

Ville Wejberg

Uuden voitelupumpun suunnittelu teollisuus- vaihteelle

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinööriytyö

23.4.2014

Tekijä Otsikko	Ville Wejberg Uuden voitelupumpun suunnittelu teollisuusvaihteelle
Sivumäärä Aika	25 sivua + 6 liitettä 23.4.2014
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotesuunnittelu
Ohjaajat	Lehtori Pekka Salonen Tekninen päällikkö Kari Laukkanen
<p>Tässä insinööriyössä suunniteltiin uuden voitelupumpun prototyyppi teollisuusvaihteelle SEW Industrial Gears Oy:n toimesta. Työ oli osa tuotekehitysprojektia, ja työn tavoitteena oli luoda toimiva prototyyppipumppu ja testata se.</p> <p>Työ aloitettiin tutustumalla teollisuusvoitelun teoriaan teollisuusvaihteissa. Samalla aloitettiin konseptin valinta tutustumalla nykyisin käytettyihin pumppuihin ja selvittämällä niiden tyypit ja toimintaperiaatteet. Tyyppi valittiin ja sen mahdolliset patenteilla rajoitetut ratkaisut kartoitettiin. Tämän jälkeen suunniteltiin prototyypin osat CAD (Computer-Aided Design) -ohjelmalla ja niistä piirrettiin valmistuskuvat. Osat valmistutettiin paikallisella alihankkijalla. Prototyypille suunniteltiin myös testauslaitteisto, jolla saadaan tietoa pumpun suoritusarvoista ja hyötysuhteista.</p> <p>Insinööriyön lopputuloksena syntyi koneistettu voitelupumpun prototyyppi. Projektin ja työn aikatauluissa sekä kokoonpanossa ilmenneiden ongelmien takia pumppu ehdittiin kokoonpanna vain osittain. Pumpulle ei tämän takia ehditty tehdä sille suunniteltuja testejä.</p> <p>Tämän työn tuloksena tuotetut dokumentit on koottu liitteisiin, ja ne on luovutettu vain työn tilaajalle.</p>	
Avainsanat	voitelupumppu, tuotekehitys, teollisuusvaihde

Author Title	Ville Wejberg New Lubrication Pump Designed for an Industrial Gear
Number of Pages Date	25 pages + 6 appendices 23 April 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical and Production Engineering
Specialisation option	Product Design
Instructors	Pekka Salonen, Principal Lecturer Kari Laukkanen, Technical Manager
<p>The aim of this Bachelor's thesis was to design a new prototype of a lubrication pump for an industrial gear and to run tests on it. The thesis was a part of a product development project and it was commissioned by SEW Industrial Gears Oy.</p> <p>Firstly, the process was started by studying the theory of industrial lubrication and industrial gears. Secondly, the concept evaluation was started by examining the currently used pumps and analyzing their types and working principles. Then, the type of the pump was chosen and any possible patents limiting the selected solutions were surveyed. After this the parts of the prototype were designed with a CAD (Computer-Aided Design) program. In addition, manufacturing drawings were made and the parts were manufactured by a local subcontractor. Finally, a testing system was also designed that could be utilized for the information of the pumps performance and efficiency.</p> <p>The final result was a machined prototype of a lubrication pump. However, there were some challenges related to the project and the work schedules as well as the assembly. Therefore, the pump was only partially assembled and for this reason the planned tests could not be conducted for the pump.</p> <p>The documents produced as a result of this thesis are summarized in the appendices and they have been released only to the client of this project.</p>	
Keywords	lubrication pump, product design, industrial gear

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	SEW Industrial Gears Oy	2
3	Teollisuusvoitelu	3
3.1	Voitelun merkitys	3
3.2	Vaihteiden voitelu	4
4	Konseptien arviointi ja valinta	5
4.1	Nykyiset pumput	5
4.2	Sisähammaspyöräpumppu	8
4.3	Patentit	10
5	Prototyypin suunnittelu	10
5.1	Osien 3D-mallit	11
5.1.1	Kotelo	12
5.1.2	Roottori	13
5.1.3	Sisähammaspyörä	14
5.1.4	Erotin	14
5.1.5	Kansi	15
5.1.6	Muut osat	15
5.2	3D-kokoonpano	16
6	Prototyypin valmistus ja kokoonpano	17
7	Prototyypin testaus	18
7.1	Testauslaitteisto	19
7.2	Mitattavat ja laskettavat suureet	22
7.2.1	Tilavuusvirta	22
7.2.2	Volumetrinen hyötysuhde	23
7.2.3	Kokonaishyötysuhde	24
8	Yhteenveto	25
	Lähteet	26

Liitteet (vain työn tilaajan käyttöön)

Liite 1. Tuotekehityssuunnitelma

Liite 2. Osien 3D-mallit

Liite 3. Kokoonpanon leikkauskuvat

Liite 4. Kokoonpanon räjäytyskuva

Liite 5. Osien valmistuskuvat

Liite 6. Testauslaitteiston luonnos

Lyhenteet

CAD	<i>Computer-Aided Design</i> . Tietokoneavusteinen suunnittelu.
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> . Saksalainen standardointi-instituutti.
EHD	<i>Elastohydrodynaaminen voitelu</i> . Ottaa huomioon hydrodynamiikassa nestettä rajaavien pintojen elastisuuden.
EP	<i>Extreme pressure</i> . Erittäin suuri paine. EP-lisäaineita tarvitaan voiteluaineisiin, joita käytetään rajusti kuormitetuissa kohteissa.
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> . Kansainvälinen standardoimisjärjestö.
IT6	<i>International Tolerance</i> . Kaikki ISO-toleranssi- ja sovitejärjestelmään kuuluvat toleranssit. Toleranssiaste 6. Asteet 5–11 kattavat tavanomaisen laite- ja konerakennuksen.
VTT	<i>Valtion teknillinen tutkimuskeskus</i> .
λ	<i>Voitelukalvon ominaispaksuus</i> . Voitelukalvon ominaispaksuuden arvoa kuvataan merkillä λ .

1 Johdanto

Tämä insinööriytyö oli osa tuotekehitysprojektia, jonka tavoitteena on tuottaa uusi voitelupumppukonsepti SEW Industrial Gears Oy:lle vuoden 2014 aikana tuotteistettavaksi. Työtä tehtiin pääasiassa yrityksen tiloissa Karkkilassa. Työn tarkoituksena oli seurata asetettua tuotekehityssuunnitelmaa (liite 1) sekä ottaa osaa sen tiettyihin kohtiin suunnittelijan näkökulmasta. Työ huipentuisi luodun prototyypin testaukseen.

Tällä hetkellä yrityksen eri teollisuusvaihteissa ja vaihdesarjoissa käytetään erilaisia akselinpääpumppuja, jotka ovat eri valmistajien tuotantoa. Projektin tarkoituksena on kehittää yrityksen ensimmäinen oma, uusi pumppu, joka on kustannustehokas ja helppo valmistaa. Myös mahdollisesti sarjarajat rikkova pumppu asettaa haasteelliset tavoitteet sen toivotuille ominaisuuksille:

- tuottoalue
- kierroslukualue
- viskositeettialue
- nimellispaine
- molempisuuntaisuus
- vaihtokelpoisuus nykyisten pumppujen kanssa
- räjähdyssuojaus
- alumiinivapaa rakenne.

Pumppukokoja tulisi olla vähintään kuusi erilaista, että haluttu tuottoalue saadaan kalettua. Myös valmistusmenetelmien pitäisi olla mahdollisimman vähän rajoitetut, jotta pumpusta saataisiin kustannustehokas, ja kustannustehokkuus tulisi huomioida myös pumpun rakenteessa.

Insinööriytyön tulokset on koottu liitteisiin ja ne on luovutettu ainoastaan työn tilaajalle.

2 SEW Industrial Gears Oy

SEW Industrial Gears Oy on osa SEW-Eurodrive-konsernia, joka keskittyy teollisuusvaihteiden valmistukseen, suunnitteluun sekä myynnin tukeen. Yhtiön tuotantolaitokset sijaitsevat Saksassa, Kiinassa, Brasiliassa ja Suomessa, Karkkilan ruukin tehdasympäristössä (kuva 1). Emoyhtiön tutkimus- ja tuotekehitysorganisaatio antaa teknisesti tukevan pohjan paikalliselle suunnittelulle ja valmistukselle.

SEW Industrial Gears Oy suunnittelee ja valmistaa MC-, X-, MD-, M1- ja MACC-teollisuusvaihdesarjoja sekä räätälöityjä ME-vaihteita. Suomalaiset sukujuuret tulevat Santasalo Vaihteilta, ja vanhoja vaihteita myös huolletaan sekä varaositaan. Tuoteperheet ovat modulaarisia ja kattavat markkina-alueen hyvin moninaisuutensa takia. SEW Industrial Gears Oy palvelee MC-kokoonpanotehtaita Suomen lisäksi yhdessätoista eri maassa. Yhtiö hoitaa myös kokoonpanot ja komponenttitoimitukset kokoonpanotehtaille ympäri maailmaa. Työntekijöitä Karkkilassa on noin 145, toimitilaa 15 000 m² ja liikevaihto vuonna 2012 oli 30 miljoonaa euroa.



Kuva 1. SEW Industrial Gears Oy.

3 Teollisuusvoitelu

Laitteet ja koneet tarvitsevat voitelua. Toistensa suhteen liikkuvien kosketuspintojen kulumista ja kitkaa tehokkaasti vähentävä tapa on erottaa ne voiteluainekalvolla.

3.1 Voitelun merkitys

Voiteluaineena voi toimia melkein mikä tahansa helposti leikkautuva materiaali neste-mäisessä, kiinteässä tai kaasumaisessa olomuodossa. Teollisuudessa käytetään yleisesti öljyjä ja rasvoja. Voitelun tärkeimmät tehtävät ovat seuraavat:

- erottaa pinnat toisistaan
- pienentää kitkaa ja siitä aiheutuvaa häviötehoa
- vähentää kulumista
- jäähdyttää kosketusta
- estää epäpuhtauksien tulo voideltavaan kohteeseen
- kuljettaa epäpuhtaudet ja kulumishiukkaset pois
- vaimentaa värähtelyä
- suojata osia korroosiolta.

Tehokkaasta voitelusta seuraa merkittävää taloudellista hyötyä, ja alhainen kitka säästää energiaa sekä nostaa tehokkuutta. Kulumisen vähyys kasvattaa koneen elinikää ja oikea voitelu on yksi perusedellytys koneen hyvälle käyttövarmuudelle.

3.2 Vaihteiden voitelu

Vaihteissa voiteluaineella voidellaan välitysosat, laakerit ja tiivisteet. Välitysosien hammaskosketuksen vierintäolosuhteet muuttuvat ja niin muuttuu myös voiteluaineen kalvonpaksuus ja -muodostus, joka vaihtelee hampaan eri kohdissa. Pyörimisnopeuden ollessa riittävä, rynnössä (hammaskosketuksessa) vallitsee hydrodynaaminen voitelutilanne ja λ -arvo (voiteluainekalvon paksuus) on yleensä riittävä koko hampaan alueella. Jos pyörimisnopeus on alhainen, voi saman hammaskosketuksen aikana vaikuttaa sekä EHD- (elastohydrodynaaminen) että rajavoitelutilanne.

Optimaalinen λ -arvo on kenttäkokeiden ja pitkän tutkimustyön tulos. Osien kehänopeuden on todettu vaikuttavan merkittävästi pintojen vaurioitumisherkyyteen. Nopeuden laskiessa tarvittava λ -arvo myös laskee. Rajavoitelutilanteessa voiteluaine tarvitsee kulumisenesto- ja EP (extreme pressure) –lisäaineistusta, joiden muodostama rajavoitelukalvo suojaa pintoja.

Vaihteiden kierrosnopeus ja asennusasento määräävät usein voitelun tarpeen ja sen tyypin. Yleisin voitelutapa on roiskevoitelu, jossa voiteluaineen taso on jonkin verran alimman hammaspyörän hampaiden alareunan yläpuolella. Roiskevoitelu soveltuu keskinopeille vaihteille, mutta pienemmillä kehänopeuksilla käytetään kylpy-voitelua, jossa voiteluaineen pinta on laakerin vierintäelimen tasolla. Erittäin nopeille ja erittäin hitaille vaihteille suositellaan pumpullista painevoitelua. Tavallisesta asennusasennosta poikkeavan vaihteen voiteluaine voidaan johtaa oikeaan paikkaan, oikeille elimille esimerkiksi pumpun ja putkiston avulla, jonne se ei muuten pääsisi. Pumpulla on myös suuri ja tärkeä rooli vaihteen jäähtyksessä sen pumpatessa voiteluöljyyn sitoutunutta lämpöä pois nopeasti liikkuvista osista. Etuna painevoitelussa on myös voiteluaineen helppo suodatus tarvittaessa.

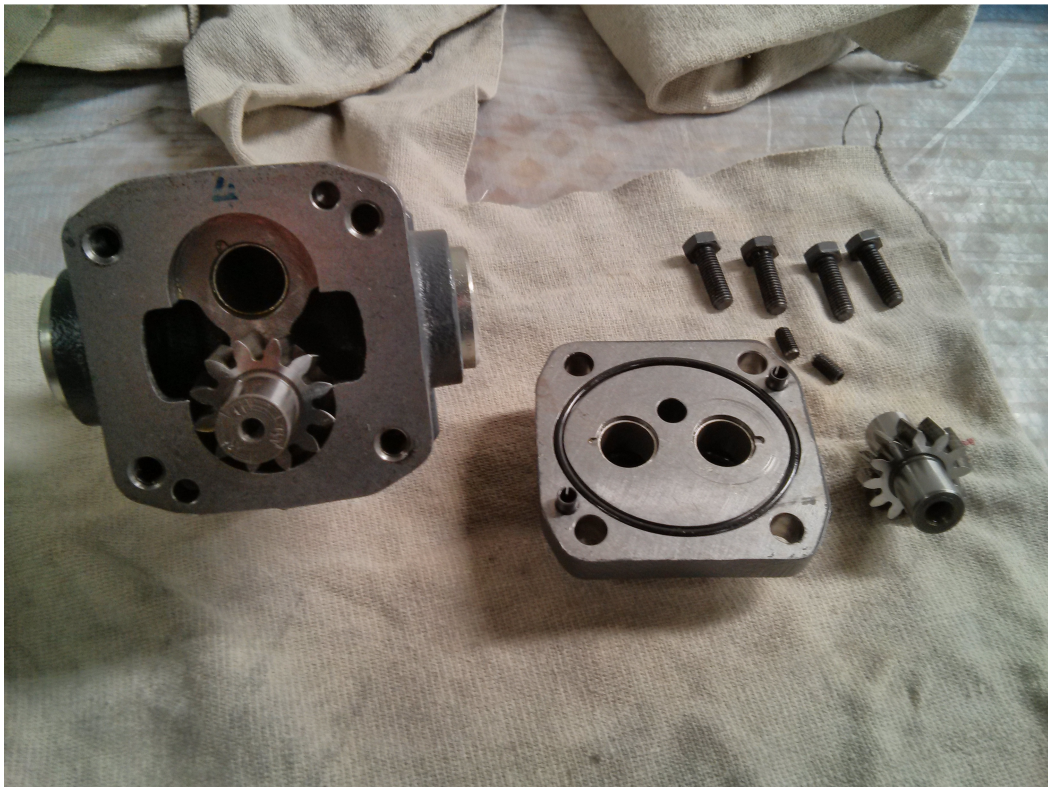
Poikkeukselliset lämpötilat tuovat myös omat haasteensa. Kylmäkäynnistyksessä öljy on usein liian jäykkää ja siksi kykenemätön kunnolliseen voiteluun. Sama öljy taas saattaa laitteen lämmittyä olla liian ohutta riittävän voitelukalvon muodostukseen. Tämä johtuu siitä, että öljyn viskositeetti on riippuvainen lämpötilasta. Näillä erikoistilanteilla on huomattava vaikutus kestoikään, vaikka niiden ajallinen kesto on varsin lyhyt. Eitoivotut tilanteet voidaan kuitenkin estää esimerkiksi käyttämällä kylmäkäynnistyksissä öljyn lämmitintä ja/tai käyttämällä synteettisiä öljyjä, joilla on suuri viskositeetti-indeksi.

4 Konseptien arviointi ja valinta

Tuottoalueen kattamiseksi tulisi pumppukokoja olla kuusi erilaista. Kehitys päätettiin aloittaa pienestä pumpusta ja siitä siirryttäisiin myöhemmin suurempiin kokoihin.

4.1 Nykyiset pumput

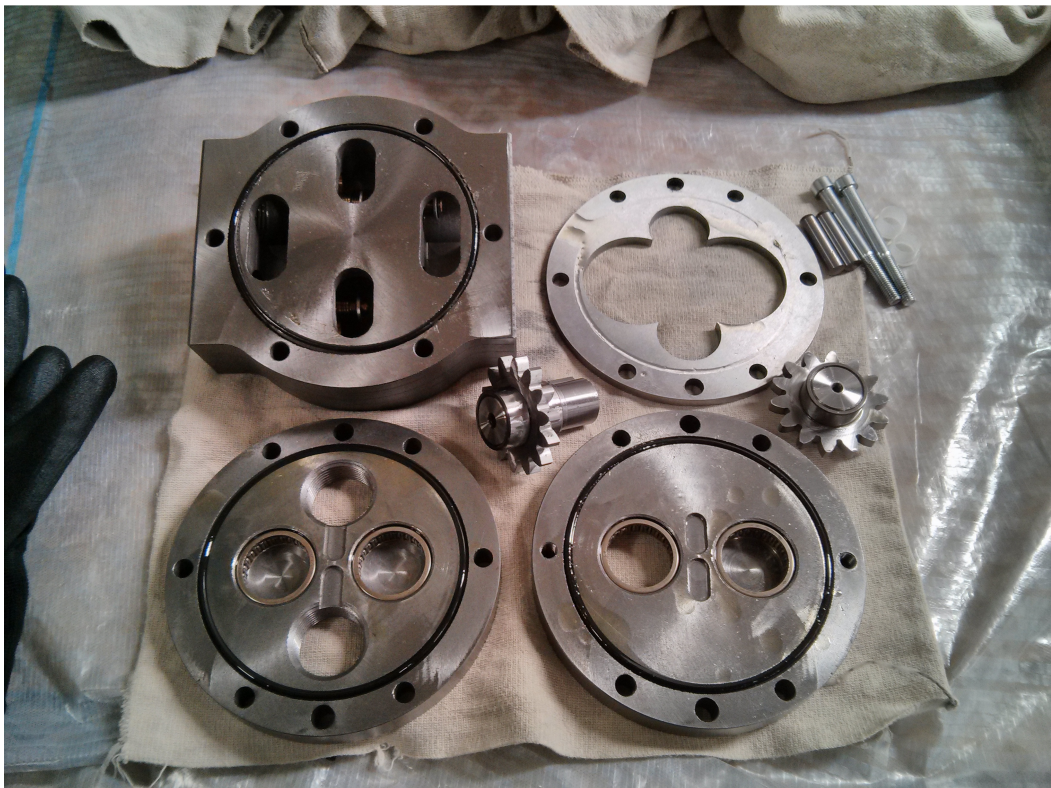
Tällä hetkellä vaihteissa ja vaihdesarjoissa käytetään erilaisia ja eri kokoisia pumppuja. Pumput ovat tyypiltään ulko- sekä sisähammaspyöräpumppuja. Näistä eri valmistajien pumppumalleista tutustuttiin lähemmin viiteen, pieneen pumppuun. Pumput purettiin osiin ja niiden toimintaperiaate pyrittiin selvittämään. Ne on esitetty purettuina kuvissa 2–6. Myös valmistajien tarjoamiin teknisiin tietoihin sekä huolto-ohjekirjoihin perehdyttiin huolellisesti.



Kuva 2. Pumppu 1 – ulkohammaspyöräpumppu.



Kuva 3. Pumppu 2 – ulkohammaspyöräpumppu erillisellä suuntaventtiiliköllä.

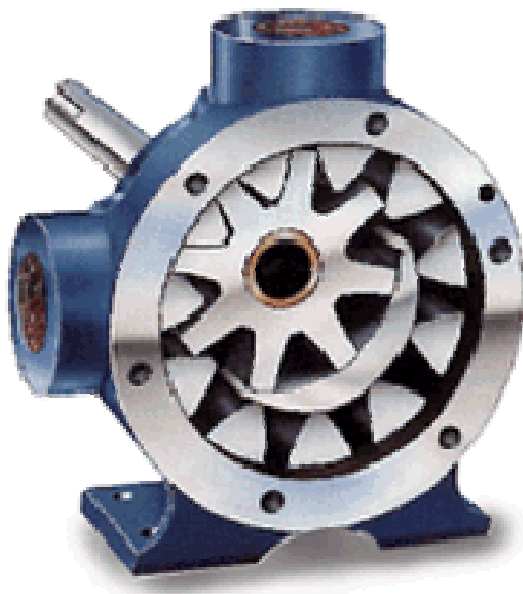


Kuva 4. Pumppu 3 – ulkohammaspyöräpumppu sisäänrakennetulla suuntaventtiiliköllä.

Pumput 4 ja 5 olivat sisähammaspyöräpumppuja, joissa etuna oli muun muassa pienempi liikkuvien osien määrä verrattuna ulkohammaspyöräpumppuihin. Molempisuuntaisuus oli toteutettu ilman suuntaventtiilejä pumpun oman rakenteen avulla toisin kuin ulkohammaspyöräpumppuissa. Pumppua käyttävän akselin pyörimissuunnan vaihtuessa pumpun osien rakenne mahdollistaa automaattisesti voitelunesteen pumppausuunnan pysymisen samana.

4.2 Sisähammaspyöräpumppu

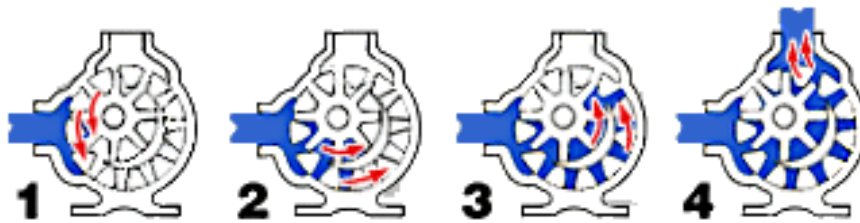
Pumpun tyyppiä valittiin sisähammaspyöräpumppu (kuva 7). Ne ovat monikäyttöisiä, soveltuvat laajalle viskositeettialueelle, erityisen hyvin paksujen nesteiden pumppaukseen, sekä kestävät suuria lämpötiloja jopa 400 °C:seen asti. Pumppu on itseimevä, tuottaa tasaisen virtaaman ja voi jopa käydä kuivana lyhyitä aikoja. Tätä ei tosin suositella. Pumppausuuntaa voidaan vaihtaa helposti pyörimissuuntaa muuttamalla. Liikkuvia osia on yleensä vain kaksi, joten pumput ovat yksinkertaisia, kompakteja, helppokäyttöisiä, luotettavia, kulutuskestäviä ja helppohuoltoisia. Pieni osien määrä vaikuttaa myös positiivisesti valmistuskustannuksiin.



Kuva 7. Sisähammaspyöräpumpun perusrakenne [2].

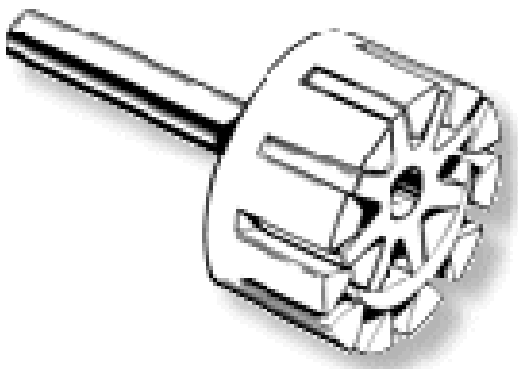
Pumpun toimintaperiaate on kuvan 8 mukainen. Punaiset nuolet ilmaisevat pumpun pumppaus- ja pyörimissuunnan, pumpattava neste on merkitty sinisellä.

Vaiheessa 1 neste tulee imupuolelle roottorin (ulkohammaskehän) ja sisähammaspyörän hampaiden väliin. Vaiheessa 2 neste matkaa hampaiden välissä pumpattavaan suuntaan. Sirppirakenne erottaa nesteen kulun kahtia ja toimii samalla imu- ja painepuolen tiivisteinä. Vaiheessa 3 pumppu on melkein täynnä nestettä. Lomittuvat hammat muodostavat nesteelle lukitut taskut, mistä johtuen tilavuus on hallittu ja kavitointia ei tapahdu. Vaiheessa 4 pumppu on täynnä nestettä ja sisäosien hammastus tiivistää yhtä kaukana toisistaan sijaitsevat imu- ja painepuolet. Tämä pakottaa nesteen ulos painepuolelta.



Kuva 8. Pumpun toimintaperiaate [2].

Kuvassa 9 on esitetty liikkuvien sisäosien rakenne irrallaan kotelosta. Roottorin akseli liitetään käyttävään laitteeseen ja se on laakeroitu pumpun koteloon. Roottorin pyöriesä se pyörittää sisähammaspyörää, joka on myös laakeroitu omalle akselilleen koteloon tai pumpun kanteen. Laakereiden voitelu voidaan joissain tapauksissa, rakenteesta riippuen, hoitaa pumpattavalla nesteellä. Rakenteesta riippuen myös pumpun pumpaussuunta voidaan pitää samana tai vaihtaa roottorin pyörimissuunnan vaihtuessa.



Kuva 9. Pumpun liikkuvat osat [2].

4.3 Patentit

Hammaspyöräpumpit ovat vanha keksintö, ja suurin osa niihin liittyvistä patenteista on vapautunut. Kuitenkin valmistajat ja yritykset ovat suojanneet omat uniikit ratkaisunsa patenteilla koskien osien, eritoten hammasosien ja niiden profiilin rakennetta. Siksi oli hyvin tärkeää selvittää, onko rekisterissä patenteja, jotka estävät jonkin tietyn profiilin, rakenteen tai ratkaisun käytön.

Patentteja selvitettiin European Patent Officen hakukoneen [4] kautta mahdollisten rikkomusten selvittämiseksi. European Patent Organisation on 38:n Euroopan valtion järjestö, jonka patenttivirus myöntää patenteja ja jonka toinen elin valvoo patenttivirus toimia.

Suuri osa patenteista oli englanniksi, saksaksi tai kiinaksi, jolloin niistä oli usein englanninkielinen lyhennelmä. Patentteja oli satoja, ja iso osa niistä koski juuri nimenomaan hammasprofiilin muotoa. Tämän lisäksi teksti oli vaikeaselkoista lakitekstiä, joka oli vieraskielisenä vielä vaikeammin käännettävää ja ymmärrettävää, ja prosessiin upposi paljon aikaa. Esteitä ei löytynyt, eikä emoyhtiön patenttiasiantuntijaa tarvittu selvittämään tarkemmin mahdollisia ristiriitoja. Mahdollisten muutosten yhteydessä tämä optio saatetaan käyttää.

5 Prototyypin suunnittelu

Prototyypin suunnittelu ja valmistuskuvien piirtäminen oli tämän työn suurin sekä haastavin osuus. Vaikka liikkuvia osia on suhteellisen vähän, niiden toiminnallisuuden takaaminen, mitoitus ja tolerointi oli suuren työn takana. Valmistuksen huomioon ottaminen ja piirteiden oikea koneistusjärjestys tuli varmistaa toleranssien ja geometrinen toleranssien avulla. Geometriset toleranssit asetetaan vain silloin, kun se on tarkoituksenmukaista varmistamaan taloudellisella tavalla osien toiminta- ja vaihtokelpoisuus [5, s. 20–70]. Valmistuskuvien tuli myös olla selkeitä, yksiselitteisiä ja helppolukuisia.

Perustoleranssiasteeksi päätettiin valita IT6. Toleranssiaste 6 kattaa muun muassa tavallisimmat työstökoneet, sähkölaitteet, vierintälaakerien halkaisijat ja tarkasti valmistetut reiät. IT6-aste on valmistusteknisesti tarkinta, mihin yleisesti käytössä oleva lait-

teisto pystyy ilman erikoisempia toimenpiteitä, ja on kyllin riittävää todentaa esimerkiksi pumpun kaltaisessa komponentissa ja sen osissa.

Suunnittelussa käytettiin Solidworks® Premium 2012 x64 Edition –ohjelmaa, johon yrityksellä on lisenssi ja jolla yrityksen suunnittelua hoidetaan pääasiallisesti. Sekä 3D-mallit että valmistuskuvat tehtiin tällä ohjelmalla. Ohjelma oli entuudestaan jokseenkin tuttu ja apua sen käyttöön sai aina kysymällä vanhemmilta suunnittelijoilta, joilla on laajempi ja pidempi kokemus suunnittelusta.

Materiaaleina käytettiin rakenneterästä, nuorrutusterästä sekä suomugrafiittirautaa näin huomioiden vaatimukset kustannustehokkuudesta, alumiinivapaasta rakenteesta ja räjähdysuojauksesta.

5.1 Osien 3D-mallit

Osista pyrittiin konseptin mukaisesti tekemään mahdollisimman yksinkertaisia ja helposti valmistettavia. Koska kyseessä on prototyyppi, jotkin siinä esiintyvät ratkaisut voivat jatkokehityksessä ja pumppua optimoidessa muuttua merkittävästikin. Ensimmäisessä prototyyppissä keskityttiin täysin toiminnallisuuteen ja sen takaamiseen, jolloin mahdolliset kauneusvirheet ja virittäminen hiottaisiin kuntoon vasta muiden ominaisuuksien ollessa konseptin mukaiset.

Osien suunnittelun sekä piirtämisen ohjenuorana käytettiin yrityksessä käytössä olevaa konsernin omaa sisäistä standardia (SEW work standards). Sisäinen standardi koostuu suureksi osaksi kansainvälisistä ISO-standardeista sekä saksalaisista DIN-normeista, jotka määrittävät käytännössä kaiken: sallitut osat, materiaalit, työkalut, käytännöt, käsittelyt ja niin edelleen.

Esitettyjen osien kaikkia erikoispiirteitä ei ole kerrottu tässä työssä yksityiskohtaisesti niiden ollessa yrityksen sisäistä tietoa. Osien mallit löytyvät liitteestä 2.

5.1.1 Kotelo

Kotelon muoto on prototyypissä pelkistetyn ja helpon suorakaiteen muotoinen, vaikkakin jatkossa sitä pyrittäisiin keventämään muodoilla ja tekemään aihio todennäköisesti valuna. Valua käytettäessä sisäiset kanavat, onkalot ja avarrukset syntyisivät muotissa ja kotelo tarvitsisi vähemmän koneistusta, mikä taas pienentäisi valmistuskustannuksia isoja tuotantosarjoja ajatellen.

Tiivistys kotelon ja kannen välillä toteutettiin prototyypissä O-renkaalla ja sille suunniteltiin ura kotelon pintaan kokoonpantavuutta ajatellen. Tiivistyksen muuttamista tulee myös harkita, jos valmistettava sarja kasvaa riittävän suureksi ja toiset menetelmät tulevat sitä kautta edullisemmiksi.

Kotelon runkoon suunniteltiin reiät kiinnitysruuveille, jotka mitoitukseltaan sopivat yhteen nykyisten vaihteissa olevien reikien kanssa, sekä reiät otsapintaan pumpun kannen kiinnitystä varten. Imu- ja painepuolille kotelon päihin suunniteltiin standardin mukaiset liitosreiät, jotka ovat yhteydessä sisäisiin kanaviin. Imu- ja painepuolet voisi jatkossa myös merkitä jotenkin asennuksen helpottamiseksi. Materiaalina kotelossa käytettiin seostamatonta rakenneterästä.

Huomioitavia seikkoja:

- pesän ja laakeripesän samankeskisyys
- pesän ja akselireiän samankeskisyys
- otsapintojen kohtisuoruus pesään nähden
- toiminnallisten mittojen toleranssit
- otsapintojen pinnanlaatu
- pesän avarrus
- onkaloiden suuruus.

5.1.2 Roottori

Roottori välittää akselinsa kautta vaihteen portaan akselin pyörimisliikkeen pumppuun ja mahdollistaa yhdessä sisähammaspyörän ja erottimen kanssa itse pumppaustapah-tuman. Prototyypiroottorin akseli kytketään vaihteen portaan akselin päähän loviliitok-sella ja roottorin akseli laakeroidaan pumpun pesään liukulaakerilla. Akselin ja kotelon välillä ei ole tiivistystä, koska pumppu on tarkoitus asentaa niin, että akselin ja kotelon välistä mahdollisesti ohivuotava öljy tihkuu vaihteen sisälle. Tiivistys myös monimut-kaistaisi rakennetta ja sille ei normaaliolosuhteissa ole tarvetta.

Roottorin toinen pää muodostaa sisähammaspyöräpumpun ulomman hammaskehän, jonka sisällä sisähammaspyörä pyörii. Hammasprofiilin suunnittelu oli haastavaa. Root-toriin tehdyt kanavat mahdollistavat niihin kulkeutuvan öljyn nostavan sen irti kotelon pesästä. Osa oli toiminnallisuutensa kannalta kriittinen.

Hammasprofiiliin voitaneen tehdä muutoksia ja parannuksia tulevaisuudessa. Liitosta-paa, akselin paksuutta ja roottorin materiaalia on syytä jatkossa miettiä tarkemmin, sillä käytetty teräs tarvitsee liitoskohdassa lämpökäsittelyä kestääkseen tarpeeksi rasitusta ja kulutusta. Materiaalina roottorissa käytettiin nuorrutusterästä, joka soveltuu induk-tiokarkaisuun.

Huomioitavia seikkoja:

- roottorin ja akselin samankeskisyys
- hammasprofiili
- toiminnallisten mittojen toleranssit
- pintojen laadut
- akselinpään lämpökäsittely
- öljykanavat.

5.1.3 Sisähammaspyörä

Sisähammaspyörä pyörii erottimeen kutistusliitetyn sylinteritapin ympärillä, roottorin ulkohammaskehän sisällä. Hammasprofiilin suunnittelu oli haastavaa ja sen tuli olla yhteensopiva roottorin hammaskehän kanssa. Materiaalina sisähammaspyörässä käytettiin suomugrafiittirautaa.

Hammaspyörän viisteitä tulee jatkossa ehkä muokata sekä optimoida ja hammasprofiilia parantaa.

Huomioitavia seikkoja:

- hammasprofiili
- otsapintojen yhdensuuntaisuus toisiinsa nähden
- toiminnallisten mittojen toleranssit
- pintojen laadut.

5.1.4 Erotin

Erotin on kolmas liikkuva osa, joka tiivistää ja jakaa roottorin ja sisähammaspyörän väliin jäävän tilan sirpillään. Osaan on tarkoitus kutistusliittää epäkeskeisesti sylinteritappi, jonka ympärillä sisähammaspyörä pyörii. Erottimen ja kannen muotoilu mahdollistaa erottimen liikkumisen 180° akselinsa ympäri ja näin pumppaussuunnan pysymisen samana, vaikka roottorin akselin pyörimissuunta vaihtuisikin. Materiaalina erottimessa käytettiin suomugrafiittirautaa.

Huomioitavia seikkoja:

- kääntömekanismi
- epäkeskon paikka
- toiminnallisten mittojen toleranssit
- pintojen laadut.

5.1.5 Kansi

Kannen muodoksi suunniteltiin yksinkertainen ympyrälaatta tai ”limppu”. Ulkokehälle kanteen suunniteltiin reiät kiinnitysruuveille ja kannen sisään suunniteltiin voitelu-ura, jouselle potero ja erottimen kääntömekanismiin vastinpinta.

Jos kansi tehdään jatkossa valuna saadaan sitä helposti kevyemmäksi muodoilla. Tiivistävän O-renkaan ura suunniteltiin koteloon kannen sijasta, jotta se olisi helpompi panna kokoon. Jousityypin mahdollisesti vaihtuessa täytyy sille suunnitella oman mallinsa potero. Materiaalina kannessa käytettiin seostamatonta rakenneterästä.

Huomioitavia seikkoja:

- kääntömekanismin vaste
- voitelu-ura
- jousipotero
- tiivistyspinta.

5.1.6 Muut osat

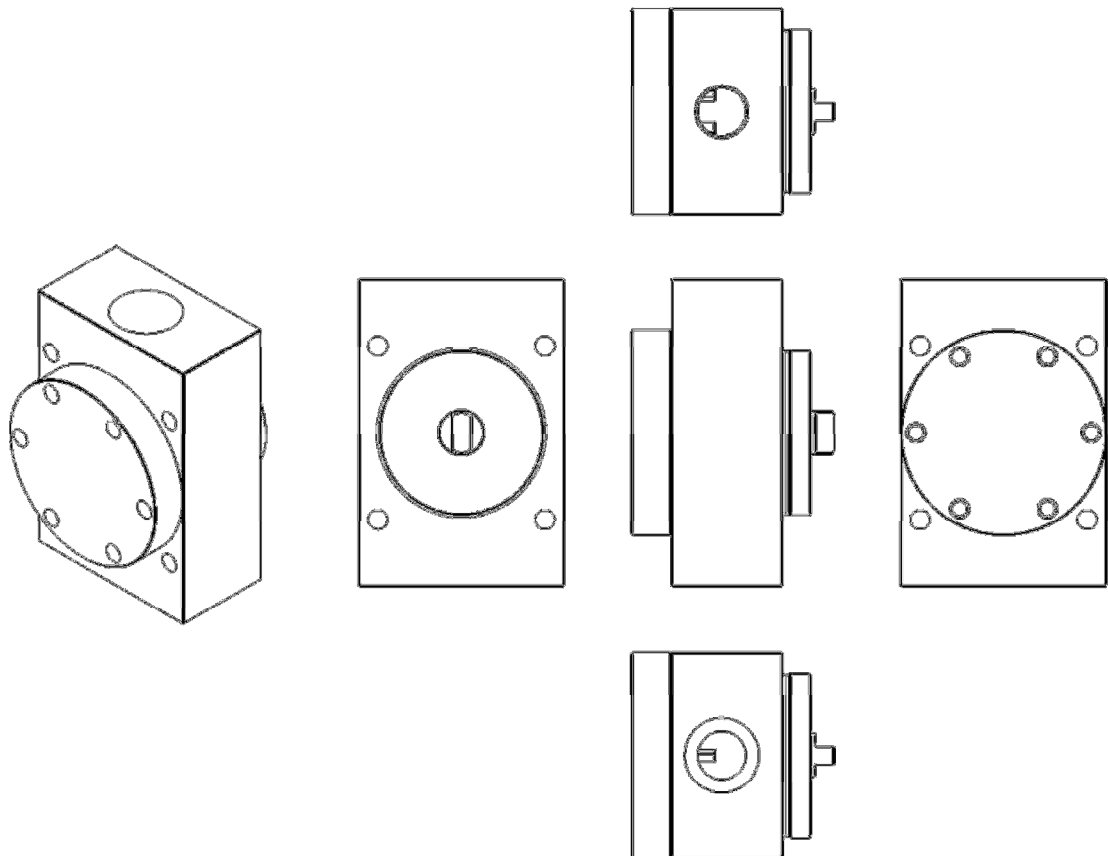
Valmistettavien osien lisäksi käytettiin erilaisia standardoituja valmisosia, joita yritys tilaa tavarantoimittajilta ja alihankkijoilta. Nämä osat löytyvät yrityksen käyttämästä, konsernin omasta sisäisestä standardista (SEW Work Standards), jota yrityksessä yleisesti käytetään. Osat olivat seuraavat:

- laakeri
- sylinteritappi
- O-rengas
- jousi
- kiinnitysruuvit.

Jousen tehtävä on mahdollistaa liikkuvien osien ”kelluminen” ja pitää ne irti kannen ja kotelon kosketuksesta aksiaalisuunnassa. Pumppua kiinnittäessä pitää myös huomioida kiinnitysruuvien sopiva kiristysmomentti, että aksiaalivälitys jää riittäväksi ja pumppu pysyy toiminnallisena. Tämä pitää huomioida myös kannen kiinnityksessä.

5.2 3D-kokoonpano

Osista tehtiin 3D-kokoonpano, jonka avulla osiat sovitettiin yhteen. CAD-ohjelman virtuaaliympäristössä mallien sekä kokoonpanojen manipulointi ja leikkaus on helppoa. Leikkausten avulla saatiin tärkeää tietoa rakenteiden sisästä ja mallinnuksessa tehdyt virheet pystyttiin havaitsemaan ja korjaamaan. Kokoonpano on esitetty kuvassa 10, sen leikkauskuvat on esitetty liitteessä 3 ja räjäytyskuva liitteessä 4.



Kuva 10. Pumpun kokoonpano ilman valmisosia.

6 Prototyypin valmistus ja kokoonpano

Kaikki osat valmistettiin 3D-malleista piirrettyjen valmistuskuvien (liite 5) perusteella suoraan aihioista koneistamalla eikä prototyypissä käytetty muotteja vaativaa valua. Valumuottien suunnittelu olisi vaatinut lisää aikaa, jota oli rajallisesti. Näin ohitettiin yksi työvaihe, nopeutettiin osien valmistumista huomattavasti sekä vältettiin ylimääräisiä kustannuksia prototyypivaiheessa, joita vielä varmasti muuttuva pumppu ja muuttuvat ratkaisut tuovat tullessaan.

Valmistuksen suoritti alihankkija Koneistamo Verax Oy, jonka tilat sijaitsevat Karkkilassa. Valmistuskuvia hiottiin kuntoon yhdessä kokeneiden koneistajien kanssa ja heiltä sai tärkeää tietoa siitä, millainen hyvän sekä helppolukuisen mitta- ja valmistuskuvan tulisi olla. Tämä tieto on jatkoa ajatellen todella hyödyllistä suunnittelijalle, varsinkin sellaiselle, jolla ei ole aiempaa koneistustaustaa. Alihankkijan toimitilojen sijainnin johdosta valmistusta pääsi myös seuraamaan paikan päältä (kuva 11) mikä oli todella hienoa ja opettavaa insinööriopiskelijalle.



Kuva 11. Hammaspyörää koneistetaan.

Pumpun kokoonpano oli tarkoitus suorittaa SEW Industrial Gears Oy:n tiloissa Karkkilaissa kaikkien osien tullessa alihankkijalta. Liikkuvia osia käsin yhteen sovittaessa huomattiin, etteivät ne liiku toistensa suhteen niin kuin niiden pitäisi. Erottimen reikä lämmitettiin ja siihen kutistusliitettiin sylinteritappi hydraulisella painimella, jonka avulla sisähammaspyörä saataisiin sille halutulle paikalle kokoonpanossa. Tämän toivottiin korjaavan asian. Osia uudelleen sovittaessa törmättiin edelleen ongelmaan, joka vaikutti olevan sisähammaspyörän ja erottimen välillä. Sisähammaspyörä ei päässyt vapaasti pyörimään erottimen sirpin sisällä, minkä arveltiin johtuvan sisähammaspyörän reiän sijainnin pokkeamasta. Ongelma ratkesi valmistusprosessia korjaamalla ja valmistamalla uusi sisähammaspyörä huolellisemmin.

Roottorin akselin päähän suunnitellun induktiokarkaisun suoritti Hilamet Oy, joka on erikoistunut teräksen lämpökäsittelyyn. Induktiokarkaisussa käytetään suuritaajuista magneettikenttää teräksen pinnan hehkuttamiseen. Induktori viedään noin 1 mm:n etäisyydelle kappaleen pinnasta ja siihen syötetään korkeataajuista vaihtojännitettä. Näin saadaan magneettisen teräksen pinta hehkumaan. Hehkutettu pinta jäähdytetään nopeasti vesi-emulsio nesteellä, jolloin pintakerros karkenee. Tyypillisesti induktiokarkaisuun sopivia teräksiä ovat nuorutus- ja hiiliteräkset.

Täydellistä kokoonpanoa ei aikataulusyistä ehditty prototyypipumpulle suorittaa.

7 Prototyypin testaus

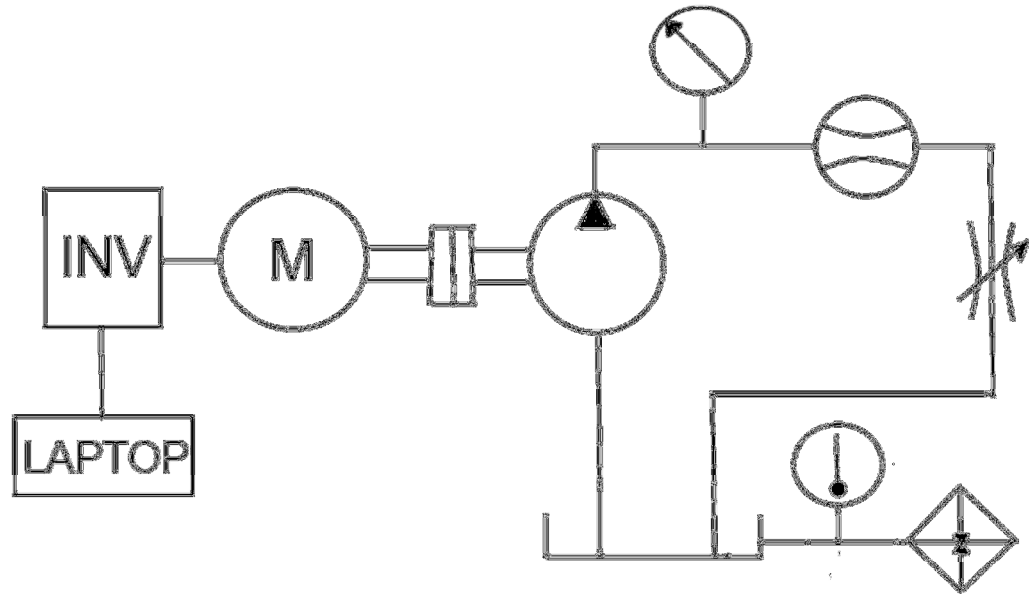
Pumpulle suunniteltiin testilaitteisto, millä pystyttäisiin alustavasti mittaamaan ja varmentamaan, että sen halutut ja sille asetetut tuotekehityssuunnitelman ominaisuudet toteutuivat. Suuri osa tarvittavista komponenteista löytyi yrityksen varastosta, mutta varsinaista testipenkkiä ei ole erikseen vielä rakennettu, koska sellaista ei ole tarvittu.

Testausta ei ehditty suorittaa tämän insinööriyön aikana. Saatuja tuloksia oli myös tarkoitus verrata muihin pumppuihin, jotka ovat esitettyinä kohdassa 4.1, sekä niiden valmistajien tarjoamiin teknisistä tiedoista löytyviin suoritusarvoihin ja -käyriin. Muut projektin prototyypipumput testattaisiin myös tällä laitteistolla tulevaisuudessa. Kestotestausta tulee myös tehdä, mutta sillekään ei tämän työn puitteissa ollut aikaa. Tarkemman testauksen yritys teettäisi alustavien testien jälkeen VTT:llä (Valtion teknillinen tutkimuskeskus).

7.1 Testauslaitteisto

Laitteisto mahdollistaa pumpun ja voiteluaineen tärkeiden ominaisuuksien hallitun säätelyn, jotka ovat kierrosnopeus, paine ja viskositeetti (lämpötilan avulla). Testauslaitteisto (kuvat 12 ja 13) koostuu seuraavista komponenteista:

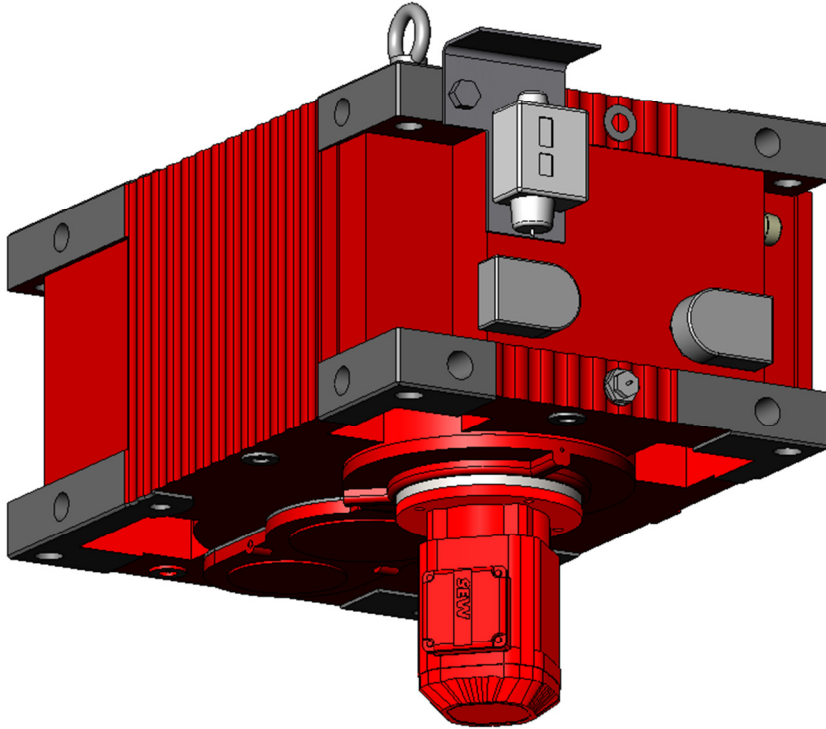
- kannettava tietokone
- taajuusmuuttaja
- sähkömoottori
- laippa
- kytkin
- testattava pumppu
- painemittari
- virtausmittari
- säädettävä virtavastusventtiili
- tankki
- öljynlämmitin
- termostaatti
- lämpötila-anturi
- letkut ja liittimet
- dataloggeri.



Kuva 12. Testauslaitteiston hydraulikaavioluonnos.

Sähkömoottoriin kiinnitetään laippa ja laipan toiseen päähän asennetaan pumppu. Moottorin ja pumpun akseli kytketään kiinni toisiinsa kytkimellä. Pumpun paineporttiin liitetään paineletku, johon liitetään painemittari, virtausmittari ja virtavastusventtiili. Virtausmittari kytketään dataloggeriin. Pumppu upotetaan tankkiin, jolloin imuportti on voiteluaineen pinnan alla. Tämä tehdään sen takia, että pumpun akselin ja kotelon välissä ei ole tiivistystä, pumpun ollessa normaalisti vaihteen sisällä osittain tai kokonaan. Paineletku instrumentteineen johdetaan takaisin tankkiin sen ulkopuolelta, jotta mittarit olisivat luettavissa. Sähkömoottorin kierrosnopeutta säädetään siihen kytketyllä taajuusmuuttajalla, johon taas on kytketty kannettava tietokone. Koneen avulla luetaan muun muassa moottorin kierrosnopeuden ja tehon arvot, joita tarvitaan laskennassa.

Tankkina toimisi vanha MC-sarjan vaihteen tyhjä kotelo. Kotelossa on valmiina kaksi porausta öljynlämmittimelle, jota voidaan käyttää termostaatin kanssa öljyn lämmitykseen ja näin ollen viskositeetin hallintaan. Haluttaessa ja lämmityksen nopeuttamiseksi koteloon saa kytkettyä kaksi lämmitintä, joiden lämpötilaa voitaisiin säätää termostaatin ja lämpötila-anturin avulla halutulle tasolle. Kotelossa on muitakin liitäntöjä varten tehtyjä porauksia, joihin lämpötila-anturi ja putket saadaan kiinnitettyä.



Kuva 13. Testauslaitteiston 3D-kokoonpano ilman letkutusta.

Laitteiston komponentteja alettiin keräämään varastosta ja laitteistoa kokoamaan testausta varten (kuva 14).



Kuva 14. Testauslaitteiston komponentteja.

7.2 Mitattavat ja laskettavat suureet

Tarkoituksena oli saada testidataa pumpun tuotosta (tilavuusvirrasta) tietyillä kierrosnopeusalueella voiteluaineen ollessa tietyssä paineessa ja tietyssä viskositeetissa. Näiden suureiden avulla voidaan myös laskea muun muassa halutut eri hyötysuhteet. Virtausmittarin ja taajuusmuuttajan yhdenaikainen lukeminen ja tiedon tallentaminen voitaisiin suorittaa esimerkiksi siihen tarkoitettulla lukulaiutteella tai dataloggerilla. Tiedot voisi tämän jälkeen siirtää esimerkiksi Microsoft Excel -ohjelmaan, jonka avulla ne voitaisiin jatkokäsitellä halutulla tavalla analysointia varten.

7.2.1 Tilavuusvirta

Mitattavan tilavuusvirran liikkua verrattaen pienellä alueella, johtuen pienikokoisesta pumpusta, virtausmittarin mittausalueen on oltava siihen sopiva ja mittalaitteen tarkka. Epätarkkuus kertaantuu laskuissa, ja siksi on mittarille on asetettava suuret tarkkuusvaatimukset. Tällaista sopivaa mittaria ei kuitenkaan löytynyt yrityksen varastosta, joten sellainen oli hankittava.

Sopiva virtausmittari löytyi Kytola Instruments Oy:n tuotevalikoimasta. Mittari on tyypiltään soikioratasmittari, jossa mittaus tapahtuu soikioratasparilla, joka taas koostuu kahdesta elliptisestä rattaasta. Tilavuusvirtaus on suoraan verrannollinen rattaiden pyörimisnopeuteen, jota mitataan induktiivisella lähestymiskytkimellä. Kytkimen signaali voidaan siirtää esimerkiksi dataloggeriin. Mittarista tehtiin tarjouskysely ja sellainen tilattiin.

7.2.2 Volumetrinen hyötysuhde

Volumetrinen hyötysuhde kuvaa pumpussa tapahtuvaa ohivuotoa. Siihen vaikuttavat kierrosnopeus, paine ja nesteen viskositeetti ja sen kautta myös lämpötila. Pumpun volumetrinen hyötysuhde on aina toimintapisteeseen sidottu arvo eli se muuttuu pyörimisnopeuden ja paineen muuttuessa. Näin ollen volumetrinen hyötysuhde voidaan määrittää eri käyttöolosuhteissa vain kokeellisesti. Volumetrinen hyötysuhde saadaan laskettua, kun tiedetään pumpun teoreettinen tilavuusvirta ja todellinen tilavuusvirta. Kaavat:

$$\eta_v = \frac{Q}{Q_t} \quad (1)$$

$$Q_t = n \cdot V_k \quad (2)$$

η_v on volumetrinen hyötysuhde
 Q on todellinen tilavuusvirta
 Q_t on teoreettinen tilavuusvirta
 n on kierrosnopeus
 V_k on kierrostitavuus.

Teoreettinen tilavuusvirta luetaan virtausmittarista tietyllä kierrosnopeudella ilman virtausventtiilin vastapainetta, jolloin saadaan laskettua kierrostitavuus kaavasta (2). Kierrostitavuus on kullekin pumpulle ominainen arvo joka pysyy vakiona kierrosnopeuden muuttuessa, jolloin tilavuusvirta pienenee tai suurenee. Sitä on vaikea mitata pumpusta, mutta se voidaan saada myös laskennallisesti. Todellisuudessa pumput eivät ole täysin tiiviitä vaan niissä tapahtuu sisäistä vuotoa. Todellinen tilavuusvirta on tällöin teoreettista pienempi ja niiden suhde on volumetrinen hyötysuhde, joka lasketaan kaavalla (1). Todellinen tilavuusvirta luetaan virtausmittarista kullakin kierrosnopeudella.

7.2.3 Kokonaishyötysuhde

Kokonaishyötysuhde koostuu volumetrisesta hyötysuhteesta ja mekaanishydraulisesta hyötysuhteesta (mekaaniset- ja nestekitkat). Kokonaishyötysuhde voidaan laskea seuraavilla kaavoilla:

$$\eta_{kok} = \eta_v \cdot \eta_{mh} \quad (3)$$

$$\eta_{kok} = \frac{P_{hyd}}{P_{mek}} \quad (4)$$

$$P_{hyd} = \Delta p \cdot Q \quad (5)$$

$$P_{mek} = M \cdot \omega \quad (6)$$

$$M = \frac{\Delta p \cdot V_k}{2 \cdot \pi} \quad (7)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (8)$$

η_{kok} on kokonaishyötysuhde

η_{mh} on mekaanishydraulinen hyötysuhde

P_{hyd} on hydraulinen teho

P_{mek} on mekaaninen teho (sähkömoottorin syöttöteho)

Δp on paine-ero pumpun yli

M on pumpun ottama todellinen vääntömomentti

ω on kulmanopeus/kulmataajuus

f on taajuus.

Kokonaishyötysuhteen kautta voidaan laskemalla selvittää pumpun sisäisiin kitkoihin kuluva teho mekaanishydraulisen hyötysuhteen avulla kaavalla (3). Kokonaishyötysuhde ei ole vakio vaan riippuu muun muassa paineesta ja tilavuusvirrasta.

8 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä suunniteltiin uuden voitelupumpun prototyyppi teollisuusvaihteelle. Projekti, jonka osana tämä insinööriyö tehtiin, noudatti tyypillisen tuotekehitysprojektin runkoa, ja tuotekehitysprojekti jatkuu, vaikka tämä insinööriyö on saatettu päätökseen.

Työ aloitettiin tutustumalla teollisuusvoitelun teoriaan ja sen tärkeyteen eritoten teollisuusvaihteissa. Samalla aloitettiin konseptin valinnan suunnittelulla tutustumalla nykyisin käytettyihin pumppuihin ja selvittämällä niiden tyyppit ja toimintaperiaatteet. Voitelupumpun tyyppi valittiin ja sen mahdolliset patenteilla rajoitetut ratkaisut kartoitettiin. Tämän jälkeen siirryttiin suunnittelemaan prototyypin osat CAD-ohjelmalla ja osien 3D-mallien perusteella piirrettiin valmistuskuvat. Osat valmistettiin alihankkijalla ja prototyyppi piti kokoonpanna testausta varten. Prototyypille suunniteltiin testauslaitteisto, jolla saataisiin dataa pumpun suoritusarvoista ja hyötysuhteista.

Työn aikaavievin osuus oli itse prototyypin suunnittelu. Prototyyppipumppu suunniteltiin mahdollisimman yksinkertaiseksi ja helposti valmistettavaksi, jolloin sen mitoitus, tolerointi ja materiaalit nousivat avainasemaan. Apua suunnitteluun sai yrityksen kokeneemmilta henkilöiltä, joiden kanssa käyty opettavaiset keskustelut ja neuvot olivat arvokkaita. Alihankkijan koneistajilta saatu palaute ja asiantuntemus auttoivat myös suuresti kuvien valmiiksi saattamisessa. Tämänkaltainen hyvä tiedonvälitys ja yhteistyö suunnittelussa sekä suunnittelun ja valmistuksen välillä on ensiarvoisen tärkeää, ja sillä saadaan nopeasti ratkaistua sekä vältettyä mahdolliset ongelmakohdat.

Vaikka insinööriyö ei kattanut kaikkia tuotekehityssuunnitelman osa-alueita, sen rajaus ja siihen varattu aika oli mielestäni sopivasti mitoitettu. Työtä tehtiin koulun ohella, mikä rajoitti alkuvaiheessa edistystä huomattavasti. Aikataulu tosin venyi noin kuukaudella konseptin valinnassa, mistä johtuen kokoonpanoa ei ehditty suorittaa loppuun ja itse testaus jäi insinööriyön ulkopuolelle.

Tuotekehitys on pitkä ja haastava prosessi. Olen hyvin tyytyväinen, että pääsin osallistumaan projektiin ja se vei mukanaan konetekniikan monelle eri osa-alueelle. Huomioitavia seikkoja on todella paljon ja aikaa kuluu myös paljon. Projekti avasi silmiä sille asiantuntemuksen määrälle, jota tarvitaan näinkin pienessä osassa tuotekehitysprojektiä, joka tämä työ oli.

Lähteet

- 1 Kunnossapitoyhdistys. 2013. Teollisuusvoitelu: käsikirja. Helsinki: KP-Media Oy.
- 2 Internal Gear Pump. 2012. Verkkodokumentti. Pump School. <<http://www.pumpschool.com/principles/internal.asp>>. Luettu 13.1.2014.
- 3 Internal Gear Pumps. Verkkodokumentti. Modern Engineering. <<http://www.filter-machine.net/internal-gear-pumps.html>>. Luettu 13.1.2014.
- 4 Espacenet. Verkkodokumentti. European Patent Office. <http://worldwide.espacenet.com/advancedSearch?locale=en_EP>. Luettu 1.10.2013 – 1.11.2013.
- 5 Pere, Aimo. 2007. Konepiirustus 1 & 2. Espoo: Kirpe Oy.
- 6 Keskustelut teknisen päällikön Kari Laukkasen kanssa, SEW Industrial Gears Oy. Talvella 2013 ja keväällä 2014.
- 7 Keskustelut hankitapäällikkö Matti Hellströmin kanssa, SEW Industrial Gears Oy. Keväällä 2014.
- 8 Keskustelut lehtori Heikki Paavilaisen kanssa, Metropolia Ammattikorkeakoulu. Keväällä 2014.
- 9 SEW Work Standards. Verkkodokumentti. SEW Eurodrive. <<http://sew-intranet/werknorm/anhang/content.pdf>>. Luettu 7.2.2014.
- 10 Hydrauliiikkapumput. Verkkodokumentti. Metropolia Ammattikorkeakoulu. <<https://wiki.metropolia.fi/display/koneautomaatio/9.+Hydrauliiikkapumput>>. Luettu 20.3.2014.
- 11 Soikioratasmittarit. Verkkodokumentti. Kytola Instruments. <<http://www.kytola.com/fi/tuotteet/virtausmittarit/soikioratasmittarit>>. Luettu 1.4.2014.
- 12 Palvelut. 2010. Verkkodokumentti. Hilamet Oy. <<http://www.hilamet.fi/>>. Luettu 16.4.2014.