotoilijana yritän suunnitella asioita mahdollisimman helppokäyttöiseksi, mutta samalla kun yritetään parantaa turvallisuutta ja estää pienen lapsen pääsyn turvakytkimille, hankaloituu myös laitteiston käyttö, tässä tilanteessa turvallisuus on tärkein tekijä, jota olen havainnut, koteloa parannellessa, jatkan sen kehittämistä vielä. En halunnut ottaa turvallisuusnäkökulmaa niin voimakkaasti opinnäytetyssäni esille vaikka se on todella tärkeää, koska opinnäytetyöstä olisi tullut puolet pidempi.

Lähteet

Kirjat

Pekka, Tuomela 1998, Hifi tee se itse WSOY

Randall D. Knight, 2008. Physics For Scientists And Engineers A Strategic Approach Second Edition: Adam Black, Ph.D.

Scott, Fitzgerald, Michael, Shiloh 2015, Arduino Project Book

Artikkelit

[Adafruit, MCP4725 Beakout Board.](https://www.adafruit.com/product/935)
<<https://www.adafruit.com/product/935>> (15.2.2020)

[Arduino. Getting Started with Arduino MEGA2560.](https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoMega2560)
<<https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoMega2560>> (16.2.2020)

[Aswinth, DIY Waveform Generator using Arduino.](https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/arduino-waveform-generator)
<<https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/arduino-waveform-generator>> (13.2.2020)

[DroneBot Workshop. Using LCD Displays with Arduino.](https://dronebotworkshop.com/lcd-displays-arduino/)
<<https://dronebotworkshop.com/lcd-displays-arduino/>> (13.2.2020)

[DroneBot Workshop I2C Communications.](https://dronebotworkshop.com/i2c-arduino-arduino/)
<<https://dronebotworkshop.com/i2c-arduino-arduino/>> (14.2.2020)

[Omataloyhtio.fi, Äänieristyksen parantaminen vanhoissa kerros- ja rivitaloissa.](https://www.omataloyhtio.fi/artikkelit/15212/paras_tapa_aanieristaa.html)
<https://www.omataloyhtio.fi/artikkelit/15212/paras_tapa_aanieristaa.html> (16.2.2020)

https://fi.wikipedia.org/wiki/Numeerinen_ohjaus> (Katsottu 2.3.2020)

Ohjelmisto linkki

<http://onlinetonegenerator.com/>

Videot

<https://youtu.be/qnOoDE9rj6w>

Rakennus ohjeistuksia

RT-kortisto, RT 07-10881, Huoneakustiikka, 2006.

SIT 05-610038 Ohjetiedosto, 2006.