



Järkäleen hydrauliiikan painehäviön pienentäminen

Opinnäytetyö

Teuvo Heikkinen

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Kone- ja tuotesuunnittelu

SAVONIA-AMMATTIKORKEAKOULU TEKNIikka KUOPIO

Koulutusohjelma

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Tekijä

Teuvo Heikkinen

Työn nimi

Järkäleen hydrauliiikan painehäviön pienentäminen

Työn laji

Päiväys

Sivumäärä

Opinnäytetyö

1.5.2010

58 + 4

Työn valvoja

Yrityksen yhdyshenkilö

Lehtori Anssi Suhonen

Suunnitteluinsinööri DI Antti Halonen

Yritys

Junttan Oy

Tiivistelmä

Tämän opinnäytetyön aiheena oli tutkia paalutuskoneen järkäleen hydrauliiikan painehäviöitä. Työn tavoitteena oli kehittää järkäleen juntausventtiilin sisältämiä komponentteja paremman hyötysuhteen saavuttamiseksi. Työssä tarkastellaan ongelmaan liittyvää teoriaa ja juntausventtiilille suoritetaan virtaussimulointeja Solidworks Flow Simulation -ohjelmistolla.

Opinnäytetyössä käsiteltävien komponenttien käyttö ei rajoitu vain uusiin paalutuskoneisiin. Komponentit voidaan asentaa jälkiasennuksena vanhempiin koneisiin. Tuottavuuden parantaminen vaihtamalla kolme komponenttia on markkinointietu. Lopullinen konstruktio valittiin simulointitulosten ja valmistettavuuden perusteella.

Virtaussimuloinnin tuloksien tarkastelussa kiinnitettiin erityistä huomiota nesteen virtausnopeuteen sekä virtauskanavien muotoon. Nesteen virtausnopeuden suuruus kanavien läpi vaikuttaa painehäviön suuruuteen.

Avainsanat

painehäviö, hydrauliiikka, virtaussimulointi, tuotekehitys

Luottamuksellisuus

luottamuksellinen

SAVONIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Degree Programme

Machine and Product Design

Author

Teuvo Heikkinen

Title of Project

Reducing Hydraulic Losses in a Pile Driving Valve

Type of Project

Final Project

Date

May 1, 2010

Pages

58 + 4

Academic Supervisor

Mr Anssi Suhonen, Senior Lecturer

Company Supervisor

Mr Antti Halonen, M.Sc., Design Engineer

Company

Junttan Oy

Abstract

The aim of this project was to study the reasons for hydraulic losses in a pile driving valve. The purpose was to design and develop the components embodied in a pile driving valve to obtain better efficiency. Theories on the hydraulic phenomenon were studied alongside with simulating flows using Solidworks Flow Simulation software.

The utilization of the components studied in this project are not limited only to new pile driving machinery. A good marketing benefit was gained by installing the new components later to old machinery to increase productivity. Manufacturability and simulation results played a significant role in selecting the final assembly to be produced.

During the interpretation of the results the focus was on the flow aperture shapes and fluid flow speeds. Hydraulic losses are directly connected to the fluid flow speed.

Keywords

pressure loss, hydraulics, flow simulation, product development

Confidentiality

confidential

ALKUSANAT

Koulun puolelta haluaisin kiittää erityisesti lehtori Anssi Suhosta, joka on edesauttanut ja vaikuttanut elämääni suuresti. Anssin suositusten myötä olen ollut vaihto-oppilaana yhdessä maailman parhaista yliopistoista, saanut opinnäytetyön eräästä Pohjois-Savon arvostetuimmasta yrityksestä sekä ensimmäisen työpaikan valmistumiseni jälkeen.

Haluaisin esittää kiitokseni Digibranch –hankkeelle sekä yliopettaja Esa Hietikolle opinnäytetyön rahoittamisesta.

Yrityksen puolelta haluaisin kiittää suunnitteluinsinöörejä Antti Halosta ja Jaakko Paavolaa sekä teknologiajohtaja Markku Penttistä.

Kuopiossa 1.5.2010

Teuvo Heikkinen

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
1.1	Yritysesittely	7
1.2	Yleistä opinnäytetyöstä.....	7
2	HYDRODYNAMIIKKA JA TUOTEKEHITYS	10
2.1	Hydrodynamiiikka	10
2.1.1	Jatkuvuusyhtälö	10
2.1.2	Energiayhtälö.....	12
2.1.3	Viskositeetti	13
2.1.4	Virtauslajit	16
2.1.5	Virtaushäviöt.....	19
2.1.5.1	Kitkavastushäviöt.....	19
2.1.5.2	Kertavastushäviöt.....	20
2.1.5.3	Muuttuvat olosuhteet.....	21
2.1.5.4	Kokonaishäviöiden laskenta	21
2.1.6	Hydraulinen teho.....	22
2.2	Finite Element Method.....	22
2.2.1	Yleistä FE-metodista	22
2.2.2	Nesteen mekaniikka	23
2.2.3	Liikkeen yhtälöt	24
2.3	Tuotekehitys	26
2.3.1	Tuotekehityksen taustaa	26
2.3.2	Tuotekehityksen haasteita.....	27
2.3.3	Design for X	28
2.3.4	Alustatuote.....	28
2.3.5	Tuotekehitysprosessi	29
2.3.5.1	Tuotekehitysprosessin vaiheet	29
2.3.5.2	Tutkimuksessa käytetty prosessi	30
2.3.6	Prototyyppi	31
2.3.6.1	Analyyttinen prototyyppi.....	31
2.3.6.2	Prototyypin valmistus.....	32

2.3.6.3	Tietokonemalli	32
3	AIHEEN RAJAUS JA KOHDENTAMINEN	34
3.1	Työn rajausta.....	34
3.2	Ongelmakohdat.....	34
3.3	Tutkimuksessa käytettyjä työkaluja.....	35
4	VENTTIILIPROJEKTI	38
4.1	Työhön tutustuminen	38
4.2	Nykyinen venttiilikokoonpano	38
4.2.1	Nykyisen venttiilikokoonpanon toiminta	38
4.2.2	Ohjauskanavan sijainti	39
4.3	Virtausmallien suunnittelu	40
4.3.1	Alkuperäinen virtausmalli	40
4.3.2	Toinen virtausmalli	40
4.3.3	Kolmas virtausmalli	40
4.3.4	Neljäs virtausmalli	41
4.4	Virtausten simulointi.....	41
4.4.1	Simuloinnissa käytettävät parametrit	42
4.4.2	Neste Hydraulii VG46.....	42
4.5	Simulointitulosten tulkinta	42
4.6	Rakenteen valitseminen	43
4.6.1	Rakenteen valmistaminen ja pintakäsittely.....	44
4.6.2	Päätävaimennus rakenteessa.....	44
5	TULOSTEN POHDINTAA	46
6	YHTEENVETO	47
	LÄHTEET	48

1. JOHDANTO

1.1 Yritysesittely

Junttan Oy on erikoistunut hydraulisten paalutuskoneiden suunnitteluun, valmistukseen ja myyntiin. Junttan kehitti ensimmäinen täysin hydraulisesti toimiva paalutuskoneen vuonna 1976. Ensimmäinen paalutuslaitteisto valmistettiin vuonna 1979. [1]

Junttanin perusarvoihin kuuluu luotettavuus, monipuolisuus, yhteistyö sekä jatkuva tuotekehitys. Tuotteen luotettavuus on tärkeä tekijä niin asiakkaalle kuin valmistajallekin, siksi tuotteet valmistetaan ja testataan huolellisesti. Jatkuvalle tuotekehityksellä taataan tuotteen korkea teknologinen taso. Yhteistyö asiakkaan kanssa on monipuolista, jossa asiakkaan tarpeet huomioidaan. [1]

Nykyään Junttanin paalutuskoneita käytetään jokaisessa maanosassa ja yli 45 maassa ympäri maailman. Junttan on maailman johtava paalutuskoneiden, syvästabilointikoneiden ja hydraulisten iskuvasaroiden valmistaja. Junttanin strategiana on tehokkaiden ja taloudellisten tuotteiden valmistus sekä kyky sopeutua erilaisiin paalutusjärjestelmäkäyttöön ottaen huomioon ympäristöystävällisyyden. [1]

Junttanin valmistamia tuotteita ovat esimerkiksi paalutuskoneet, multipurpose-koneet, syvästabilointikoneet, hydrauliset iskuvasarat, prosessinhallintajärjestelmät, voimayksiköt sekä muut porausjärjestelmät. Junttan valmisti tuhannennen iskuvasaran vuonna 2007 ja viidennensadannen paalutuskoneen vuonna 2008. Vuonna 2008 Junttan siirtyi uusiin tuotantotiloihin Kuopion Kylmämäkeen.

Junttanin motto on ”Piles better”. Jatkuvalle tuotekehityksellä varmistetaan johtopaikka paalutuskoneiden valmistajana, kehittäjänä ja suunnan näyttäjänä. Tuotteiden tehokkuus, taloudellisuus ja ympäristöystävällisyys pohjaavat yrityksen tulevaisuutta. [1]

1.2 Yleistä opinnäytetyöstä

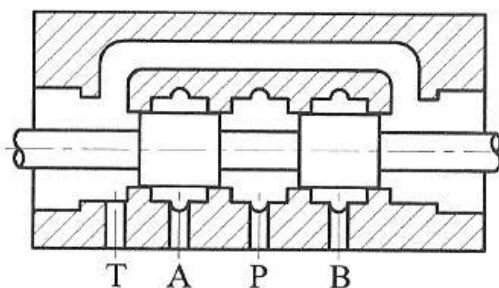
Opinnäytetyössä tutkittiin paalutuskoneen junntausventtiilin painehäviötä, sen syitä sekä kehitettiin nykyistä konstruktiota taloudellisemmaksi. Paalutuskoneen tärkein osa on itse hydraulivasara, jolla lyödään paaluja maahan rakennusten tueksi tai muuhun tarkoitukseen. Paalutuskone koostuu vaunusta, jossa ohjaamo sijaitsee sekä pitkistä keilistä, johon hydraulivasara on kiinnitetty. Paalutuskoneen pääkomponentit näkyvät kuvassa 2. Kuvassa 2 oleva paalutuskone on vuonna 1983 markkinoille tullut PM20 -malli. [1]



Kuva 2. Paalutuskoneen pääkomponentit [1].

Kuvassa 2 keili on käännetty kuljetusasentoon. Paalun junnauksen aikana keili on pystyasennossa. Hydraulivasaran kuvassa näkyvä keltainen pääty laitetaan paalua vasten, jonka jälkeen paalua lyödään maahan.

Junttausventtiilin tarkoituksena on ohjata hydraulinesteen virtausta junnaussylinterin sisällä. Junnaussylinteri nostaa ja laskee massaa, jolla paalua lyödään maahan. Tätä massaa kutsutaan järkäleeksi. Junttausventtiili on luistiventtiilityyppinen, siinä on yksi liikkuva osa. Liikkuvalla osalla mahdollistetaan eri kanavien käyttö. Perinteinen luistiventtiilikonstruktiio on esitetty kuvassa 3. Luistiventtiilissä kara liikkuu edestakaisin avaten ja sulkien eri kanavia käyttöön.



Kuva 3. Luistiventtiilin periaatekuva [2].

Työn perustana oli Tampereen teknillisen yliopiston hydraulikan ja automatiikan laitoksen, TTY/IHA, yhteinen tutkimusprojekti Junttan Oy kanssa. Tutkimusprojektissa keskityttiin järkäleeseen hydraulitoimintojen kehittämiseen.

Aluksi aiheena oli TTY/IHA tekemän Tehojunta 1 -simulointimallin simuloiminen MATLAB -ohjelmistolla. Simulointimallilla simuloidaan paalutustapahtumaa erilaisilla lähtöarvoilla, joiden avulla saadaan analyttisiä tuloksia. Tuloksien perusteella pystyttiin muuttamaan haluttuja parametreja siten, että paaluttamisen hyötysuhde parantuisi muuttamatta konstruktiota.

Tarvittavien lähtöarvojen puuttuttua päätettiin opinnäytetyö kohdentaa luistiventtiilin painehäviön alentamiseen.

Tampereen teknillisen yliopiston tekemän raportin sanotaan painehäviön olevan juntausventtiilin tankkiportissa kymmenkertainen painekanavan painehäviöön verrattuna. Painekanavan painehäviö on noin 0,7 bar 700 l/min tilavuusvirralla.¹

Painehäviöön menetetty energia muuttuu lämmöksi, jolloin järjestelmä lämpenee turhaan. Opinnäytetyössä keskityttiin tankkiportin painehäviön pienentämiseen. Painehäviön pienentäminen parantaa iskutaajuutta, jolloin tuottavuus paranee.

Painehäviön syyksi paljastui juntausventtiilin yläpään ulkoolkin virtauskanavien muoto ja koko sekä karan asema. Tuotekehitysprosessissa ei muunnettu juntausventtiilin komponenttien ulkomittoja. Tällöin kehitetyt kappaleet mahtuvat myös vanhoihin kokoonpanoihin. Tämä on markkinointietu, sillä vaihtamalla 3 komponenttia kokoonpanoon saataisiin parannettua tuottavuutta ja ympäristöystävällisyyttä.

¹ L. Elo, A. Laamanen. Järkäleen hydraulitoimintojen kehittäminen, loppuraportti, s.2 - 9, 2009.

2. HYDRODYNAMIIKKA JA TUOTEKEHITYS

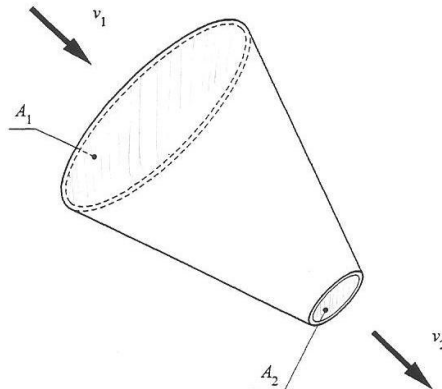
Tässä luvussa kerrotaan työhön liittyvästä teoriasta muun muassa, käsinlaskentateoriasta, laskentamalleista, hydraulineiteistä, viskositeetista ja tehohäviöistä. Teoriaosuudessa tutustutaan myös tässä opinnäytetyössä käytettyyn tuotekehitysprosessiin ja sen vaiheisiin. [3]

2.1 Hydrodynamiikka

Hydrodynamiikassa tarkastellaan liikkeessä olevaa nestettä, toisin kuin hydrostatiikassa. Hydrodynamiikassa otetaan huomioon nesteen kokoonpuristuvuus, massat ja kitkat, joita ei huomioida hydrostatiikassa. Hydrostatiikassa paine pysyy samana jokaisessa pisteessä, toisin kuin hydrodynamiikassa, jossa paine alenee kitkan, tiheyden ja nesteen liikesuunnassa häviöiden vaikutuksesta. [3]

2.1.1 Jatkuvuusyhtälö

Kuvassa 4 olevan virtausputken seinämien oletetaan olevan nestettä läpäisemättömiä ja neste oletetaan kokoonpuristumattomaksi. Virtauksen oletetaan olevan ajasta riippumatonta, jolloin putken poikkileikkauksien läpi kulkee aikayksikössä yhtä suuri massa. Tällöin massavirta on vakio ja virtausputken sisältämä nestemassa on vakio. [3]



Kuva 4. Virtausputki [3].

Massavirta ilmaistaan massan muutoksena aikayksikössä yhtälön 1 mukaan [3]:

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} \quad (1)$$

jossa \dot{m} on vakiona pysyvä massavirta. Massan yhtälö nesteen tilavuuden V ja tiheyden ρ mukaan [3]:

$$m = \rho V \quad (2)$$

Derivoimalla yhtälö 1 ja sijoittamalla siihen yhtälön 2 saadaan yhtälö 3 [3]:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} + V \dot{\rho} \quad (3)$$

jossa \dot{V} on tilavuusvirta, jolla kuvataan virtausputken jokaisen poikkileikkauksen A läpi kulkevaa nestetilavuutta aikayksikköä kohden. Integroimalla virtaus poikkileikkauksen yli, saadaan tilavuusvirta, joka voidaan kirjoittaa muotoon. [3]

$$\dot{V} = Av \quad (4)$$

jossa v on poikkileikkausta A kohtisuoraan oleva keskimääräinen virtausnopeus [3].

Nesteen tiheyteen vaikuttavat lämpötila ja paine. Hydraulikassa käytettävillä lämpötiloilla ja paineilla voidaan kuitenkin todeta, että paine- ja lämpötilavaihtelut ovat merkityksettömiä tiheyden kannalta, tällöin tiheyttä voidaan pitää vakiona ja nestettä kokoonpuristumattomana. Tällöin yhtälö 3 voidaan kirjoittaa muotoon [3]:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} \quad (5)$$

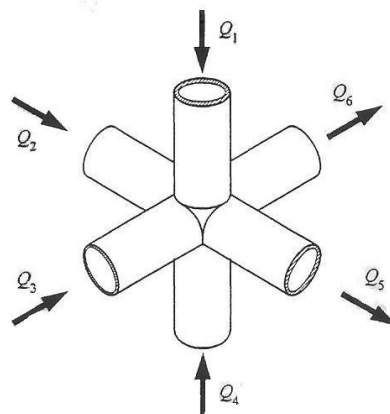
Yhtälö 5 ratkaistaan tilavuusvirralle seuraavasti [3]:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (6)$$

Tilavuusvirrasta käytetään yleensä symbolia Q ja jatkuvuusyhtälö on yhtälön 4 muotoa, tällöin virtausputken poikkileikkauksille saadaan [3]:

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (7)$$

jossa Q on tilavuusvirta. A_1 ja A_2 vastaavat virtausputken kohtisuoria poikkileikkauspinta-aloja kuvan 4 mukaan. Nesteen virtausnopeudet v_1 ja v_2 ovat vastaavasti poikkipinta-aloilla A_1 ja A_2 . Jatkuvuusyhtälöä kuvaa parhaiten kuva 5. [3]



Kuva 5. Jatkuvuusyhtälöä esittävä haarautuva putki [3].

Kuvassa 5 jatkuvuusyhtälö täyttyy yhtälön 8 mukaan vastaavasti [3]:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = Q_5 + Q_6 \quad (8)$$

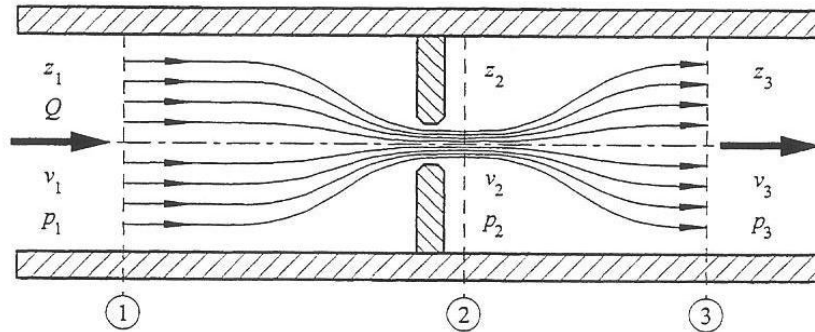
2.1.2 Energiayhtälö

Ajasta riippumattomalle nesteen virtaukselle pätee paine-, potentiaali-, ja nopeusenergian yhdistävä Bernoullin yhtälö, joka on vakio [3]:

$$p + \rho gz + \frac{\rho v^2}{2} \quad (9)$$

jossa z on asemakorkeus [3].

Kuvassa 6 on esitetty virtauskanava äkillisellä kaventumalla eli kuristuksella [3].



Kuva 6. Virtauskanavan kuristus [3].

Kuvan 6 esittämälle tilanteelle voidaan yhtälö 9 kirjoittaa muotoon [3]:

$$p_1 + \rho gz_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \rho gz_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} \quad (10)$$

Oletetaan, että $A_1 \gg A_2$, jolloin jatkuvuusyhtälön 7 perusteella $v_2 \gg v_1$. Tarkastelu tehdään samassa tasossa, jolloin asemakorkeuksille voidaan kirjoittaa $z_1 = z_2$. Tällöin yhtälö 9 voidaan kirjoittaa seuraavasti [3]:

$$p_1 = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} \quad (11)$$

Yhtälöstä 11 voidaan todeta, että paine-energia muuttuu nopeusenergiaksi. Ratkaisemalla yhtälöstä 11 v_2 saadaan yhtälö 12 [3]:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2\Delta p^*}{\rho}} \quad (12)$$

jossa Δp^* on paineiden p_1 ja p_2 erotus [3].

Jatkuvuusyhtälön 7 mukaan voidaan kirjoittaa poikkileikkaukselle 2 kuvassa 6 seuraavaasti [3]:

$$Q_2 = A_2 \sqrt{\frac{2\Delta p^*}{\rho}} \quad (13)$$

jossa Q_2 on tilavuusvirta, joka kulkee kuristuksen läpi, kun kuristuksen yli vaikuttaa paine-ero Δp^* [3].

Kuristuksen läpi kulkevaan tilavuusvirtaan vaikuttaa virtausakanavan ominaisuudet, kuten muoto ja reunojen terävyys. Näiden lisäksi tilavuusvirtaan vaikuttaa myös paine-ero, pinta-ala ja virtaavan nesteen tiheys. Nämä kaikki ominaisuudet otetaan huomioon purkautumiskertoimella, jota merkitään symbolilla μ . Purkautumiskertoimen teoreettinen arvo on 0,611; mutta todelliset arvot vaihtelevat 0,5 - 1,0. Yleistämällä yhtälö 13 ja lisäämällä siihen purkautumiskerroin saadaan yleinen muoto [3]:

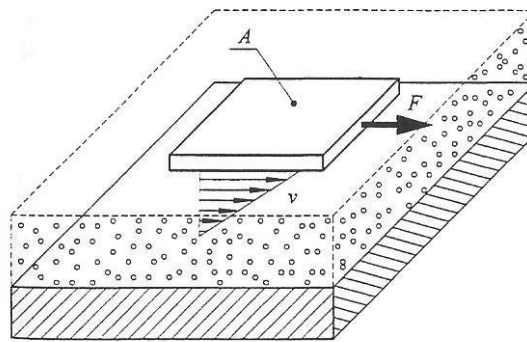
$$Q = \mu A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (14)$$

jossa Δp on paineiden p_1 ja p_3 erotus. p_3 on paine kohdassa 3, jossa virtaus täyttää jälleen koko kanavan ja virtausnopeus on v_3 . Yhtälö 14 on ristiriidassa Bernoullin yhtälön kanssa. Bernoullin yhtälön mukaan paineet p_1 ja p_3 tulisi olla samat, mutta häviöiden takia ne eivät ole. Bernoullin yhtälössä oletetaan neste kitkattomaksi, jollaista ei todellisuudessa ole olemassa. [3]

Koska päätyvaimennuksen laskemiseen ei ole olemassa yhtälöä, voidaan yhtälöä 14 soveltaa siihen [3].

2.1.3 Viskositeetti

Kaikissa virtausaineissa on viskositeettia, eli nesteen sitkeyttä. Viskositeetilla kuvataan nesteen sisäistä kitkaa. Nesteen virratessa kiinteiden kappaleiden ohi, esiintyy nesteen ja kiinteän kappaleen kosketuspinnassa ulkoista kitkaa. Nesteen ja kiinteiden kappaleiden välinen kitka aiheuttaa adheesiovoiman, jonka vaikutuksesta virtaus kiinnittyy kappaleen seinämään. Tällöin seinämällä ja seinämän viereisellä nestekerroksella on sama nopeus. Tämän jälkeen viskositeetti aiheuttaa nesteeseen nopeusjakauman. [3]



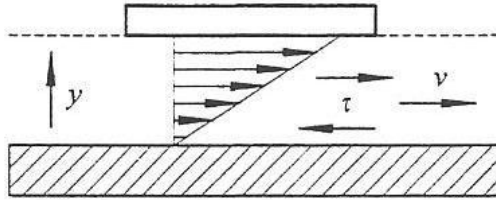
Kuva 7. Levy nestekerroksen päällä [3].

Tarkastellaan kuvassa 7 esiteltyä tapausta. Kuvassa 7 nestekerroksen päällä liikkuu levy, jonka kosketuspinta-ala nesteeseen on A . Nestekerroksen paksuus on y . Levyllä on nopeus, v , kiinteään pohjaan verrattuna. Kiinteän pohjan vieressä nestekerroksen nopeus on sama kuin pohjalla, eli $v_y = 0$. Levyn viereisen nestekerroksen nopeus on $v_y = v$. Kerroksen y välissä olevan nesteen viskositeetti aiheuttaa leikkausvoiman, jonka myötä levyn liikuttamiseen tarvitaan sen suuruinen voima seuraavasti [3]:

$$F = \eta A \frac{v}{y} \quad (15)$$

jossa η on verrannollisuuskerroin, jolla kuvataan nesteen kitkaa, eli sitkeysominaisuuksia. Verrannollisuuskerrointa η kutsutaan myös dynaamiseksi viskositeetiksi. Paineen suuruus ei vaikuta leikkausvoimaan. Dynaamista viskositeettia kutsutaan myös absoluuttiseksi viskositeetiksi. [3]

Yhtälössä 15 esitetty leikkausvoima F saa pohjan ja levyn väliset nestekerrokset liikkeeseen. Leikkausvoima muodostaa kuvan 8 esittämän nopeusjakauman. Leikkausvoima kiihdyttää hitaammin liikkuvaa nestekerrosta ja hidastaa nopeammin liikkuvaa. [3]



Kuva 8. Nopeusjakauma levyn ja pohjan välissä [3].

Leikkausjännitys τ voidaan ratkaista pinta-alan A sekä leikkausvoiman F avulla seuraavasti [3]:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (16)$$

Yhtälö voidaan kirjoittaa nyt yleiseen muotoon, jotka kutsutaan myös Newtonin laiksi [3]:

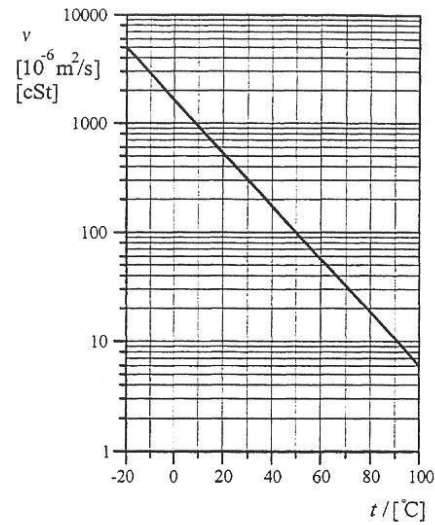
$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \quad (17)$$

Newtonin lakia noudattavia nesteitä kutsutaan newtonilaisiksi nesteiksi. Pienikin leikkausjännitys aiheuttaa näissä nesteissä virtausta. Kaikki hydraulinesteet ovat newtonilaisia nesteitä. Lepotilassa nesteeseen ei vaikuta leikkausjännitystä. [3]

SI-järjestelmässä dynaamisen viskositeetin yksikkö on P , poisi. Teoreettisissa tarkasteluissa käytetään yleensä kinemaattista viskositeettia, jonka symboli on ν , ja yksikkö St , stoki. Kinemaattinen viskositeetti saadaan ratkaistua yhtälöstä 18 [3]:

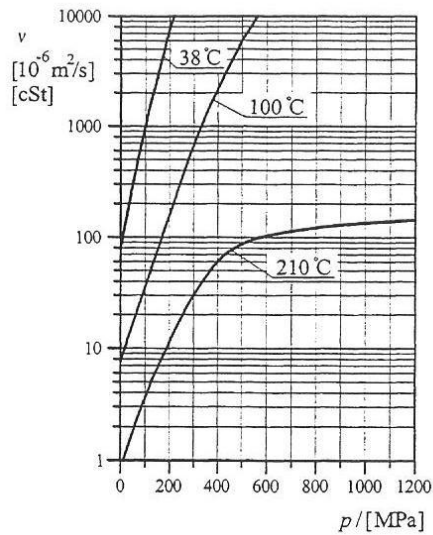
$$v = \frac{\eta}{\rho} \quad (18)$$

Viskositeetin arvo on lämpötilariippuvainen, siksi niiden arvot esitetään yleensä tietyssä lämpötilassa. Lämpötilan nousu vaikuttaa alentavasti viskositeetin arvoon, mutta paineen nousu vaikuttaa kasvattavasti viskositeetin arvoon. Kuvassa 9 on esitetty lämpötilan vaikutus viskositeetin arvoon. Kuvan asteikko on logaritminen. [3]



Kuva 9. Lämpötilan vaikutus viskositeetin arvoon [3].

Kuvassa 10 on esitetty paineen vaikutus viskositeetin arvoon [3]. Kuvan asteikko on logaritminen. Kuitenkin alle 400bar paineilla paineen vaikutus viskositeettiin on merkityksetön.



Kuva 10. Paineen vaikutus viskositeetin arvoon [3].

Viskositeetilla on suuri vaikutus hydraulijärjestelmän toimintaan ja hyötysuhteeseen. Suurella viskositeetin arvolla neste on paksua, jolloin virtausvastukset kasvavat, joka vastaavasti alentaa hyötysuhdetta. Paksu hydraulineneste huonontaa voitelua, koska se ei pääse tunkeutumaan välyksiin. Pienellä viskositeetin arvolla neste on ohutta ja juoksevaa.

Ohuet hydraulinesteet vastaavasti aiheuttavat vuotoja, ja alentavat näin hyötysuhdetta. Pienellä viskositeettiarvolla voitelukalvo on ohuempi kuin suurella viskositeettiarvolla, jolloin voitelukalvo jää ohuemmaksi. Ohuella voitelukalvolla kappaleiden keskeinen liike aiheuttaa kulumista.

Tehohäviöt ja vuodot ovat pienempiä, mitä pienempiä välyksiä käytetään. Pienillä välyksillä on vaarana kuitenkin kiinnileikkautuminen. Kiinnileikkautumisen estämiseksi tulee suunnitteluvaiheessa ottaa huomioon käytettävän hydraulinesteen viskositeetti, lämpölaajeneminen sekä mahdollisesta käyttöpaineesta aiheutuva laajeneminen. [3]

Kulumiseen ja vuotoihin kulutettu teho muuttuu hukkatehoksi, joka lämmittää järjestelmää. Järjestelmän lämmittäminen edelleen pienentää viskositeettiarvoa, jolloin häviöt kasvavat edelleen.

Nesteen lämmittäminen vaikuttaa myös tiheyteen, joka vaikuttaa viskositeettiin, paineiskujen suuruuteen sekä järjestelmässä syntyviin painehäviöihin. Tiheys tulisi pitää alhaisena tehohäviöiden ja paineiskujen kannalta.

Tiheys on lämpötilariippuvainen ja se voidaan ratkaista yhtälön 19 mukaan seuraavasti [3]:

$$\rho_t = \frac{\rho_{15}}{1 + \beta_t(t - 15)} \quad (19)$$

jossa ρ_t on nesteen tiheys lämpötilassa t . Nesteen tiheys määritellään ISO-standardin mukaan 15°C lämpötilassa, jolloin referenssiarvona toimii ρ_{15} . β_t on tilavuuden lämpölaajenemiskerroin, jonka arvo mineraaliöljyllä on noin $7 \cdot 10^{-4} \frac{1}{^\circ\text{C}}$. [3]

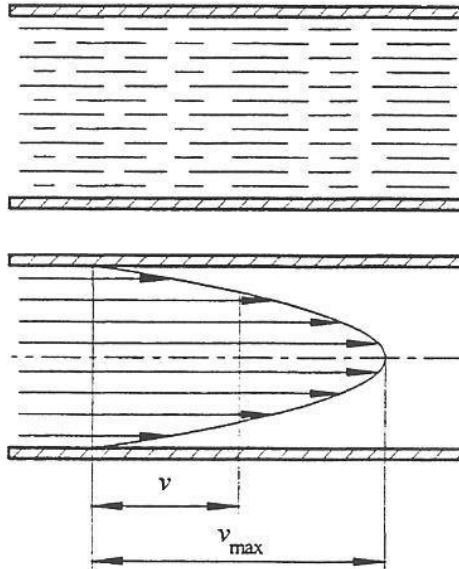
2.1.4 Virtauslajit

Järjestelmän häviöt ovat pienet, jos virtaus on tasaista ja pyörteetöntä [3].

Virtausta on kahta tyyppiä, laminaarinen ja turbulenti. Laminaarinen virtaus tarkoittaa kerrosomaista virtausta. Laminaarisessa virtauksessa kaikki nesteosaset seuraavat tiettyä rataa, jotka kutsutaan virtaviivaksi. Tässä tapauksessa nestehiukkaset liikkuvat yhdensuuntaisesti. Virtausnopeuden kasvaessa laminaarinen virtaus muuttuu turbulentiiseksi. Turbulentti virtaus on pyörteellistä, jossa nesteosaset liikkuvat vapaasti noudattamatta tarkkoja ratoja. Turbulenttisessa virtauksessa koko virtaus kulkee tiettyyn suuntaan, mutta yksittäiset nestepartikkelit voivat liikkua jopa tätä suuntaa vastakkaiseen suuntaan hetkellisesti. [3]

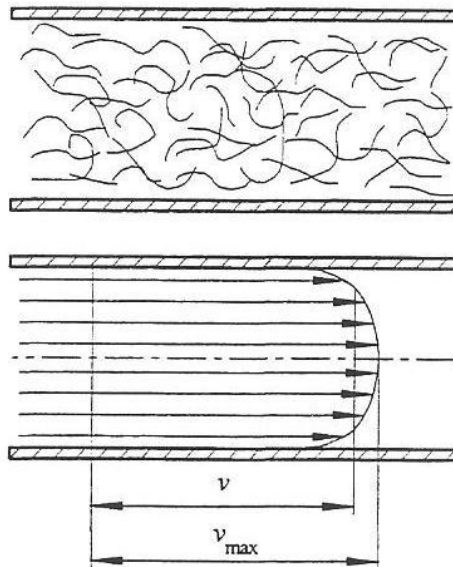
Kuvassa 11 on esitetty laminaarinen virtaus ja virtauksen nopeusjakauma putkessa. Laminaarisessa virtauksessa nopeusjakauma on paraboloidinen. Laskennassa käytetään

virtauksen nopeusjakauman keskiarvoa. Laminaariselle virtaukselle keskiarvonopeudeksi saadaan $v = 0,5v_{max}$. [3]



Kuva 11. Laminaarinen virtaus [3].

Kuvassa 12 on esitetty turbulентtinen virtaus ja virtauksen nopeusjakauma putkessa. Turbulenttisessa virtauksessa nopeusjakauma on laakeampi pyörteiden takia. Turbulenttiselle virtaukselle keskiarvonopeudeksi saadaan $v = (0,8 \dots 0,88)v_{max}$. [3]



Kuva 12. Turbulenttinen virtaus [3].

Virtaushäviöt kasvavat lineaarisesti virtausnopeuden funktiona laminaarisessa virtauksessa. Turbulenttisessa virtauksessa häviöt kasvavat eksponentiaalisesti. Virtaushäviöiden kurissa pitämiseksi pyritään hydraulijärjestelmissä aina laminaarivirtauksiin. [3]

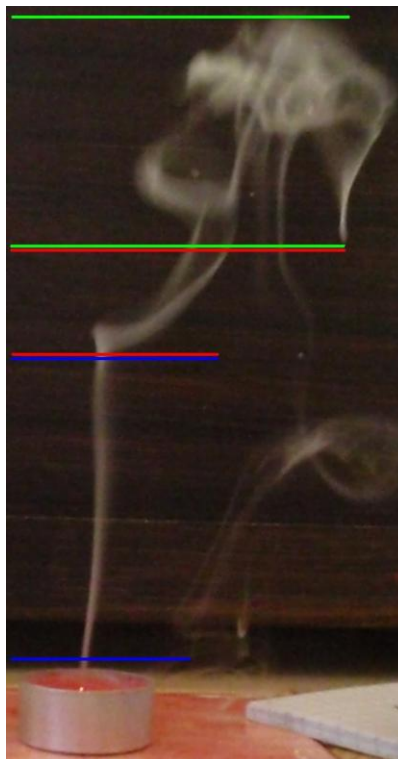
Virtauslajin selvittämiseksi laskennallisesti on olemassa laaduton Reynoldsin luku, Re . Saatua arvoa verrataan kokeellisesti mitattuun kriittiseen Reynoldsin lukuun, Re_{kr} :ään. Jos Re on suurempi kuin Re_{kr} , on virtaus turbulenttista. Kriittinen Reynoldsin luku vaihtelee virtauskanavan ja -aukon mukaan. Kriittiset Reynoldsin luvut voivat vaihdella läppä- ja kartioistukkaventtiileillä 25 - 100. Pyöreille sileäpintaisille putkille kriittinen Reynoldsin luku voi olla väliltä 2000 - 2300. [3]

Reynoldsin luku määritellään yhtälön 20 mukaan seuraavasti [3]:

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (20)$$

jossa d on virtausputken sisähalkaisija [3].

Virtaus ei muutu välittömästi laminaarisesta turbulenttiseksi, vaan näiden virtaustyyppien välillä on siirtymäalue. Siirtymäalueella esiintyy niin laminaarista kuin turbulenttista virtausta. Siirtymäalue oletetaan turbulenttiseksi laskennassa. Laminaarisen, siirtymä- ja turbulenttisen alueen voi nähdä kuvasta 13. Kuvassa 13 on sammutetusta kynttilästä nousevaa savua. Sinisten viivojen välissä virtaus on laminaarista. Punaisten viivojen välissä on transitioalue. Vihreiden viivojen välissä on turbulenttista virtaus. [3]



Kuva 13. Virtauslajit. (Kuva: Tuomo Heikkinen 15.4.2010.)

Virtauslajin tyyppiin vaikuttaa siis nesteen virtausnopeus, hydraulinen halkaisija ja viskositeetti. Putkistoissa virtausnopeus on tärkein tekijä, sillä viskositeetti pyritään pitämään vakiona lämpötilan avulla ja hydraulinen halkaisija oletetaan muuttumattomaksi. Virtausnopeuteen vaikuttaa jatkuvuusyhtälöiden 7 ja 8 mukaan virtauspoikkipinta-ala ja nesteen virtausnopeus.

Putkiston kanavat tulee mitoittaa siis siten, ettei turbulenti virtausta esiinny maksimitilavuusvirrallakaan. Todellisuudessa putkia tai komponentteja ei voida aina mitoittaa näin. Komponentit ovat toisiinsa kiinnitettyinä, jolloin tilantarve ja rakenteelliset jännitykset voivat rajoittaa virtauskanavien kokoa. Muita rajoittavia tekijöitä voi olla myös massa, järjestelmän kokonaistilantarve, kustannukset, suunnittelun vähäisyys, tiedon puute, muiden fysikaalisten ilmiöiden, liikkuvien osien tai avautuvien kanavien huomioonottamattomuus.

Venttiileissä on yleensä ahtaita virtauskanavia, jolloin turbulenti virtausta esiintyy jo pienillä tilavuusvirroilla. Tämän vuoksi venttiileiden painehäviökäyrät ovat yleensä eksponentiaalisia.

2.1.5 Virtaushäviöt

Mahdollinen paineen aleneminen virtaussuunnassa voi johtua virtaushäviöistä. Putkiston suorilla osuuksilla voi syntyä kitkavastushäviötä, kun taas virtauspoikkipinta-alan tai virtaussuunnan muutoksissa voi syntyä kertavastushäviötä. [3]

2.1.5.1 Kitkavastushäviöt

Laminaarisen virtauksen yhtälöllä voidaan ratkaista putkikitkan voittamiseen tarvittava paine-ero seuraavasti [3]:

$$(p_1 - p_2) = \frac{128\eta l Q}{\pi d^4} \quad (21)$$

Korvataan dynaaminen viskositeetti kinemaattisen viskositeetin yhtälöllä 18. Kirjoitetaan tilavuusvirran yhtälö auki. Tällöin saadaan yhtälöstä 21 seuraavanlainen [3]:

$$\Delta p = \frac{128\nu\rho l v d^2 \pi}{4\pi d^4} \quad (22)$$

Lavennetaan oikea puoli nopeudella v sekä järjestellään termit uudelleen [3]:

$$\Delta p = 64 \frac{l\rho}{2d} v^2 \frac{\nu}{dv} \quad (23)$$

Yhtälön 23 viimeinen termi on yhtälön 20 käänteisarvo, saadaan [3]:

$$\Delta p = \frac{64}{Re} \frac{l\rho}{2d} v^2 \quad (24)$$

Yhtälön 24 ensimmäistä termiä kutsutaan kitkavastuskertoimeksi, merkitään [3]:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (25)$$

Sijoittamalla yhtälö 25 yhtälöön 24 saadaan [3]:

$$\Delta p = \lambda \frac{l\rho}{2d} v^2 \quad (26)$$

Jos kyseessä on muu kuin ympyrämäinen virtauskanava, korvataan tällöin yhtälön 26 d hydraulisella halkaisijalla D_H [3].

Adiabaattisen virtauksen kitkavastuskerroin on [3]:

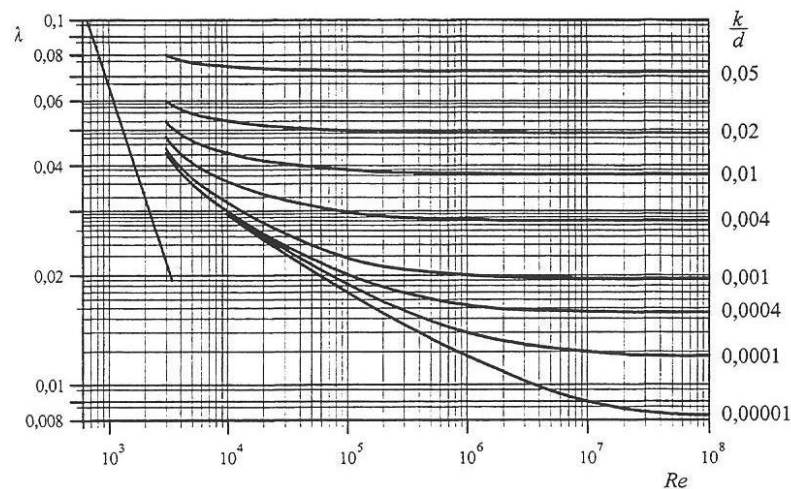
$$\lambda = \frac{75}{Re} \quad (27)$$

Adiabaattisessa virtauksessa virtaavan nesteen lämpötila vaihtelee huomattavasti [3].

Pinnankarheus ei vaikuta kitkavastuskertoimeen laminaarisessa virtauksessa. Turbulenttien virtauksien kitkavastuskertoimet on määritetty kokeellisesti. Tämän vuoksi kitkavastuskerroin turbulentsissa tapauksissa voidaan ratkaista kokeellisesti tai katsomalla käyrästä. [3]

Turbulentsissa tapauksessa hydraulisesti sileille putkille voidaan käyttää Blasiuksen yhtälöä, kun $Re < 10^5$, Nikuradsen yhtälöä, kun $10^5 < Re < 5 \cdot 10^6$; Prandtin ja v. Kármánin iteratiivista yhtälöä, kun $Re > 10^6$. [3]

Yleensä kitkavastuskertoimen määrittämiseksi turbulentsissa virtauksessa käytetään Moodyn käyrästä, joka on esitetty kuvassa 14. Moodyn käyrästä käytetään Reynoldsin luku ja absoluuttisen pinnankarheuden arvoa jaettuna putken sisähalkaisijalla. Tästä saadaan suhde k/d . [3]



Kuva 14. Moodyn käyrästä [3].

2.1.5.2 Kertavastushäviöt

Hydraulijärjestelmän osissa, joissa virtauksen suuntaa tai nopeutta muutetaan, syntyy kertavastushäviöitä. Esimerkiksi venttiileissä virtaus muuttuu turbulentsiseksi jo alhaisilla

Reynoldsin luvun arvoilla. Kertavastushäviöstä aiheutuva painehäviö saadaan ratkaistua yhtälöstä 28 seuraavasti [3]:

$$\Delta p = \xi \frac{\rho v^2}{2} \quad (28)$$

jossa ξ on kertavastuskerroin [3].

Reynoldsin luku ja virtauskanavan rakenne vaikuttavat kertavastuskertoimeen. Todellisten järjestelmien kertavastuskertoimet määritellään kokeellisesti, koska esimerkiksi perättäisiä kertavastuksia aiheuttavien komponenttien kertavastuksia ei voida laskea yhteen kokonaisvaikutuksen ratkaisemiseksi. Suoralle putkiliitokselle kertavastuskertoimen arvoksi on määritelty 0,5 ja kuristusläppäventtiilille kertavastuskerroin voi olla väliltä 0,5...300. [3]

Hydraulikomponenttien kertavastushäviöt voidaan helpoiten määrittää valmistajien toimittamien ominaiskäyrien avulla. Näistä ominaiskäyristä nähdään painehäviö tilavuusvirran funktiona. [3]

2.1.5.3 Muuttuvat olosuhteet

Jos painehäviön suuruus tiedetään tietyissä olosuhteissa, voidaan painehäviö erilaisessa tilanteessa ratkaista tietyllä tilavuusvirralla, nesteen tiheydellä tai viskositeetilla. Seuraavat yhtälöt kertovat arvon painehäviölle muuttuneessa tilanteessa tilavuusvirran ja tiheyden mukaan, sekä likiarvon painehäviölle muuttuneella virtausnopeudella [3]:

$$\Delta p = \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^2 \Delta p_1 \quad (29.a)$$

$$\Delta p = \frac{\rho_2}{\rho_1} \Delta p_1 \quad (29.b)$$

$$\Delta p \approx \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{0.25} \Delta p_1 \quad (29.c)$$

Yhtälöt 29.a...c esittävät uuden painehäviön seuraavassa tilanteessa jonkin muuttujan mukaan. Oikeassa järjestelmässä tilavuusvirta, tiheys ja nesteen virtausnopeus voivat kaikki muuttua yhtäaikaan, jolloin tarvitaan yhtälöitä, joissa nämä kaikki on otettu huomioon.

2.1.5.4 Kokonaishäviöiden laskenta

Kokonaishäviöt voidaan laskea summaamalla eri kerta- ja kitkavastushäviöt seuraavasti:

$$\Delta p_{kok} = \sum \lambda \frac{l\rho}{2d} v^2 + \sum \xi \frac{\rho v^2}{2} \quad (30)$$

Joissakin tapauksissa voidaan harkinnan mukaan vähäisemmät tekijät jättää huomioimatta perustuen kokemukseen. Järjestelmän käyttötarkoituksella ja laskennan tarkkuudella on vaikutus laskentaan. Käyttötarkoitukseen ja laskentaan vaikuttavia tekijöitä voivat olla esimerkiksi pitkät putkisto-osat, sekä useiden venttiileiden järjestelmät. Häviöiden suuruksia tulee verrata toisiinsa, aina ennen kuin häviö voidaan jättää huomioimatta. [3]

2.1.6 Hydraulinen teho

Komponentin teho voidaan laskea tilavuusvirran ja paine-eron avulla seuraavasti:

$$P = Q\Delta p \quad (31)$$

Jossa P on hyöty- tai häviöteho. Hyöty- ja häviöteholaskennassa tulee ottaa huomioon komponentin erityisominaisuudet, kuten vuodot. Järjestelmän toimintaa ohjaavissa komponenteissa saadaan syntyvä häviöteho laskettua yhtälön 31 mukaan. Todellisessa tapauksessa tilavuusvirta ja paine-erot pisteiden välillä mitataan tehohäviön laskemista varten. Yhtälöä 31 käytetään esimerkiksi venttiileissä syntyvien tehohäviöiden laskemiseen. [3]

2.2 Finite Element Method

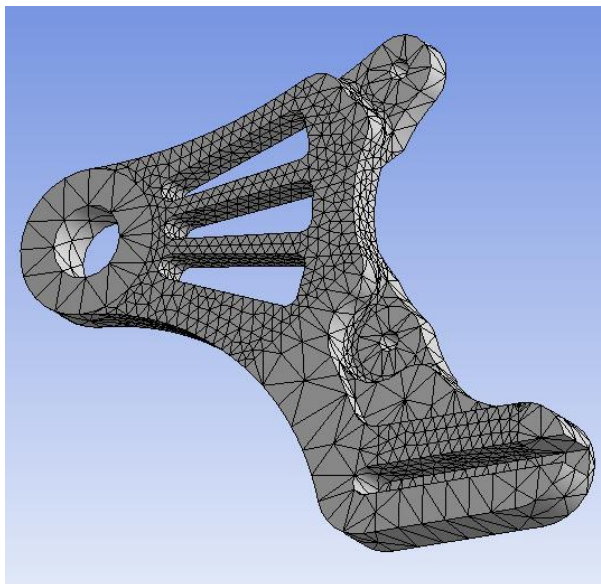
Finite Element Method, FEM, on numeerinen metodi, jota voidaan käyttää tarkkojen tuloksien saamiseen monimutkaisissa suunnitteluongelmissa. FE-metodi kehitettiin vuonna 1956 lentokoneiden rakenneongelmien ratkaisua varten. Vuosikymmentä myöhemmin FE-metodin potentiaali erilaisissa käytännön tieteiden ja suunnitteluongelmien ratkaisussa huomattiin. [4]

Nykypäivänä FEM laskentaa pidetään yhtenä parhaimpana tapana ratkaista käytännön ongelmien laajaa kirjoa. Yhtenä FEM laskennan etuna pidetään tietokoneelle ohjelmoitavaa yleistä ohjelmaa, jota voidaan sitten käyttää moneen erilaiseen ongelmaan vain muuttamalla lähtöarvoja. [4]

2.2.1 Yleistä FE-metodista

FE –metodin perusideana on löytää ratkaisu monimutkaiseen ongelmaan korvaamalla ongelma yksinkertaisemmalla ongelmalla. Koska monimutkainen ongelma ratkaistaan korvaamalla se yksinkertaisemmalla, on tuloksetkin likimääräisiä. Olemassa olevat matemaattiset työkalut eivät ole riittäviä tarkkojen tulosten aikaansaamiseksi, joskus ne eivät riitä edes likimääräisen tuloksen saamiseksi. Tarkempien tulosten aikaansaamiseksi voidaan likimääräistä tulosta parantaa käyttämällä tehokkaampia ja tarkempia tietokoneohjelmia. [4]

FE –metodissa ratkaisualue, esimerkiksi moottoripyörän jarrusatulan runko, on jaettu pienempiin osiin. Nämä pienet osat ovat kytketty toisiinsa elementeillä. Tietokonemalliin lisätään FEM –ohjelmassa tuennat sekä voimat, jonka jälkeen tapaus ratkaistaan. Elementit välittävät jännityksiä toisiinsa, jolloin saadaan kokonaisvaltainen likimääräistulos. Ratkaisuna moottoripyörän jarrusatulan rungossa voidaan nähdä esimerkiksi muodonmuutokset ja jännityskeskittymät. Kuvassa 15 on esitetty Savonia Chopperin takajarrusatulan elementit. Elementtien kulmapisteissä ovat solmupisteet, joita voidaan kutsua joskus myös englannin kielen termillä ”nodes”. [4]



Kuva 15. Elementit moottoripyörän jarrusatulan rakenteessa.

Rakenteet koostuvat FE –metodissa siis pienistä elementeistä, joista koostuu suurempi kokoonpano. Nämä elementit ovat kiinnittyneet toisiinsa tietyistä pisteistä, joita kutsutaan solmupisteiksi. Koska rakenteen muutosta, esimerkiksi muodon, lämpötilan, jännityksen, paineen tai nopeuden, ei tiedetä, voidaan sitä arvioida likimääräisfunktiolla. Nämä funktiot on määritelty siten, että pisteet siirtävät halutun suureen seuraavaan elementtiin. [4]

Kun funktio, esimerkiksi tasapainoyhtälö, kirjoitetaan koko rakenteelle, voidaan siitä ratkaista esimerkiksi siirtymät. Likimääräisfunktiot ovat yleensä matriisiyhtälöiden muotoa, koska rakenteet koostuvat elementeistä ja niiden kulmissa esiintyvistä solmupisteistä.

Vastaavasti virtausanalyysissä tila, jossa neste virtaa, sisältää elementit, joissa analyysi tapahtuu. Nestepartikkeleiden liikeratoja seuraamalla saadaan graafinen esitys tapahtumista. Virtausanalyysissä tarkasteltavia suureita voivat olla muun muassa nestepartikkelin nopeuden muutokset, paine-erot ja lämmön johtuminen. [4]

2.2.2 Nesteen mekaniikka

Nesteeksi määritellään nesteet ja kaasut. Nesteet muuttavat muotoaan jatkuvasti yhtälön 17 mukaan leikkausjännityksen takia. Jännityksen suuruus riippuu erisuuntaisten muodonmuutosten nopeudesta. [4]

Eri nesteillä on erilaisia yhteyksiä jännityksen ja muodonmuutoksen nopeuksien suhteen. Riippuen jännityksen ja muodonmuutosnopeuden välisestä yhteydestä, nesteet jaetaan newtonilaisiin ja ei-newtonilaisiin nesteisiin. Kuten yhtälöstä 17 huomataan, newtonilaisten nesteiden leikkausjännityksen suuruus on suoraan verrannollinen verrannollisuuskertoimeen. [4]

Verrannollisuuskertoimena käytetään dynaamista viskositeettia. Ei-newtonilaisilla nesteillä jännitysten ja muodonmuutosnopeuden välinen yhteys ei ole suoraan verrannollinen

verrannollisuuskertoimeen. Ei-newtonilaisia nesteitä ovat esimerkiksi jotkin muovit ja emulsiot. [4]

Virtauskenttä määritellään nestepartikkelin nopeuksien ja kiihtyvyyksien mukaan eri ajan ja paikkojen suhteen. Graafinen virtauksien esittäminen onnistuu seuraamalla partikkelien liikeratoja nesteen täyttämässä tilassa. [4]

Analyysiin perustuen virtaus voi olla viskoosia tai viskoositonta. Viskoositomassa virtauksessa ei ole kitkaa. Viskoosissa virtauksessa nesteellä on kitkaa. Todellisissa tapauksissa viskoositonta tilannetta ei ole mahdollista saavuttaa nesteen ominaisuuksien vuoksi. Joissakin malleissa kitkattoman nesteen käyttö on mahdollista, koska sen vaikutus lopputulokseen on vähäinen. [4]

2.2.3 Liikkeen yhtälöt

Liikkeen yhtälöt voidaan johtaa käyttämällä Newtonin toista lakia, johon lisätään differentiaalilavuus $dx dy dz$ sekä massa dm . Newtonin toinen laki on esitetty yhtälössä 32 seuraavasti [4]:

$$F = ma, \quad (32)$$

jossa F on voima, m on massa ja a on kiihtyvyys. Nestealkioon vaikuttava voima massayksikköä kohden saadaan vektorista [4]:

$$\vec{B} = B_x \vec{i} + B_y \vec{j} + B_z \vec{k} \quad (33)$$

Soveltamalla yhtälöä 32 yhtälöön 33 saadaan x suunnalle [4]:

$$dF_x = dma_x = (\rho dx dy dz) a_x \quad (34)$$

jossa dF_x on x -suuntainen differentiaalivoima ja a_x on x -suuntaan vaikuttava nesteen kiihtyvyys [4].

Nesteeseen kohdistuvien voimien myötä nesteessä esiintyy jännityksiä. Jos käsittelemme nestettä suljettuna järjestelmänä, sen täytyy Newtonin ensimmäisen lain mukaan olla tasapainossa itsensä kanssa. [4]

Teoreettisesti jännitykset nesteen eri pisteissä voidaan määrittellä yhdeksän komponentin mukaan $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yx}, \sigma_{yz}, \sigma_{zy}, \sigma_{zx}$ ja σ_{xz} . Voidaan todeta, että jännitykset $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$, $\sigma_{yz} = \sigma_{zy}$ ja $\sigma_{zx} = \sigma_{xz}$ ovat yhtäsuuria, mutta vastakkaissuuntaisia [4].

Jännitykset voidaan määrittellä kuudella komponentilla $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}$ ja σ_{zx} . Näistä komponenteista kolme ensimmäistä ovat normaali-jännityksiä ja kolme viimeistä leikkausjännityksiä. [4]

Soveltamalla jännityskomponentteja ja yhtälöä 34 saadaan x -suuntainen differentiaalivoima kirjoitettua seuraavasti [4]:

$$dF_x = (\rho dx dy dz) B_x - \sigma_{xx} dy dz + \left(\sigma_{xx} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} dx \right) dy dz - \sigma_{yx} dx dz + \left(\sigma_{yx} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} dy \right) dx dz - \sigma_{zx} dx dy + \left(\sigma_{zx} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} dz \right) dx dy \quad (35)$$

Jakamalla yhtälö 35 nestealkion tilavuudella saadaan vastaavasti suunnille x, y ja z [4]:

$$\rho B_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} = \rho a_x \quad (36.a)$$

$$\rho B_y + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} = \rho a_y \quad (36.b)$$

$$\rho B_z + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = \rho a_z \quad (36.c)$$

Yhtälöt 36.a...c ovat yleisiä ja niitä voidaan soveltaa kaikkii nesteisiin, joihin vaikuttaa vetovoima tyyppinen voima [4].

Leikkausjännitykset σ_{xy} , σ_{yz} ja σ_{zx} voidaan kirjoittaa muodossa [4]:

$$\sigma_{xy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (37.a)$$

$$\sigma_{yz} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (37.b)$$

$$\sigma_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (37.c)$$

joissa μ on viskositeetti, u on x-komponentin nopeus, v on y komponentin nopeus ja w on z-komponentin nopeus [4].

Yhdistämällä yhtälöt 36.a...c ja yhtälöt 37.a...c saadaan Navier-Stokes -liikkeen yhtälöt puristumattomille nesteille komponenteittain seuraavasti [4]:

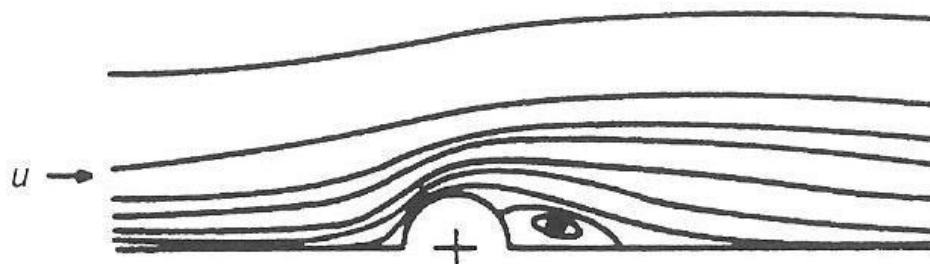
$$a_x = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = B_x - \frac{l \partial p}{\rho \partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (38.a)$$

$$a_y = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = B_y - \frac{l \partial p}{\rho \partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (38.b)$$

$$a_z = \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = B_z - \frac{l \partial p}{\rho \partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (38.c)$$

Yhtälöissä 38.a...c l on yksiulotteisen elementin pituus. Tietokoneohjelmistot, kuten Solidworks Flow Simulation, ratkaisevat tällaisia yhtälöitä nestevirtauksille liikkeen mallintamiseksi

graafisesti. Kuvassa 16 on esitetty nestepartikkeleiden liikeradat nopeudella u sylinterimäisen esteen ohi. [4]



Kuva 16. Nestepartikkeleiden liikeratoja esteen ohi [4].

2.3 Tuotekehitys

Onnistuneen tuotteen aikaansaamiseksi tulee yrityksen tehdä tuotekehitystä. Tuotekehitys voi olla kokonaan uuden tuotteen kehittämistä, mutta usein se on jo valmiin tuotteen tai teknologian päivittämistä. Tuotekehityksen lähtökohtana on impulssi, joka tulee esimerkiksi asiakkaalta jonkin ominaisuuden parantamiseksi. Tuotekehitysprosessin aikana määritellään lähtöarvot, tavoitteet, toimintatavat ja lopuksi tehdään prototyypit, joiden pohjalta suoritetaan mittauksia. Mittausten perusteella voidaan sanoa päästiinkö tavoitteisiin, eli onnistuiko tuotekehitys.

2.3.1 Tuotekehityksen taustaa

Onnistunut tuotekehitysprojekti on muutakin kuin tavoitteisiin pääsemistä. On olemassa viisi eri määrettä, jotka lopulta johtavat tuotteen taloudelliseen tuottoon. Nämä määreet ovat tuotteen laatu, tuotteen kustannukset, tuotekehitykseen kulutettu aika, tuotekehitykseen kulutetut pääomat ja tuotekehityskyvyyt. [5]

- Tuotteen laatu on tärkeä tekijä tuotekehityksessä. Tuotekehitysprosessin aikana siinä toimivat henkilöt voivat pohtia, syntykö heidän ponnistelujensa pohjalta halutunlainen tuote ja täyttääkö syntyvä tuote asiakkaan vaatimukset ja toimiiko se luotettavasti. Laatu vaikuttaa tyytyväisyyteen ja hintaan, jonka asiakas on valmis tuotteesta maksamaan. Laadun tulisi vastata tavoitteita, sillä alilaatuinen tuote ei vastaa kysyntään. Ylilaadullinen tuote taas sisältää ominaisuuksia, joka ei edesauta asiakkaan tarpeita ja maksaa ylimääräistä. [5]
- Tuotteen kustannukset määrittävät tuotteen valmistustavan mukaan. Valmistuskustannuksiin kuuluu esimerkiksi työkoneiden pääomakustannukset ja työkalukustannukset. Tuotteen kustannukset heijastuvat lopulta tuotteen lopulliseen jälleenmyyntihintaan. [5]
- Tuotekehitykseen kulutettu aika kertoo siitä, kuinka hyvin ja kuinka nopeasti yritys voi vastata kilpailuun kehittyvillä markkinoilla. Tuotekehitykseen kulutettu aika korreloi suoraan taloudellisen hyödyn kanssa.

- Tuotekehitykseen kulutettu pääoma kertoo, kuinka paljon tuotekehitysprosessiin on kulutettu rahaa. Tuotekehitykseen kulutetaan yleensä suuri osa koko projektiin suunnatusta pääomasta taloudellisen hyödyn saamiseksi. [5]
- Tuotekehityskyvyt kertovat yrityksen työntekijöiden kyvystä kehittää tulevaisuuden tuotteita heidän aikaisempien kokemustensa perusteella. Projektissa toimivien henkilöiden ominaisuudet ja osaamistaito ovat yrityksen varanto, jonka pohjalta tuotteita voidaan kehittää tehokkaammin ja taloudellisemmin. [5]

Yrityksen tulisi ymmärtää ja osata nämä kaikki viisi osa-aluetta pärjätäkseen taloudellisesti markkinoilla. On myös muitakin kriteereitä jotka yrityksen tulee ottaa huomioon. Esimerkiksi onko tuote ekologista valmistaa, entä sen loppusijoitus tai kierrättäminen. Kuinka paljon jätettä tuotteen kehittäminen ja valmistaminen aiheuttaa? Valmistetaanko tuotetta luoden uusia työpaikkoja? Onko tuote turvallinen käyttää? Tuotekehitysprojektin päämääränä ei voi olla ainoastaan yrityksen taloudellinen voitto, vaan myös toisten ihmisten ja asioiden huomioonottaminen.

Tuotekehitys on moninainen prosessi, johon tarvitaan osaamista usealta osaamistaholta. Tuotekehitysprojektissa on olemassa kolme ydin osaamisaluetta: markkinointi, suunnittelu ja valmistus. [5]

- Yrityksen markkinointi on vuorovaikutuksessa asiakkaiden kanssa. Markkinoinnilta saadaan usein impulsseja tuotekehitysprojekteihin. Markkinointi kommunikoi asiakkaiden kanssa, määrittelee tuotteen loppuhinnan, hoitaa mainonnan ja tuo uudet tuotteet markkinoille. [5]
- Suunnittelussa toimivat henkilöt ovat avainasemassa tehdäkseen, jotta tuotteesta tulisi halutunlainen asiakkaan tarpeisiin. Suunnittelu voi olla esimerkiksi mekaniikkasuunnittelua tai ergonomian suunnittelua. [5]
- Valmistus on vastuussa tuotteen valmistuksen suunnittelusta, toiminnasta ja koko valmistusprosessin järjestelyistä. Valmistukseen voi kuulua myös ostos, jakelu ja muut toiminnot. [5]

Jokaisella näillä alueilla työskentelee oman alansa ammattilainen. Eri alueiden osaajat eivät välttämättä ymmärrä toisen alueen toimintatapoja, jolloin markkinoinnin, suunnittelun ja valmistuksen välille tarvitaan ”yhteinen sävel”. Yhteisen sävelen löytyminen on tärkeää saumattoman tiedonkulun ja toiminnan saavuttamiseksi.

2.3.2 Tuotekehityksen haasteita

Erittäin hyvän ja toimivan tuotteen kehittäminen on vaikeaa. Vain muutamat yritykset onnistuvat puolella tuotekehitysprojekteissa kehittämään tällaisen tuotteen. Kyseisillä todennäköisyyksillä tuotekehityksryhmälle asetetaan kovia haasteita. [5]

Kompromissit asettavat tuotteen ominaisuuksien valitsemiseen haasteita. Esimerkiksi tuotteesta voidaan tehdä kevyempi, mutta siitä täytyy tehdä jäykempi toiminnan varmistamiseksi, mikä taas nostattaa kustannuksia. Parhaan tilaisuuden tai kompromissin huomaaminen monen muuttujan ryhmässä on vaikeaa. [5]

Markkinat, tuotteet, asiakkaat ja kilpailijat kehittyvät luoden uusia tarpeita ja tuotteita. Ympäristön vaihtuvuuden myötä päätöksenteko vaikeutuu. [5]

Tulisiko osat kiinnittää toisiinsa ruuveilla vai haittaliitoksella? Mikä on paras tapa kiinnittää osat tietyssä tuotteessa? Kierteiden tekeminen on suhteellisen kallista haittaliitoksen valmistamiseen verrattuna. Jos tuotteita tehdään massatuotantona, voi pienenkin yksityiskohdan valmistaminen maksaa paljon. [5]

Tuotekehitykseen kulutettavaa aikaa ei yleensä ole riittävästi, jolloin päätöksiä täytyy tehdä liian vähäisillä perusteilla. Jos aikaa olisi loputtomiin, olisivat tuotteet täydellisiä, mutta tuotteet olisivat kalliita, jos yritys pyrkisi taloudelliseen hyötyyn. [5]

Suunnittelu, valmistus ja markkinointi vaativat investointeja, jotka vaikuttavat yrityksen talouteen. Tämän vuoksi tuotteen asiakkaalle tuomien etujen ja tuotteen loppuhinnan tulisi olla sellaisia, jotka vetoavat asiakkaisiin. Tuotteen valmistuskustannusten tulee olla suhteellisen pienet näihin investointeihin. [5]

2.3.3 Design for X

”Design for X” on menetelmäoppi, jonka mukaan jokin tuote, sovellus tai järjestelmä suunnitellaan esimerkiksi valmistusta varten. Valmistettavuuden menetelmäopin nimi olisi ”Design for manufacturability”. ”Design for X” lyhennetään monesti DFX. Samalla periaatteella valmistusta varten suunniteltu tuote olisi suunniteltu DFM -menetelmäopin mukaisesti. [5]

Tässä opinnäytetyössä keskityttiin alustatuotteen suunnitteluun DFE, ”Design for Efficiency” menetelmäopin mukaisesti. Projektin päätavoitteena on hyötysuhteen parantaminen kokoonpanossa. Tässä opinnäytetyössä on myös vivahteita DFMA:sta, ”Design for manufacturability and assembly”, jossa keskitytään tuotteen valmistukseen ja asennettavuuteen.

Valmistuksen kannalta helpottavia tekijöitä ovat esimerkiksi samanlaiset toleranssit, pinnanlaadut ja symmetrisyys, tällöin työvaiheiden ja asetusaikojen määrä ja pituus vähenee. Asennuksen kannalta helpottavia tekijöitä on symmetrisyys, jolloin asentajan ei tarvitse miettiä asennettavan kappaleen asentoa suhteessa tuotteeseen. Lisäksi tuote sopii sille määrättyyn paikkaan vain yhdellä tapaa.

2.3.4 Alustatuote

Alustatuotteet rakennetaan jo olemassa olevan alijärjestelmän ympärille. Alustatuotteessa tuotekehitysprojektin ryhmä olettaa tuotteen tulevan valmiille alustalle, jonka on jo todettu toimivan käytännössä. Alustatuotteen kehitys on huomattavasti helpompaa ja edullisempaa, kuin jos tuote olisi kehitetty kokonaan uuden idean perusteella tyhjästä. Tämä edesauttaa myös rahoituksen saamista projektille. Koska aikaisemman tuotteen on todettu olevan hyödyllinen asiakkaille, voidaan tulevaa tuotetta markkinoida helpommin, esimerkiksi parannetulla toiminnalla tai hyötysuhteella. [5]

Joissakin tapauksissa alustatuotteen rinnalla voidaan puhua myös teknologiapainotteisesta tuotteesta. Teknologiapainotteisella tuotteella tarkoitetaan tuotetta, jonka uusi tai uudet

teknologiset edut auttavat uusien markkinoiden luomisessa. Tällöin voidaan olettaa, että uusi teknologia pakottaa kehittymiseen. [5]

2.3.5 Tuotekehitysprosessi

Hyvin ennalta määritetty tuotekehitysprosessi on tärkeä laadun takaamiseksi. Kun tuotekehitysprosessi jaetaan pienempiin vaiheisiin, joita seurataan koko prosessin läpi ja joissa tarkistetaan tulokset, voidaan taata laatu. Selkeän tuotekehitysprosessin edut näkyvät myös tulevaisuuden tuotekehityksissä. [5]

Henkilöiden koordinointi omiin tehtäviinsä prosessissa vähentää epäonnistumisen riskiä. Henkilöiden järjestäminen omiin tehtäviinsä muodostaa suuremman kehitysryhmän, jonka sisällä tehdään yhteistyötä halutun lopputuloksen aikaansaamiseksi. [5]

Tuotekehitysprosessin suunnittelulla voidaan jaotella kokonainen prosessi pienempiin osaluokkiin. Näillä pienillä osaluokilla on omat tavoitteensa, jotka tarkistetaan vaiheiden lopussa. Näin aikataulun seuraaminenkin helpottuu. [5]

Ongelma-alueiden tunnistaminen on tärkeää. Projektin vastuhenkilö voi seurata alustensa tehokkuutta ja tuottavuutta helposti välivaiheista saatavilla tuloksilla. Näin voimavaroja voidaan siirtää tehokkaasti tarvealueelle. [5]

Koko tuotekehitysprosessin dokumentointi edesauttaa tulevia projekteja, mutta selventää myös mahdollisia ongelma-alueita joihin tulisi panostaa. [5]

2.3.5.1 Tuotekehitysprosessin vaiheet

Yleinen tuotekehitysprosessi koostuu useista pienistä askeleista tai vaiheista, jotka muuttavat tavoitteita todeksi. Yleisen tuotekehitysprosessin vaiheet on esitetty kuvassa 17. [5]



Kuva 17. Tuotekehitysprosessin vaiheet [5].

Tuotekehitysprosessissa on siis kuusi vaihetta, jotka ovat suunnittelu, konseptisuunnittelu, järjestelmätasosuunnittelu, yksityiskohtainen suunnittelu, testaus ja parantaminen sekä tuotannon aloittaminen.

Ennen tuotekehitysprosessin ensimmäistä vaihetta, suunnittelua, seuraa projektin hyväksyminen ja projektin varsinainen aloitus. Suunnitteluvaiheessa määritellään yrityksen tavoitteet projektissa, kehitettävä kohde sekä markkinat. Ensimmäisen vaiheen tuotona voidaan pitää projektisuunnitelmaa, jossa kerrotaan muun muassa projektin tavoitteet ja rajaehdot. [5]

Tuotekehitysprosessin toisessa vaiheessa, konseptisuunnittelussa, todetaan kohdemarkkinat sekä arvioidaan vaihtoehtoisia tuotekehityselmiä niiden toteutuskelpoisuuden sekä muiden määreiden pohjalta. Konseptisuunnittelun loppuvaiheessa valitaan yksi tai useampi vaihtoehto, jota aletaan

kehittämään ja testaamaan. Vaihtoehdon muoto, toimintatapa ja muut ominaisuudet, eli tavoitteet lyödään lukkoon. Tällöin on hyvä tutustua kilpailijoiden tuotteisiin sekä tehdä arvioi projektiin tarvittavasti pääomasta. [5]

Järjestelmätasosuunnittelu on kolmas prosessin vaihe, siinä kehitettävä tuote jaotellaan pienempiin osiin, alikokoonpanoihin. Alikokoonpanot jaotellaan vielä yksittäisiin komponentteihin, eli osiin. Tässä vaiheessa voidaan päätellä kokoonpanon suuruus, tilantarve sekä toiminnot. Suuria alikokoonpanoja voidaan käsitellä aliprojekteina, jolloin virheiden määrä tuotekehitysprosessissa vähenee. [5]

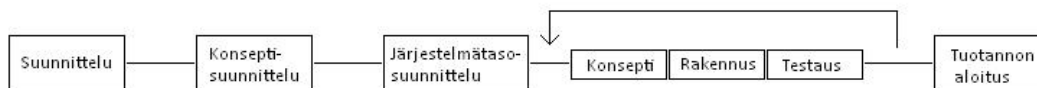
Yksityiskohtaisessa suunnittelussa lopullisen tuotteen mitat, materiaali ja toleranssit selventyvät, myös mahdolliset standardikomponentit valitaan kokoonpanoon. Neljännen vaiheen tuottona voidaan pitää kappaleiden piirustuksia, joiden mukaan valmistus ja kokoonpano voivat edetä. Tämän vaiheen tärkeitä yksittäisiä kohtia ovat tuotteen lopullinen hinta sekä toiminnan varmistaminen. [5]

Viidennessä vaiheessa, testauksessa ja parantamisessa, nimensä mukaan testataan valittua tai valittuja konsepteja. Tulosten perusteella valitaan sopivin tuote tai parannetaan jotakin tuotetta. Joistakin tuotteista tehdään alfa-mallit, jotka sisältävät toiminnon, mutteivät muotoa. Beta-mallit sisältävät kehitettävän tuotteen toiminnon ja muodon, joka vastaa lopullista markkinoille laskettavaa tuotetta. Alfa-malleilla testataan tuotteen toimivuus ja beta-mallien testaus voidaan suorittaa jopa asiakkailta niiden suunnittelussa käyttöympäristössä. Tuotteen parantamisen ja testauksen jälkeen tuotteelle voidaan tehdä viimeiset muutokset, minkä jälkeen valitaan lopullinen kokoonpano. [5]

Tuotannon aloittamisvaiheessa tuotetta aletaan valmistaa siihen varatuilla ja valmistelluilla laitteilla. Tuotannon aloittamisvaiheen tavoitteena on kouluttaa työntekijät uuden tuotteen valmistamiseen sekä huomata mahdolliset tuotannolliset ongelmat. Tuotannon aloittamisvaiheesta siirtyminen varsinaiseen tuotantoon on yleensä portaistettu tuotannon varmistamiseksi. Myöhemmässä vaiheessa tuote päästetään markkinoille jakeluun. [5]

2.3.5.2 Tutkimuksessa käytetty prosessi

Tässä opinnäytetyössä käsiteltävässä tuotekehitysprojeektissa sovellettiin spiraalimaista tuotekehitysprosessia. Spiraalimaisen tuotekehitysprosessin vaiheet on esitetty kuvassa 18. [5]



Kuva 18. Spiraalimaisen tuotekehitysprosessin vaiheet [5].

Spiraalimaisen tuotekehitysprosessin vaiheet kulkevat samalla tavalla kuin yleisen tuotekehitysprosessin vaiheet. Alussa on suunnittelu, jonka jälkeen tulee konseptisuunnitteluvaihe. Näiden välissä on projektin hyväksyminen. Kolmantena vaiheena on järjestelmätasosuunnittelu, jota ennen on konseptikatselmus. Konseptikatselmuksessa päätetään jatkokehitykseen pääsevät konseptit. Järjestelmätasosuunnitteluvaiheen jälkeen valitaan

konsepti, rakennetaan ja testataan se. Tämän jälkeen mahdollisesti parannetaan kehitettävää järjestelmää. Uudelleen kehitettyä järjestelmää testataan jälleen ja tehdään tarvittavia muutoksia. Tarpeeksi usean iteroinnin jälkeen päästään tuotannon aloitusvaiheeseen. [5]

2.3.6 Prototyyppi

Prototyypit voidaan jaotella kahteen alueeseen, fyysisiin ja analyttisiin. Fyysiset prototyypit ovat oikeita valmistettuja prototyyppisiä, joilla arvioidaan esimerkiksi miltä prototyyppi näyttää tai tuntuu. Fysikaalisilla prototyypeilla voidaan myös testata laitteen toimivuutta ja uusien ideoiden toteutettavuutta. [5]

Analyttiset prototyypit ovat yleensä matemaattisia tai visuaalisia malleja, jotka eivät ole fyysisesti olemassa. Analyttisiä malleja voivat olla esimerkiksi tuotteen tietokonemallit. Analyttisiä malleja testataan koneella rakentamatta niitä, jolloin säästetään rahaa. Analyttiset mallit ja niiden testaus on kuitenkin epätarkkaa verrattuna fyysisen mallin testaukseen. [5]

Tässä opinnäytetyössä on perehdytty enemmän analyttisen prototyypin testaukseen. Tämä toimintatapa valittiin taloudellisista syistä sekä syystä, että analyttiseen testaukseen oli valmiina ohjelmistot. Prototyypin suunnittelu, valmistus ja testaus fyysisellä prototyypillä olisi tullut kalliiksi, koska tuotteen valmistus ja testaus analyttisellä prototyypillä eivät vaadi tuotteen valmistusta ja mittausten järjestelyä. [5]

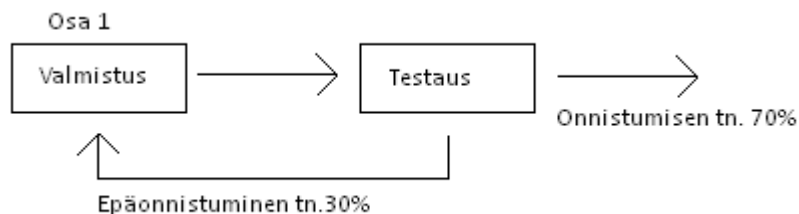
2.3.6.1 Analyttinen prototyyppi

Koska analyttiset prototyypit eivät ole fyysisesti olemassa, ne ovat approksimaatioita ja niillä on vähemmän ympäristön rajoituksia. Tämän vuoksi virheiden huomaaminen voi olla hankalaa. Toisaalta analyttisessä prototyypissä esimerkiksi muodon muuttaminen on helpompaa kuin fyysisessä prototyypissä. [5]

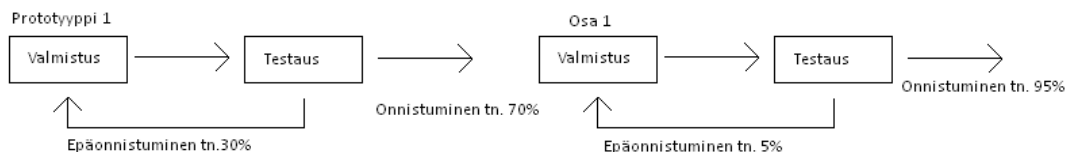
Analyttisellä prototyypillä kavennetaan käytettävien muuttujien rajoja, esimerkiksi paineen tai tilavuusvirran siten, että fyysisellä prototyypillä korjataan enää pieniä virheitä. Toisaalta fyysisen prototyypin testauksessa voi tulla esiin jokin odottamaton ilmiö. Tällaisen ilmiön syynä voi olla se, että esimerkiksi kaikki fysiikan lait ovat voimassa. [5]

Jotkin muuttujat voidaan jättää huomioimatta analyttisessä testauksessa, jos niiden oletetaan olevan mitättömiä järjestelmän toiminnan kannalta. Toinen syy jonkin muun muuttujan pois jättämiseen voi olla esimerkiksi alustatuotteen aikaisemman version jo toimivaksi todetut parametrit. Esimerkiksi toleranssien uudelleen määrittäminen voidaan jättää tekemättä, koska aikaisemman järjestelmän on todettu toimivan, vaikka se lämpölaajenee ja on paineen vaikutuksen alainen. [5]

Analyttisellä prototyypillä siis vähennetään kalliiden ja hankalien ongelmien todennäköisyyttä. Kun ongelmien todennäköisyys pienenee, kasvaa onnistumisen todennäköisyys. Tuotekehitysprosessin prototyyppivaiheita on esitetty kuvissa 19 ja 20. [5]



Kuva 19. Perinteinen prosessi [5].



Kuva 20. Prototyyppiprosessi tuotekehityksessä [5].

Vertaamalla kuvia 19 ja 20 voidaan nähdä, että prototyypin valmistus kannattaa. Perinteisessä prosessissa lopullinen tuote vain valmistetaan ja sitten testataan, jolloin onnistumisen todennäköisyys on esimerkiksi 70 %, kun epäonnistumisen todennäköisyys 30 %.

Kun taas käytetään prototyyppiprosessia tuotekehityksessä, voi onnistumisen todennäköisyys olla 95 %. Prototyyppien valmistus ja testaus hyvän ja toimivan lopputuotteen aikaan saamiseksi on harvoin kalliimpaa, kuin perinteinen tuotekehitysprosessi. Tässä menettelytavassa virheet huomataan jo edullisessa prototyyppivaiheessa.

Prototyyppiprosessia ei tule kuitenkaan nähdä ”matalana aitana”, sillä usean prototyypin valmistaminen on myös kallista. Prototyypin suunnitteluun tulee siis panostaa myös, jotta halutut ominaisuudet saadaan testattua.

2.3.6.2 Prototyypin valmistus

Kahden viime vuosikymmenen aikana on yleiseen käyttöön tullut kaksi erittäin tehokasta prototyypin valmistustapaa. Nämä valmistustavat ovat 3-ulotteiset tietokonemallit sekä niin kutsuttu ”free-form fabrication”, joka vapaasti suomennettuna on vapaan muodon valmistus. Jälkimmäisellä valmistustavalla tarkoitetaan pikavalmistusta esimerkiksi 3D -tulostimella. [5]

Tässä opinnäytetyössä valmistettiin eniten prototyyppisiä tietokoneella halutunlaisen rakenteen löytämiseksi edullisesti.

2.3.6.3 Tietokonemalli

3-ulotteiset tietokonemallit ovat analyyttisiä malleja, jotka voidaan rakentaa tietokoneohjelmistoihin, kuten esimerkiksi Solidworks ohjelmistoon, jota tässä opinnäytetyössä on käytetty. Tietokonemalleilla saadaan esiin lopputuotteen ulkonäkö, mitat, tilavuus, valmistuspiirustukset sekä valokuvamaisia kuvia mahdollisessa käyttöympäristössä.

Tietokonemalleilla voidaan myös tarkastaa sopivatko tuotteen yhteen toistensa kanssa, eli menevätkö jotkin pinnat toistensa sisään. [5]

Tietokonemalleilla on myös mahdollista tehdä erilaisia analyysejä. Tässä opinnäytetyössä tehtiin rakenneanalyysejä, sekä virtausanalyysejä. Muita analyysejä voi olla esimerkiksi lämmön johtuminen ja monimutkaisten mekanismien liikkeet. Koska kyse on edelleen analyyttisestä mallista, tulee muistaa, että lopputulokset eivät ole tarkkoja, vain suuntaa antavia. [5]

Pikavalmistetut osat voidaan valmistaa 3D-tulostimella, jonka tulostusmateriaali on esimerkiksi muovia. Tällainen prototyypin valmistusmenetelmä todettiin epäkäytännölliseksi käytettävien painetasojen vuoksi. Siksi pikavalmistus hylättiin tässä opinnäytetyössä ja tietokonemallit valittiin sopiviksi. [5]

3. AIHEEN RAJAUS JA KOHDENTAMINEN

3.1 Työn rajaus

Junttan Oy:n yhtenä peruskivenä on jatkuva tuotekehitys. Tampereen teknillisen yliopiston hydrauliiikan ja automatiikan laitoksen ja Junttan Oy:n tekemä tutkimusprojekti oli lähtökohtana tälle opinnäytetyölle. Tutkimusprojektissa keskityttiin järkäleen toimintaan sekä laatia ratkaisumalli, jolla parannettiin järjestelmän hyötysuhdetta, toimintanopeutta ja ohjattavuutta ¹.

Aluksi opinnäytetyön aiheena oli hyötysuhteen parantaminen etsimällä sopivat arvot esimerkiksi käyttöpaineelle ja tilavuusvirralle ja MATLAB -simulointimallissa. Hyötysuhdetta tuli parantaa siten, että iskutaajuus tai järkäleen nostokorkeus ei kärsisi liikaa. Tämä osoittautui haastavaksi ongelmaksi, sillä huippuarvojen löytäminen usean muuttujan seasta oli hankalaa ilman matemaattista tapaa selvittää ongelmaa. Ongelma oltaisiin voitu ratkaista osittaisdifferentiaalilaskennalla sekä Lagrangen määräämättömien vakioiden avulla.

Riittämättömien lähtöarvojen puuttuessa todettiin, että työtä tulisi rajata enemmän. Työksi rajattiin TTY/IHA -raportissa mainittu juntausventtiilin tankkikanavassa tapahtuva painehäviö ja sen syyn selvittäminen. Järjestelmän yksinkertaistettu hydraulikaavio on esitetty kuvassa 21. Sylinterin vieressä oleva venttiili on tässä opinnäytetyössä käsiteltävä juntausventtiili ¹.

Tutkimuksessa mitattu painehäviö tankkikanavassa 700 l/min tilavuusvirralla on noin 7 bar, joka on huomattava ¹. Tehohäviö voidaan laskea käyttämällä yhtälöä 31. Tehohäviöksi saadaan noin 8,2 kW; joka muuttuu kokonaan lämmöksi. Tutkimuksessa arvioitiin, että painehäviöt tankkiportissa voivat olla suurimmillaan 15 bar. ¹

3.2 Ongelmakohdat

Opinnäytetyössä oleviin ongelmakohtiin tutustuttiin ensiksi teorian pohjalta. Hydraulitekniiikan kirjoissa esitettyihin ongelmiin, ratkaisuihin ja teorioihin syvennyttiin. Lisäksi yritettiin saada kokonaisvaltainen kuva hydraulitekniiikan ongelmakohdista. Alun jälkeen ongelmakohtien selvittelystä tutustuttiin juntausventtiilin toimintaan sekä pääkomponentteihin.

Yläpäädyn ulkoolkin tutkiminen oli erittäin tärkeää painehäviön syyn ymmärtämiseksi. Kuvassa 26 esitetystä yläpäädyn ulkoolkissa on 10 kappaletta halkaisijaltaan 10 mm reikiä. Näiden reikien yhteen laskettu ala on noin 785 mm². Kara peittää nostossa yläpäädyn ulkoolkin virtauskanavista puolet, jolloin virtauspinta-alaksi jää noin 392 mm². Todettiin myös, että karan puoliksi peittämän virtausalan kertavastus kasvaa, kun virtauskanava on puoliympyrän muotoinen. Karan alaosa peittää myös osittain alapäädyn ulkoolkin virtauskanavia. Kuvassa 31 on esitetty alapäädyn ulkoolkin virtauskanavien osittainen peittyminen.

Yhdeksi suureksi juntausventtiilin ongelmakohdaksi varmistui siis karan pituus ja asema sekä yläpäädyn ulkoolkin virtauskanavien ala ja muoto. Parhaassa mahdollisessa tapauksessa yläpäädyn ulkoolkin virtausreikiä olisi vähemmän ja niiden yhteen laskettu pinta-ala olisi nykyistä suurempi. Myös karan peittämää aluetta ei olisi parhaassa mahdollisessa tapauksessa.

Muiksi ongelmakohdiksi todettiin alapäädyn ulkoolkin mittavirhe, joka on esitetty kuvassa 32. Muita mahdollisia ongelmakohtia olivat esimerkiksi karan olakkeen paksuus,

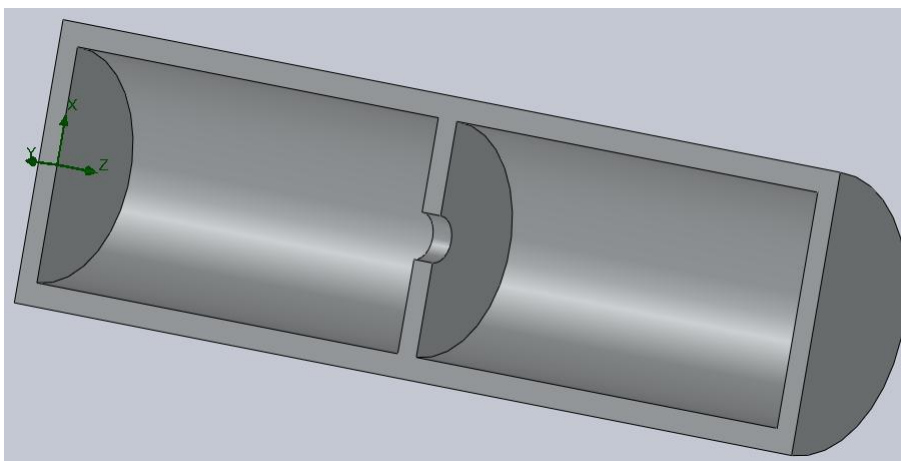
päätyvaimennuksen puute, peittovirheet suunnan vaihtotilanteessa sekä alapäädyn ulkoholkin virtauskanavien asema.

Ongelmakohtien ratkomisen lisäksi keskityttiin myös erilaisiin suunnitteluperiaatteisiin niin paljon kuin mahdollista. Suunnittelu hyötysuhteen parantamiseksi oli pääasiallinen tavoite, mutta tässä opinnäytetyössä huomioitiin myös suunnittelua valmistettavuuden ja asennettavuuden kannalta. Valmistettavuuden ja asennettavuuden parantamiseksi kappaleiden tulisi olla symmetrisiä. Tällä periaatteella koneistus- ja kappaleen asennusaika lyhenisi.

3.3 Tutkimuksessa käytettyjä työkaluja

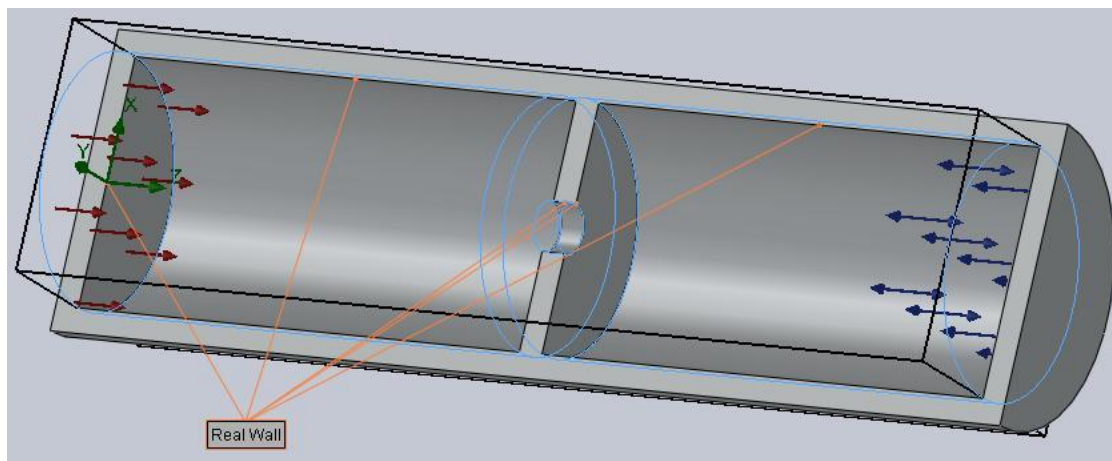
Tutkimuksessa käytettiin kappaleiden mallinnukseen Solidworks -ohjelmistoa sekä työpiirustusten tekoon. Lisäksi työssä käytettiin Solidworksin aliohjelmaa Flow Simulationia, jolla ratkaistaan virtausongelmia.

Solidworks -ohjelmaa käytetään analyttisten mallien valmistukseen. Mallit ovat 3-ulotteisia. Kuvassa 22 on Solidworks -ohjelmistolla mallinnettu kappale. Kappaleesta on otettu puoliksi halkaistu kuvanto. Kappale vastaa kuvassa 6 esitettyä virtauskanavaa, jonka päät on tukittu. Kappaleen mitat ovat: halkaisija 120 mm, pituus 420 mm, seinämäpaksuus 10 mm ja virtausreiän halkaisija keskellä 20 mm.



Kuva 22. Solidworksilla mallinnettu kappale.

Kun kappale on mallinnettu, voidaan sille tehdä analyysija, kuten virtausanalyysi. Virtausanalyysia varten täytyy kappaleelle asettaa reunaehtoja, kuten esimerkiksi paikat mistä neste virtaa sisään kappaleeseen, paine jossakin kohtaa sekä pinnanlaadut kitkavastushäviötä varten. Kuvassa 23 on kuvan 22 virtausputki, johon on määritetty reunaehtoja. [6]

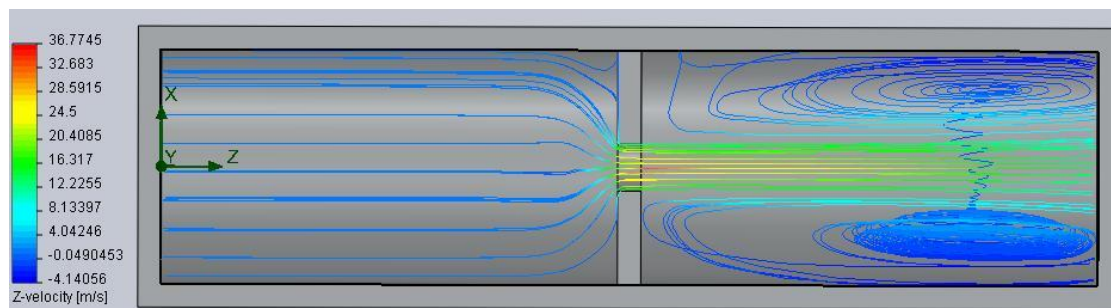


Kuva 23. Reunaehtojen määrittäminen virtausputkeen.

Pinta, jossa punaiset nuolet ovat, on virtauksen sisääntulo. Pintaan, jossa siniset nuolet ovat, on määritetty jokin paine. ”real wall” -tekstistä lähtevät nuolet osoittavat pintoja, joille on annettu pinnanlaadut. Kaikkia parametreja voidaan muuttaa halutunlaisiksi. Kuvassa näkyvä suorakaiteen muotoinen laatikko on ”computational domain” eli alue jossa laskenta tapahtuu. Rakenneanalyseissa ”computational domain” on itse kappale, jota rasitetaan rakenneanalyysissä.

Ennen simulointia määritellään muun muassa virtaava neste, virtaustyyppi ja simuloinnin resoluutio. Esimerkiksi Flow Simulation -aliohjelmassa voi määrittää oman virtaavan nesteen, fluidin, ja sen ominaisuudet. Määriteltävä ominaisuus voi olla esimerkiksi tiheyden lämpötilafunktio, joka lasketaan yhtälön 19 mukaan. [6]

Seuraavaksi suoritettiin analyysi, jonka tuloksena haluttiin nestepartikkeleiden liikeradat. Tärkeimpiä lähtötietoja virtauksen kannalta ovat neste ja sen tuloisuus sisääntulolla. Nesteeksi valittiin 20 -asteinen vesi sekä paineeksi 1 bar. Simuloinnin tuloksen voi nähdä kuvasta 24.



Kuva 24. Nestepartikkeleiden liikeradat kappaleessa.

Nestepartikkeleiden liikeradat näkyvät viivoina. Mitä punaisempi viiva on, sitä nopeammin nestepartikkeli on liikkunut sillä kohtaa. Toisenlainen tulosten esittäminen voi olla esimerkiksi leikkauskuvanto.

Virtausanalyysin avulla voidaan parantaa rakennetta siten, että nesteen virtausnopeus ei kasva niin suureksi kuin kuvan 24 esittämässä tapauksessa. Ohjelmistoilla voidaan myös määrittää muun muassa numeerisesti kertavastuksia ja painehäviöitä.

Ensiksi kappale siis mallinnettiin käyttäen Solidworks ohjelmistoa. Mallinnuksen jälkeen kappaleelle asetettiin reunaehdot, minkä jälkeen suoritettiin simulointi. Simuloinnin tuloksia voi tulkita graafisesti tai numeerisesti. Numeerista tulkintaa varten täytyisi kappaleeseen asettaa kohdat, josta tuloksia luetaan.

Muutetun geometrian hyötysuhdetta ja toimintaa voidaan ennustaa myös yhtälöiden 29.a...c avulla. Aikaisempien mittaustulosten avulla voidaan likimääräiskaavalla arvioida muuttuneen geometrian painehäviö tilavuusvirran, tiheyden tai nesteen virtausnopeuden mukaan.

4. VENTTIILIPROJEKTI

4.1 Työhön tutustuminen

Opinnäytetyön alkuperäiseen aiheeseen tutustuminen pidettiin Junttanilla Kuopion Kylmämässä marraskuussa 2009. Työn tarkemman rajauksen jälkeen työn aiheeksi valittiin järkäleen juntausventtiilin painehäviöiden syyn selvittäminen sekä venttiilikokoonpanon parantaminen. Juntausventtiilillä tarkoitetaan järkäleen nostoa ja iskua varten tarvittavaa venttiilikokoonpanoa. Järkäleellä tarkoitetaan massaa, jolla paalua lyödään maan sisään.

Työn alkuvaiheessa tutustuttiin venttiilin rakenteeseen. Rakenne jaoteltiin pienempiin osiin, jotka sitten käsiteltiin erikseen ottaen huomioon siihen liittyvät komponentit ja toiminnot järjestelmätasosuunnittelun periaatteita noudattaen. Alkuvaiheen jälkeen siirryttiin konseptisuunnitteluun, jossa komponenttien aiemmat epäkohdat korjattiin. Näiden perusteella tehtiin erilaisia virtausmalleja.

Virtausmallien valmistuttua suoritettiin virtaussimulointeja Solidworks Flow Simulation -ohjelmistolla. Tämä vaihe seurasi täsmällisesti konseptin ideoiden kehityksen, konseptin analyttisen prototyypin valmistuksen Solidworks -ohjelmistolla sekä saadun konseptin testauksen Solidworks Flow Simulation -ohjelmistolla. Työssä seurattiin spiraalimaisen tuotekehitysprosessin vaiheita.

4.2 Nykyinen venttiilikokoonpano

Juntausventtiilin Solidworks 3D -mallit saatiin Junttanilta. Aluksi tutustuttiin venttiilikokoonpanon kokonaisvaltaiseen rakenteeseen. Rakenteessa kiinnitettiin erityisesti huomiota esimerkiksi karan ohjauskanavien sijainteihin, osien keskinäisiin liikkeisiin, virtauskanavien muotoihin ja paikkoihin. Venttiilikokoonpanon halkaisukuva on esitetty kuvassa 25.

Venttiilikokoonpanossa on 4 pääkomponenttia, joita tarvittiin työn suorittamiseen ja simulointiin. Pääkomponentit ovat esitetty kuvissa 26, 27, 28 ja 29. Kuva 26 esittää yläpään ulkolehkkia. Kuva 27 esittää alapään ulkolehkkia. Kuva 28 esittää karaa ja kuva 29 esittää juntausventtiilin halkaistua ulkokuorta tai runkoa, jota kutsutaan myös blokiksi. Kuvissa 25, 26, 27, 28 ja 29 näkyvät komponentit ovat kaikki käytössä nykyisessä kokoonpanossa.

Tuotekehitysprosessin tavoitteena oli alustatuote, jossa jo olemassa olevaa tuotetta parannellaan, siten, että se mahdollisesti voidaan asentaa aikaisempiin kokoonpanoihin. Tässä tapauksessa kuvissa 26, 27 ja 28 esitettyjen kappaleiden tulisi sopia juntausventtiilin rungossa oleviin pesiin tuotekehitysprosessin jälkeen.

Kuvassa 29 on esitetty juntausventtiilin rungon pesät, joihin osien tulisi sopia tuotekehityksen jälkeen. Huomioi, että kuvasta 29 on poistettu kuvissa 26, 27 ja 28 esitetyt komponentit, jotka ovat kokoonpanokuvassa 25.

4.2.1 Nykyisen venttiilikokoonpanon toiminta

Nykyisen venttiilikokoonpanon toiminta on yhtäläinen perinteisen luisti- tai karaventtiilin kanssa. Venttiilillä on kaksi toimintoa, jotka ovat nosto ja isku. Toiminnot toteutetaan ohjaamalla ohjauspaine karan olakkeen ala- ja yläpinnoille tilanteen mukaan. Järkäleen noston aikana venttiilin kara on niin sanotusti ala-asennossa kuvan 30 mukaan. Kara on värjätty kuvissa keltaiseksi havainnollistamisen parantamiseksi.

Järkäleen iskun aikana venttiilin kara on niin sanotusti yläasennossa kuvan 31 mukaan.

Kuvista voidaan huomata, että noston aikana karan yläosa peittää osan yläpään ulkoolkin virtauskanavista silmämääräisesti noin puolet. Tämä on jatkuvuusyhtälön ja Bernoullin yhtälöiden mukaan huono tilanne, koska nesteen virtausnopeus kasvaa. Kertavastusyhtälön 28 mukaan virtausnopeuden tuplaaminen kasvattaa kertavastusta nelinkertaiseksi. Myös kertavastusyhtälön etukerrointa voidaan pitää suurena tällaiselle puoliympyrämaiselle virtausreiälle. Neste joutuu myös muuttamaan suuntaa, jolloin energiaa muuttuu lämmöksi.

Karan sisäreiän läpi kulkevan nestevirran aiheuttama kitkavastushäviö voidaan todeta olevan huomattavasti pienempi, kuin virtauskanavien koosta ja muodosta aiheutuvat kertavastushäviöt. Tämä todistetaan luvun 4.6 alla.

Tampereen teknillisen yliopiston ja Junttan Oy:n tekemässä tutkimusraportissa todettiin, että painehäviö järkäleen nostovaiheessa on huomattava. Tämän vuoksi tutkittiin karan rakennetta ja mekaniikkaa sekä yläpään ulkoolkin rakennetta muita alueita enemmän.

4.2.2 Ohjauskanavan sijainti

Kuten kuvasta 32 nähdään, on nykyisessä kokoonpanossa oleva karan nostoa varten oleva ohjauskanava pois sijaltaan 2 mm. Kanavien tulisi olla kohdakkain, koska terävät reunat ja ulokkeet virtauskanavassa aiheuttavat ylimääräistä pyörteilyä, hidastavat tai huonontavat laitteen toimintaa ja toimintavarmuutta.

Ohjauskanavan sijainnin epäkohdakkaisuus johtui luultavasti pienestä suunnitteluvirheestä. Tällaiset kohdat on vaikeampi huomata kaksikulotteisilla suunnitteluohjelmilla, jotka olivat käytössä nykyisen junttausventtiilin suunnitteluajankana. Nykyinen kokoonpano on kuitenkin ollut luotettava toiminnassaan tästä epäkohdasta huolimatta. Kuvasta 32 nähdään myös, että alapään ulkoolkikki on 2 mm liian lyhyt.

4.3 Virtausmallien suunnittelu

Tässä luvussa esitetään eri virtausmallien konseptit sekä minkälaisia virtausmalleja tehtiin ja mitkä olivat tehdyt muutokset. Virtausmallien suunnittelussa käytettiin spiraalimaisen tuotekehitysprosessin mukaisia vaiheita, jossa rakennetta iteroidaan useasti.

Konseptisuunnittelun ja analyttisen mallin valmistuksen jälkeen tehtiin virtaussimulointeja, joiden pohjalta tehtiin iterointi uutta konseptia varten. Ensimmäistä konseptia kehitetään useaan kertaan ja korjataan ongelmakohtia.

Erityistä huomiota virtausmallien suunnittelussa kiinnitettiin myös lopullisen kokoonpanon toimintaan ja ongelmakohtiin. Ongelmakohtia olivat esimerkiksi karan peittämät virtauskanavat ja läpivirtaus. Läpivirtauksella tarkoitetaan tilannetta, jolloin nosto- ja paineikanavat ovat yhteydessä toisiinsa. Tällöin neste virtaa nostokanavasta paineikanavaan tai toisinpäin, jolloin virtaava neste menee hukkatehon tuottamiseen.

Solidworks Flow Simulation -ohjelmisto vaatii, että virtaussimulointia varten olevat mallit ovat suljettuja. Siksi virtausmallien virtauskanavat mallinnettiin kappaleen sisään. Virtausmallit vastaavat kooltaan ja muodoltaan täydellisesti alkuperäisiä 3D -malleja. Virtausmalleista on esitetty kuvissa vain kriittisimmät kohdat eli yläpään ulkoholkin virtausreiät sekä karan asema.

4.3.1 Alkuperäinen virtausmalli

Alkuperäisestä kokoonpanosta tehtiin virtausmalli. Tämän virtausmallin tarkoitus oli toimia referenssinä tuleville konsepteille. Alkuperäisen virtausmallin virtauskanavat leikattiin kuvan 33 esittämän kappaleen sisään.

Alkuperäisessä virtausmallissa on 10 kappaletta halkaisijaltaan 10 mm:n virtauskanavia. Etukäteen tiedettiin jo, että virtauskanavia on liikaa. Suuri virtauskanavien lukumäärä aiheuttaa myös enemmän painehäviötä, jos virtausnopeus niiden lävitse on suuri.

4.3.2 Toinen virtausmalli

Toisen virtausmallin virtauskanavia vähennettiin 8:aan kappaleeseen ja kasvatettiin virtauskanavien halkaisijaa 15 mm:in. Kuvassa 34 on esitetty toisen virtausmallin leikkauskuvanto.

Toisessa virtausmallissa myös karan virtauskanavia peittävä asento on korjattu, tällöin virtauskanavat paljastuvat kokonaan. Alussa havaittiin, että tällä kokoonpanolla karan aseman vaihdossa tulisi olemaan läpivirtausta.

4.3.3 Kolmas virtausmalli

Kolmannessa virtausmallissa kasvatettiin virtauskanavien lukumäärä takaisin alkuperäiseen kymmeneen. Samalla virtauskanavien halkaisijaa pienennettiin 12,5 mm:in. Ohjauskaran peittovirhe pidettiin samanlaisena kuin toisessa virtausmallissa. Kolmannen virtausmallin leikkauskuvanto on esitetty kuvassa 35.

Kolmannella virtausmallilla haettiin korjausta läpivirtausongelmaan. Alkuperäisessä mallissakin oli läpivirtausta, joten tämän ongelman todettiin olevan mitätön toiminnan kannalta. Läpivirtaus pienentää hyötysuhdetta, mutta karan liikkeen kesto on muutamia millisekunteja, tällöin tehohäviö on mitätön.

4.3.4 Neljäs virtausmalli

Neljäs virtausmalli edustaa lopullista tuotetta. Virtauskanavia on 4 kappaletta, ja niiden leveys on 30 millimetriä, korkeus 15 millimetriä ja kulmissa on R5 -pyöristykset. Kuva 36 esittää neljännen virtausmallin leikkauskuvantaa.

Neljäs virtausmalli poikkeaa lopullisesta tuotteesta valmistettavuuden takia. Lopullisen tuotteen virtauskanavat ovat samanmuotoiset, mutta suunniteltu valmistettavuudelle. Valmistettavuuden kannalta terän halkaisijan tulee olla sama kuin virtauskanavan. Virtauskanavien koneistaminen pyörittämällä yläpäähän ulkoolkia muutti myös virtauskanavan reunoja. Virtaussimuloinnin tuloksista nähdään myöhemmin, miksi neljäs virtausmalli valittiin.

Pienistä virtauskanavien reunojen muutoksista huolimatta lopullinen kappale valittiin ilman virtaussimulointia. Reunojen muodon muuttaminen parantaa tai pitää samana kertavastushäviöt, joten erillistä virtaussimulointia ei tarvittu.

4.4 Virtausten simulointi

Jokaisella eri virtausmallilla suoritettiin samanlainen simulointi. Virtausparametrit, nesteet, sekä muut parametrit pidettiin samana. Ainoastaan kappaleen geometriaa muutettiin, koska tämä vastaa eniten todellista tilannetta.

Solidworks Flow Simulation -ohjelmisto ratkaisee nesteen mekaniikan osittaisdifferentiaaliyhtälöitä sekä iteroi niitä. Tässä tapauksessa iteroinnilla tarkoitetaan ensimmäisen virtaussimuloinnin tuloksen syöttämistä seuraavan simuloinnin lähtöarvoiksi. Näin päästään erilaisiin lopputuloksiin, vaikka simulointia tehtäisiin samalla geometrialla uudestaan.

Kuten muissakin fysiikan laskuissa, sekä muissa laskuissa, tulokset harvoin vastaavat todellista tilannetta. Esimerkiksi kappaleen lentorataa kuvaava fysiikan yhtälö kertoo paikan nopeuden tai ajan suhteen, riippuen lähtöarvoista. Yhtälöön kuitenkin ei ole syötetty esimerkiksi ilmanvastuksesta ja kappaleen muodosta johtuvaa häiriötä, joka muuttaa todellista lentorataa. Laskuissa ei myöskään ole otettu huomioon ympäristön olosuhteita, esimerkiksi tuulta, koska se on vaikea ennustaa tai määrittellä.

Myös virtaussimuloinneissa osa asioista jää huomioimatta ja osa jätetään huomioimatta. Tämä johtuu siitä, koska näiden muuttujien funktioiden ratkaiseminen olisi epäoleellista työn lopputuloksen kannalta. Siksi muuttujien löytämisen ja syöttämisen kannalta niiden haku- ja etsintäajat optimoitiin virtaussimulointien aloittamiseksi mahdollisimman nopeasti. Simulointiparametreja muutettiin alussa hieman, jotta simuloinneista tulisi tarkempia. Mitä epätarkempia lähtöarvot ovat, sitä enemmän lopputuloskin muuntuu todellisesta.

Muuttuvia parametreja ovat esimerkiksi virtausnesteen parametrit, joita ovat muun muassa tiheys, viskositeetti ja lämpökerroin. Muita parametreja voivat olla esimerkiksi pinnankarheus, virtauksen laatu ja tulokulma sisääntulossa ja paineen valinta.

4.4.1 Simuloinnissa käytettävät parametrit

Solidworks Flow Simulation -ohjelma tarvitsee erilaisia lähtöparametreja virtaussimuloinnin toteuttamiseksi. Taulukossa 1 esitetyt arvot vastaavat kaikki mahdollisimman hyvin todellista tilannetta.

Taulukko 1. Simuloinneissa käytetyt parametrit.

Massavirta	3,6	kg/s
Staattinen paine	180	bar
Pinnankarheus	6,3	μm
Virtaava neste	Neste H VG46	-
Seinämät	Adiabaattiset	-

Käytettävänä hydraulinesteenä Junttanin paalutuskoneissa on Nesteen Super Hydraulinen VG46, jonka tärkeimpiä parametreja virtaussimuloinnin kannalta on esitetty kappaleessa 4.4.2.

Pinnankarheuden arvona käytettiin R_a arvoa $6,3 \mu\text{m}$; koska todelliset kappaleet valmistetaan virtauspinnoiltaan tähän pinnanlaatuun. Kappaleen seinämäksi valittiin adiabaattiset. Staattiseksi paineeksi ja massavirraksi valittiin Antti Halosen suosittelemat 180 bar ja $3,6 \text{ kg/s}$. Kyseinen massavirta vastaa 250 l/min tuottoa.

4.4.2 Neste Hydraulinen VG46

Paalutuskoneissa käytettävä hydraulioöljy on Nesteen Hydraulinen, jonka ISO VG-luokitus on 46. VG-luokitus tarkoittaa, että öljyn viskositeetti on $40 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa on 46 cSt. Kyseisen hydraulioöljyn viskositeetti $100 \text{ }^\circ\text{C}$:ssa on 9,0 cSt. Neste Hydraulinen VG46 sopii hyvin talvikäyttöön sekä raskaaseen kesäkäyttöön. Kyseisen hydraulioöljyn tiheys $15 \text{ }^\circ\text{C}$:ssa on 849 kg/m^3 . [7]

Flow Simulation -ohjelmisto tarvitsee vähintään 2 arvoa nesteen tiheydestä, dynaamisesta viskositeetista, lämpökapasiteettiarvosta sekä lämmönjohtavuudesta simuloinnin suorittamiseksi. Tämän opinnäytetyön kannalta tärkein arvo simuloinnin kannalta oli dynaaminen viskositeetti sekä tiheyden lämpötilafunktio.

Tiheyden lämpötilafunktio syötettiin Flow Simulation -ohjelmiston tietokantaan käyttäen hyväksi yhtälöä 19 sekä tiheyden arvoa Neste Hydraulinen VG46 öljylle $15 \text{ }^\circ\text{C}$:ssa. Kinemaattiset viskositeettiarvot $40 \text{ }^\circ\text{C}$:ssa ja $100 \text{ }^\circ\text{C}$:ssa muutettiin Flow Simulationin haluamiksi dynaamiseksi viskositeettiarvoiksi yhtälön 18 mukaan.

4.5 Simulointitulosten tulkinta

Tässä kappaleessa on esitetty simulointituloksia. Tulokset ovat esitetty graafisessa muodossa. Graafisten tulosten perusteella tehtiin likimääräisiä numeerisia arvioita muuttuneesta

painehäviön arvosta. Painehäviön muuttunutta suuruutta käsitellään myöhemmässä kappaleessa. Tulokset on esitetty kuvissa 37, 38, 39 ja 40. Tulokset on esitetty vastaavassa järjestyksessä kuin virtausmallitkin. Kuvissa on esitetty nopeusjakauma tasossa, toisin kuin kuvassa 24, jossa oli esitetty nestepartikkeleiden liikeradat.

Alkuperäisen rakenteen simulointituloksista näkee silmämääräisesti, että painehäviö on suurempi, kuin neljännessä virtausmallissa. Kyseessä on useita pieniä virtauskanavia, joiden läpi nestettä virtaa suurella virtausnopeudella. Tällöin painehäviöt kasvavat toiseen potenssiin kertavastushäviöyhtälön 28 mukaan.

Koska noston aikana yläpään ulkoholkissa syntyvä painehäviö 700 l/min tuotolla noin 7 baria, oli virtauskanavien läpi kulkevan nesteen virtausnopeuden pienentäminen pääasiallinen tehtävä.

Alkuperäisen rakenteen virtausmalliin, kuva 37, ei mallinnettu paineakun linjaa. Myöhempiin virtausmalleihin paineakun linja mallinnettiin, mutta sen todettiin olevan virtaussimuloinnin kannalta merkityksetön. Kuvasta 40 nähdään, kuinka virtausnopeus on alentunut huomattavasti, verrattuna kuvaan 37.

Neljännessä virtausmallin simulointituloksista huomataan myös, että virtaus on keskittynyt enemmän suuntaan, johon neste pääsee poistumaan. Virtaussimuloinnissa oletettiin, että karan läpi virtaava neste poistuu kokonaan linjaan.

4.6 Rakenteen valitseminen

Rakenteeksi valittiin virtaussimulointi tulosten perusteella neljännessä virtausmallin mukainen rakenne. Komponentteja muutettiin valmistettavuuden vuoksi. Muutoksia oli ainoastaan virtauskanavan muodoissa ylä- ja alapään ulkoholkeissa. Uudet kappaleet suunniteltiin virtaussimulointien pohjalta siten, että ne sopivat myös vanhaan kokoonpanoon. Uudet komponentit on esitetty kuvissa 41, 42 ja 43.

Alapäädyn ulkoholkin virtauskanavat vaihdettiin samanlaisiin, kuin yläpäädyn ulkoholkissa olevat. Samalla alapäädyn ulkoholkin virtauskanavat nostettiin ylemmäs, jolloin saavutettiin symmetrisysettu karassa. Kara voitiin nyt valmistaa symmetriseksi. Symmetrisyys edesauttaa valmistusprosessia ja asennusta.

Alapäädyn ulkoholkin seinämä, jossa virtauskanavat sijaitsevat, kasvatettiin 5 millimetriin. Seinämän kasvatuksella saatiin kasvatettua lujutta vähentyneiden kannakkeiden takia. Yläpäädyn ulkoholkin virtauskanavien alojen vertailu on esitetty taulukossa 2. Alapäädyn ulkoholkin virtauskanavien alojen vertailu on esitetty taulukossa 3. Taulukoissa n tarkoittaa virtauskanavien lukumäärää, ja A yhden virtauskanavan virtauspinta-alaa.

Taulukko 2. Virtausalojen vertailu yläpäädyn ulkoholkissa.

Yläpäädyn ulkoholkki	A [mm ²]	n	Σ [mm ²]
Alkuperäinen	78,53982	10	785,39
Uusi	461,7146	4	1846,85

Taulukko 3. Virtausalojen vertailu alapäädyn ulkoolhokissa.

Alapäädyn ulkoolhokki	A [mm ²]	n	Σ [mm ²]
Alkuperäinen	314,1593	6	1884,95
Uusi	461,7146	4	1846,85

Yläpäädyn ulkoolhokkin virtauskanavien alojen suhde muuttui 2,35 kertaa suuremmaksi. Ottaen huomioon, että vanhassa kokoonpanossa kara peitti puolet virtauskanavista, jolloin virtauskanavien ala kasvoi yhteensä 4,70 kertaiseksi. Alapäädyn ulkoolhokkin virtauskanavien alojen suhde muuttui 0,98 kertaiseksi. Alapäädyn ulkoolhokkin virtauskanavien ala pieneni 2 %, mutta yläpäädyn ulkoolhokkin virtausalat kasvoivat 470 %. Avarempien virtauskanavien myötä myös kertavastuserroin on pienentynyt, jolloin kertavastushäviöt pienenevät.

4.6.1 Rakenteen valmistaminen ja pintakäsittely

Lopullisen rakenteen valitsemisen jälkeen kappale valmistettiin Ahmotuote Oy:llä Iisalmessa. Ahmotuote on erikoistunut voimansiirtokomponenttien ja koneenosien valmistukseen.

Komponentit valmistettiin DIN -standardin mukaisesta 21NiCrMo2 materiaalista. Kappaleet koneistettiin ensiksi haluttuun muotoonsa, jonka jälkeen ne lämpökäsiteltiin. Lämpökäsittelynä oli hiiletyskarkaisu. Hiiletyskarkaisun jälkeen kappale hiekkapuhallettiin mahdollisen hilseilyn takia. Hiekkapuhalluksen jälkeen kappale hiotaan lopullisiin mittoihinsa.

Hiiletyskarkaisussa kappaleen pintaan muodostuu kova kulutusta kestävä pinta, kun taas kappaleen sisus jää pehmeäksi ja sitkeäksi. Hiiletyskarkaistun kappaleen pintakerroksen paksuus on yleensä välillä 0,5 - 2 mm. Hiiletysessä kappaletta hehkutetaan hiiltä luovuttavassa ympäristössä. Hiiletyslämpötila on noin 920 °C. Kappale karkaistaan esimerkiksi öljyssä, jonka lämpötilan tulee olla alle 800 °C. Karkaisun jälkeen kappale päästetään 160 - 200°C. [8]

Kaikki kappaleet hiiletyskarkaistiin. Hiiletyskarkaisu tehtiin noin 915 °C. Pintakerroksen syvyydeksi tuli 0,6 - 0,8 mm hionnan jälkeen. Ennen hiontaa pintakerroksen syvyys oli 0,8 - 1,0 mm. Kappaleet sammutettiin, eli karkaistiin, kuumennettuun öljyyn. Kappaleen pintakovuudeksi tuli Rockwell asteikolla HRC 60+2.

4.6.2 Päätyvaimennus rakenteessa

Päätyvaimennuksella tarkoitetaan karan pysäytysliikkeen vaimennusta. Vaimennusta tarvitaan karan keston parantamiseksi, mutta ennen kaikkea melusaasteen vähentämiseksi. Junttan Oy:n yhtenä tuotekehityksen päämääränä on ympäristöystävällisyys.

Päätyvaimennuksen toteuttaminen luistiventtiilissä on toteutettavissa käytännössä vain yhdellä tavalla. Luistiventtiilin päätyvaimennus voidaan toteuttaa vaikeuttamalla karan ja ulkoolhokkien välistä poistuvan nesteiden kulkua. Käytännössä tämä tehdään lisäämällä olakkeet karan olakkeiden molemmille puolille sekä tekemällä ylimääräiset pesät näille ulkoolhokkeihin. Kuvassa 44 on esitetty yksi vaihtoehto päätyvaimennetusta karasta.

Päätyvaimennusta voi teoriassa tutkia yhtälön 14 avulla. Pienentämällä purkautumiskerrointa saadaan tilavuusvirran arvoa pienennettyä. Pienentämällä tilavuusvirran arvoa saadaan purkautuvan nesteen poistumisaikaa pidennettyä. Nesteen poistumisajan pidennyttä täytyy myös karan liikkeen hidastua, jolloin vaimennusta tapahtuu. Karan liikkeelle lähtö tällaisella vaimennustavalla tuottaa ongelmia, koska nesteen on hankalampi täyttää nestepesät liikkeelle lähtöä varten.

Syntyvän melutason ja vaimennuksen välinen numeerinen ennakointi on hankalaa, siksi melutasot pitäisi mitata käytännössä. Junttan Oy:llä on tehty vuonna 2005 päätyvaimennettuja karoja sekä sopivia ulkoholkkeja 5 kappaletta vuonna 2005. Mittaustulosten puuttuessa ei tässä opinnäytetyössä keskitytty päätyvaimennukseen.

5. TULOSTEN POHDINTAA

Simulointitulosten perusteella painehäviöt laskevat juntausventtiilin tankkiportissa. Painehäviöt laskevat alentuneen kertavastuskertoimen ja nesteen virtausnopeuden myötä. Painehäviöiden määrittäminen analyttisesti on epätarkkaa. Tämän vuoksi tulisi suorittaa mittauksia uudella rakenteella.

Tavoitteena oli, että painehäviöt ainakin puolittuisivat alkuperäisestä järkäleen noston aikana. Analogiana voidaan käyttää alapäädyn ulkoholkin virtauskanavia. Alapäädyn ulkoholkin virtauskanavien läpi kulkenut 700 l/min tilavuusvirta sai aikaan vain 0,7 bar painehäviön Tampereen teknillisen yliopiston tekemän tutkimusprojektin ja mittauksen mukaan. Yläpäädyn ulkoholkin virtauskanavat ovat nyt samansuuruiset, jolloin voitaisiin olettaa painehäviöiden putoavan samalle tasolle, kuin alapäädyn ulkoholkin virtauskanavassa.

Yhtälöä 29.c käyttämällä voitaisiin laskea painehäviö muuttuneessa tilanteessa. Tämä vaatisi mitattuja referenssiarvoja. Referenssiarvoiksi tarvittaisiin mitatut virtausnopeudet sekä painehäviöt uudessa ja vanhassa rakenteessa. Simulointiohjelmia voidaan käyttää myös painehäviöiden määrittämisessä.

Tulokset eivät rajoitu ainoastaan painehäviöön, mutta myös asennettavuuteen ja valmistukseen. Asennettavuuden kannalta juntausventtiilin karaa ei voi enää asentaa väärällä tavalla. Samalla kyseisen osan valmistettavuus paranee symmetrisyyden takia.

Todellisten tulosten saamiseksi tulisi suorittaa mittaukset halutuilla parametreilla. Tällöin voidaan todeta tuotteen toimivuus, toimintavarmuus ja painehäviön suuruus. Painehäviö vaikuttaa suoraan tehohäviöön. Tehohäviö muuttuu järjestelmässä ylimääräiseksi lämmöksi. Tehohäviön myötä paalutuskoneen iskutaajuus heikkenee.

Yläpäädyn ulkoholkin uudet virtauskanavat kasvattavat laitteen kokonaishyötysuhdetta, joten ylimääräiseen lämmittämiseen menee vähemmän tehoa. Uudella konstruktiolla päästään hyvin todennäköisesti jopa parempiin tuloksiin, kuin pelkästään painehäviön puolittamiseen. Varsinaiset tulokset saadaan, kun kappaleet valmistetaan ja niillä suoritetaan mittauksia.

Mittauksissa mitataan voimayksikön tuottamaa tilavuusvirtaa. Juntausventtiilissä mitataan kahden pisteen välistä paine-eroa. Mittaukset olisi voitu tehdä myös simulointimallilla, mutta tämä olisi vaatinut koko venttiilin rakenteen mallintamista Solidworks ohjelmistoon.

Virtauskanavien koot alapäädyn ulkoholissa pienenevät noin 2 %, mutta yläpäädyn ulkoholkin virtauskanavat kasvoivat 470 %. Tästä voidaan päätellä jo virtausten kulkevan helpommin vähemmällä pyörteilyllä. Tällöin painehäviöt ovat varmasti pienentyneet alkuperäisestä.

6. YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli järkäleen junttausventtiilin painehäviöiden pienentäminen. Painehäviöihin vaikuttavia asioita ovat nesteen virtausnopeus, kertavastuskertoimet, pinnankarheet, järjestelmän monimutkaisuus ja laajuus, virtaustyypit, virtausnesteet, järjestelmän tiiveys, välykset ja paineiskut.

Painehäviöihin vaikuttaa siis monta asiaa, joiden ennustaminen ja mittaaminen on vaikeaa. Tämän vuoksi virtaussimuloinneissa keskitytään niihin parametreihin, jotka vaikuttavat eniten painehäviön suuruuteen.

Virtausnopeutta alennettiin muuttamalla virtauskanavan kokoa. Kertavastushäviötä pienennettiin muuttamalla virtauskanavien lukumäärää ja muotoa. Kertavastushäviöt ja nesteen virtausnopeus ovat molemmat kytkettyjä toisiinsa ja painehäviöön. Jos molempia saadaan parannettua, pienenee painehäviö myös.

Muuttunut painehäviö voidaan todeta varmaksi mittauksin. Osavalmistumahdollisuuksien takia osien toimittaminen myöhästyi ja mittauksia ei ehditty suorittaa. Mittaustulokset piti sisällyttää työhön, mutta niiden uupuessa täytyi tyytyä simulointituloksiin. Simulointituloksia voidaan pitää luotettavina, sillä simuloinnit tehtiin ohjeiden mukaan, eikä kyse ole monimutkaisesta simuloinnista.

Liitteissä 1 - 3 on esitetty kappaleiden valmistuspiirustukset. Valmistuspiirustuksissa on tarkkoja toleransseja ja pinnanlaatuja. Millimetrin tuhannesosatarkkuuden valmistustoleranssit vaikuttavat suoranaisesti kappaleen valmistuskustannuksiin. Myös pinnanlaadun R_a arvo 0,4 kasvattaa kustannuksia. On kuitenkin perusteltua käyttää näitä arvoja, sillä venttiilikokoonpano on junttauskoneiston yksi tärkeimmistä kokoonpanoista.

Osia ei valmisteta sarjatuotantona suuria määriä vuodessa, joten tarkat toleranssit ja pinnanlaadut ovat perusteltuja. Myös laitteen toiminta vaatii näitä, sillä huonommilla toleransseilla ja pinnanlaaduilla painehäviöt kasvaisivat. Tavoitteena oli parempi hyötysuhde, tällöin toleranssien ja pinnanlaatuojen huonontaminen olisi tätä tavoitetta vastaan. Mittausten valmistuttua päätetään, laitetaanko komponentit tuotantoon eli otetaanko tuotekehitys käytäntöön.

Jatkumona tälle tuotekehitykselle on kesällä 2010 toteutettava päätyvaimennuksen kehitys. Päätyvaimennuksen ohella pohditaan myös venttiilille toista kokonaisvaltaista valmistusmenetelmää, jossa keskityttäisiin hyötysuhteeseen, valmistettavuuteen ja asennettavuuteen. Kesän 2010 tuotekehityksen tavoitteena on ympäristöystävällisyys, joka saavutetaan hyvällä päätyvaimennuksella.

LÄHTEET

- 1 Junttan Oy Internetsivut, www.junttan.fi 17.4.2010
- 2 H. Kauranne, J. Kajaste ja M. Vilenius. Hydrauliteknikka, WSOY, 1. painos, s.244, 2008.
- 3 H. Kauranne, J. Kajaste ja M. Vilenius. Hydrauliteknikan perusteet, WSOY, 3. painos, s.29 - 85, 1998.
- 4 Singiresu S. Rao. The Finite Element Method in Engineering, ELSEVIER, 4. painos, s.3 - 600, 2005.
- 5 K. T. Ulrich, S. T. Eppinger. Product Design and Development, McGraw-Hill, 4. painos, s.2 - 258, 2008.
- 6 J. E. Matsson. An Introduction to SolidWorks Flow Simulation 2009, SDC, kpl. 9, 2009.
- 7 Ajoneuvojen ja teollisuuden tuoteluettelo, 2004,
http://www.nestesiippoo.fi/uploads/files/Voiteluaine_tuoteluettelo_1.pdf 17.4.2010
- 8 K. Koivisto, E. Laitinen, M. Niinimäki, T. Tiainen, P. Tiilikka, J. Tuomikoski. Konetekniikan materiaalioppi, EDITA, 10.-11. painos, s.110, 2006.