

Jarkko Kilpivaara

MUOVISILPPURI

MUOVISILPPURI

Jarkko Kilpivaara
Opinnäytetyö
Syksy 2019
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Konetekniikan koulutusohjelma, koneautomaatio

Tekijä: Jarkko Kilpivaara
Opinnäytetyön nimi suomeksi: Muovisilppuri
Opinnäytetyön nimi englanniksi: Plastic shredder
Työn ohjaaja: Jari Viitala
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: syksy 2019
Sivumäärä: 46 + 3 liitettä

Yrityksellä on suunnitteilla muovinkierrätysjärjestelmä, johon kuuluu muovijätteen silppuaminen pieniksi paloiksi. Tätä varten järjestelmä tarvitsee silppurin, joka pystyy silppuamaan muovin helposti ja energiatehokkaasti haluttuun kokoon. Tavoitteena oli suunnitella ja valmistaa prototyyppi silppurista. Työhön kuului silppurin tarvitseman tehon määrittäminen ja sille sopivan sähkömoottorin valinta.

Suunnittelutyökaluna käytettiin SolidWorks-ohjelmistoa. Aluksi suunniteltiin ja valmistettiin yksiakselinen muovijätettä murskaava referenssilaitte Precious Plasticin mallin pohjalta. Referenssilaitetta testattiin pyörittämällä akselia ja syöttämällä muovijätettä siihen. Tällä tavoin perehdyttiin silppurin toimintaan ja tarvittaviin ominaisuuksiin.

Perehtymisen jälkeen suunniteltiin yrityksen käyttötarkoitukseen sopiva kaksiakselinen muovijätettä murskaava silppuri ja valmistettiin siitä prototyyppi. Prototyyppiä testattiin pyörittämällä akseleita sähkömoottorin ja taajuusmuuttajan avulla. Prototyyppiä verrattiin markkinoilla jo olevaan laitteeseen silppuamalla samanlaiset erät muovijätettä kummallakin laitteella. Tärkeimmät vertailukohteet olivat virrankulutus sekä silppuamisprosessin tehokkuus ja lopputulos.

Valmis prototyyppi silppusi muovijätteen tehokkaasti halutun kokoiseksi silpuksi ja oli energiatehokkaampi kuin vertailuun käytetty laite. Prototyypin toimintaa pystyttäisiin vielä parantamaan muutamalla jatkokehityskohteella.

Asiasanat: silppuri, muovinkierrätys, koneenrakennus

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree programme, option

Author: Jarkko Kilpivaara
Title of thesis: Plastic shredder
Supervisor: Jari Viitala
Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2019
Pages: 46 + 3 appendices

Company is building plastic recycling system and needs shredder to shred plastic waste. Shredder had to be energy efficient and shred plastic waste to right size. Goal is to engineer shredder and build prototype. Part of the job is to define needed power and choose electric motor for shredder.

For engineering we used SolidWorks engineering software. First we engineered crushing reference shredder that has one shaft and built it. We get model for reference shredder from Precious Plastic internet sites. We tested the reference shredder by feeding plastic waste in to rotating shaft. This way we get to know how the shredder works and what features it should have.

Then we engineered two shafted crushing shredder and made prototype from it. Prototype was tested by rotating shafts with electric motor and frequency converter. We compared prototype and shredder that was already in the market. We did the test by feeding same amount of plastic waste to both shredders and examine how they worked. Most important points of comparison was power consumption, shredding efficient and final result.

Finished prototype was energy efficient and it shreds plastic waste to right size. Prototype could work better with few improvements.

Keywords: Shredder, plasticrecycling, mechanical engineering

ALKULAUSE

Kiitos Head Recycle Systems Oy:lle ja toimitusjohtaja Johnny Pehkoselle hienosta ja haastavasta opinnäytetyömahdollisuudesta. Kiitos Oulun ammattikorkeakoulun henkilökunnalle ja lehtori Jari Viitalalle opinnäytetyön ohjauksesta. Eri-tyiskiitos Oulun ammattikorkeakoulun laboratoriohenkilökunnalle kaikesta avusta ja neuvoista. Kiitos myös kaikille tavarantoimittajille ja muille yhteistyökumppaneille.

12.12.2019

Jarkko Kilpivaara

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS	6
SANASTO	8
1 JOHDANTO	9
1.1 Head Recycle Systems	9
1.2 Työn tavoitteet	9
2 MUOVISILPPURIT	10
2.1 Sippureiden toimintatavat	10
2.2 Silputtava materiaali ja sen ominaisuudet	13
2.3 Silppuamisen testaus	14
2.4 Laitevaatimukset	14
3 REFERENSSILAITE	16
3.1 Mallinnus ja osien valmistus	16
3.2 Kokoonpano ja testaus	17
4 PROTOTYYPIN SUUNNITTELU JA OSIEN VALMISTUS	21
4.1 Osien suunnittelu	21
4.2 Moottorin mitoitus ja valinta	24
4.2.1 Leikkaustapahtuman teoriaa	24
4.2.2 Moottorin mitoitus prototyypille	26
4.2.3 Moottorin valinta	28
4.3 Huollettavuus ja lujuuslaskelmat	28
4.4 Osien valmistus ja hankinta	30
5 PROTOTYYPIN KOKOONPANO JA TESTAUS	32
6 TULOKSET	42
7 POHDINTA	44
LÄHTEET	46
LIITTEET	
Liite 1. Moottorin tiedot	
Liite 2. Kustannuslaskelmat	

Liite 3. Kokoonpanopiirros

SANASTO

N = newton (voiman yksikkö)

Nm = newtonmetri (momentin yksikkö)

Pa = pascal (paineen yksikkö)

rpm = kierrosta minuutissa

W = watti (tehon yksikkö)

1 JOHDANTO

Head Recycle Systems Oy suunnittelee muovinkierrätysjärjestelmää, johon kuuluu muovijätteen silppuaminen pieniksi paloiksi. Tätä varten järjestelmä tarvitsee silppurin, joka pystyy silppuamaan jätemuovin helposti ja energiatehokkaasti halettuun kokoon.

1.1 Head Recycle Systems

Head Recycle Systems on vuonna 2018 perustettu yritys, joka valmistaa ratkaisuja jätemuovin kierrätykseen. Yrityksen ideana on erotella eri muovilaadut muovijätteestä ja jalostaa ne uusiokäyttöön. Yritys kehittää ratkaisuja kuluttajan ja teollisuuden tarpeisiin. (1.)

1.2 Työn tavoitteet

Tavoitteena on suunnitella ja valmistaa prototyyppi muovisilppurista. Prototyyppi on suunniteltavan laitteen ensimmäinen versio, jolla todennetaan laitteen toiminta ja havaitaan mahdolliset jatkokehityskohteet. Työhön kuuluivat silppurin tarvitseman tehon määrittäminen ja sille sopivan sähkömoottorin valinta.

2 MUOVISILPPURIT

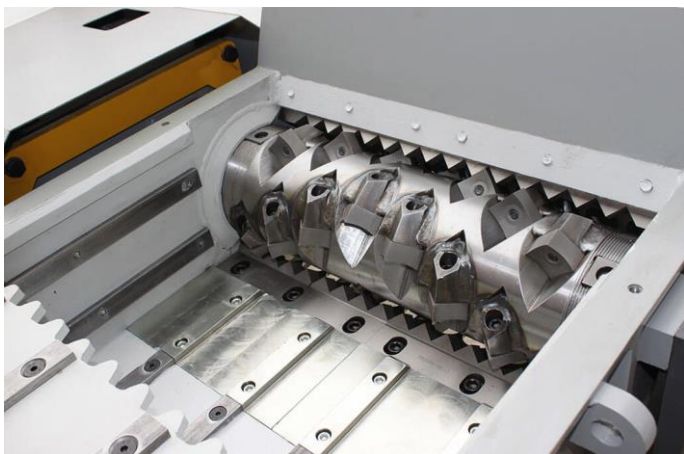
Silppureita tiedettiin olevan eri tarkoituksiin, mutta muovisilppureista ei ollut tietoa. Internetistä etsittiin tietoa muovisilppureista ja niiden mahdollisista valmistajista.

2.1 Silppureiden toimintatavat

Tietoa muovisilppureista löytyi, mutta ei täysin sopivaa tähän opinnäytetyöhön. Valmistajia löytyi ulkomailta muovisilppureille, jotka olivat teollisuuteen tarkoitettuja isoja koneita tai osia suuresta linjastosta.

Markkinoilla olevat muovisilppurit joko rouhivat, leikkaavat tai murskaavat muovin. Markkinoilla olevat muovisilppurit valmistetaan joko yksi- tai kaksiakselisina. Rouhivat ja leikkaavat koneet pyörivät nopeasti, kun taas murskaavat koneet pyörivät yleensä hitaammin.

Rouhivissa koneissa käytetään yleensä yhtä akselia, johon on kiinnitetty vaihdettavia teräpaloja. Terät rouhivat silputtavaa materiaalia tasoa vasten. Monesti näissä koneissa materiaalia puristetaan jollain pyörivää akselia vasten. (Kuva 1.)



KUVA 1. Genoxin V-sarjan rouhiva silppuri (2, linkki V Series)

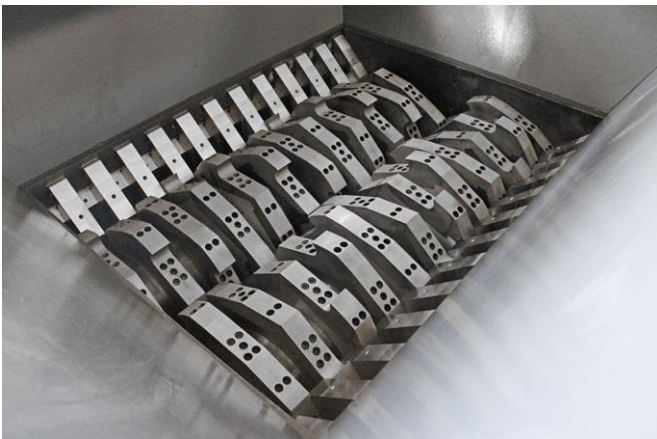
Leikkaavissa ja murskaavissa koneissa on yleensä kaksi akselia, joille on asennettu kiinteät terät. Nämä akselit pyörivät toisiinsa nähden eri suuntiin, jolloin silputtava tavara kulkee niiden välistä. Leikkaavissa silppureissa akselit pyörivät

nopeasti ja terät leikkaavat materiaalin. Akseleiden nopea pyöräminen tuottaa terille tarvittavan voiman leikkausta varten. (Kuva 2.)



KUVA 2. Genoxin M-sarjan leikkaava silppuri (2, linkki M Series)

Kuvassa 3 näkyy murskaavan silppurin rakenne, joka on lähes samanlainen kuin leikkaavan silppurin rakenne. Murskaavissa silppureissa akselien pyörimisnopeus on huomattavasti pienempi kuin leikkaavissa silppureissa. Murskaavissa silppureissa käytetään usein vaihdetta moottorin lisäksi, jotta saadaan pyörimisnopeus pienemmäksi ja moottorilta saatava vääntö suuremmaksi. Suurempi vääntö saa aikaan tarvittavan voiman muovin silppuamiseen pienemmällä pyörimisnopeudella.



KUVA 3. Genoxin X-sarjan murskaava silppuri (2, linkki X Series)

Genoxtechin internet-sivuilta löytyy kattava valikoima eri tarkoituksiin sopivia silppureita (2). Nämä silppurit on tarkoitettu teolliseen käyttöön ja niiden moottoritehot ovat 7,5 kW:sta jopa 440 kW:iin.

Internetistä löytyi myös pieniä laitteita, joita yksityiset ihmiset olivat itse valmistaaneet ja testanneet. Huomattiin kaikkien laitteiden toimivan jokseenkin samalla periaatteella ja muistuttavan hyvin paljon toisiaan.

Silppuriin syötetään ylhäältä suppiloa pitkin muovia, ja pyörivissä akseleissa kiinni olevat terät silppuavat sen. Silppurit ovat joko leikkaavia tai murskaavia sen mukaan, mikä on akselien pyörimisnopeus ja terien geometria.

Suppilon täytyy olla tarpeeksi iso, jotta muovit eivät tartu siihen vaan menevät terille asti. Suppilo toimii parhaiten pystyssä teriin nähden. Seinämien tulisi olla tarpeeksi pystyt, jotta muovit eivät jää pomppimaan niitä vasten.

Silppurin terägeometria pitää suunnitella sellaiseksi, että terien väliin mahtuu muovia ja terä pystyy irrottamaan sopivia paloja muovista. Leikkuupinta-ala määrää moottorista tarvittava voima, joten sekin pitää ottaa huomioon terägeometriassa. Silppurissa täytyy olla terille jonkinlaiset vastakappaleet, joita vasten terät leikkaavat tai jotka irrottavat muovin teristä.

Jos silppurista saatava lastu täytyy olla tietyn kokoista, on tarpeen suunnitella laitteen pohjalle ritilä. Ritilän reikäkoolla voidaan silpun kokoa rajoittaa jonkin verran, mutta se ei takaa täydellistä tulosta. Teristä irtoava lastu voi mennä taitettuna tai pitkänä pienemmästä reiästä läpi.






Silppurityypeistä valittiin prototyypiksi hitaasti pyörivä murskaava silppuri. Nopeimmin pyörivissä leikkaavissa ja rouhivissa silppureissa vaarana on se, että muovi syttyy palamaan tai sulaa. Silppurin tulisi toimia ilman valvontaa, joten palamisen ja sulamisen mahdollisuus olisi turha riski. Toisaalta rouhivassa laitteessa täytyisi olla jonkinlainen puristus akselia vasten, jotta muovin syöttö laitteeseen varmistettaisiin. Tämä on turhan monimutkainen ominaisuus suunniteltavaksi prototyypiin.

2.2 Silputtava materiaali ja sen ominaisuudet

Tässä työssä silputtava materiaali tulee olemaan kotitalouksissa syntyvää kierrätettävää muovijätettä. Muovien ominaisuudet vaihtelevat aina materiaalien mukaan. Kierrätettävät muovit saadaan selville kierrätysmerkinnöistä (kuva 4).

Muovipakkaukset voi laittaa muovipakkauskeräykseen, paitsi PVC:n

Tavallisimpien pakkausmuovimateriaalien merkintä, ominaisuudet, käyttö- ja hyötykäyttöesimerkkejä

MATERIAALI-MERKINTÄ	NIMI	YLEISET OMINAISUUDET	ESIMERKKEJÄ KÄYTTÖKOhteista JA LAJITTELUSTA
	Polyeteeni-tereftalaatti	Kirkas, kova, kemikaaleja kestävä	Virvoitusjuoma- ym. pullot. Pantilliset pullot kauppojen automaatteihin. Muut muovipakkauskeräykseen.
	Polyeteeni high-density	Samea tai värillinen, joustava, vahamainen pinta	Mehupullot, virvoitusjuomakorit. Muovipakkauskeräykseen.
	Polyvinyylikloridi	Erittäin monimuotoinen ja -piirteinen	Harvoin pakkausmateriaalia. EI muovipakkauskeräykseen
	Polyeteeni low-density	Pehmeä, joustava, vahamainen pinta	Muovikassit, pussit, kalvot. Muovipakkauskeräykseen
	Polypropeeni	Jäykkä, sitkeä, hyvin monikäyttöinen	Narut, rasiat, kalvot, pehmusteet. Muovipakkauskeräykseen
	Polystyreeni	Lasin kirkas tai värjätty, hauras, vaahdotettu (EPS)	Rasiat, purkit, pehmusteet. Muovipakkauskeräykseen
	Muut	Kaikkien ylläolevien yhdistelmät	Rasiat, kannet, pussit.

KUVA 4. Kierrätysmerkinnät (3)

Muovien mekaaniset ominaisuudet piti selvittää ja hyödyntää tietoa myöhemmin silppurin toiminnan suunnittelussa ja moottorin mitoituksessa. Tärkein tieto muovien ominaisuuksista oli leikkaustapahtumaa varten tarvittava materiaalin lujuus. Lujuuden avulla voidaan laskea moottorin tarvitsema teho. (Kuva 5.)

MEKAANISET OMINAISUUDET		PET	PE FOAM	PP-H	PS	ABS
Kimmomoduuli Testausmenetelmä:	MPa DIN EN ISO 527-2	3100	700	N/A	1670	1900
Vetolujuus Testausmenetelmä:	MPa DIN EN ISO 527-2	79	17	33	20	33
Murtovenymä Testausmenetelmä:	% DIN EN ISO 527-2	5	N/A	8	N/A	>2
Murtolujuus Testausmenetelmä:	% DIN EN ISO 527-2	10	N/A	N/A	42	55

KUVA 5. Muovien mekaaniset ominaisuudet (4, linkit Perusmuovit → Lisää vertailuun ABS, PS, PP-H ja PE FOAM → palaa sivulle Muovimateriaalit, linkki → Tekniset muovit → lisää vertailuun PET → Käynnistä vertailu)

2.3 Silppuamisen testaus

Yhdessä ohjaavan opettajan ja yrityksen edustajan kanssa päätettiin, että helpoin tapa testata muovin silppuamista oli hankkia referenssilaitte. Referenssilaitteen avulla pystyttäisiin tutkimaan silppurin toimintaa, voiman tarvetta ja silpun kokoa.

2.4 Laitevaatimukset

Silppurin tulee murskata muovijäte paloiksi, joiden halkaisijat ovat 5 - 8 mm. Pituudeltaan laitteen tulee olla 300 - 600 mm. Laitteen koko tulisi olla helposti muunneltava ja laitteen huollon pitää olla helppoa. Silppurin moottorin tulee olla energiatehokas ja toimia alhaisissa lämpötiloissa. Silppurin kokonaiskustannukset pitäisi saada pidettyä aika alhaisina, joten valmistuskustannuksia täytyy miettiä tarkoin. Pyörimisajaksi arvioidaan 20 s ja materiaalmääräksi 0,05 m³ kerralla. Silppurin laitevaatimukset löytyvät taulukosta 1.

TAULUKKO 1. Vaatimuslista

KV, VV, T	Vaatimus
	1. Geometria
	Pituus 300 - 600 mm
	Leveys 120 mm
	2. Kinematiikka
KV	Pyörivä liike
KV	Pyörimisnopeus n. 60rpm

(jatkuu)

TAULUKKO 1. (jatkuu)

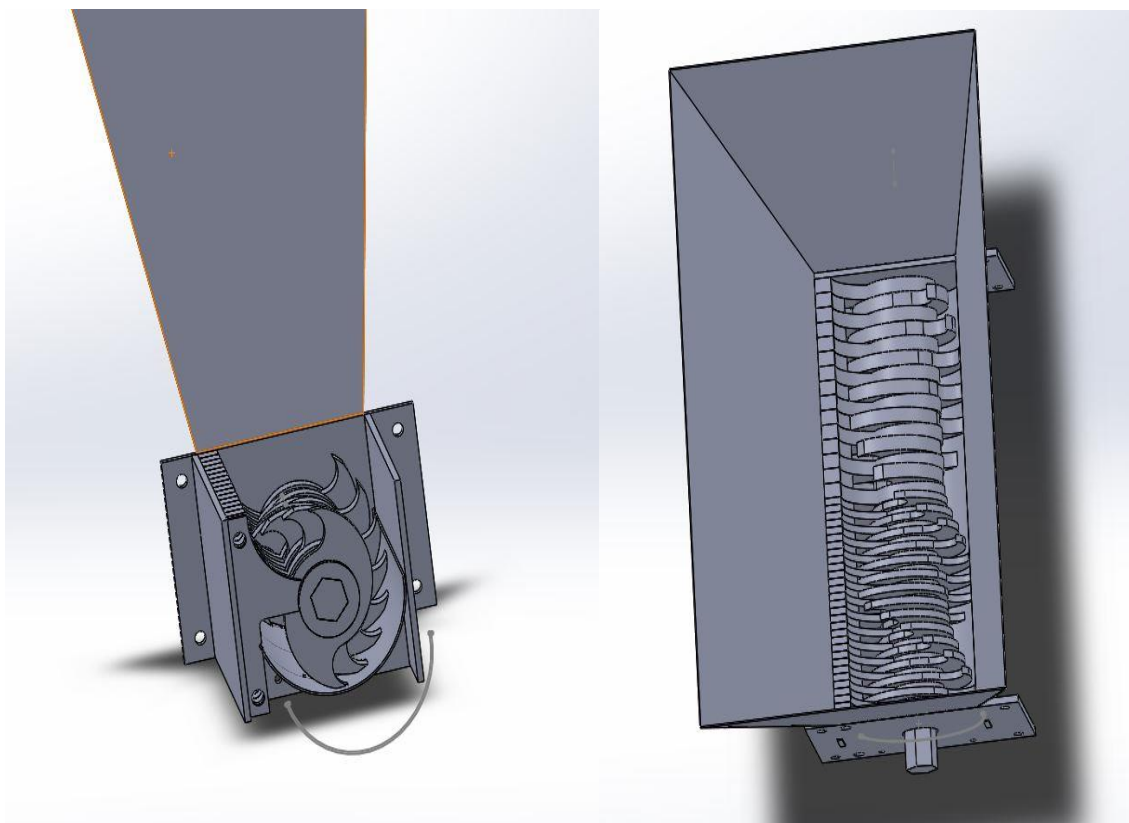
	3. Voimat
	Silppurin oltava tukeva
	Leikkausvoima
	4. Energia
	Sähkö(voimavirta)
	5. Aine/Materiaali
	Teräs, alumiini
	6. Turvallisuus
	Käyttö turvallista
	7. Ergonomia
	Huoltotoimet
	8. Valmistus
	Vesileikkuu osat
	Valmiit osat
	9. Asennus
	Asennus mahdollisimman helppoa
	10. Käyttö
	Pyörimisaika 20 s kerralla
	Silppuaa muovin halkaisijaltaan 5-8 mm palasiksi
	11. Kunnossapito
	Kunnossapito helppoa
	Terien vaihto akselille
	12. Kustannukset
	Mahdollisimman alhaiset valmistuskustannukset
	Käyttökustannukset vähäiset

3 REFERENSSILAITE

Valmista muovisilppuria yritettiin etsiä ja tilata internetistä, mutta sopivaa valmistajaa ei löytynyt. Yleensä sopivat laitteet olivat yksityisten ihmisten tekemiä eivätkä he valmistaneet niitä myyntiin. Internetistä löytyi kuitenkin sivusto (5), josta löytyi CAD-malli sopivaan silppuriin. Tämän mallin perusteella päätettiin mallintaa referenssilaitte ja valmistaa se itse. Referenssilaitte on laite, jonka toimintaa tutkimaan ja vertailemalla haluttuun lopputulokseen tehdään päätökset suunniteltavan laitteen toiminnasta.

3.1 Mallinnus ja osien valmistus

Aluksi mitattiin ja mallinnettiin referenssilaitteen osat cad-mallista SolidWorks-ohjelmalla. Osien mallinnuksen jälkeen tehtiin SolidWorks-ohjelmalla kokoonpano referenssilaitteesta, jotta voitiin varmistua osien sopivuudesta (kuva 6).



KUVA 6. Referenssilaitte mallinnettuna

Akseli haluttiin pitää kokonaan kuusiotankona, jotta sen pyöritys onnistuisi helposti hylsyavaimella. Terien paikoitus on helppo tehdä kuusiotangon muotoa hyväksikäyttäen. Moottorin tarvitsemaa vääntöä voitaisiin mitata hylsillä ja momenttiavaimella suoraan akselilta. Akseliksi hankittiin 27-millimetristä teräksistä kuusiotankoa. Akselin kuusiomuodon vuoksi täytyi laakereiden ja akselin väliin suunnitella sopivat holkit.

Teriä ja terien väliin akselille tulevia välilevyjä päätettiin tehdä kokeeksi kahta eri paksuutta ja ne vesileikattiin 10 mm ja 5 mm paksuista teräslevyistä. Terät haluttiin saada kiertämään akselia tasaisesti, joten suunniteltiin kolme eri terää. Tällä tavoin terien asema saatiin muuttumaan 20°:n välein. Välilevyt ja terien vastakappaleet leikattiin myös samoista levyistä.

Referenssilaitteen rungon päädyt sekä sivut vesileikattiin 5 mm paksusta teräslevystä. Laakerointi toteutettiin pesälaakereilla ja ne kiinnitettiin ruuveilla päätyihin. Pesälaakerit ja kotelon koossa pitävät kierretangot sekä mutterit hankittiin valmiina.

Holkit päätettiin valmistaa hylsyistä sorvaamalla ja leikkaamalla, jotta kustannukset olisivat pienet. Suppilo suunniteltiin itse ja osat vesileikattiin 1,5 mm paksusta teräslevystä. Samasta 1,5 mm paksusta levystä vesileikattiin ritilä ja mankeloitiin se muotoonsa.

3.2 Kokoonpano ja testaus

Kokoonpano tapahtui asettelemalla ensin terät ja välilevyt akselille oikeaan järjestykseen. Tämän jälkeen vastakappaleet aseteltiin oikeaan järjestykseen omalle kierretangolle ja aseteltiin paikoilleen. Laakeripesät kiinnitettiin päätyihin, minkä jälkeen akseli ja muut osat koottiin paikoilleen. Kotelo saatiin pysymään koossa kierretankojen ja muttereiden avulla. Holkit kiinnitettiin kiristysruuveilla omille paikoilleen akselin ja laakereiden väliin. Ritilä asennettiin pohjalle metallitankojen varaan. (Kuva 7.)



KUVA 7. Silppurin kasausta ja kokoonpano valmiina

Referenssilaitteen kokoonpanon ja koepyöräytysten jälkeen aloitettiin testaus. Akselia pyöritettiin hylsyavaimella ja syötettiin muovijätettä referenssilaitteeseen. Muovi silppuuntui ihan hyvin, mutta akselin pyöritys oli raskasta käsin. Akselin pyöritystä kokeiltiin akkuporakoneella, mutta se ei ollut tarpeeksi tehokas. Testattiin pyöritykseen vielä sähköporakonetta, mutta sekään ei sopinut tähän tarkoitukseen. Päätettiin pyörittää akselia käsin ja mitata näin tarvittavaa momenttia muovin silppuamiseksi.

Referenssilaitteella saatu silppu oli kooltaan hyvin lähellä haluttua. Silppuaminen onnistui kummallakin teräpaksuudella hyvin, mutta ohuin terä läpäisi helpommin muovin. Ohuimmat muovit tarttuivat teriin helposti ja alkoivat pyöriä terien mukana, jolloin leikkaustapahtumasta tuli raskaampi. (Kuva 8.)



KUVA 8. Referenssilaitteen testausta

Momentin mittaus osoittautui haasteelliseksi, koska referenssilaitteessa silputtavan muovijätteen paksuus, määrä, laatu ja muoto voivat vaihdella hyvin paljon. Kun muovia oli tarpeeksi paksusti silputtavana, kotelon rakenne alkoi antaa periksi eikä silppuaminen onnistunut. Momenttiavaimen avulla arvioitiin momentin tarpeeksi 60 - 100 Nm perustilanteessa, mutta todentaminen oli hankalaa. Referenssilaitteen toimintaperiaate näytti toimivan halutulla tavalla, joten tältä pohjalta alettiin suunnitella prototyyppiä.

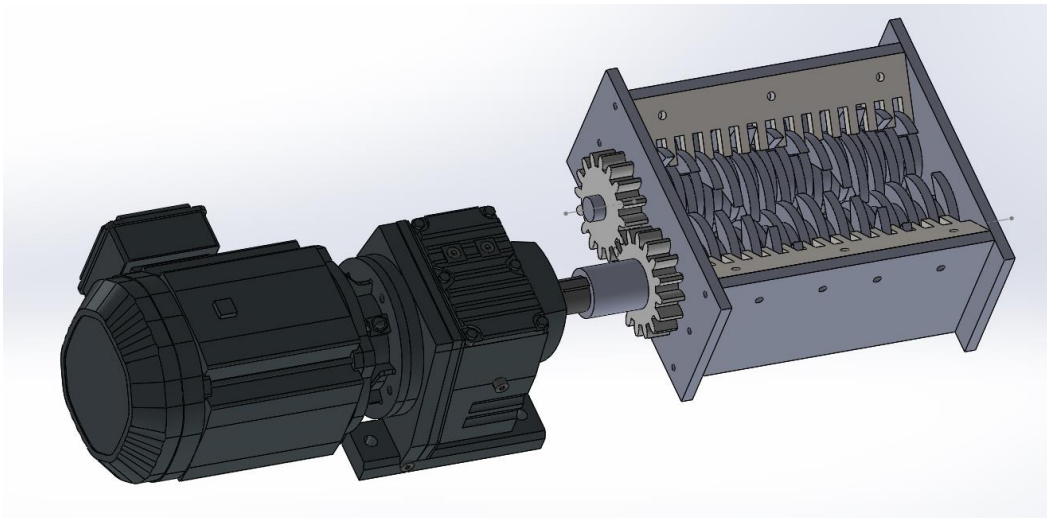
Terien geometriaa eli terien muotoa tulisi miettiä vielä prototyyppiin optimaaliseksi, jotta leikkaus-murskaustapahtumasta saataisiin mahdollisimman tehokas. Testien perusteella kahden teräakselin käyttö voisi olla järkevää, koska tällä tavalla prototyypin toiminta voisi olla tehokasta ja prosessi kevyt.

Lastun koko muuttui alkuperäisestä suuremmaksi, koska kierrätysprosessin jatkovaiheet sen vaativat. Uudeksi lastun halkaisijaksi tuli noin 10 mm, joten päätettiin käyttää suunnittelussa terien materiaalina 10 mm paksua terästä.

4 PROTOTYPIN SUUNNITTELU JA OSIEN VALMISTUS

4.1 Osien suunnittelu

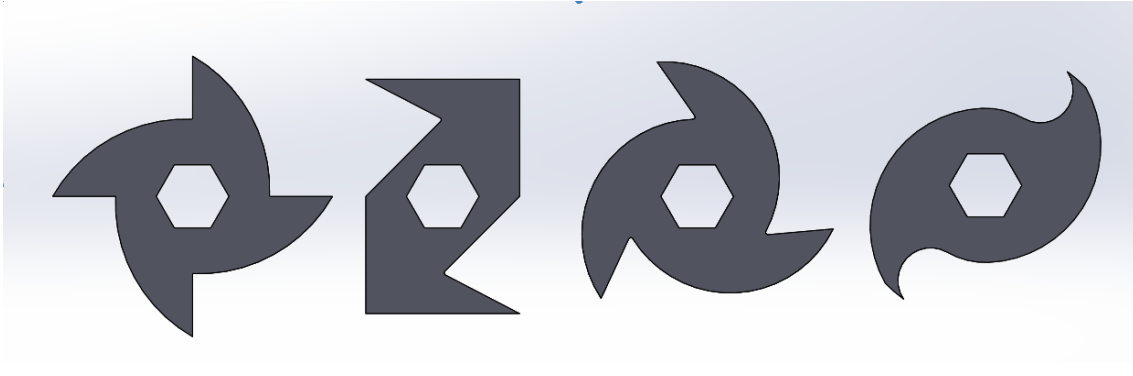
Asiaan perehtymisen ja testien perusteella päätettiin suunnitella prototyypistä kaksiakselista. Teräkselliset akselit pyörisivät vastakkaisiin suuntiin ja jätemuovi silppuun-tuisi mennessä läpi niiden välistä. Näin saataisiin terät vetämään muovijätettä paremmin sisäänsä kuin mitä yksiakselisella versiolla. Leikkaustapahtuman pi-täisi keventyä, kun ei yritetä leikata kiinteää vastakappaletta vasten yhdellä te-rällä. Voimaa leikkaukseen kohdistuisi vastakkaisista suunnista. Akselien välinen voimansiirto suunniteltiin niin, että moottori pyörittäisi toista akselia ja toiseen ak-seliin voima siirtyisi hammaspyörien avulla (kuva 9).



KUVA 9. Voimansiirto

Rakenteen vahvistamiseksi sivut ja päädyt suunniteltiin 12 mm paksusta teräk-sestä. Päätyihin suunniteltiin reiät akselleille ja sivujen kiinnitysruuveille sekä reiät ja kierteet laippalaakereiden kiinnitykseen. Sivuihin suunniteltiin kiinnitysruuveille reiät ja kierteet.

Terägeometriaan perehdyttiin ja suunniteltiin erilaisia teriä kokeiluun. Kokeiluteriä oli useammalla hampaalla olevia ja teriä, joilla saatiin aikaan puhkaisua enem-män. (Kuva 10.)



KUVA 10. Kokeiluun tehdyt terämallit

Kokeiluteriä valmistettiin pieni erä kutakin 5 mm paksusta teräslevystä ja niitä testattiin referenssilaitteessa. Kokeiluteristä parhaiten silppuavaksi todettiin kolmella hampaalla oleva terämalli ja sitä päätettiin käyttää prototyypissä. Terät suunniteltiin valmistettavaksi 10 mm paksusta teräksestä, koska sillä saataisiin sopivamman kokoista silppua ja terä eivät vääntyisi niin helposti. Terien keskireiät suunniteltiin referenssilaitteen pohjalta 27 mm paksulle kuusioakselille.

Välikappaleet myös suunniteltiin valmistettavaksi 10 mm paksusta teräksestä. Välikappaleen halkaisija määräytyi terän mukaan niin, että välikappaleen halkaisija olisi terän halkaisija ilman hampaita.

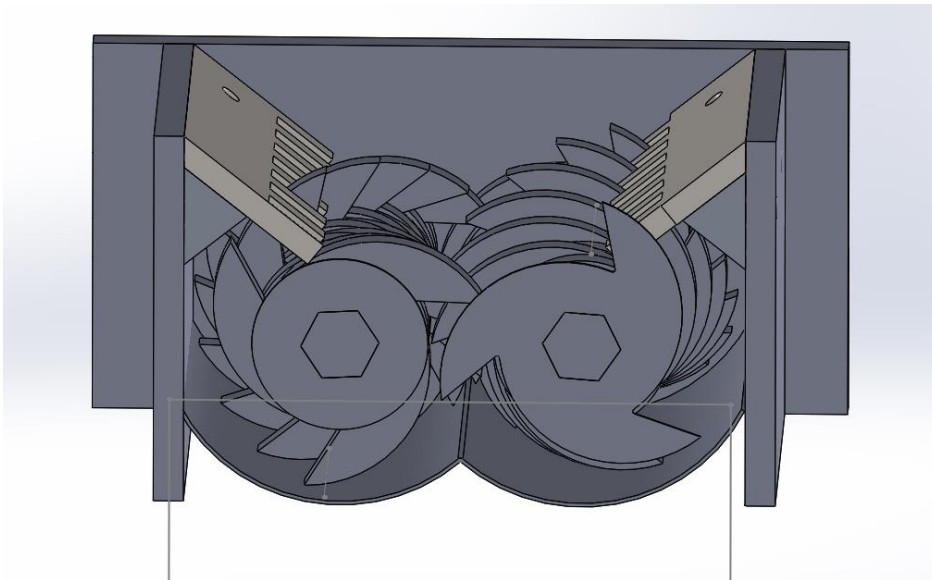
Akselit suunniteltiin valmistettavaksi 27 mm paksusta teräksisestä kuusiotangosta. Akseleiden päät sorvattaisiin pyöreäksi 25 mm:iin, ja toiseen päähän pyöristetylle osalle tehtäisiin kiilaurat kytkintä ja hammaspyöriä varten. Pyöreälle akselin osalle saataisiin myös asennettua laakerit suoraan ilman erillisiä holkkeja. Laakerit suunniteltiin tulevaksi akseleiden kumpaankin päähän päätyjen ulkopuolelle. Akselin pituus ja pyöristys täytyi suunnitella niin, että toiseen päähän saadaan mahtumaan laakerin ja toiseen laakerin lisäksi hammaspyörä ja kytkin.

Hammaspyörien suunnittelu aloitettiin mittaamalla akselien keskikohtien etäisyys toisistaan, koska se määrää hammaspyörien jakoympyrän koon. Akselien keskikohtien etäisyys oli 96 mm, joten hammaspyörien jakoympyrän halkaisija täytyi olla sama. Toinen huomioitava seikka oli hammaspyörän keskireiän koko, joka on sama kuin akselin paksuus eli 25 mm. Hammaspyörien paksuus määräytyy

halkaisijan ja valmistusmateriaalin mukaan. Hammaspyörät päätettiin hankkia valmiina, joten näillä tiedoilla päästin etsimään sopivan kokoisia hammasrattaita.

Laakerit hankittaisiin myös valmiina, joten niiden suunnitteluun riitti akselin halkaisijan mitta. Laakereiksi päätettiin hankkia laippalaakeriryksiköt, joiden keski-reikä oli 25 mm. Laippalaakereiden malli määräsi kiinnitysruuvien paikat päätylevyissä.

Silppuriin suunniteltiin ohjurit ohjaamaan muovijätettä paremmin terien väliin sekä myös katkaisemaan teriin tarttuvat muovit terien pyörähtäessä ohjureiden urien läpi. Ohjureille suunniteltiin myös kulmapalat, joilla ne saataisiin kiinnitettyä sivuihin oikeassa kulmassa. Ohjurit kiinnitettäisiin ruuveilla kulmapaloihin ja kulmapalat ruuveilla sivuihin. (Kuva 11.)



KUVA 11. Prototyypin poikkileikkaus

Akselilytkimen suunnitteluun vaikuttivat hankittavan moottorin ja teräakselin halkaisijat. Akselilytkin päätettiin hankkia valmiina ja sen tyyppiä päätettiin joustava kytkin, jotta se kestäisi paremmin teräakselin tärinää. Huomioitavaa akselilytkimen hankinnassa olisivat myös akselin kierrosnopeus ja siihen kohdistuva vääntö, jotka saataisiin selville moottorin valinnan jälkeen.

Suppilo suunniteltiin rungon koon mukaan ja tehtäisiin 1,5 mm paksusta teräksestä. Suppilo suunniteltiin 500 mm korkeaksi, jolloin sen tilavuus on noin 0,09

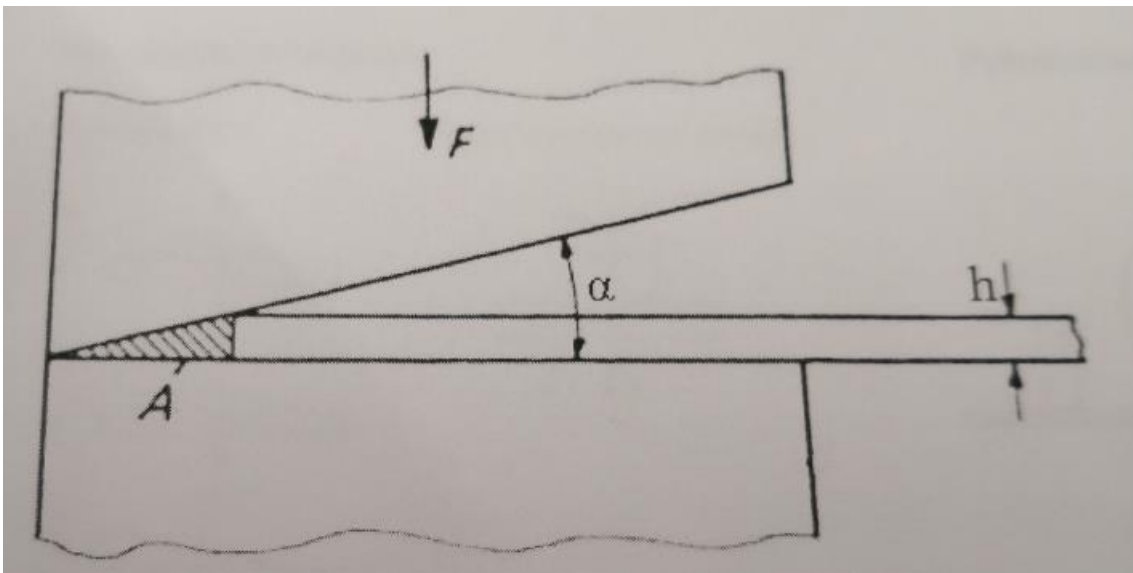
m³. Tämän tilavuuden arveltiin olevan riittävän suuri silppurin käyttötarkoitus huomioiden. Korkeus myös suojaisi käyttäjää joutumasta liian lähelle pyöriviä teriä. Suppilon kiinnitykseen suunniteltiin kulmapalat, joiden toinen pää hitsattaisiin kiinni suppiloon ja toiseen päähän tehtäisiin reiät päätyihin kiinnitystä varten.

Ritilä suunniteltiin valmistettavaksi 1 mm paksuisesta teräksestä, jossa on 10x10 mm reiät. Tällaista reikäpeltiä löytyisi luultavasti valmiina ja sen toimivuutta voitaisiin testata helposti sijoittamalla pelti rungon alle silppuamisen ajaksi. Ritilän suunnittelua päätettiin jatkaa vasta reikäpellin testien jälkeen, kun tiedettäisiin paremmin ritilän toimivuus. Ritilän muotoa ja reikien kokoa olisi testien jälkeen helpompi suunnitella.

4.2 Moottorin mitoitus ja valinta

4.2.1 Leikkaustapahtuman teoriaa

Kuvassa 12 havainnollistetaan leikkaustapahtumaa ja siihen vaikuttavia asioita. Leikkaustapahtumaan vaikuttavia asioita ovat materiaalin paksuus, käytetty voima, leikkauskulma ja materiaalin murtolujuus.



KUVA 12. Leikkaustapahtuma

Teoreettiselle leikkausvoimalle voidaan laskea likimääräinen arvo kaavalla 1 (7, s. 13).

$$F := \frac{h^2}{4} \cdot \boxed{\cot \alpha} \cdot C \cdot R_m$$

KAAVA 1.

F = teoreettinen leikkausvoima [N]

h = leikattavan levyn paksuus [mm]

α = leikkauskulma [°]

$C = 0,8$ (vakioarvo välillä 0,6 - 0,9)

R_m = materiaalin murtolujuus

$$\cot \alpha = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} = \frac{1}{\tan \alpha}$$

Kaavalla 2 (8, s. 28) saadaan moottorin tehosta P ja pyörimisnopeudesta n laskettua vääntömomentin T m.

$$M_a = P_N \cdot \eta \cdot \frac{9550}{n_a} = \dots \text{ Nm}$$

KAAVA 2.

Moottorin kokoon vaikuttaa tarvittava vääntömomentti eli tehon ja pyörimisnopeuden suhde. Tämä seikka on omiaan tekemään sellaiset ratkaisut edullisiksi, joissa moottorin pyörimisnopeus on suuri. Työkoneen pyörimisnopeuden poikkeessa moottorien standardipyörimisnopeuksista on useimmiten edullista valita standardimoottori ja sopiva välitys.

Moottori mitoitetaan työkoneen aiheuttaman vastamomentin eli kuormitusmomentin T_1 mukaan. Seuraavat vastamomentin riippuvuudet pyörimisnopeudesta ovat yleisiä $T_1 = k n^2$. Vastamomentti kasvaa verrannollisena pyörimisnopeuden neliöön. Tällainen vastamomentti on esimerkiksi keskipakotuulettimilla ja -pumpeilla. $T_1 = T n$. Vastamomentti on vakio ja yhtä suuri kuin moottorin nimellismomentti. Tällainen vastamomentti on tyypillinen nostureille, kuljettimille ja las-

tuaville työstökoneille. $T_1 = 0,2 \dots 0,5 T_n$ Vastamomentti on vakio, mutta pienempi kuin moottorin nimellismomentti. Tällainen vastamomentti esiintyy kompressoreilla, kun käynnistys on kevennetty tai työstökoneilla, kun käynnistys tapahtuu kuormittamattomana. $T_1 = 1,0 \dots 2,5 T_n$, kun $n = 0$, mutta $T_1 < T_n$, kun $n > 0$. Usein esiintyy käyttötapauksia, joilla lepokitka on suuri, jolloin vaadittava irrotusmomentti on suuri. Esimerkkinä ovat erilaiset pyörivät uunit ja murskaimet.

Kun työkoneen hitausmomentti on suuri tai vaadittava kiihdytysaika on lyhyt, voi hitauden aiheuttama vastamomentti nousta mitoitus määrääväksi tekijäksi. Tällainen työkone on esimerkiksi paperikoneen kuivatusryhmä. Käytännössä vastamomentti muodostuu usein edellisten yhdistelmästä ja on jaksollinen. Moottorin vastamomenttikäyrää konstruoitaessa on mahdollinen vaihteiston aiheuttama redusointi otettava huomioon.

Moottoria valittaessa on lisäksi otettava huomioon, että usein kannattaa jaksolliselle vastamomentille valita tälle käyttötavalle leimattu moottori. Säädettävälle moottorille tuuletuksen heikkeneminen pienillä pyörimisnopeuksilla saattaa olla merkittävä mitoitus tekijä, mikäli ei käytetä erillistä jäähdytysilmapuhallinta. (6.)

4.2.2 Moottorin mitoitus prototyypille

Moottorin mitoitus lähdettiin tekemään laskemalla muovin leikkaukseen tarvittava voima. Leikkausvoima laskettiin kaavalla 3, jossa otetaan huomioon materiaalin murtolujuus R_m sekä aineen paksuus h . Laskelmissa käytettiin muovin aineenpaksuutena 2 mm:ä, joka kuvaa useamman päällekkäin olevan muovin paksuutta. Muovin lujuutena käytettiin 70 MPa, mikä on reilusti isompi kuin kierrätysmuovien lujuus. Tällä tavoin saatiin vielä lisävarmuutta laskuihin ja tarvittava voima varmasti riittävän suureksi.

Muovin leikkaukseen tarvittava voima

$$F := \frac{h^2}{4} \cdot \frac{1}{\tan 45^\circ} \cdot C \cdot R_m \qquad F := \frac{(2 \text{ mm})^2}{4} \cdot 1 \cdot 0.8 \cdot 70 \text{ MPa} = 56 \text{ N}$$

KAAVA 3.

Momentin tarve saadaan laskettua voiman avulla kaavalla 4, jossa F on tarvittava voima ja r on matka akselin keskipisteestä terän kärkeen. Koska terässä kaksi

sivua leikkaa täytyy momentti kertoa kahdella, jolloin saadaan yhden terän tarvitsema momentti. Varmuuskertoimena käytettiin 1,5:tä.

Varmuuskerroin $A := 1.5$

$$M := F \cdot r \qquad M := F \cdot A \cdot r = 5.04 \text{ N} \cdot \text{m}$$

terässä kaksi leikkaavaa pintaa, joten momentti kerrotaan kahdella

$$M_{\text{terä}} := M \cdot 2 = 10.08 \text{ N} \cdot \text{m}$$

KAAVA 4.

Momentin tarve on suurin, kun jokainen terä leikkaa yhtä aikaa. Tämä ei käytännössä ole mahdollista, mutta lasketaan kaavalla 5 teoreettinen maksimimomentti kertomalla luku terien määrällä eli 30:llä.

Teriä silppurissa 30 joten maksimimomentin tarve on

$$M_{\text{toisio}} := M_{\text{terä}} \cdot 30 = 302.4 \text{ N} \cdot \text{m}$$

KAAVA 5.

Maksimimomentin (M), moottorin kierrosnopeuden (n_a) ja hyötysuhteen (η) avulla saadaan laskettua moottorin tarvittava teho kaavalla 6. Moottorin kierrosnopeudeksi on valittu 60 rpm.

$$M := P_N \cdot \eta \cdot \frac{9550}{n_a} \qquad \Rightarrow \qquad P_N := \frac{302.4}{0.9 \cdot \frac{9550}{60}} = 2.111 \text{ kW}$$

KAAVA 6.

Nelinapaisen oikosulkumoottorin pyörimisnopeus on noin 1 450 rpm:ää, joten tarvittiin moottorin ja akselin väliin vaihde. Väliytssuhde saatiin laskettua kaavalla 7, jossa moottorin pyörimisnopeus jaettuna halutulla toisioakselin pyörimisnopeudella.

$n_1 := 1450 \text{ rpm}$	$i := \frac{n_1}{n_2} = 24.167$	Välityssuhde
$n_2 := 60 \text{ rpm}$		

KAAVA 7.

Mitoitus varmistettiin vielä moottorivalmistajien laskureilla, jotka näyttivät samoja lukemia kuin omat laskelmat. Näillä arvoilla lähdettiin etsimään sopivaa moottoria ja vaihdetta prototyyppiin.

4.2.3 Moottorin valinta

Moottoriksi valittiin oikosulkumoottori sen toimivuuden, kustannustehokkuuden sekä ylikuormitettavuuden vuoksi. Valmis vakiovaihdemoottori olisi järkevin vaihtoehto, koska silloin ei tulisi ongelmaa yhteensopivuuden vuoksi ja hintakin olisi halvempi. Vaihdemoottorityypiksi valittiin hammaspyörävaihdemoottori sen hyvän hyötysuhteen ja energiatehokkuuden vuoksi.

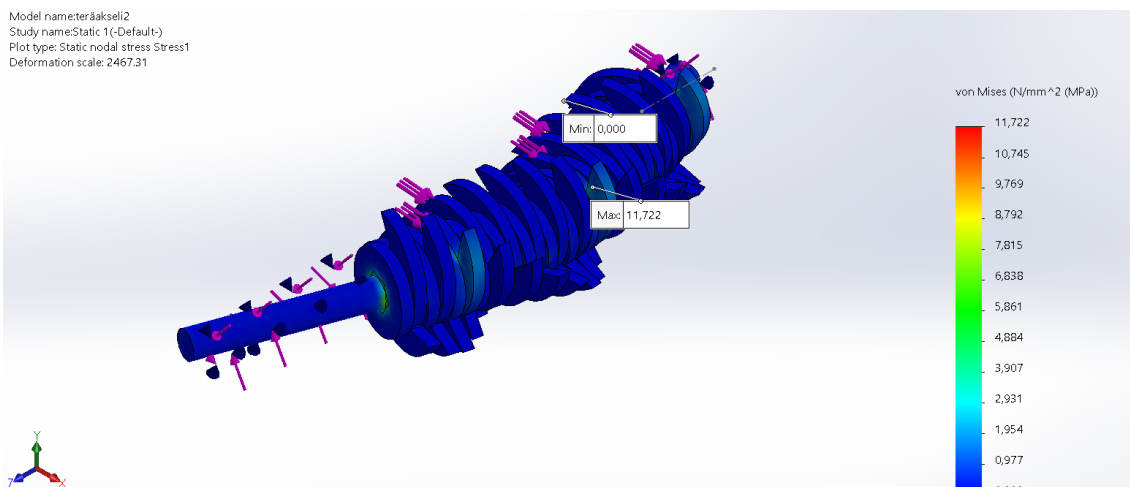
Paikalliselta sähkömoottorien toimittajalta oli mahdollista saada nopealla aikataululla vaihdemoottori, jonka arvot vastasivat aika hyvin laskelmia. Vaihteen välityssuhde oli hieman pienempi kuin laskelmissa, mutta moottorin teho oli sopiva. Tämä tarkoitti sitä, että akselit pyörisivät hieman nopeammin kuin haluttiin, mutta sen ei ajateltu aiheuttavan ongelmia. Samalla saataisiin tilattua moottorin ja silppurin akselit yhdistävä kytkin sekä hammaspyörät voimansiirtoon.

4.3 Huollettavuus ja lujuuslaskelmat

Murskaavan silppurin huoltotoimenpiteet ovat melko vähäisiä ja koskevat lähinnä teriä. Terät voivat vääntyä, katketa tai kulua käyttökelvottomiksi. Akselin vääntyminen on myös yksi varteenotettava vaihtoehto huollon tarpeelle, kuten myös laakereiden kuluminen.

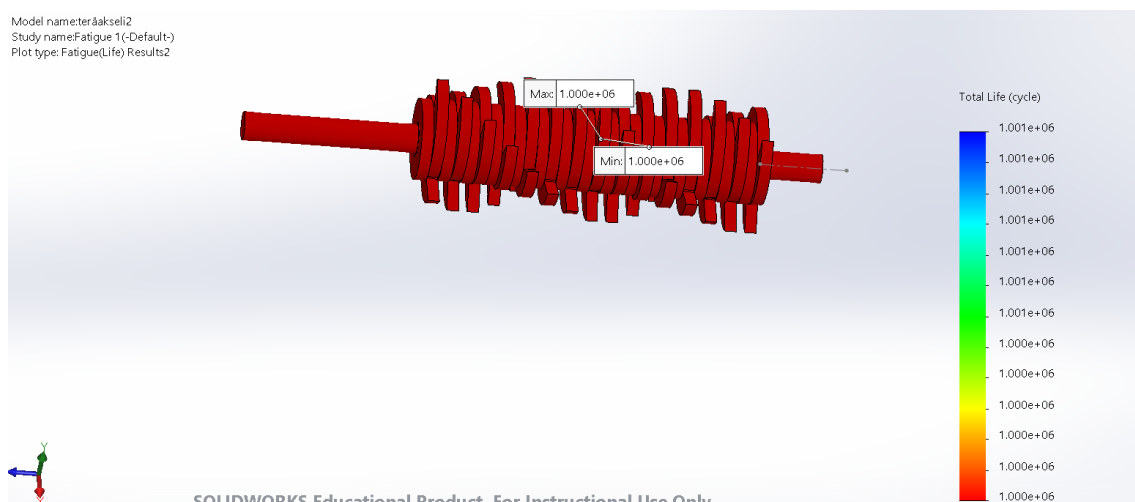
Teräakselille tehtiin lujuus- sekä väsymislujuuslaskelmat SolidWorksin simulaation avulla. Osien valmistusmateriaaleiksi simulaatioon valittiin S235-teräs akselille ja S355-teräs terille sekä välilevyille. Teräakseliin kohdistuu suurimmat kuormitukset, joten laskelmat nähtiin järkeväksi tehdä sille. Samalla saataisiin tietoon millainen käyttöikä teräakselilla normaalikäytössä olisi. Maksimijännitykseksi

saatiin simulaatiolla 11,722 N/mm² ja se kohdistui terän hampaan juureen (kuva 13).



KUVA 13. Maksimijännitys teräkselilla

Simulaatiolla teräkselin käyttöikäksi saatiin miljardi kierrosta (kuva 14). Teräkselin pyöriessä taukoamatta nopeudella 60 kierrosta minuutissa sen käyttöikä olisi simulaation mukaan yli 30 vuotta. Teräkseli tuskin pyörisi normaalikäytössä taukoamatta, joten käyttöikä olisi todellisuudessa vieläkin pidempi. Teräkselin käyttöikä valituilla valmistusmateriaaleilla olisi simulaation mukaan erittäin pitkä.



KUVA 14. Käyttöikä teräkselilla

4.4 Osien valmistus ja hankinta

Osista päätettiin valmistaa itse terät, välikappaleet, ohjurit, päädyt, sivut, akselit, suppilo ja ritilä. Valmiina hankittaisiin laakerit, hammasrattaat, kytkin ja kiilat.

Terien, välikappaleiden ja ohjureiden valmistusta varten hankittiin 10 mm paksua S355-laatuista teräslevyä. S355-teräksen myötölujuus on vähintään 355 N/mm^2 ja muovin laskelmissa käytetty murtolujuus on 70 N/mm^2 , joten materiaali sopii lujuuden puolesta hyvin teriin. Muut 10 mm levyistä valmistettavat osat päätettiin valmistaa samasta materiaalista kuin terät. Osat leikattiin suunniteltujen mallien mukaan teräslevystä vesileikkurilla. Vesileikkurilla leikatessa täytyi ottaa huomioon, että vesisuihku kääntyy hieman materiaalia läpäistessä. Suoran leikkauspinnan saamiseksi vesileikkurin asetuksiin täytyi asettaa tietty kompensatio arvo. Kompensatio arvo riippuu materiaalin ominaisuuksista ja paksuudesta.

Päätyjen ja sivujen valmistusta varten hankittiin 12 mm paksua S235-laatuista teräslattatankoa. Päätyihin ja sivuihin ei kohdistu kovin suuria voimia, joten S235 teräs käy valmistusmateriaaliksi hyvin. Lattatanko oli leveydeltään sopivasti 150 mm, joten osia varten sahattiin tangosta vain suunnitellun pituiset kappaleet. Päätyihin koneistettiin reiät akseleille, laakeripesien kiinnitysruuveille ja sivujen kiinnitysruuveille CNC-jyrsinkoneella. Sivujen pituus koneistettiin CNC-jyrsinkoneella tarkkaan mittaan ja kiinnitysruuveille koneistettiin samalla reiät ja niihin kierteet.

Akseleiden valmistusta varten hankittiin 27 mm paksua S235-laatuista teräksistä kuusiotankoa. Lujuuslaskelmien mukaan S235 teräs on sopiva akselien materiaaliksi. Tangosta leikattiin suunnitellun mittaiset akselit ja akselin päät sorvattiin pyöreiksi suunnitellun mallin mukaan. Akseleiden päihin pyöreälle osalle jyrsittiin 8 mm kiilaura hammaspyörää ja kytkintä varten CNC-jyrsinkoneella.

Prototyypin suppilona päätettiin käyttää referenssilaitteen suppiloa. Referenssilaitteen suppilo on hieman pienempi kuin prototyyppiin suunniteltu, mutta pienellä muokkauksella sitä voitiin käyttää prototyypin testauksessa. Suppilon alaosaan hitsattiin kaksi kulmaprofiilia, jotta se saatiin pysymään vakaasti paikoillaan. Suppilo kiinnitettiin päätyihin kulmarautojen avulla.

Ritilän valmistusta varten hankittiin 1 mm paksuista teräksistä reikälevyä, jossa oli 10x10 mm reiät 12 mm jaolla. Reikälevystä leikattiin levyleikkurilla prototyypin pohjan peittävä palanen.

Täysin sopivia hammaspyöriä ei löytynyt valmiina, joten tilattiin jakohalkaisijaltaan sopivat napahammaspyörät ja muokattiin ne sopiviksi. Tilatut napahammaspyörät olivat mallia moduuli 3 ja hammasluku oli 32. Hammaspyörien materiaali oli C45 ja ryntökulma 20°. Akselireiän halkaisija oli hammaspyörissä 16 mm, joten suurensimme sen manuaalisorvissa 25 mm:iin. Moottoriin kiinni tulevan akselin hammaspyörästä jyrtsittiin napaa matalammaksi, jotta akselin pituus saatiin riittämään. Hammaspyöriin täytyi vielä tehdä kiilaurat, jotta ne pyörivät akselien mukana. Kiilaurat saatiin tehtyä aventimen avulla prässissä.

Laakereiksi hankittiin neljä UCFL-205 FK -laippalaakeriyksikköä. Laippalaakeriyksiköissä oli jokaisessa kaksi kiinnitysreikää ja kuusiokoloruuvi akseliin lukitusta varten.

Kyttimeksi hankittiin Rotexin joustava kytkin, joka pystyttiin tilaamaan täysin prototyyppiin sopivana. Kytkimen puoliskoissa oli kiilaurat valmiina ja kuusiokoloruuvit akseliin lukitusta varten.

Moottoriksi hankittiin KEBin lieriöhammasvaihdemoottori mallia G32A DM100LC4. Moottorin nimellisteho oli 2,2 kW ja toisiopyörimisnopeus 68 rpm. Moottorin tarkemmat tiedot liitteessä 1.

5 PROTOTYYPIN KOKOONPANO JA TESTAUS

Prototyypissä huomattiin ongelma heti kokoonpanon jälkeen, koska terät osuivat toisiinsa ja akselit jumiutuivat. Toisaalta päätyjen väliin akseleille jäi tilaa, vaikka kaikki osat oli asennettu. Jonkin aikaa asiaa selvitettyä arveltiin sen johtuvan terien paksuudesta. Teräslevy, josta terät oli leikattu osoittautui mittauksissa paksuudeltaan kauttaaltaan alle 10-millimetriseksi. Levyn paksuustoleranssiksi mitauksissa saatiin $-0,20\text{ mm}$ - $-0,10\text{ mm}$. Päätettiin valmistaa ohuesta 0,25-millimetrisestä pellistä välislevyt terien ja välilevyjen väliin. Tällä toimenpiteellä ongelma ratkesi ja terät saatiin pyörimään sulavasti. Kokoonpano oli valmis ensimmäisiä testejä varten. (Kuva 15.)



KUVA 15. Kokoonpano

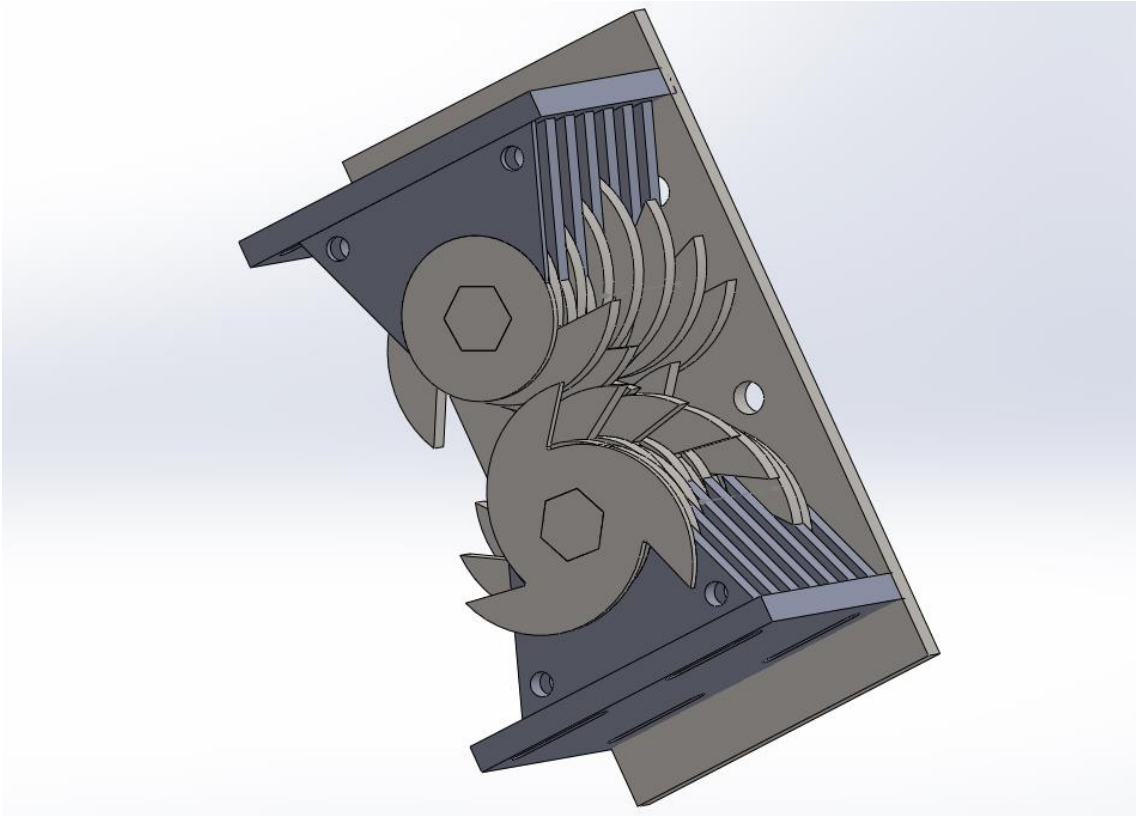
Ensimmäiset testit tehtiin ilman ohjureita ja ritilää, jotta voitiin tarkastella pelkästään terien toimintaa ja momentin riittävyttä. Momentti tuntui riittävän hyvin ja terät leikkasivat muovia. Muovi tarttui teriin ja alkoi pyörimään akselin mukana,

mutta tämän arveltiin korjaantuvan ohjureiden asennuksella. Voitiin siis jatkaa testausta lisäämällä ohjurit ja ritilä laitteeseen. Ritilä oli tehty millin paksuisesta reikäpellistä, jossa oli neliöreiät kokoa 10x10 mm. Seuraavissa testeissä silppuaaminen onnistui paremmin ohjureiden ja ritilän ansiosta, mutta muovi tuntui nyt kasaantuvan ohjureiden alle ja ritilän läpi menevä silppu oli liian isoa. (Kuva 16.)



KUVA 16. Vasemmalla ritilän läpi mennyttä silppua ja oikealla silppu ritilällä

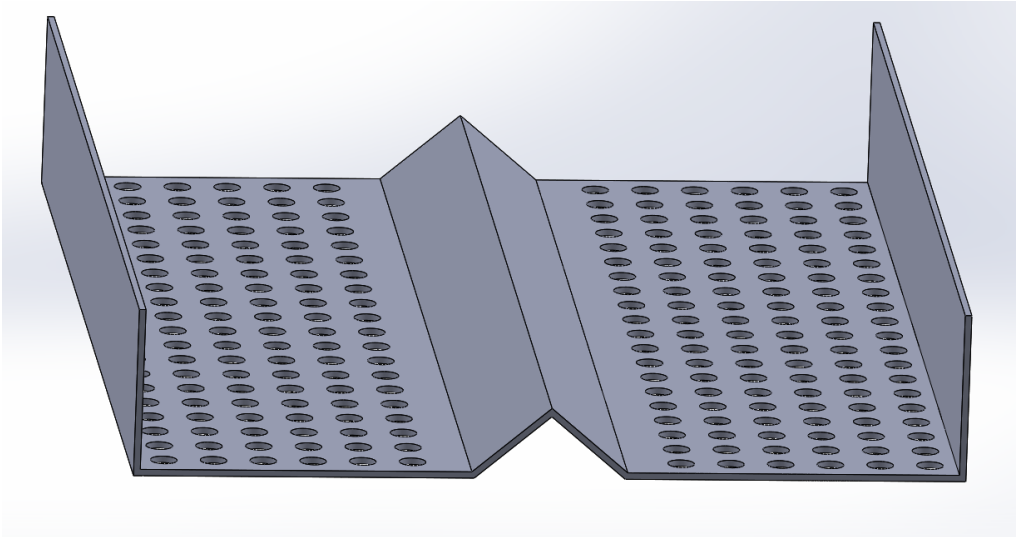
Testejä jatkettaessa huomattiin myös, että ritilä oli vahvuudeltaan liian ohutta ja se alkoi taipua. Ohjureiden vaihtoa vastinpaloihin alettiin myös miettimään ja päädyttiin kokeilemaan sitäkin vaihtoehtoa, joten suunniteltiin ne. (Kuva 17.)



KUVA 17. Silppurin poikkileikkauskuva vastinpaloilla

Vastinpaloihin suunniteltiin tankoja varten reiät, jotka varmistavat vastinpalojen pysymisen paikoillaan. Tangoiksi hankittiin sopivaa kierretankoa ja osat asennettiin paikoilleen.

Uusi ritilä valmistettiin 1,5 mm paksusta levystä, jossa oli pyöreät 8 mm:n reiät valmiina. Ritilä suunniteltiin suorilla linjoilla ja se särmättiin muotoonsa, koska vastinpalojen vuoksi kiinnitys täytyi tulla sivujen ulkopuolelle. (Kuva 18.)



KUVA 18. Ritilä 2

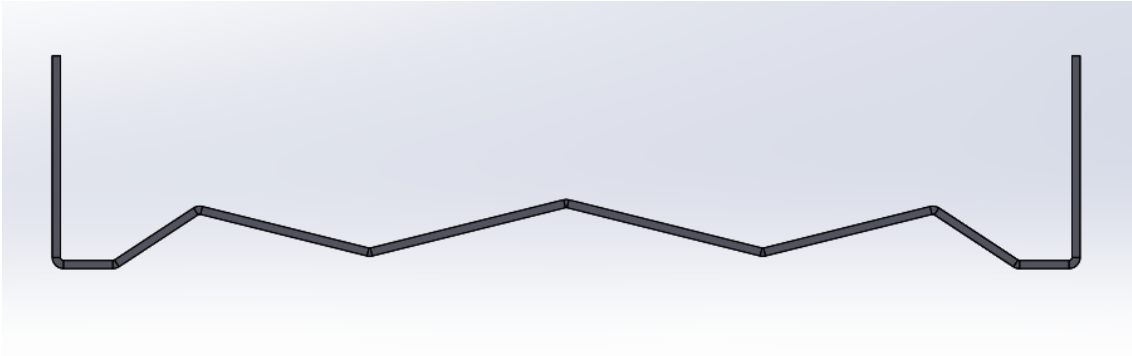
Ritilälle tehtiin kiinnitysreiät sivuihin ja reikiin kierteet ruuveja varten. Kiinnitykseen käytettiin M5-ruuveja.

Prototyypin testattiin uusilla osilla ja saatiin kohtalaisen hyviä tuloksia. Uuden ritilän läpi menevästä silpusta tuli sopivan kokoista ja vastinpalat helpottivat silppuamista. Jonkin verran silppua kertyi edelleen ritilän päälle, koska ritilän ja terien väliin jäi liikaa tilaa. (Kuva 19.)



KUVA 19. Ritilän päälle kertynyt silppu

Päätettiin suunnitella ritilä vielä uudestaan niin, että se tulisi mahdollisimman lähelle teriä ja olisi kuitenkin mahdollista valmistaa särmämällä. (Kuva 20.)



KUVA 20. Ritilä 3

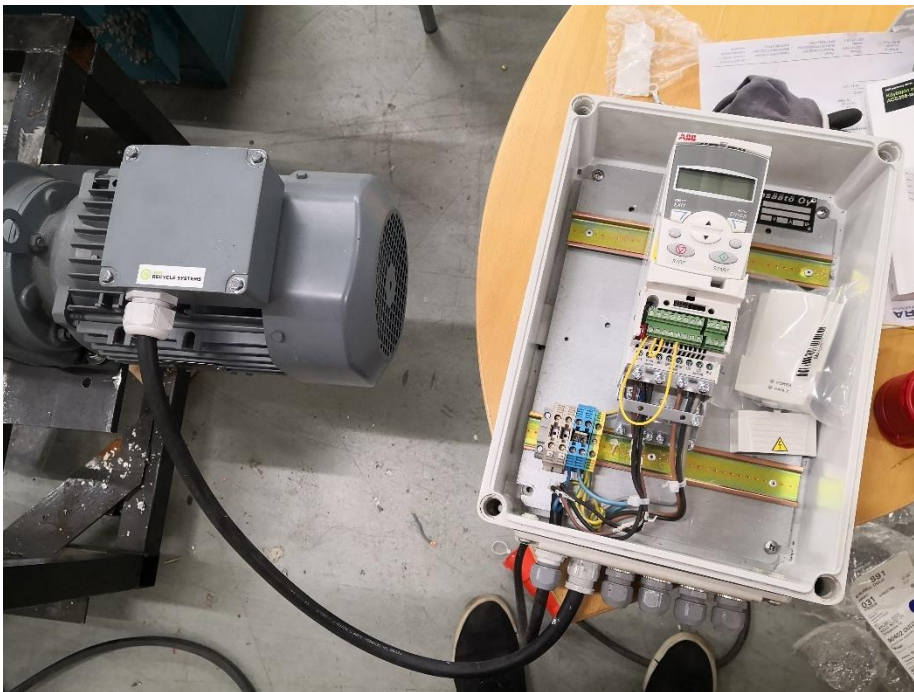
Uusi muotoiltu ritilä toimi testeissä paremmin kuin edellinen ja silppua kertyi vähemmän sen päälle. Seuraava vaihe testaamisessa oli kiinnittää prototyyppi uuteen tukevampaan kehikkoon. Kehikoksi löytyi vanha teräsputkesta valmistettu kehikko, jossa oli renkaat alla. Hitsaamalla kaksi teräsputkea kehikkoon saatiin silppuri asennettua kulmarauodoilla paikalleen ja moottorille hitsattiin oma taso kehikkoon. (Kuva 21.)



KUVA 21. Prototyyppi kiinnitettynä uuteen kehikkoon

Kehikon sisään on helppo asettaa laatikko tai pussi, johon silppu kerätään. Kehikon sisään olisi myös mahdollista asentaa liuska tai putki, jota pitkin silppu kulkeutuu keräyspaikkaan.

Virrankulutus saataisiin mitattua, kun asennetaan taajuusmuuttaja ohjaamaan moottoria. Taajuusmuuttaja on laite, jolla voidaan säätää sähköverkon jännitteen taajuutta. Taajuusmuuttajan näytöltä voitiin lukea virrankulutus silppurin pyöriessä tyhjänä ja murskatessa muovijätettä. Taajuusmuuttajaksi hankittiin ABB:n malli ACS355-03E-05A6-4, joka kytkettiin sähköverkon ja moottorin väliin. (Kuva 22.)



KUVA 22. Taajuusmuuttaja kytkettynä moottoriin

Taajuusmuuttajan muita hyötyjä on pyörimisnopeuden säätö, pyörimissuunnan vaihto, omat suoja- ja virranrajoituskomponentit. Taajuusmuuttajan avulla silppurin suojaus ja käytettävyys paranevat. Taajuusmuuttajan avulla saadaan myös virrankulutusta pienemmäksi, koska käynnistyminen ja pysäytys ovat pehmeämpiä.

Hammasrattaiden päälle tehtiin ja asennettiin suojus, jotta silppurin käyttö olisi turvallisempaa. Käyttäjä ei näin pääse laittamaan sormiaan tai vaatteitaan hammasrattaiden väliin silppurin pyöriessä. Prototyypin kaikki osat oli nyt kokoonpantu (kuva 23) ja päästiin tekemään lopulliset testit.



KUVA 23. Prototyyppi kokoonpantuna

Testit aloitettiin asettamalla taajuusmuuttajaan haluttu pyörimisnopeus, joka tässä tapauksessa oli sähkömoottorin vakiopyörimisnopeus eli 1 410 kierrosta minuutissa. Taajuusmuuttajalla ajettiin prototyyppiä ja syötettiin muovijätettä supiloon. Taajuusmuuttajalta voitiin lukea prototyypin käyttämä virta, joka oli vapaasti pyöriessä 2,7 A ja silputessa korkeimmillaan 4,3 A. Silppu oli suunnitellun kokoista ja prototyyppi söi muovijätettä hyvin. Rutilän päälle jäi vieläkin jonkin verran isompaa silppua.

Yritys hankki vertailusilppurin, jossa oli yksi nopeasti pyörivä teräkseli. Hankittu silppuri toimi 4 kW:n sähkömoottorilla ja voimansiirto oli toteutettu hihnalla. (Kuva 24.)



KUVA 24. Vasemmalla vertailusilppuri ja oikealla sen teräakseli

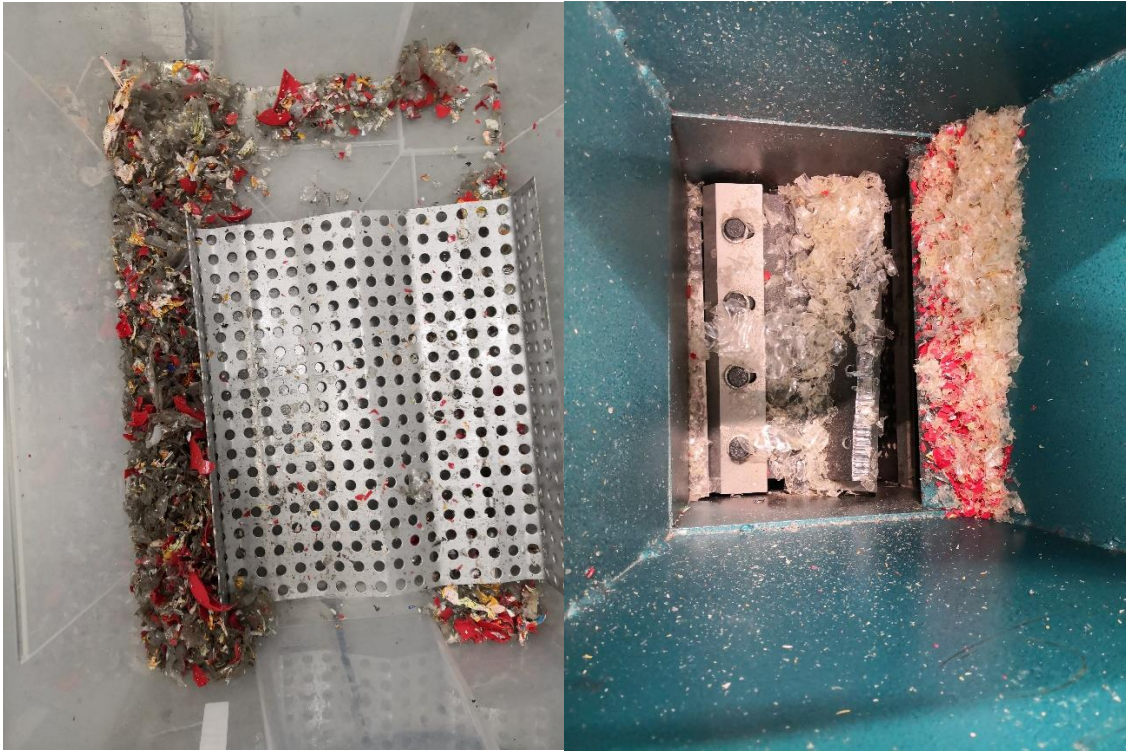
Prototyypin toimintaa haluttiin verrata vertailusilppurin toimintaan. Vertailusilppurin sähkömoottori on melkein kaksi kertaa isompi kuin prototyypin, joten virrankulutus on prototyypissä pienempi. Vertailusilppurin käyttämä nimellisvirta on 8,7 A ja prototyypin 4,8 A. Kumpikin laite toimii kolmivaihesähköllä.

Vertailua varten kumpaankin laitteeseen syötettiin 1 kg muovijätettä, joka koostui PET ja PP muovilaaduista. Kumpikin laite suoriutui silppuamisesta hyvin, mutta vertailusilppurin tekemä silppu oli huomattavasti pienempää kuin prototyypin. (Kuva 25.)



KUVA 25. Vasemmalla prototyypin silppu ja oikealla vertailusilppurin silppu

Vertailusilppuri tuotti silppua hitaammin kuin prototyyppi, joten sen virrankulutus oli luultavasti siitäkin syystä suurempi. Kummastakin silppurista saatiin ulos noin 700 g silppua eli muovijätettä jäi kumpaankin laitteeseen 300 g. Prototyypissä muovijätettä jäi ritilän päälle isommaksi silpuksi ja vertailusilppurissa isompi silppu pyöri suppilossa sekä terien päällä. (Kuva 26.)



KUVA 26. Vasemmalla prototyypin ritilälle jäänyt silppu ja oikealla vertailusilppurin sisään jäänyt silppu.

Laitteisiin jäänyt isompi silppu luultavasti silppuuntuisi pienemmäksi, kun muovijätettä lisättäisiin. Laitteisiin jäävän silpun määrä on kuitenkin melkein kolmasosa koko muovijätteen määrästä, joten kummankin toiminnassa olisi parannettavaa. Jos halutaan silputa eri muovilaatuja niin laitteisiin jäävä silppu muodostuu isoksi ongelmaksi. Prototyypistä saa poistettua silpun irrottamalla ritilän, mutta vertailusilppurista silpun poistaminen on vaikeampaa.

6 TULOKSET

Prototyypistä saatiin suunniteltua ja rakennettua toimiva silppuri, joka silppuaa muovijätteen halutun kokoiseksi silpuksi. Prototyypistä rakennettiin kaksiakselinen murskaava silppuri, jota ajettiin vaihteellisella sähkömoottorilla. Prototyypissä on kaksi teräkseliä, jotka pyörivät vastakkaisiin suuntiin hammasrattaiden avulla. Muovijätteen silppuamiseen tarvittava teho saatiin määritettyä ja prototyypille sopiva sähkömoottori hankittua. Prototyyppiä saatiin testattua ja verrattua sen toimintaa kaupallisen silppurin toimintaan.

Prototyypin tarvitsemaksi tehoksi saatiin määritettyä 2,1 kW ja maksimimomentiksi 302,4 Nm. Tarvittava maksimimomentti saatiin 2,1 kW:n sähkömoottorista välityssuhteella 24. Sähkövirtaa prototyyppi käyttää silputessaan 4,3 A ja tyhjäkäynnillä 2,7 A.

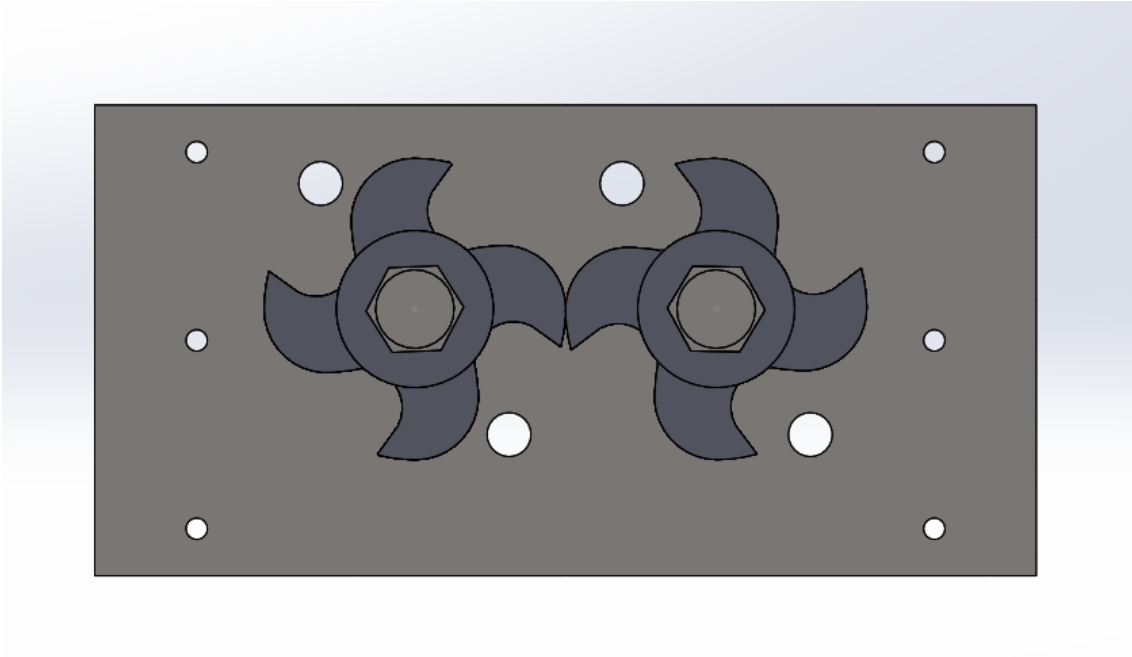
Prototyyppi suoriutuu silppuamisesta helposti ja nopeasti. Suppilon avulla prototyyppiin on helppoa ja turvallista lisätä muovijätettä. Muovijäte hakeutuu hyvin terien väliin ja se mahdollistaa nopean sekä jatkuvan silppuamisen. Prototyyppi silppuaa muovijätteen noin 10 mm halkaisijaltaan olevaksi silpuksi.

Prototyypin valmistettavat osat ovat kohtalaisen helppoja valmistaa ja suurin osa voidaan tehdä samalla valmistusmenetelmällä. Valmiina hankittavia osia on vähän ja niitä löytyy helposti. Prototyyppi vaatii hyvin vähän huoltoa ja useimpien huoltotoimenpiteiden teko on helppoa. Terien huolto on hankalaa, koska se vaatii teräkselien irrotuksen ja terien purkamisen akselilta.

Prototyyppi menestyi vertailussa hankitulle silppurille hyvin, koska se oli nopeampi ja energiatehokkaampi. Muovisilpun puhdistus prototyypistä on helpompaa, koska ritilän saa irti.

Kustannusarvioksi prototyypille saatiin noin 2 400 € (liite 2). Arvio laskettiin listahinnoilla, joten kilpailuttamalla hintaa saataisiin varmasti pienemmäksi. Työstöaika arvioitiin prototyypin tekoon käytetyn ajan perusteella. Arviossa on otettu huomioon vain osien tekoon menevä aika, mutta ei kokoonpanoa eikä asennusta.

Prototyypistä saa myös helposti muovipuristimen, kun terien geometria muutetaan siihen sopivaksi ja ritilä poistetaan (kuva 27). Suunniteltiin ja tehtiin puristavat terät kokeilumielessä ja testattiin niitä. Prototyyppi toimi hyvin myös pelkkänä puristimena. Puristuskäytössä ritilä jätettiin pois kokoonpanosta, koska sitä ei tarvittu.



KUVA 27. Puristinterät

7 POHDINTA

Muovisilppurin prototyypistä saatiin suunniteltua ja valmistettua toimiva ja yksinkertainen. Terien vastinkappaleet ja niiden kiinnitys vaatisi vielä jatkokehitystä. Ritiä vaatisi myös jatkokehitystä, jotta se saataisiin lujemmaksi ja lähemmäksi teriä. Tällöin silppua ei jäisi niin paljon ritiän ja terien väliin.

Prototyypin runko, akselit, ritiä, terät, välikappaleet ja terien vastinkappaleet valmistettiin teräksestä. Teräs sopii hyvin näiden osien valmistusmateriaaliksi, mutta terien valmistukseen käytettävää teräslaatua voisi miettiä vielä paremmaksi. Teriin voisi käyttää hyvin karkenevaa terästä ja niihin voisi tehdä pintakarkaisun, jolloin niiden käyttöikä saisi lisättyä. Pintakarkaisun avulla terien reunat kuluisivat hitaammin kuin keksiosa, jolloin terät pysyvät terävinä pitempään.

Valmistusmenetelmänä osille käytettiin pääsääntöisesti vesileikkausta, joka on hyvä, tarkka ja kustannustehokas tapa valmistaa osat. Muutamia osia jouduttiin koneistamaan.

Prototyyppi silppusi muovijätteen halutunlaiseksi silpuksi, mutta silpun kokoa on mahdollista muuttaa tarpeen mukaan erilaisilla osilla. Terägeometriaa ja terien paksuutta voidaan muuttaa, jolloin saadaan erikokoista silppua. Ritiän reiänkoko voidaan muuttaa ja näin voidaan säätää silpun kokoa.

Prototyypin käyttöturvallisuutta voisi lisätä tekemällä käyttöohjeet ja liimaamalla varoitustarrat suppiloon ja/tai maalaamalla suppilon sisäosan huomiovärillä. Suppilon voisi suunnitella myös sellaiseksi, ettei se ole avonainen vaan syöttöaukon edessä on luukku tai kumiläppä. Prototyyppiin tulisi asentaa ainakin hätä-seisäkytkin ja mielellään muutakin turvalogiikkaa.

Prototyypin ohjaukseen voitaisiin käyttää automaatiota, jolloin käyttöä voidaan tehostaa monella eri tavalla. Ohjaus voidaan toteuttaa taajuusmuuttajan liitäntöjen kautta ohjauslogiikalla tai erillisellä moottorinohjausyksiköllä. Pelkästään nykyisillä moottorinkäynnistimillä saataisiin prototyyppiin hätäpysäytys, moottorin käynnistys, suunnanvaihto ja suojaus ylikuormitukselta.

Prototyypin huoltaminen on kohtalaisen helppoa, vaikkakin huollon tarve on luultavasti aika vähäistä ja koskee lähinnä teriä. Jatkokehityskohteena voisi olla terien vaihdettavuuden helpottaminen niin, että teräakselit olisi helppo irrottaa rungosta.

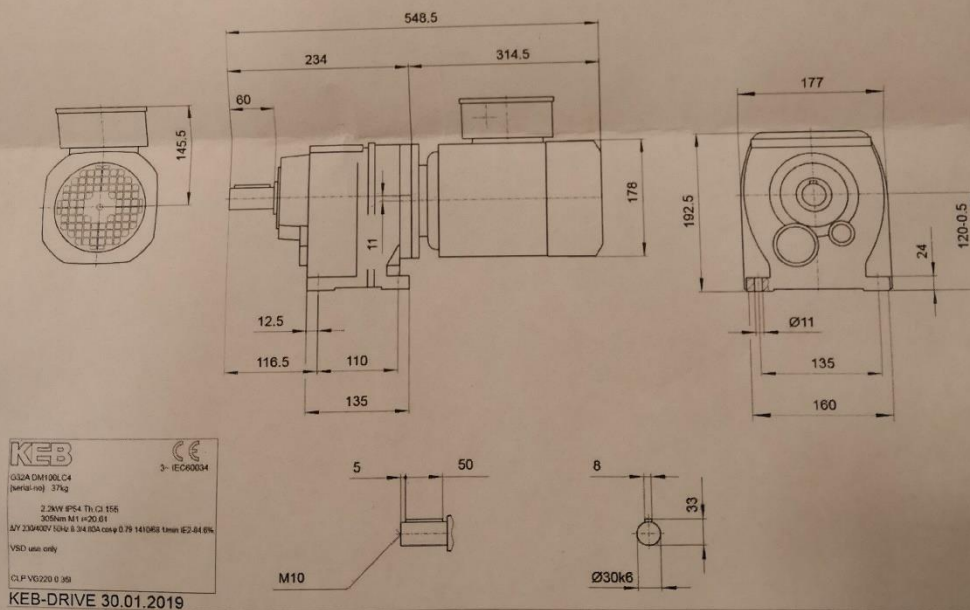
Akselikytkimeksi voisi vaihtaa jäykän kytkimen, kun prototyypin ylikuormitussuojaus on kunnossa. Joustava kytkin antaa periksi hieman, jolloin leikkaustilanteessa muovikappaleeseen tuleva isku pehmenee myös.

LÄHTEET

1. Solutions. 2018. Head Recycle Systems. Saatavissa: <https://headrecyclesystems.com/>. Hakupäivä 12.11.2019.
2. Shredders. 2018. Genox Recycling Tech Co., Ltd. Saatavissa: <https://www.genoxtech.com/en/products.html>. Hakupäivä 10.4.2019.
3. Muovien materiaalimerkit. Suomen Uusiomuovi Oy. Saatavissa: http://www.uusiomuovi.fi/fin/pakkaus_kiertaa/muovien_kierratys/muovien_materiaalimerkit/. Hakupäivä 19.11.2019.
4. Tuotteet. 2018. Aikolon Oy. Saatavissa: <https://www.aikolon.fi/tuotteet>. Hakupäivä 25.4.2019.
5. Shredder machine. Precious plastic. Saatavissa: <https://preciousplastic.com/en/videos/build/shredder.html>. Hakupäivä 30.10.2018.
6. Sähkömoottorikäytöt. ABB:n TTT-käsikirja 2000-07. Saatavissa: http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/18_S%84hk%94moottorik%84yt%94t.pdf. Hakupäivä 27.4.2019.
7. Lämsä, Antti 2010. Hukkarainen leikkuri. Opinnäytetyö. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö, kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma, tuotekehitys.
8. Käyttöratkaisuja SEW-vaihdemoottoreilla. Laskentamenetelmiä ja esimerkkejä. Osa 1. 12/93. SEW Eurodrive.

(KEB Vaihteet ja moottorit. 2019. Software KEB-DRIVE. Lataa KEB-vaihteiden ja moottoreiden valintaohjelma. Saatavissa <https://www.keb-drive.de/KEB-DRIVE.fi.html>. Hakupäivä 12.12.2019.)

Lieriöhammasvaihde moottori
 G32A DM100LC4
 Toisiopyörimisnopeus: 68 1/min
 vääntömomentti: 305Nm
 Vaihteen käyttökerroin: 1.55
 Vaihde:
 Välytysuhde: 20.61
 Jalkaversio
 Toisioakseli kiilalla Ø30x60
 Huohotintulppa
 Voitelu: 0.35 l CLP VG220 Mineraaliöljy
 Moottori: Oikosulkumoottori IE2
 Nimellisteho: 2.2kW
 Moottorin pyörimisnopeus: 1410 1/min
 Jännite/Taajuus: Δ/Y 230/400V 50Hz
 Nimellisvirta: 8.3/4.80A
 cosφ: 0.79
 Eristysluokka: 155
 Kotelointiluokka: IP54
 VSD use only
 Moottoriliitäntä: Liitinkotelo 1xM25, asento 0A
 Väri: normaali, RAL7031 sinivihreä
 Rakennemuoto: M1
 Paino: ~37 kg



Materiaalit	200 €
Laakeripesät	23 €
Hammaspyörät	126 €
Kytkin	120 €
Moottori	1 300 €
Osien työstö 10h	600 €
Tarvikkeet	20 €
Yhteensä	2 389 €

