



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
VASA YRKESHÖGSKOLA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Katri Mäkinen

3D- JA FEM-MALLINNUS

Tekniikka ja liikenne
2011

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty Vaasan ammattikorkeakoulun tekniikan ja liikenteen yksikön kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelman päättötyönä Wärtsilä Finland Oyj:lle. Olen aiemmin työskennellyt sylinterinkansien koneistuksessa, ja aihe opinnäytetyöhön löytyikin tätä kautta.

Opinnäytetyö toteutettiin Wärtsilän tuotekehitysosastolla, sylinterinkansien ja venttiilien kehitysryhmässä. Vaasan ammattikorkeakoulusta työtä ohjasi lehtori Timo Gröndahl ja Wärtsilässä Manager, Cylinder Head & Valve Mechanism, Sören Höstman.

Haluan kiittää opettajia ja Wärtsilän työntekijöitä, jotka ovat auttaneet tämän opinnäytetyön teossa.

Vaasassa 29.4.2011

Katri Mäkinen

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Katri Mäkinen
Opinnäytetyön nimi	3D- ja FEM-mallinnus
Vuosi	2011
Kieli	suomi
Sivumäärä	51 + 6 liitettä
Ohjaaja	Timo Gröndahl

Tämä opinnäytetyö on tehty Wärtsilä Finland Oyj:n tuotekehitysosastolle. Aiheena oli pakoputken kiinnityspään muotoilun parantaminen. Muotoilulla pyrittiin parantamaan pakoputken ja sylinterinkannen tiivistymistä.

Työn tavoitteena oli suunnitella ja laskea vähintään kaksi erilaista ratkaisua pakoputkesta. Tavoitteena oli löytää pakoputkelle parempi muoto, joka laajentuisi tasaisemmin. Tarkoituksena olisi saada pakoputki tiivistymään sylinterinkantta vasten lämpötilan vaihdellessa ja aiheuttaessa erilaisia muutoksia osiin.

Opinnäytetyön tekeminen alkoi tutustumalla pakoputkesta tehtyyn ensimmäiseen versioon sekä työhön liittyvään sylinterinkanteen. Pakoputkesta päätettiin mallintaa ja laskea kaksi erilaista vaihtoehtoa. Ensimmäiseksi vaihtoehdoksi valittiin ovaalin mallinen pakoputken kiinnityspää, jonka pitäisi jakaa paineet pakoputken kiinnityspäässä tasaisemmin koko alueelle. Toisena vaihtoehtona tutkittiin, kuinka holkki toimisi pakoputken jatkeena sylinterinkannen sisällä. Mallinnuksiin ja laskentoihin käytettiin NX-ohjelmistoa, jota yrityksessä ollaan ottamassa käyttöön.

Yhteenvetona voidaan todeta, että parhaaseen lopputulokseen pääsemiseksi olisi pakoputken kiinnityspää muotoiltava pyöreäksi. Tällöin lämpölaajeneminen ja tiivistyminen tapahtuvat tasaisesti koko pakoputken kiinnityspään alueella. Sylinterinkannen muotoilu asettaa rajoituksia, joiden takia pakoputken muotoa joudutaan rajoittamaan. Analysoiduista vaihtoehdoista parempi on ovaalinmallinen pakoputken pää, koska sen kuormitukset pysyvät paremmin sallituissa rajoissa. Holkki vaatisi välyksen, että sen voisi asentaa sylinterinkannen sisälle ilman kuormitusten nousemista liian korkeiksi. Tavoitteena olisi kuitenkin ollut asentaa se ahdistussoviteella, jolloin kuormitukset nousisivat liian korkeiksi.

Avainsanat	elementtimenetelmä, lämpölaajeneminen, 3D-mallinnus, tuotekehitys, pakoputki
------------	--

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

ABSTRACT

Author	Katri Mäkinen
Title	3D and FEM modelling
Year	2011
Language	Finnish
Pages	51 + 6 Appendices
Name of Supervisor	Timo Gröndahl

This thesis was made for Wärtsilä Finland Oy, Department of Research and Development. The subject was improving the design of the fastening end of exhaust pipe. By the design it was aspired to improve the sealing of the exhaust pipe and cylinder head.

The objective of the work was to design and calculate at least two different alternatives of the exhaust pipe. The objective was to find a better shape for the exhaust pipe, which would expand more evenly. The purpose was to get the exhaust pipe to become tighter against the cylinder head even with varying temperatures, causing different changes to parts.

The thesis started by getting familiar with the first version of the exhaust pipe and the cylinder head, which was also included in the work. It was decided to design and calculate two different alternatives of the exhaust pipe. As the first option was chosen an oval shaped fastening end of the exhaust pipe, which should divide pressures evenly to the whole fastening end area. As a second option it was investigated how a sleeve would work as an extension of the exhaust pipe inside the cylinder head. The NX-software was used for modelling and calculating, the program is going to be taken into use in the company.

As a conclusion it was found that to get the best result, the fastening end should be designed to be of a round shape. In that case thermal expansion and sealing are occurring evenly on the whole fastening end area. The design of the cylinder head sets restrictions which limit the design of the exhaust pipe. The better option of the ones analysed is an oval shaped exhaust pipe, because its loads stay better in the allowed limits. The sleeve requires a clearance so that it can be mounted inside the cylinder head without the rise of loads being too high. The objective would anyhow be to install it with an interference fit, when the loads would rise too high.

Keywords	Finite Element Method, Thermal Expansion, 3D-modelling, product development, exhaust pipe
----------	---

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KÄYTETYT TERMIT JA LYHENTEET

LIITELUETTELO

1	JOHDANTO	9
	1.1 Työn tavoitteet	9
	1.2 Työn eteneminen.....	10
2	WÄRTSILÄ	11
	2.1 Wärtsilän tuotteet	11
	2.2 Wärtsilä Suomessa ja maailmalla	11
3	TUOTESUUNNITTELU	13
	3.1 Tuotteen suunnittelu.....	13
	3.2 Tietokoneavusteinen suunnittelu	14
	3.3 Elementtimenetelmä tuotesuunnittelun tukena	15
4	FINITE ELEMENT METHOD.....	16
	4.1 FEM–analyysi	16
	4.2 Elementtimenetelmäanalyysin kulku	17
5	LÄMPÖLAAJENEMINEN	21
	5.1 Kiinteän aineen lämpölaajeneminen	21
	5.2 Lämpöjännitys.....	22
	5.3 Lämmön siirtyminen	22
6	SUUNNITTELUN LÄHTÖKOHTA	23
	6.1 Alkuperäinen malli.....	23
	6.2 Alkuperäisen mallin FEM.....	24
	6.2.1 Mallin verkotus ja idealisointi.....	25
	6.2.2 Reunaehdot.....	26
	6.2.3 FEM-analyysin tulokset	27
7	TUOTTEEN JATKOKEHITTELY	30
	7.1 Muodon parantaminen	30
	7.1.1 Ovaali	30

7.1.2	Holkki.....	33
8	FEM-ANALYYSIT.....	36
8.1	Mallien elementtiverkot ja materiaalit.....	36
8.2	Reunaehdot analyyseissä	37
8.3	Analyyssien tulokset.....	39
8.3.1	Ovaalin pakoputken FEM-laskennan tulokset	39
8.3.2	Holkillisen kokoonpanon FEM-laskennan tulokset.....	40
8.4	Välyksen optimointi pakoputken, holkin ja sylinterinkannen välillä	41
8.5	Yhteenveto analyyseistä.....	42
8.6	Analyyssien luotettavuus.....	43
9	KEHITELTÄVÄÄ	44
9.1	Muoto.....	44
9.2	Pakoputken kiinnityskulma ja -korkeus sylinterinkannessa	45
10	YHTEENVETO	48
	LÄHTEET.....	50
	LIITTEET	

KÄYTETYT TERMIT JA LYHENTEET

3D	Three-dimensional, kolmiulotteinen
Dual fuel- moottori	Moottori, jota voi ajaa dieselillä tai kaasulla
FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä
Kontakti	Sidos, jolla kappaleiden osat voidaan yhdistää seuraamaan toistensa liikettä ja muotoja analyysissä
Kontaktipinta	Kappaleen pinta, jolle kontakti on määritetty
Konvektio	Lämmön johtuminen, lämmön virtaus
Sovite	Tarkoituksellinen, haluttu ero kahden toisiinsa liittyvän osan välillä. Osien välinen mitta, jolla määritetään niiden liittyminen toisiinsa.

LIITELUETTELO

LIITE 1. Lämpötilojen jakautuminen alkuperäisen mallin kappaleissa.

LIITE 2. Kuormitusten jakautuminen alkuperäisessä pakoputkessa.

LIITE 3. Lämpötilan jakautuminen ovaalinmallisessa pakoputkessa.

LIITE 4. Kuormitusten jakautuminen ovaalinmallisessa pakoputkessa.

LIITE 5. Lämpötilojen jakautuminen holkissa.

LIITE 6. Kuormitusten jakautuminen holkissa.

1 JOHDANTO

Nykypäivän markkinakilpailussa pärjätäkseen jokaisen yrityksen on panostettava tuotekehittelyyn. Wärtsilä Finland Oyj panostaa jatkuvasti moottoreidensa kehittämiseen kilpailukykyisemmiksi, mikä vaatiikin satsaamista tuotekehittelyyn ja uusiin moottorimalleihin.

Wärtsilän tuotevalikoimaan kuuluu voimalaitos- ja laivamoottoreita, sekä kaksitahtisina että nelitahtisina. Wärtsilä valmistaa moottoreita, jotka saavat tehonsa joko kaasusta tai dieselistä, näiden lisäksi valmistetaan dual fuel -moottoreita, joita voidaan ajaa sekä kaasua että dieseliä polttoaineena käyttäen.

Opinnäytetyön tuote, pakoputki, on suunniteltu nelitahtiseen testimoottoriin, jossa on tarkoitus testata uuden sylinterinkansimallin toimivuutta. Työhön kuului pakoputken sylinterinkanteen kiinnittyvän pään muodon ja tiivistymisen kehittäminen. Työ toteutettiin käyttämällä NX-ohjelmiston mallinnus- ja lujuuslaskentatoimintoja.

Pakoputkesta tehtiin tarvittavat 3D-mallit ja FEM-laskennat, joiden perusteella sitä pystytään analysoimaan ja löytämään mahdolliset ongelmakohdat.

1.1 Työn tavoitteet

Työlle asetettiin tavoitteeksi suunnitella ja laskea vähintään kaksi erilaista ratkaisua pakoputken muodosta ja tiivistyksestä. Tavoitteena oli löytää muoto, jonka avulla pakoputki saataisiin tiiviisti yhdistettyä sylinterinkanteen myös lämpötilan vaihdellessa, ja aiheuttaessa erilaisia muutoksia osiin.

Lisäksi tarkoituksena oli löytää mahdolliset ongelmakohdat, joita on syytä parantaa, ennen kuin pakoputken ja sylinterinkannen välinen liitos on valmis tuotantoon. Tavoitteena oli myös löytää näille ongelmakohdille korvaavia ratkaisuja tai ehdotuksia, joiden avulla pakoputken ja sylinterinkannen muotoja voidaan jatkossa parantaa.

Sellaisenaan pakoputkea ei tulla ottamaan tuotantokäyttöön, vaan tavoitteena oli kartoittaa ne ongelmat, joita pakoputken sijoittelu, muoto ja asento tuovat ja kuinka ne pystyttäisiin jatkossa välttämään.

1.2 Työn eteneminen

Ennen kuin varsinaista työtä päästiin aloittamaan, täytyi valita ohjelmisto, jolla työ toteutettaisiin. Työ päätettiin toteuttaa NX-ohjelmistolla, jota ollaan yrityksessä ottamassa käyttöön.

Varsinainen työ lähtikin liikkeelle tutustumalla pakoputkesta tehtyyn ensimmäiseen versioon, samalla tutustuttiin myös sylinterinkanteen, johon pakoputki kiinnittyy. Näiden yhteenliittymisestä tehtiin ensimmäisenä uusi laskenta, josta saatiin selville mitkä kohdat ovat ongelmallisia. Tätä laskentaa käytettiin jatkossa vertailupohjana uusille malleille.

Varsinainen työ aloitettiin miettimällä eri vaihtoehtoja pakoputken uudeksi muotoiluksi. Tämän pohjalta päädyttiin mallintamaan kaksi erilaista versiota pakoputkesta, näiden mallinnusten perusteella tehtiin myös sylinterinkanteen tarvittavat muutokset.

Kun kappaleet oli mallinnettuna, suoritettiin niiden lujuuslaskennat, joilla osien muotoilun toimivuutta voitiin tarkastella. Näiden laskentojen perusteella optimoitiin vielä osien muotoja ja välyksiä, joita malleista löytyy kappaleiden elämisen varalle.

Näiden mallinnusten perusteella päätettiin, testataanko mallinnettuja osia vai tehdäänkö vielä jatkokehittelyä ja laitetaan kappaleet testiin vasta sitten. Lopuksi vielä mietittiin eri vaihtoehtoja pakoputken muodon optimoinnille, mitä voitaisiin lähteä vielä kehittelemään.

2 WÄRTSILÄ

Wärtsilä Finland Oyj on konepajateollisuuden alalla toimiva suomalaiset juuret omaava yritys. Se on maailman johtava yritys energian tuotannon koko elinkaaren ratkaisujen toimittaja meri- ja energiamarkkinoilla. Wärtsilä painottaa tuotteissaan teknologisia innovaatioita ja kokonaistehokkuutta, joiden avulla se pystyy tarjoamaan laiva- ja voimalaitosasiakkailleen ympäristöystävällisemmän ja taloudellisesti tehokkaamman ratkaisun.

2.1 Wärtsilän tuotteet

Wärtsilän tuotteisiin kuuluu erilaisia voimalaitosratkaisuja, joissa voidaan tuottaa sähköä tai lämpöä. Voimalaitoksiin Wärtsilä valmistaa moottoreita, jotka käyvät öljyllä, kaasulla tai molemmilla polttoaineilla. Lisäksi voimalaitossovelluksiin valmistetaan biopolttoaineilla käyviä moottoreita. Myös valmiiden voimalaitosten rakentaminen kuuluu Wärtsilän toimialaan, niinpä voimalaitoksen voi tilata jopa avaimet käteen periaatteella. /13/

Toinen iso toimiala Wärtsilällä on laivanmoottorien valmistus. Tuotevalikoimaan kuuluu myös laivojen voimansiirtojärjestelmät ja huoltopalvelut. 2010 valmistuneessa Allure of the Seas -laivassa, joka oli valmistuessaan maailman isoin risteilijä, on Wärtsilän moottorit. /10/ /12/

Kolmas ja tuottoisin toimiala Wärtsilälle on huolto- ja tukipalvelut, joka huoltaa moottoreita niiden koko elinkaaren ajan. Huolto palvelee asiakkaita moottoreiden asennuksen, huollon, käytön optimoinnin ja päivittämisen alalla. Wärtsilän huolto palvelee asiakkaitaan ympäri maailman olevissa toimipisteissään. /9/

2.2 Wärtsilä Suomessa ja maailmalla

Wärtsilä on perustettu 1834 Karjalassa Tohmajärven kunnassa. Se aloitti toimintansa sahana, mutta alkoi pian laajentua metallialalle yritysostojen kautta. Vaasan Wärtsilä saapui 1936, kun se hankki omistukseensa Onkilahden konepajan. /8/

Nykypäivänä Wärtsilällä on Suomessa toimintaa Vaasan lisäksi sekä Turussa että Helsingissä, jossa yhtiön pääkonttori sijaitsee. Vuoden 2010 lopulla Wärtsilän Suomen toimipisteissä työskenteli yhteensä 3 326 työntekijää. Suomen toimintojen lisäksi Wärtsilällä on toimintaa 160 eri toimipisteessä 70 maassa, ja näissä oli yhteensä 17 528 työntekijää vuoden 2010 lopulla. /14/ /15/

Vuonna 2010 Wärtsilän laivamoottoreiden suurimmat markkinat olivat Aasissa, jossa laivojen rakennusteollisuus kasvaa tällä hetkellä nopeimmin. Voimalaitosten markkinaosuudet ovat jakautuneet tasaisemmin ympäri maailman, samoin huollon. Aasian jälkeen Euroopassa ja Amerikoissa olevat markkinat jakautuvat lähes yhtä suuriin osiin. Pienimpänä markkina-alueena tulee Afrikka noin 10 % markkinaosuudella Wärtsilän markkinoista. /7/ /11/

3 TUOTESUUNNITTELU

Nykyaikana teollisuudessa tuotekehityksen laadulla on suuri merkitys, koska suunnittelu ja valmistus tapahtuvat usein eri puolilla maapalloa. Tuotesuunnittelu pitää sisällään nykyään paljon muutakin kuin piirustusten laatimisen, esimerkiksi yhä useammin valmistus tehdään suoraan 3D-mallia hyväksi käyttäen. /3/

3.1 Tuotteen suunnittelu

Tuotekehitysprosessin alussa muodostetaan tuoteidea, johon sisältyy paitsi liike-toimintaa varten tarvittava idea myös tuotteen toimintaan liittyvät periaatteet. Tästä alkaa varsinainen tuotesuunnitteluprosessi. /3/ /6/

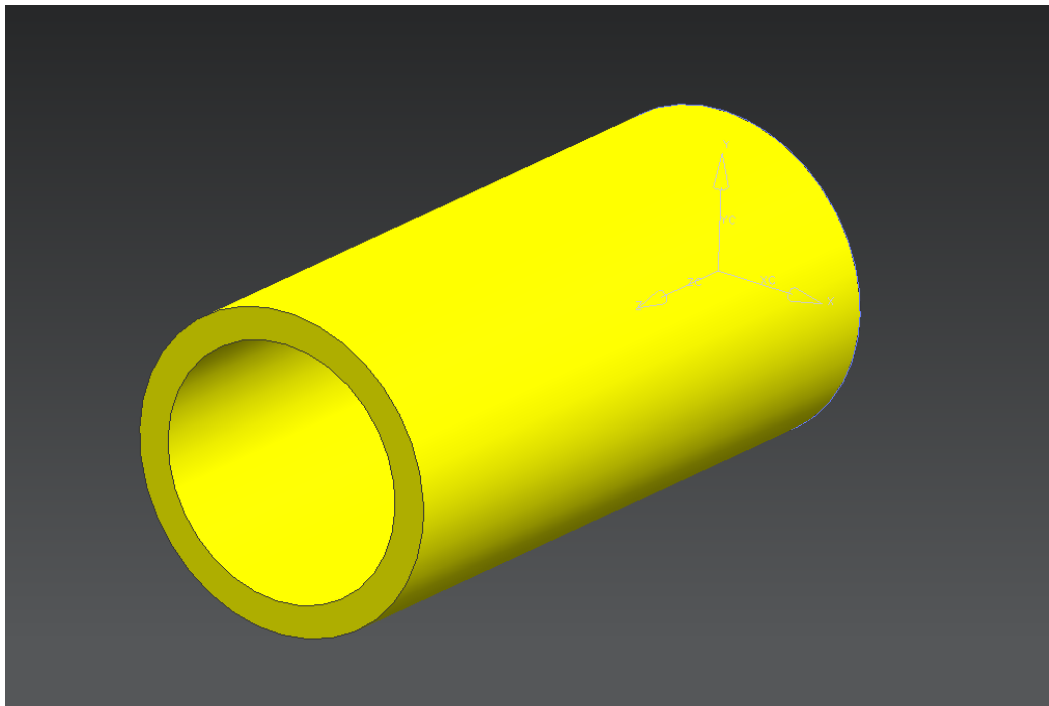
Tuotesuunnitteluprojekti on aina aloitettava analysoimalla ongelmia ja asettamalla suunnittelulle tavoitteita. Projektin alkuvaiheessa on oleellista kehitellä ratkaisuja ongelmiin, mutta myös arvioida näiden ratkaisujen laatua. Tuotteen suunnittelun lähtökohdaksi vaaditaan, että tuotteella on toimintaperiaate, potentiaalisia käyttäjiä ja valmistusmääristä sekä hinnasta jonkinlainen käsitys. /3/ /6/

Tuotesuunnittelussa on huomioitava useita asioita, sillä kuluttajalle tuote on ostettava hyödyke, jolla on jokin funktio, jonka takia se hankitaan. Suunnittelijalle sama tuote on teknis-fysikaalinen systeemi, joka pitää saada toimimaan luotettavasti ja tuotteelle luontevasti. Tuotantotalouden kannalta tuotetta tarkasteltaessa on varmistuttava siitä, että tuotanto- ja jakelukanavat toimivat luotettavasti, tehokkaasti ja taloudellisesti sekä teknisessä, psykologisessa että kulttuurisessa mielessä. Markkinointiosasto taas näkee tuotteen hyödykkeenä, joka lisää arvoa niin että ihmiset ovat valmiita ostamaan sen. /3/ /6/

Tuotesuunnittelu on muuttunut viimeisten vuosikymmenien aikana kun tuotteet ovat monipuolistuneet ja tietotekniikka on tullut suunnittelijoiden avuksi. Nykypäivänä tuotteet suunnitellaan useimmiten tiimeissä. Tuotteet ovat kehittyneet ja monimutkaistuneet niin paljon, että yksin ei kukaan pysty suunnittelemaan koko tuotetta ja tuotantoa, ainakaan vaadittavassa ajassa, joka yleensä on hyvin lyhyt johtuen markkinatalouden vaatimuksista. /3/

3.2 Tietokoneavusteinen suunnittelu

Tietokoneiden matemaattisia ja graafisia mallinnusominaisuuksia on käytetty tuotesuunnittelussa jo parin vuosikymmen ajan, mutta vasta viimeisen kymmenen vuoden aikana kehitys on mahdollistanut kolmiulotteisen suunnittelun. Viimeisen viiden vuoden sisällä on kolmiulotteinen mallintaminen tehostunut parametriseen mallinnukseen ansiosta (**Kuva 1.**) /3/



Kuva 1. NX-ohjelmistolla tuotettu putken 3D-malli.

Kolmiulotteinen mallintaminen on mahdollistanut sen, että valmistusvaiheessa käytetään hyväksi jo aiemmin luotua 3D-mallia, jonka pohjalta esimerkiksi koneistusohjelma voidaan luoda. Yksi tärkeimmistä sovellusominaisuuksista tietokoneavusteisessa suunnittelussa on tuotetiedonhallinta, jonka avulla voidaan hallita kaikkea tuotteeseen liittyvää materiaalia. /3/

3.3 Elementtimenetelmä tuotesuunnittelun tukena

Tietokoneiden laskentakapasiteetin kasvettua on viime aikoina yhä yleisemmin analysointivälineenä FEM (Finite Element Method) eli elementtimenetelmä. Menetelmästä on tullut riittävän yleinen, että sillä voidaan mallintaa lähes millainen kappale tai kokonaisuus, materiaaliominaisuus tai kuormitus tahansa. Menetelmän avulla voidaan tuottaa likimääräisratkaisuja lähes kaikilta insinööritieteen alueilta jännitysten laskennasta lämmönjohtavuuksiin. Vielä 60-luvulla jännitykset ja muodonmuutokset jouduttiin selvittämään kokeellisin menetelmin. Nykyään FEM on korvannut kokeelliset menetelmät ja ne ovatkin varsin harvinaisia. /3/

FEM-laskennan avulla pystytään jo tuotekehitysvaiheessa tarkastelemaan tuotteen rasituksia ja näiden tulosten avulla optimoimaan rakennetta. Tämä on tarpeen, koska turhan massiivinen rakenne voi olla yhtä suuri rasite rakenteelle kuin sen alimitoitus. Elementtimenetelmän käyttö tuotekehityksen tukena on lisääntynyt tietokoneiden myötä, koska analyysien teko on helpottunut ja nopeutunut. /2/

4 FINITE ELEMENT METHOD

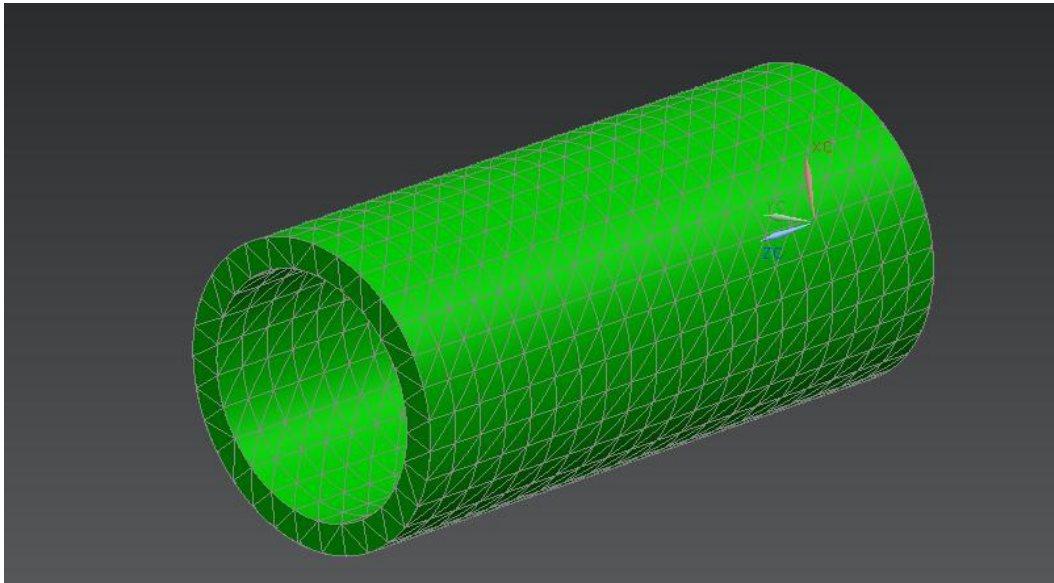
FEM on analyyttistä ja matemaattista tuotteen rasitusten tarkastelua. Sen avulla pyritään analysoimaan rakenteen kestävyyttä, kuinka jykevä rakenne tarvitaan, että se kestää sille tulevat rasitukset. /2/

4.1 FEM–analyysi

Elementtimenetelmässä rakenne kuvataan pieninä osina, elementteinä, jotka ovat kytkeytyneet toisiinsa solmupisteiden avulla. Elementtien muoto määritellään niitä luotaessa, mutta niiden kokoa muuttamalla pystytään mallintamaan lähes kaikenmuotoisia kappaleita. /2/

FEM-malli on ehkä helpompi ymmärtää, jos sitä ajattelee jousien yhdistämänä kokonaisuutena. Kun malliin vaikuttaa ulkoinen kuorma, sen kaikki elementit/jouset muuttavat muotoaan kunnes systeemi saavuttaa taas tasapainonsa. Rakenteen jokaiselle elementille voidaan laatia oma tasapainoyhtälönsä, jotka yhdistetään yhteensopivuusehtojen avulla solmupisteissä. /2/

Elementtimenetelmässä rakenne jaetaan pieniin osiin, jotka 3D-mallissa ovat usein yksinkertaisia särmiöelementtejä (**Kuva 2.**) Pienten elementtien muodostama elementtikokonaisuutta sanotaan myös elementtiverkoksi. Elementit yhdistyvät toisiinsa nurkkapisteidensä kautta, nurkkapisteitä voidaan kutsua myös solmupisteiksi. Laskennat saadaan ratkaistua laskemalla jännitysten ja venymien perusyhtälöiden avulla kunkin elementin siirtymä voimasysteemissä, johon voimat välittyvät naapurielementtien kautta. Vaikeutta laskentaan tuo se, että jokaiseen solmupisteeseen vaikuttavat rasitukset riippuvat muiden solmupisteiden rasituksesta. Elementtien voidaan ajatella olevan kuin jousia, jotka on yhdistetty toisiinsa muodostamaan systeemi, joka muuttaa muotoaan kunnes se on saavuttanut tasapainotilan. Tämän johdosta FEM-laskenta johtaa monimutkaiseen yhtälöryhmään, jonka ratkaisemiseen tarvitaan matriisilaskentaa ja tietokonetta, koska yhtälöitä voi olla kymmenistä moniin tuhansiin. /2/ /5/



Kuva 2. NX-ohjelmistolla tehty särmiöelementtinen elementtiverkkomalli.

Solmupisteiden siirtymät saadaan selville kun kuormitukset yhdistetään solmupisteiden koordinaattien ja materiaalin ominaisuuksien avulla muodostettavaan jäykkymatriisiin. Edelleen solmupisteiden siirtymien avulla saadaan selvitettyä kapaleeseen vaikuttavat jännitykset. Alun alkaen FEM-laskenta kehitettiin lineaaristen jännitysten ja muodonmuutosten laskentaan, mutta huomattiin, että samat periaatteet pätevät myös esimerkiksi värähtelymekaniikan, nesteiden dynamiikan ja lämmönjohtumisen laskentaan. /2/ /3/

4.2 Elementtimenetelmäanalyysin kulku

Elementtimenetelmäanalyysi voidaan jakaa seuraaviin vaiheisiin, joiden avulla mallinnetusta rakenteesta saadaan luotua elementtimalli, jota voidaan analysoida. Seuraavaksi kuvattavat vaiheet pätevät yleisesti kaikille elementtimenetelmäanalyysille.

Ennen varsinaisen analyysin aloittamista kannattaa analysoitava rakenne idealisoida, eli yksinkertaistaa niiltä kohdin, joilla ei ole niin suurta merkitystä analyysin kannalta. Idealisointi tarkoittaa käytännössä sitä, että etsitään rakenteesta symmetriatasoja, joiden avulla rakennetta voidaan yksinkertaistaa ja jättää niitä kohtia pois, joiden mallintaminen olisi vaikeaa, mutta analyysin kannalta niillä ei

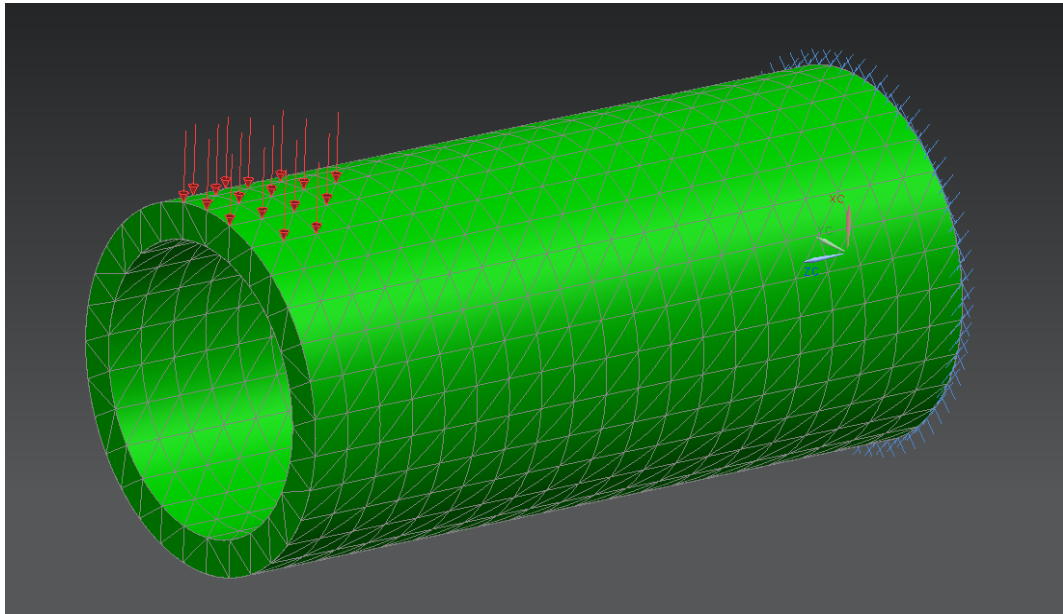
ole juurikaan merkitystä. Idealisoinnin tarkoituksena on rajoittaa analyysin tarvitsemää laskentakapasiteettia ja näin säästää aikaa laskennassa. /2/

Toisena vaiheena analyysin teossa on rakenteen verkottaminen. Ensimmäisenä on valittava elementtiverkon elementtien muoto, 3D-malleille käytetään yleensä tetran muotoisia elementtejä. Tulokset lasketaan yleensä elementin keskipisteeseen, jossakin ohjelmissa on mahdollista asettaa tulokset laskettavaksi myös muutamassa pisteessä elementin alueella. Tämän takia on elementtiverkkoa syytä tihentää sellaisissa kohdissa, joista halutaan tarkkoja tuloksia tai on odotettavissa, että tapahtuu suuria muutoksia rakenteessa. /2/

Analyysin reunaehdot, kiinnittymiset ja tuennat, muodostetaan kuvaamaan mahdollisimman tarkasti todellisia olosuhteita. Rakenne on tuettava analyysissä, jotta se ei pääsisi liikkumaan, kun siihen vaikuttavat kuormitukset. Reunaehdot määritellään kunkin solmupisteen kohdalle niin, että ne estävät sen solmun liikkumisen määriteltyn suuntaan. FEM-laskennassa saatuihin virheellisiin tuloksiin on yleensä syynä reunaehtojes vääärä tai puutteellinen määrittäminen, jo pieni ero todellisiin olosuhteisiin saattaa vaikuttaa suuresti laskennan lopputuloksiin. /2/

Elementtimalliin lisätään reunaehtojes jälkeen kuormitukset, jotka voidaan lisätä solmu-, viiva- tai pintakuormina, joko elementteihin tai solmupisteisiin. Analyysiin voidaan lisätä myös tilavuus- ja lämpökuormien vaikutuksia, tyypillisiä tilavuuskuormia ovat kiihtyvyyksistä tai omasta painosta tulevat rasitukset. Myös kuormien mallintamiseen on syytä kiinnittää huomiota, sillä ne ovat usein todellisuudessa niin monimutkaisia, että niiden mallintaminen ilman yksinkertaistusta ei onnistu. Lisäksi on määriteltävä materiaalin ominaisuudet ennen laskennan aloittamista, elementtimallin materiaalille on yleensä määriteltävä ainakin kimmokerroin ja Poisonin vakio, joiden avulla laskenta voidaan suorittaa. /2/

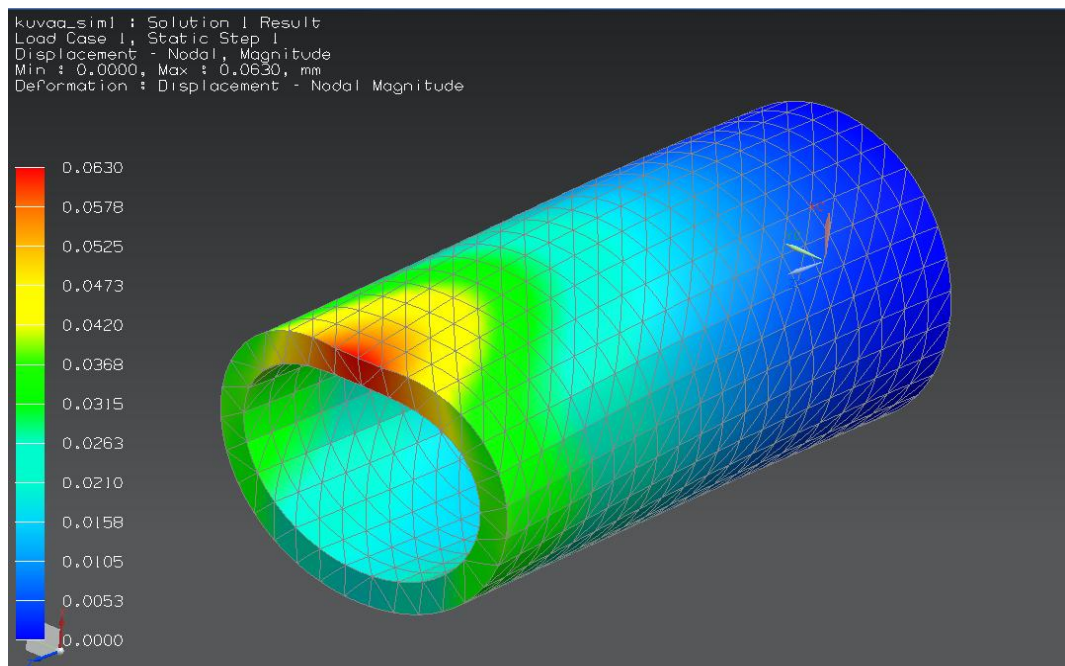
Kuvassa 3 on esitetty yksinkertainen valurautainen putkimalli, joka on verkotettu ja mallia kuormittamaan on määritetty 2000 N kokonaiskuorma 17 solmupisteeseen putken toiseen päädyn yläosaan. Malli on tuettu toisesta päästään kiinteällä tuennalla, joka sitoo kaikki kuusi vapausastetta paikoilleen.



Kuva 3. Kuormitukset on merkitty punaisina nuolina mallin vasempaan reunaan ja tuennat näkyvät putken toisessa päässä sinisinä.

Kun malliin on määritelty kaikki tarvittavat ehdot, se on valmis laskentaan, joka saattaa kestää sekunneista useisiin tunteihin, riippuen mallin koosta ja monimutkaisuudesta. Laskenta on yleensä luonteeltaan staattinen ja lineaarinen, mikä edellyttää, että jännitykset pysyvät materiaalin suhteellisuusrajan alapuolella, jolloin kimmokerroin on vakio ja kuormitukset ovat lepäviä. Tietokoneiden ja laskentaohjelmistojen kehitys on kuitenkin mahdollistanut sen, että yhä useammin analyysit ovat epälineaarisia. Tällöin kimmokerroin tai jokin muu osa mallista ei käytäyty lineaarisesti. Tämä mahdollistaa myös dynaamiset analyysit, joissa tarkastellaan vaihtelevien kuormien vaikutusta esimerkiksi rakenteen värähtelyyn. /2/

Laskennan tulokset käsitellään jälkikäsitteilyllä, joka muuntaa tulokset mallin pinnalta luettavaan muotoon (**Kuva 4.**) Huomiota kiinnitetään yleisimmin mallin muodonmuutoksiin ja jännityksiin. Muodonmuutokset esitetään solmupisteiden siirtymien avulla, jolloin voidaan erottaa siirtymät ja kiertymät eri akseleiden suhteen. Jännitykset lasketaan analyysissä elementti- tai solmupisteiden kautta, mutta tulokset tasoitetaan yleensä koko elementin alueelle kokonaiskuvan saamiseksi. FEM-analyysin tuloksia on kuitenkin aina tarkasteltava kriittisesti, sillä pienikin virhe reunaehdoissa tai kuormituksessa saattaa vaikuttaa suuresti tuloksiin. /2/ /5/



Kuva 4. NX-ohjelmiston jälkikäsittelijän tulostus mallin siirtymistä.

Jälkikäsittelijän tulostamassa kuvassa tummansininen kuvaa yleensä neutraalia tasoa kun taas punainen kuvaa suurimpia rasituksia. Näiden väliin sijoittuvia arvoja kuvataan sinisestä punaiseen liukuvilla väreillä, jotka muuttuvat yleensä arvojen mukaan lineaarisesti. Jälkikäsittelijän tulostus antaa oletusasetuksena mallin siirtymistä liioitellun kuvan. Jos haluaa mallista tarkan kuvan, on asetuksista muutettava kuva vastaamaan todellisuutta. /5/

5 LÄMPÖLAAJENEMINEN

Lämpölaajeneminen on tuttu kaikille, esimerkiksi lämpömittarin toiminnasta, lämpötilan noustessa mittarissa käytetyn aineen pinta kohoaa aineen laajentuessa lämmön vaikutuksesta. Lämpölaajeneminen onkin otettava huomioon useissa teknisissä ratkaisuissa, siltojen saumoihin on jätettävä elämisvarat, putkistoihin on tehtävä elämisen varalle mutkia, paisuntalenkkejä. /1/ /4/

5.1 Kiinteän aineen lämpölaajeneminen

Selitys lämpölaajenemiselle löytyy aineen molekyylien liikkeestä toisiinsa nähden. Atomien voidaan ajatella olevan kiinnittyneinä toisiinsa jousilla, joita on helppompi venyttää kuin puristaa. Atomit värähtelevät epäsymmetrisesti tasapainoasemastaan sen molemmille puolille. Lämpötilan noustessa kasvaa myös energia ja värähtelyn laajuus. Tästä johtuen värähtelylaajuus kasvaa ja atomien keskimääräinen välimatka kasvaa, jolloin kaikki pituudet kasvavat. /1/ /4/

Kappaleen lämmitessä kaikki sen ulottuvuudet laajenevat molekyylien liikkuesssa, myös kappaleen tilavuus ja pinta-ala laajenevat samalla tavoin kuin pituus. Tilavuuden muutos on verrannollinen lämpötilan muutokseen ja alkuperäiseen tilavuuteen. /1/ /4/

Lämpölaajenemista voidaan käyttää myös käänteisesti hyväksi, sillä lämpötilan laskiessa aine kutistuu. Tätä ominaisuutta käytetään hyväksi esimerkiksi asennettaessa laakeria akseliin. Akseli jäähdytetään nestemäisellä tyypellä $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilaan, jolloin laakeri saadaan asennettua kutistuneen akselin ympärille. Lämmitessään akseli laajenee ja laakeri asettuu tiukasti paikoilleen. /4/

5.2 Lämpöjännitys

Jos lämpölaajenemisiin ei varauduta, syntyy kappaleeseen lämpöjännityksiä, jotka voivat rikkoa rakenteen. Mikäli rakenne on tiukasti kiinnitetty, kun sen lämpötila laskee, syntyy silloin vetojännityksiä rakenteeseen, jotka ovat niin suuria, että ne pitävät rakenteen pituuden vakiona. Vastaavasti lämpötilan noustessa, rakenteeseen syntyy puristusjännityksiä, jotka pyrkivät pitämään rakenteen koon vakiona. /1/ /4/

Kappaleen sisälle voi syntyä lämpöjännityksiä myös siitä, että se lämpenee epätasaisesti, jolloin siihen saattaa tulla epätasaista laajenemista tai kutistumista. Esimerkki tällaisesta on kuumen veden kaataminen lasiastiaan, jolloin lasin pinta äkillisesti laajenee, koska lasi johtaa huonosti lämpöä, syntyy siihen suuria lämpötilaeroja. Myös jääkuution rikkoutuminen kuumaan veteen pudotettuna on seurausta samasta ilmiöstä, lämpöjännityksistä. /1/ /4/

5.3 Lämmön siirtyminen

Konvektio, kuljetus, on prosessi, jossa siirretään lämpöenergiaa paikasta toiseen virtaavan aineen mukana. Aineen lämmitessä sen tiheys pienenee lämpölaajenemisen seurauksena ja tästä johtuen neste tai kaasu pääsee nousemaan ylöspäin. Esimerkkinä konvektiosta voidaan käyttää asunnon lämmitystä vesikierto- ja ilmalämmitys, myös auton moottorin jäähtyminen tapahtuu konvektion avulla. /4/

Konvektio sanotaan olevan vapaata, luonnollista, silloin kun ainevirtaus tapahtuu tiheyserojen seurauksena. Monet luonnon ilmiöt, kuten tuulet ovat vapaan konvektion aiheuttamia ilmiöitä. Myös veden lämmittäminen kattilassa on yksi konvektion muoto, kun vesi lämmitessään nousee tiheyden pienentyessä ylöspäin ja kylmän veden virratessa tilalle kattilan alaosaan. /4/

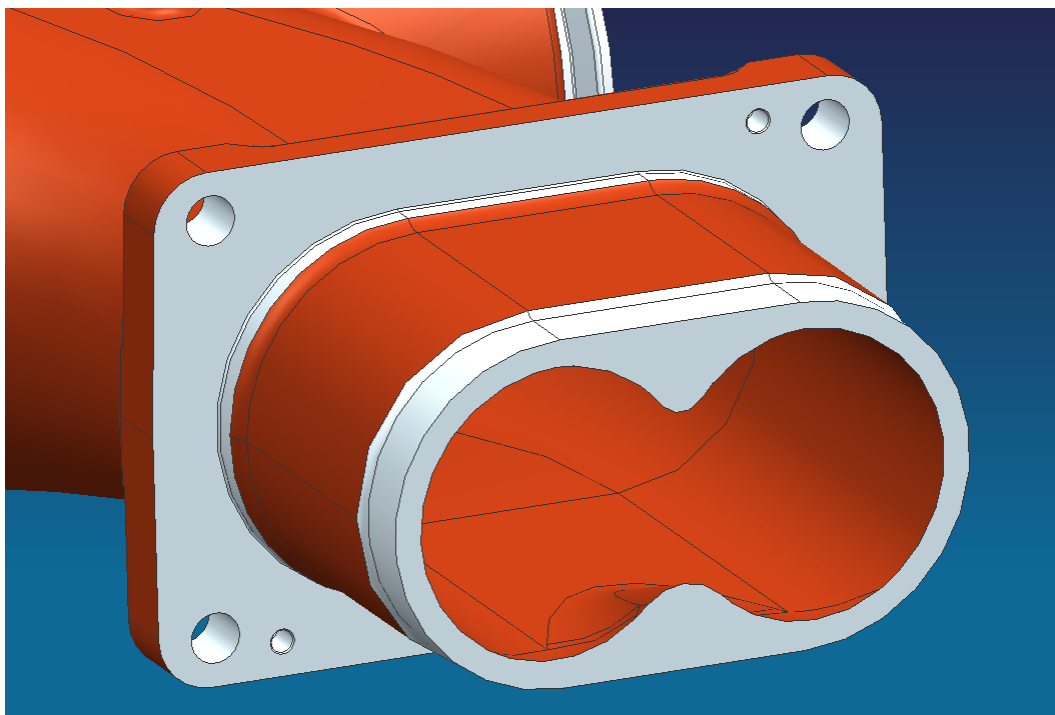
Konvektio voi olla myös pakotettua, silloin tarkoitetaan yleisesti koneellisesti aikaan saatua virtausta. Esimerkki tästä on rakennusten keskuslämmitys, jossa vedenkiertoa tehostetaan pumpulla. /4/

6 SUUNNITTELUN LÄHTÖKOHTA

Lähtökohtana opinnäytetyön toteutukseen oli uuteen sylinterikansi malliin suunnitellun pakoputken ensimmäinen versio. Kun opinnäytetyötä aloitettiin tekemään, ei ensimmäistäkään versiota pakoputkesta oltu vielä testattu moottorissa, mutta tiedettiin jo, että pakoputki vaatisi jatkokehittelyä muodon ja mahdollisesti tiivistämisen suhteen. Jatkokehittelyä vaatii nimenomaan pakoputken sylinterinkanteen kiinnittyvä osuus.

6.1 Alkuperäinen malli

Koska tuotteesta oli jo valmiina ensimmäinen versio (**Kuva 5.**) kun opinnäytetyötä ruvettiin tekemään, ei työtä tarvinnut aloittaa aivan nolatilanteesta. Tiedettiin kuitenkin, että tuotteessa olisi vielä parannettavaa, ennen kuin sen voisi ottaa tuotantokäyttöön.



Kuva 5. Alkuperäinen malli.

Alkuperäisen mallin heikkoutena on se, että siinä ei jakaudu pakoputken alkupäähän kohdistuva paine tasaisesti, vaan paine keskittyy kaareville reunoille. Koska

malli on muodoltaan sellainen, että paine ei jakaudu tasaisesti, ei se myöskään tiivistä kunnolla. Kappale ei myöskään laajene lämmössä riittävästi pituussuunnassa, eikä keskiosan suorilta pinnoilta, jolloin karstaa saattaa päästä muodostumaan putken ja sylinterinkannen väliseen tilaan.

Sylinterinkansi, johon kyseinen pakoputki on suunniteltu, on kokonaan uuden tyyppinen, eikä Wärtsilän tuotannossa ole ennestään vastaavaa mallia. Koska kyseessä on vasta testivaiheessa oleva sylinterinkansi, ei sen ominaisuuksista ole vielä testattua tietoa. Tämän vuoksi pakoputken lämpötiloihin tai kiinnitykseen ei ole kokemuspohjaista tietoa, koska ensimmäinen testiversio sylinterinkannesta valmistuu samoihin aikoihin kun tämä opinnäyteyö menee painoon.

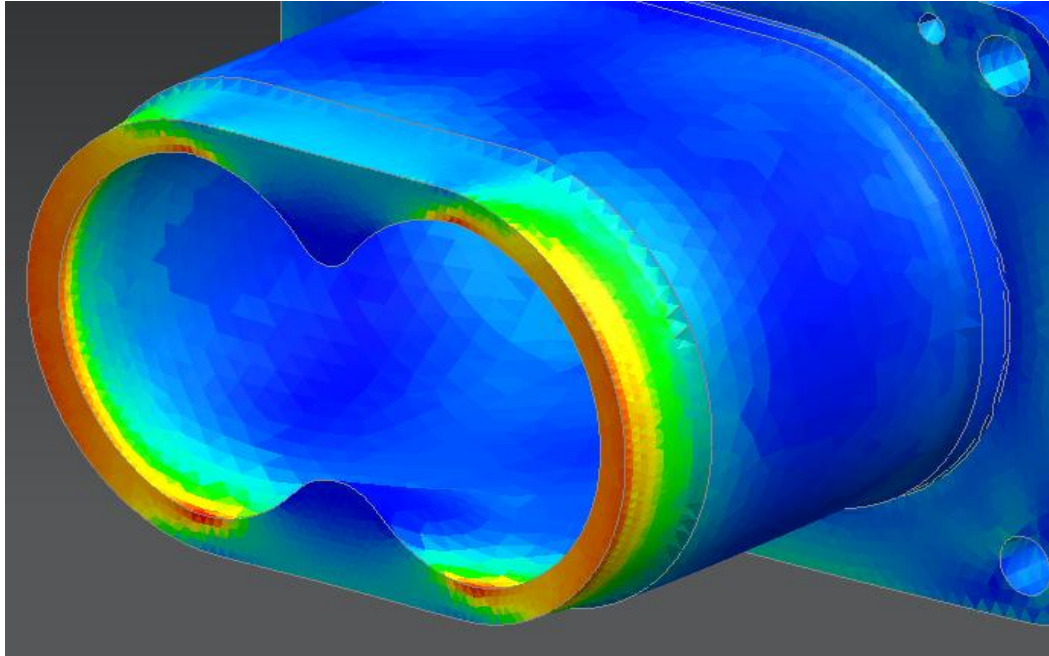
Pakoputki tulee kiinnittymään sylinterinkanteen kuvassa 5 näkyvästä laipastaan, ja laipan etupuolella oleva osa tulee olemaan sylinterinkannen sisällä. Tällä ratkaisulla pyritään vähentämään sylinterinkannen jäähdystarvetta ja saamaan pakokaasun lämpöenergia paremmin hyötykäyttöön, ja näin parantamaan moottorin tehokkuutta.

6.2 Alkuperäisen mallin FEM

Pakoputken ensimmäisestä versiosta oli tehty FEM-laskennat jo ennen kuin opinnäytetyön tekemistä aloitettiin. Mutta koska opinnäytetyössä päädyttiin käyttämään eri ohjelmistoa kuin aiemmissa laskennoissa, päätettiin laskennat tehdä vielä uudelleen ja varmistua näin, että saadut tulokset vastaavat aiempia.

Pakoputken ensimmäisen version elementtianalyysistä ilmenee, että se muodostaa pintapainetta kantta vastaan vain kaareville reunoilleen, joten se ei tiivistä kunnolla kuin näiltä kohdin. Kuvassa 6 näkyvät jännitykset, jotka tulevat pakoputkenpään ympärille, punaisena oleviin kohtiin kohdistuu suurimmat rasitukset, tummansinisiin kohtiin ei kohdistu jännityksiä lainkaan. Kuten kuvasta 6 ilmenee, jännityksiä muodostuu vain kaareville osille, kontaktipaineen aiheuttamat jännitykset tulevat samoihin kohtiin, mutta keskustan suoralle osalle ei painetta muodostu. Painetta tarvittaisiin kuitenkin tiivistämään pakoputken pää sylinterinkantta

vasten, niin että karsta tai pakokaasut eivät pääsisi vuotamaan sylinterinkannen ja pakoputken välistä.



Kuva 6. Kuvassa näkyy rasitusten jakautuminen pakoputken sylinterinkannen päässä.

6.2.1 Mallin verkotus ja idealisointi

Ennen elementtiverkon luomista sylinterinkannesta piilotettiin imupuolelta, joita-kin ruuvinreikiä, koska niillä ei ole vaikutusta työssä käsiteltävän osuuden laskentaan. Tällä saatiin mallin tiedostokokoa pienennettyä, jolloin myös analyysiaika lyhenee.

Pakoputkeen luotiin aluksi 10 mm särmiöelementtiverkko, jota lähdettiin tihentämään tarvittavilta kohdilta. Verkotusta lähdettiin tihentämään niiltä osin kuin pakoputki on kosketuksissa sylinterinkanteen. Verkkoa tihennettiin 3 mm elementteihin. Myös sylinterinkannen pakoputkea vastaan tulevien alueiden elementtiverkkoa tihennettiin, jolloin näiltäkin alueilta saadaan tarkempia tuloksia.

Sylinterinkannen elementtiverkko luotiin aluksi 20 mm jaolla, koska se oli ohjelman suositusarvo kyseiselle muodolle ja koolle. Tämän jälkeen verkkoa tihennettiin pakoputken kiinnityskohdasta, jolloin pakokanavan tuloksista saadaan tarkempaa tietoa, mutta imupuoli ei turhaan kuormita analyysia, tiedoilla joilla ei ole oleellista merkitystä analyysissä.

Molemmissa osissa käytettiin kolmiulotteista elementtiverkotusmallia, jolloin kappale luotiin tetranmallisilla elementeillä. Näin tulokset saadaan jokaisen tetranmallisen elementin alueelta keskiarvona, ja ne yhdistettäessä saadaan tulokset koko kappaleen alueelta luettavaan muotoon.

6.2.2 Reunaehdot

Ensimmäisen version analyysiin määriteltiin lämpötilat, jotka arvioitiin aiempien kokemusten perusteella ja lisäksi annettiin lämmönjohtumisen arvot. Sylinterinkannen lämpötilaksi määritettiin 200 °C ja pakoputken 500 °C, koska kokemuksesta tiedettiin näiden olevan osien lämpötilat moottorin käydessä ja lämpötilaeron olevan noin 300 °C. Pakoputken ja sylinterinkannen ulkopinnoille annettiin lämmönjohtumisen arvoksi $100 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, jolla kaasu pakotettuna johtuu materiaalin läpi ympäröivään, arviolta noin 80 °C, ilmaan. Sylinterinkannen sisään tulevan pakoputken osan ympärille arvioitiin konvektioksi $40 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, ympäröivän ilman ollessa 200 °C. Kun lämpötilat ja konvektiot oli asetettu, niin määritettiin kappaleiden välille sidoksia, kontakteja, joiden avulla lämmöt saatiin johtumaan kappaleesta toiseen. Kun lämmöt oli saatu laskettua, lisättiin ne mukaan kuormitusten laskentaan, jolloin saatiin tuloksiin lämpöjännitysten ja -kuormitusten aiheuttamat jännitykset ja siirtymät selville.

Konvektioiden määrittämisessä käytettiin apuna NX-ohjelmiston opastus-sivuja, joilta löytyi esimerkki pakosarjan konvektioiden ja lämpötilojen määrittämiseen. Lämpötilojen ja konvektioiden määrittäminen perustui hyvin pitkältä arviointiin vanhojen mallien perusteella, koska kyseisestä mallista ei mitattuja lämpötila tuloksia vielä ole saatavilla.

Pakoputki kiinnittyy ruuviliitoksella sylinterinkanteen, joten tätä jäljittelemään asetettiin pakoputken laipassa oleviin ruuvinreikiin, sitä sylinterinkantta kohti työntävät voimat. Nämä voimat määritettiin suuruudeltaan samanarvoisiksi, kuin pakoputken vaatima kiinnitysvoima sylinterinkanteen tulee olemaan. Kyseiset voimat kuitenkin sallivat pakoputken elämisen kuin ruuviliitoksessa, jossa laipan reiät ovat ruuvin halkaisijaa suuremmat. Lisäksi kappaleiden välille asetettiin kontaktisidoksia, joilla kappaleiden liikkuminen toistensa suhteen saatiin simuloitua.

Kappaleidenvälisten kontaktisidosten avulla saatiin tutkittua kontaktien aiheuttamien paineiden jännityksiä ja vaikutuksia osiin. Ensimmäinen kontakti asetettiin pakoputken pään ja sylinterinkannessa olevan kolon pohjaan, minkä avulla saatiin asetettua näiden välissä olevan tilan supistuminen ja välin katoamisen aiheuttama kontaktipaine. Lisäksi kontakteja asetettiin sylinterinkannen ja pakoputken laipan, pakoputken pään ja sen reunojen sekä laipan sisäpuolelle jäävien reunojen välille.

Sylinterinkansi tuettiin palopinnaltaan yksinkertaisella tuennalla, joka sitoo vain kyseisen tason pystysuuntaisen liikkeen paikoilleen. Lisäksi määritettiin sylinterinkannen palopinnan ulkoreunalle sylinterimäinen tuenta, joka sallii aksiaalisen ja radiaalisen kasvun, mutta kiinnittää akselinsuuntaisen pyörimisen. Näillä tuenoilla sylinterinkansi saatiin paikoitettua paikalleen, mutta ei rajoitettu laajenemista muuta kuin tapahtumaan palopinnasta ylöspäin.

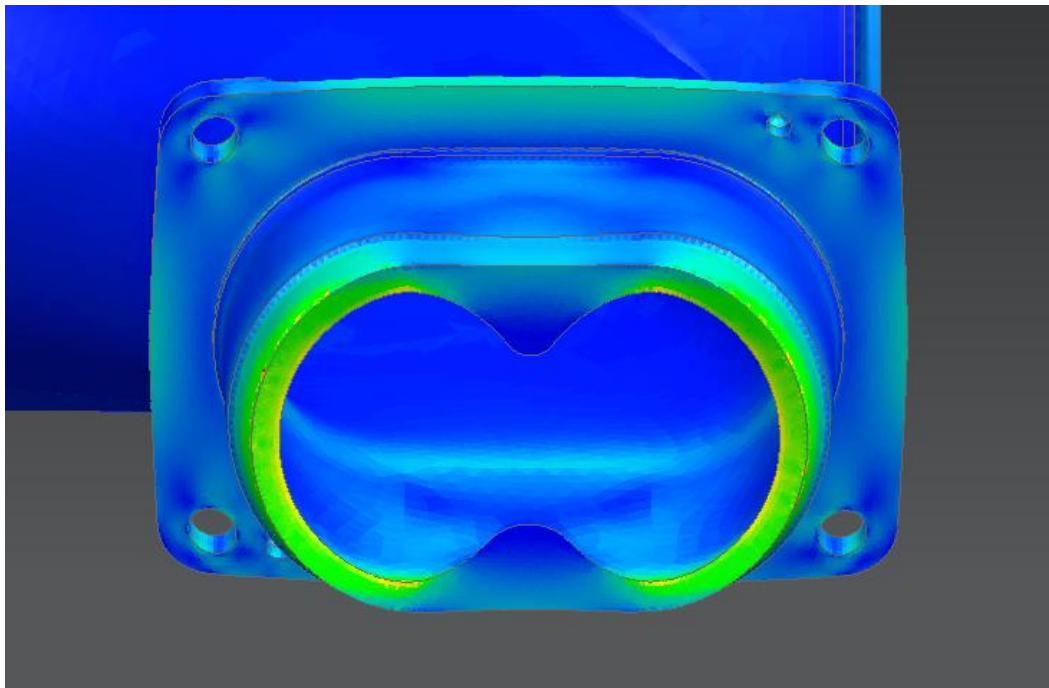
6.2.3 FEM-analyysin tulokset

FEM-laskenta suoritettiin kahdessa osassa, ensin laskettiin kappaleille tulevat lämpökuormitukset. Tämän jälkeen päästiin laskemaan varsinaisia jännityksiä kappaleille. Tähän toiseen osaan lämpökuormitukset lisättiin mukaan esikuormituksina.

Kappaleiden väliseksi lämpötilaeroksi arvioitiin kokemusten perusteella 300 °C, koska lämpötilat määriteltiin tämän pohjalta, myös tulokseksi saatiin sama 300 asteen ero. Pakoputken lämpötilaksi arvioitiin noin 500 celsiusastetta ja sylinterinkannen noin 200 astetta. Sylinterinkannen todelliset lämpötilat tulevat palopinnalla olemaan paljon korkeammat, mutta tähän simulointiin asetettiin sylinterin-

kannen pakokanavaan lämpötilaksi 200 celsiusastetta. Se tulee todennäköisesti olemaan todellinen lämpötila pakoputken kiinnityskohdan ympäristössä jäähtymisen seurauksena. Liitteessä yksi on esitetty lämpötilojen jakautuminen kappaleissa.

Analysoitaessa alkuperäisen mallin FEM-laskentoja, löytyivät suurimmat jännitykset sekä sylinterinkannessa että pakoputkessa kaarevilta päätyreunoilta. Näille alueille kerääntyi suhteellisen tasaisesti kaikki jännitys ja paine kappaleiden välisistä kontakteista. Pakoputken pään keskiosan suoralle pinnalle ei kontaktista painetta kerry, mutta jännityksiä jonkin verran (**Kuva 8.**)



Kuva 8. Kuvassa pakoputken laskennan tulokset liioiteltuina, antaa suuntaan miten laajeneminen osassa tapahtuu.

Kontaktipaine pakoputken kaarevilla reunoilla pyörii noin 300 MPa:in paikkeilla, mutta paikallisesti paineet voivat nousta kuitenkin korkeammiksi, tämä johtuu laskennan epätarkkuudesta ja verkotuselementtien aiheuttamista jännityksistä. Jännitykset pakoputken kaarevilla reunoilla vaihtelee 200–260 MPa:in välillä. Materiaalin myötöraja on 500 °C:ssa 270 MPa:ia, joten kappaleen pitäisi nämä jännitykset kestää, vaikkakin paikallisesti jännitykset nousevat hieman korkeam-

miksi. Kappaleiden laajentuessa pakoputken pään ja sylinterinkannen väliin jää muutaman millimetrin sadasosan rako, mutta se on riittävän iso, jotta painetta ei pääse syntymään näiden kohtien välille.

Kappale laajenee enemmän leveyssuunnassa kuin pituussuunnassa. Tästä johtuen pakoputken pään ja sylinterinkannen välissä oleva tila ei supistu kokonaan pois vaan väliin jää tilaa, johon karsta ja pakokaasut pääsevät vaikuttamaan. Laajeneminen pituussuunnassa pysähtyy kun pakoputken reunat ottavat sylinterinkannen reunoihin kiinni, mutta se jatkaa laajenemistaan leveyssuuntaan, jolloin se alkaa pullottaa reunan yläpuolelta.

Liitteessä kaksi on kuvin esitetty kuormitusten jakautuminen ja voimakkuus kappaleiden pinnalla. Liitteen kuvissa on esitetty pakoputki alkuperäisillä mitoilla ja välyksillä, reunan välyksenä on 0,15 mm joka reunalla, yhteensä 0,3 mm suuntaansa ja pituussuuntaisena välyksenä oli 0,6 mm.

7 TUOTTEEN JATKOKEHITTELY

Tuotteen jatkokehittely aloitettiin optimaalisemman muodon hakemisella, muuttamalla tuotteen rasituksenalaisen päädyn muotoilua paremmin painetta jakavaksi. Samalla pohdittiin muita vaihtoehtoja pakoputken ja sylinterinkannen yhdistämiseen, ja tutkittiin millaisia ongelmakohtia näistä löytyy, mitkä täytyy ottaa huomioon myöhemmin suunnittelussa.

7.1 Muodon parantaminen

Muotoilun parantamista lähdettiin selvittämään mallintamalla ja simuloimalla. Tutkittiin, kuinka pakoputken pään muotoa muuttamalla voidaan parantaa tiivistymistä sylinterinkantta vasten. Ensimmäisenä vaihtoehtona tutkittiin kuinka hyvin paine jakautuisi, jos pakoputken pää muutettaisiin ovaalin muotoiseksi. Toisena vaihtoehtona kokeiltiin, kuinka holkki toimisi pakoputken jatkeena sylinterinkannen sisällä.

Yhtenä vaihtoehtona kokeiltiin myös pakoputken pään muodon muuttamista muistuttamaan kahdeksikkoo, mutta tämä vaihtoehto hylättiin melko aikaisessa vaiheessa. Kyseinen vaihtoehto olisi vaatinut pakoputken pään jakamista kahteen osaan, jotta olisi päästy toivottuun lopputulokseen, se taas ei sopinut yhteen pakoputkelle asetettujen vaatimusten kanssa. Jos pakoputki olisi päästään kahteen osaan jaettu, syntyisi jakokohtaan suuria jännityksiä sekä lämpökuormituksia ja koska tavoitteena oli alentaa sylinterinkannen jäähdytystarvetta, tämä vaihtoehto ei siihen sopisi.

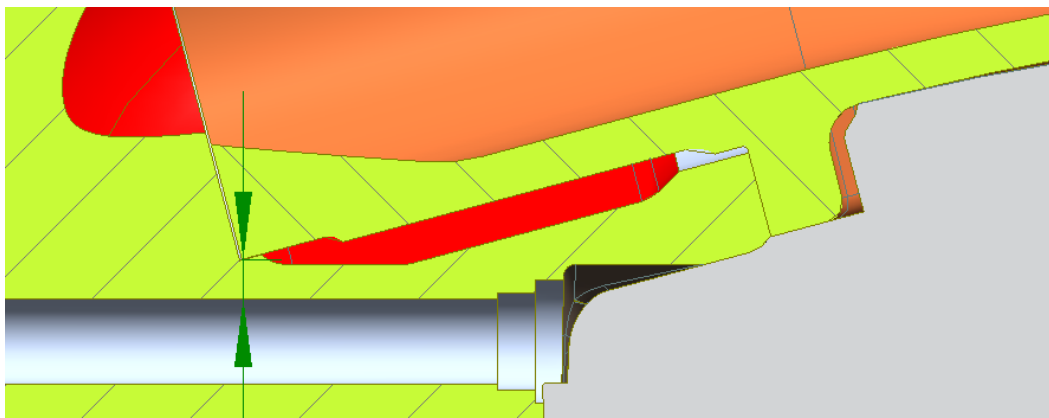
7.1.1 Ovaali

Ensimmäisenä vaihtoehtona oli mallintaa pakoputken pää ovaalin muotoisena, millä pyrittiin löytämään parempi muotoilu pakoputkelle. Ovaalinmuodon tarkoituksena olisi jakaa paine tasaisemmin koko pakoputken pään alueelle.

Pakoputken muokkaus aloitettiin mallintamalla se kokonaan uudelleen NX-ohjelmistossa, koska alkuperäinen malli oli tehty I-deas-ohjelmistolla. Kopioitaessa kappaletta ohjelmistosta toiseen, sen mallinnushistoria ei seurannut mukana,

joten sen muokkaaminen olisi vaikeaa. Tästä johtuen koko pakoputki mallinnettiin uudelleen NX-ohjelmistossa, ja näin päästiin tekemään myös putken päähän tarvittavia muutoksia.

Sylinterinkannenrakenne kuitenkin rajoittaa pakoputken muodon muokkaamista, koska vesikanavat sekä ohjurit, venttiilit ja pakokanavan muotoilu asettavat omat haasteensa toiminnallaan ja muotoilullaan. Sylinterinkannessa suurimmat rajoitukset pakoputken muodon muuttamiselle asettaa jäähdytysvesikanava, joka kulkee suoraan pakoputken alapuolella (**Kuva 9.**)

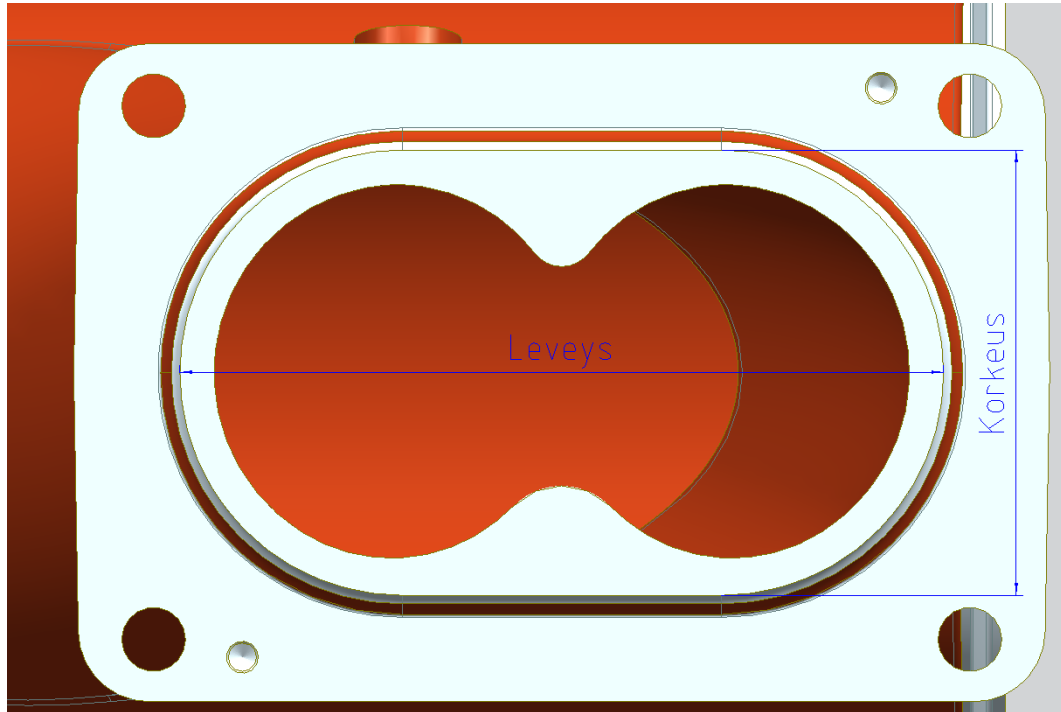


Kuva 9. Vesikanavan ja pakoputken välinen rako.

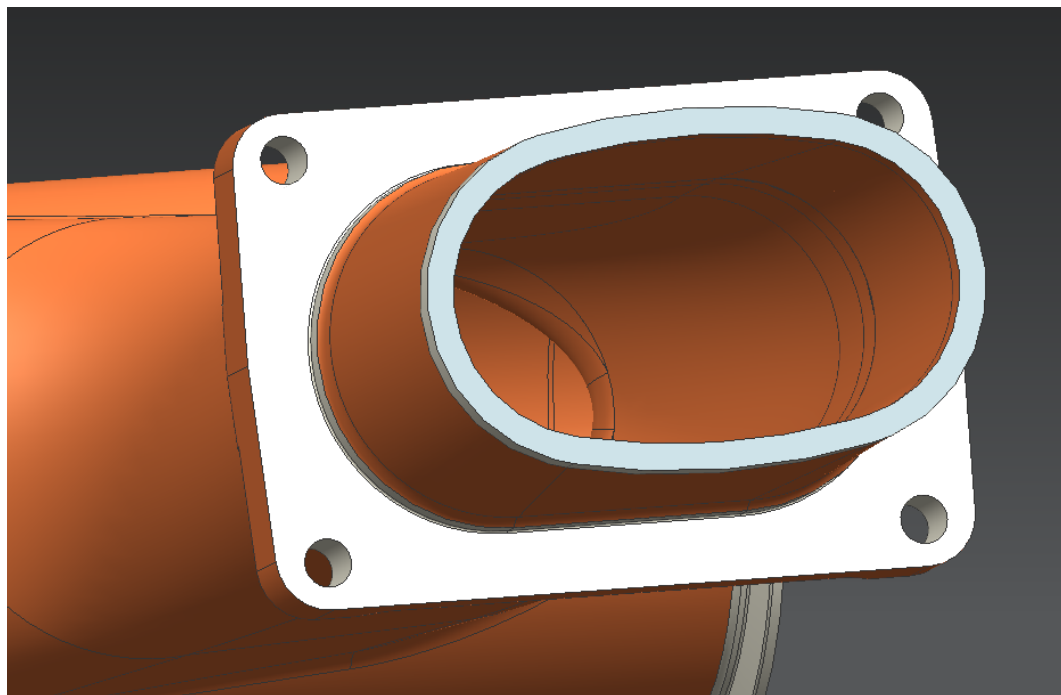
Pakoputken laajenemisen ja siten tiivistymisen kannalta paras vaihtoehto olisi pyöreäpakoputki, mutta se ei onnistu ilman suuria muutoksia sylinterinkannessa. Tästä johtuen tavoitteena oli suunnitella mahdollisimman pyöreä pakoputken pää, mutta sylinterinkannen asettamien rajoitteiden takia siitä päätettiin kuitenkin tehdä ovaalinmallinen.

Alkuperäisessä mallissa pakoputken pään korkeus on 125 mm, tätä mitta muokkaamalla lähdettiin mallia muuttamaan pyöreämmäksi (**Kuva 10.**) Aluksi päädyttiin 10 mm muutokseen pakoputken pään korkeuden suhteen, leveyden pysyessä muuttumattomana (**Kuva 11.**) Tämä 10 mm muutos voidaan toteuttaa todennäköisesti ilman muita muutoksia, koska väli alapuolen vesikanavaan säilyy 6 mm kokoisena, jolloin se saattaa vielä kestää sille tulevat rasitukset. Alkuperäisessä mal-

lissa tämä väli on 10 mm, mutta välin vaatimaa ainevahvuutta on vaikea arvioida ilman tarkkaa lujuuslaskentaa.



Kuva 10. Pakoputken pään korkeus- ja leveys suunnat, joihin tekstissä viitataan.

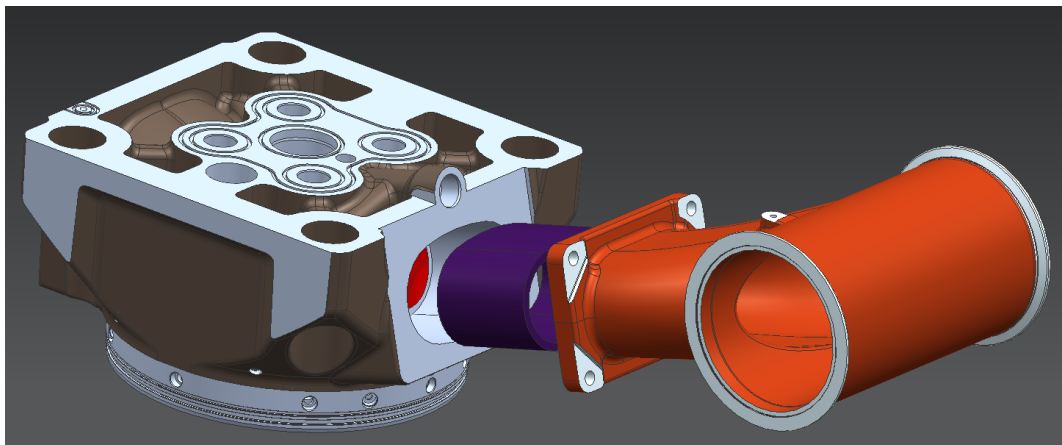


Kuva 11. Ovaali pakoputki.

Pakoputken laajenemisen ja tiivistymisen kannalta jo 15 mm korkeuden muutoksella ovaalimpaan suuntaan, saataisiin parempi lopputulos. Silloin rako alapuolella olevaan vesikanavaan kutistuu 3 mm, jolloin se on todennäköisesti liian kapea kestääkseen sille tulevia rasituksia. Jos sylinterinkannen pakokanavan pohjaa korottaa 2 mm, on vaikutus kyseisen raon kohdalla noin puolen millimetrin luokkaa, joten sekään ei tässä tapauksessa auta riittävästi. Pohjaa täytyisi korottaa noin 18 mm, jotta rako vesikanavaan saataisiin säilymään alkuperäisissä mitoissaan. Pakokanavassa kaasujen virtausmatka kuitenkin pitenisi ja lämpötilat sylinterinkannessa lähtisivät nousemaan, mitä pyritään kuitenkin välttämään, koska pakoputken muotoilun tavoitteena on saada sylinterinkannen jäähdytystarvetta vähennettyä.

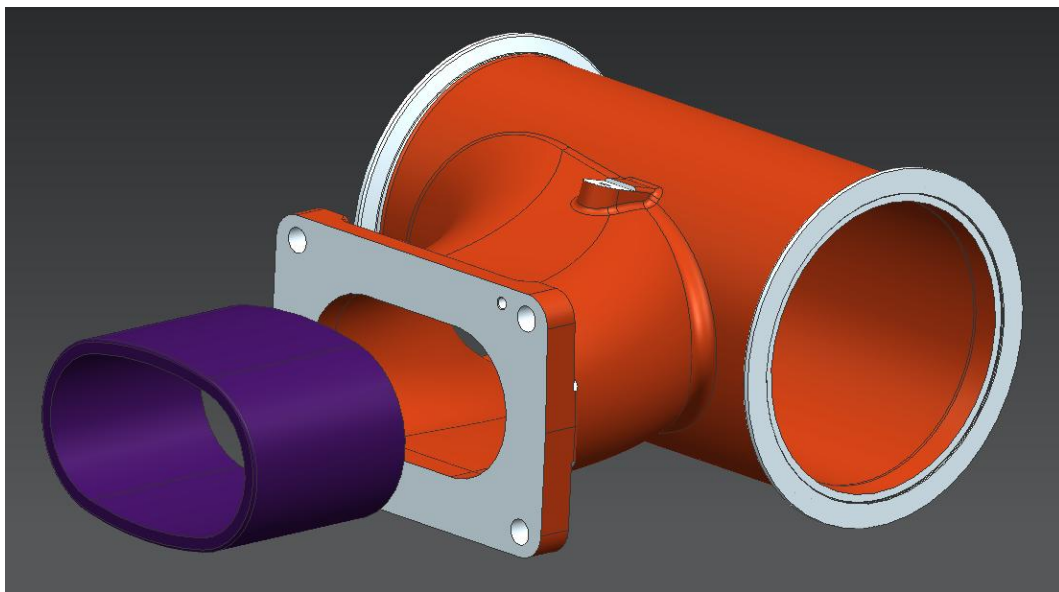
7.1.2 Holkki

Toisena vaihtoehtona päätettiin kokeilla, kuinka holkki toimisi pakoputken jatkeena (**Kuva 12.**) Holkki asennettaisiin sylinterinkannen sisään niin, että se olisi asennettuna tiukasti paikoillaan, mutta sen kuuluisi kuitenkin kestää lämpölaajenemisesta tulevat rasitukset. Tämä asettaa vaatimuksia myös holkin materiaalille, jonka tulee kestää nämä kuormitukset. Mallinnettaessa holkkia on sille valittava sopiva sovite, jolla se tullaan asentamaan sylinterinkanteen.



Kuva 12. Räjätyskuva holkillisesta kokoonpanosta.

Pakoputken mallinnus aloitettiin kopioimalla alkuperäinen pakoputki, mutta siitä leikattiin pois laipasta eteenpäin sylinterinkannen sisään tuleva osa. Tämän osan tilalle mallinnettiin holkki, jonka tarkoituksena on toimia pakoputken jatkeena. Pakoputkesta jäljelle jäävä osa muodostaa uuden putken, joka kiinnittyy laipasaan sylinterinkanteen (**Kuva 13.**) Holkki asennetaan sylinterinkannen sisälle siten, että se on tiiviisti paikoillaan, ja pituussuuntaiselle laajenemiselle jätetään tilaa sylinterinkannen ja pakoputken väliin.



Kuva 13. Pakoputki ja holkki.

Holkki mallinnettiin käyttäen hyväksi sylinterinkannen ja pakoputken muotoiluja, näistä kopioitiin mitat ja muodot siihen. Kopioimalla käytetyt mitat ja muodot saadaan pakoputken sekä sylinterinkannen geometria toistettua holkissa, joka näin mallinnettuna on varmasti samanlainen kuin sille suunniteltu tilakin. Geometrian kopioimisen etuna on, että näin holkin geometria saadaan seuraamaan sylinterinkannen ja pakoputken muotoja, ja niitä muutettaessa muutokset tapahtuvat myös holkissa.

Tiivistymisen kannalta ajateltuna olisi holkista tehtävä mahdollisimman pyöreä, mutta sylinterinkannen muotoilu asettaa tiettyjä rajoituksia muodolle. Holkin suunnittelussa on otettava huomioon samat asiat kuin ovaalia pakoputkea hahmoteltaessa. Sylinterinkannessa ei ole tilaa täysin pyöreälle holkille ilman muutoksia,

koska alapuolella oleva vesikanava rajoittaa laajentamismahdollisuuksia. Sylinterinkannen asettamien rajoitusten vuoksi myös holkista tehtiin ovaalin muotoinen, sen korkeudeksi määritettiin sama kuin ovaalille pakoputkellekin. Muuttamalla pakoputken ja holkin asennuskulmaa ja nostamalla niitä ylöspäin sylinterinkannessa, saataisiin tarvittavaa lisätilaa, jolloin laajemmat muutokset pakoputkessa olisivat mahdollisia.

Holkin materiaalia valittaessa, on huomioitava sille tulevat kuormitukset ja lämpökuormat. Holkki tulee olemaan noin 500 °C lämpötilassa moottorin käydessä, joten sen kuormitukset tulevat olemaan suuria, mikä asettaa materiaalille tiettyjä vaatimuksia. Materiaalin pitää kestää korkeita lämpötiloja ja sen lujuus ominaisuuksien pitää kestää lämpölaajenemisesta ja kontaktipaineista tulevat rasitukset.

8 FEM-ANALYYSIT

FEM-analyysejä käytettiin hyödyksi tuotesuunnittelun alusta alkaen, näin pystyttiin vertailemaan eri ratkaisujen vaikutuksia. Analyysien avulla pyrittiin selvittämään millaisia rasituksia kappaleisiin kohdistuu ja miten niiden vaikutuksia voitaisiin rajoittaa sallittuihin arvoihin.

8.1 Mallien elementtiverkot ja materiaalit

Molemmissa malleissa sylinterinkannelle luotiin ensin 20 mm elementtiverkko, jota sitten lähdettiin tihentämään tarvittavilta kohdilta. Elementtiverkkoa tihennettiin niiltä alueilta, joilla se on kosketuksissa muiden kappaleiden kanssa. Verkko tihennettiin 5 mm elementtikokoon tiivistepinnalla, tällä tavoin tulokset saadaan tarvittavalla tarkkuudella. Sylinterinkannen sisään jäävän osan alueelta elementtiverkko tihennettiin 2 mm, niiltä osin kun reunat ovat kosketuksissa pakoputkeen. Niiden sylinterinkannen sisällä olevien kylkien osalta, jotka eivät ole suorassa kosketuksessa pakoputken kanssa, määritettiin verkko 5 mm elementtikokoon, jolloin elementeistä on luettavissa selkeästi kuinka rasitukset jakautuvat kappaleissa.

Pakoputken molemmille malleille luotiin aluksi 20 mm elementtiverkko, joka on samanlainen kaikissa malleissa laipan takapuolisella osalla, mutta laipan etupuolinen verkotus eroaa kaikissa jonkin verran toisistaan. Ovaalin muotoisen pakoputken päässä ja tiivistepinnalla elementtiverkkoa tihennettiin 2 mm:iin elementtikokoon, ulkoreunoilla verkko tihennettiin 5 mm:iin. Pakoputkien elementtiverkko luotiin aluksi suuremmalla elementtikoolla, koska on turhaa tehdä siitä tiheämpää joka kohdasta ja näin tuhata laskentakapasiteettia siihen, koska laipan takapuolisella osalla ei ole laskennan kannalta tärkeitä kohtia.

Holkillisen kokoonpanon pakoputkelle luotiin laipan etupuolelle 5 mm elementtiverkko, laipan takapuoliselle osalle luotiin elementtiverkko samoin ehdoin kuin ovaalille pakoputkellekin. Holkille luotiin 5 mm elementtiverkko, jonka päädyt tihennettiin 2 mm elementtikokoon.

Pakoputken materiaaliksi oli valittu EN-GJS-500 SiMo, joka on ominaisuuksiltaan soveltuva kuumissa oloissa käytettäväksi. Lyhenne SiMo tulee materiaalin raaka-aineista, sillä se sisältää piitä ja molybdeenia. Holkin materiaaliksi valittiin NIMONIC 90, koska se soveltuu ominaisuuksiensa puolesta kyseiseen tarkoitukseen. NIMONIC on nikkeliä, kobolttia ja kromia sisältävä metalliseos, jota voidaan vahvistaa titaanilla ja alumiinilla.

8.2 Reunaehdot analyyseissä

Kaikissa malleissa on sylinterinkannen tuentoina käytetty samoja vaihtoehtoja, koska näin tuloksista saadaan mahdollisimman samoissa olosuhteissa toteutettuja ja siten keskenään vertailukelpoisia. Sylinterinkansi tuettiin palopinnastaan tuennalla, joka kiinnittää sylinterinkannen pystysuuntaisen liikkeen palopinnasta paikalleen, niin että kaikki muut vapausasteet saavat vapaasti liikkua. Lisäksi määritettiin sylinterimäinen tuenta, jolla estettiin sylinterinkannen pyöriminen, mutta jätettiin aksiaalisesti ja radiaalisesti kasvavat liikesuunnat vapaiksi, jolloin ne voivat muuttua rajoituksetta.

Pakoputken sylinterinkanteen kiinnittävää ruuviliitosta jäljittelemään määriteltiin ruovinreikien reunoille voima, jolla painetaan pakoputkea sylinterinkantaan kohden. Voiman suuruudeksi annettiin pakoputken kiinnittämiseen tarvittava kiinnitysvoima. Tällä tavoin saatiin ruuviliitos mallinnettua vaaditulla tarkkuudella, mutta pakoputkelle jätettiin kuitenkin elämismahdollisuus, joka siihen tulee todellisuudessakin, koska kiinnitysreiät tulevat olemaan pultteja suurempia.

Kappaleisiin kohdistuvat lämpökuormitukset jouduttiin arvioimaan, koska niitä ei ole vielä päästy todellisuudessa mittamaan. Opinnäytetyössä päädyttiin käyttämään arvioituja lämpötiloja, vanhoista malleista tai kokemuksen perusteella tiedettyjä. Lämpötilat määritettiin kaikkiin malleihin samalla tavoin, sylinterinkannelle 200 °C ja pakoputkelle 500 °C, jolloin lämpötilaeroksi saatiin 300 °C. Lämpötilojen johtuminen mallinettiin konvektioiden avulla, sylinterinkannen ja pakoputken ulkopinnoille määritettiin konvektio, jonka voimakkuus on $100 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ ja ympäröivä ilma arvioitiin 80 °C lämpöiseksi. Lisäksi asetettiin konvektio pako-

putken sylinterinkannen sisään tulevan osan ulkoreunoille, jolle annettiin $40 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ voimakkuus ja $200 \text{ }^\circ C$ ympäröivän ilman lämpötilaksi. Näiden lämpötilojen ja konvektioiden sekä kontaktien avulla saadaan lämpötilat laskettua kaikkien kappaleiden osalta. Analyyseissä käytettiin samoja määritelmiä lämpötiloille ja konvektioille kuin alkuperäisessä mallissakin.

Kontaktien avulla määritettiin sylinterinkannen ja pakoputken liittyminen toisiinsa. Niiden avulla pystyttiin myös määrittämään kappaleiden sallitut liikkumavarat toistensa suhteen. Lisäksi kontaktien avulla saatiin mallinnettua lämmönjohtuminen kappaleesta toiseen, laskettaessa lämpötiloja kappaleiden eri kohdissa. Näitä lämmönjohtumisia varten täytyi osien välille määrittää kontakteja, joilla lämmön siirtyminen saatiin mallinnettua. Lämmönjohtuminen pakoputkesta sylinterinkanteen mallinnettiin kontakteilla, jotka käytetyssä FEM-analyysiratkaisijassa toimivat lämmönjohtumisliitoksina.

Ovaalin pakoputken FEM-analyysiin määritettiin kontaktit, joilla sylinterinkansi, holkki ja pakoputki kiinnittyvät toisiinsa. Kontakteilla määritettiin simulointiin pakoputken ja sylinterinkannen eläminen toistensa suhteen niiden lämmitessä. Pakoputken päädyn ja sylinterinkannen välille asetettiin kontakti, joka sallii kappaleiden välissä olevan tilan kutistumisen, sen jälkeen ne alkavat muodostaa kontaktivoimia ja työntää toista kappaletta edellään. Pakoputken päädyn reunojen ja sylinterinkannen reunojen välille asetettiin samanlaiset kontaktit kuin päätyynkin, mutta erikokoisella liikkumavaralla.

Holkki on yhdistetty sylinterinkanteen ja pakoputkeen vain kontaktiliitosten avulla. Kontakteilla pystyttiin mallintamaan samalla holkin ja muiden osien liikkuminen toistensa suhteen. Kontakteilla määritettiin holkin ja sylinterinkannen välinen sovite sekä holkin päädyn ja sylinterinkannen välinen tila. Näiden avulla määritettiin holkin paikka sylinterinkannen sisällä ja sen elämisvarat. Holkin toisen päädyn ja pakoputken laipan välille määritettiin myös kontakti, joka sallii holkin laajenemisen pakoputkea kohti. Näiden kontaktien ja niiden asettamien rajoitusten avulla saadaan mallista laskettua kontaktien aiheuttamat jännitykset.

8.3 Analyysien tulokset

Analyysien avulla vertailtiin mallinnettujen ratkaisujen toimivuutta käytännössä. Tavoitteena oli löytää mahdollisimman hyvin tiivistävä ja kestävä ratkaisu pakoputken ja sylinterinkannen yhdistämiseen. Analyysien avulla pyrittiin myös optimoimaan välykset kappaleiden välillä.

8.3.1 Ovaalin pakoputken FEM-laskennan tulokset

Ovaalin pakoputken lämpötilat määriteltiin lähes samoin kuin alkuperäiseen malliin. Sylinterinkannen pakokanavan lämpötilaksi asetettiin 200 °C:tta, jonka arvioitiin vastaavan todellisuutta. Todellisuudessa sylinterinkannen palopinnalla lämpötila nousee korkeammaksi, mutta jäähdytyksellä lämpötila saadaan pidettyä kohtuullisena pakokanavan ympäristössä. Pakoputken lämpötilaksi asetettiin 500 °C:tta, joka on arvioitu aiempien kokemusten perusteella (**Liite 3.**) Näin saadaan kappaleille 300 °C:een lämpötilaero, jonka pitäisi vastata todellisuutta.

Ovaalin pakoputken päässä jännitykset vaihtelevat 90 ja 360 MPa:in välillä välyksen ollessa 0,4 mm, suurimmat kuormitukset keskittyvät reunojen kaareville osuuksille. Pakoputken pään keskikohdan suuremmilla osuuksilla vaikuttavat pienemmät kuormitukset, niille kuitenkin tulee jännityksiä toisin kuin alkuperäisessä mallissa. Kuormitukset jakautuvatkin paremmin ovaalilla mallilla kuin alkuperäisessä mallissa, jossa kuormitukset keskittyivät kokonaan kaareville reunoille.

Kontaktipaineet pakoputken päässä ovat noin 100–450 MPa:in suuruisia, kaarevilla reunoilla paineet nousevat keskimääräin 400 MPa:in suuruiseksi, paikallisesti ne voivat kuitenkin nousta suuremmiksi. Pakoputken suuremmille reunoille painetta muodostuu vain noin 100 MPa:ia, mikä kuitenkin tiivistää pakoputkea sylinterinkantaa vasten.

Liitteessä neljä on esitetty kuormitusten jakautuminen ovaalin pakoputken osalta. Kuvissa olevat tulokset on saatu 0,4 mm:n kokonaisvälyksellä päädyn reunojen välissä ja 0,4 mm:n pituussuuntaisella raolla.

Pakoputken materiaalin myötöraja 500 °C:ssa on 270 MPa:ia ja murtoraja 370 MPa:ia, joten sille tulevat jännitykset ovat yli sen myötörajän, joten siinä tapahtuisi pysyvää muodonmuutosta. Nämä kuormitukset ovat kuitenkin liian korkeat myös materiaalin murtorajaan nähden, että holkki kestäisi niitä pitempi aikaisessa käytössä. Näiden kuormitusten ja paineiden alentamiseksi olisi välystä vielä kasvatettava pakoputken ja sylinterinkannen kylkien välillä 0,05 mm:llä, jolloin kokonaisväly kasvaa 0,5 mm.

8.3.2 Holkillisen kokoonpanon FEM-laskennan tulokset

Holkillisen pakoputkiratkaisun lämpötilojen asettelussa täytyi kiinnittää huomiota lämmönjohtumiseen, koska holkki tulee koko pituudeltaan kosketuksiin sylinterinkannen kanssa. Lähtökohtana käytettiin samoja lämpötiloja kuin muissakin malleissa, mutta holkin erilaisen kiinnittymisen vuoksi lämmönjohtumisilla saatiin hiukan erilaiset lämpötila-arvot eri osissa kappaleita (**Liite 5.**) Koska holkki on koko matkaltaan kosketuksissa sylinterinkanteen, se myös johtaa sinne hieman enemmän lämpöä, tästä johtuen sylinterinkannen lämpötilat ovat pakokanavan ympärillä paikoitellen 30 °C:tta korkeammat.

Holkin pituussuuntaista laajenemista varten pakoputken ja holkin väliin tarvitaan 0,5 mm:n väly, jos holkki on toisesta päästä asennettu sylinterinkanteen kiinni. Leveysuuntaista laajenemista varten holkin ja sylinterinkannen väliin tarvitaan 0,1 mm:n väly, jolloin joka puolella on periaatteessa 0,05 mm:n väly.

Holkin pinnalla jännitykset vaihtelevat 230–670 MPa:in välillä, suurimmat paineet kertyvät holkin sylinterinkannen puoleisen päädyn sisäpinnalle. Kontakteista suurimmat paineet kasautuvat kaarevilla reunoilla, kontaktipaineet vaihtelevat 100–330 MPa:iin, matalimmat kuormitukset tulevat holkin suuremmille kyljille ja kaareville reunoille tulevat suurimmat paineet. Holkin materiaalin myötöraja ollessa 500 °C:ssa 672 MPa:ia, joten tämän pohjalta osan pitäisi kestää sille tulevat kuormitukset (**Liite 6.**)

Holkki olisi ollut tarkoitus asentaa sylinterinkannen sisään sellaisella sovitteella, että se ei pääse liikkumaan normaalilämpötilassakaan. Tätä varten olisi pitänyt

tehdä ahdistussovite, joka kuristaa holkin paikoilleen. Mutta tällaista sovitetta varten osien välitys tulisi laskea nolnaan, jolloin jännitykset holkin sisäpinnalla nousevat 800–900 MPa:iin, ja voivat paikallisesti nousta korkeammiksikin.

Holkki on asennettava sylinterinkannen sisään siten, että se on koko matkaltaan kosketuksissa sylinterinkanteen. Näin saadaan paine jakautumaan tasaisemmin holkin pinnalle ja kuormitukset pysymään kohtuullisina. Jos sylinterinkanteen jäätetään sivuille samalla tavoin tilaa kuin alkuperäisessä mallissa, holkkiin vaikuttaa liian suuret voimat ja se alkaa paisua sivuille. Lisäksi paineet nousevat korkeammiksi ja ne kasautuvat holkin päätyihin. Kun holkki asennetaan koko matkalta sylinterinkantta vasten, kontakteista aiheutuvat jännitykset jakautuvat tasaisemmin koko holkin alueelle.

8.4 Välyksen optimointi pakoputken, holkin ja sylinterinkannen välillä

Välystä muuttamalla pyrittiin optimoimaan sylinterinkannen, pakoputken ja holkin väliset tilat, joita tarvitaan kappaleiden lämpölaajenemisen varalle. Sopivan välyksen löytämiseksi kokeiltiin analysoida useampiakin vaihtoehtoja. Näiden avulla pyrittiin valitsemaan parhaiten yhteensopivat välykset, joilla osat voitaisiin toteuttaa.

Holkillisessa kokoonpanossa holkille tulee jättää 0,5–0,6 mm:ä varaa pituussuuntaiselle lämpölaajenemiselle. Samassa kokoonpanossa sylinterinkannen ja holkin kylkien väliin tarvitaan 0,1 mm:n välitys, jolloin jännitykset pysyvät tarpeeksi alhaisina. Holkin ja sylinterinkannen väliin tarvitaan välystä, koska muuten kuormitukset nousevat liian korkeiksi materiaalille, mutta silloin holkki pääsisi mahdollisesti normaali lämpötilassa liikkumaan sylinterinkannen sisällä. Tarkoituksena kuitenkin olisi asentaa holkki sellaisella sovitteella, että se pysyisi paikoillaan myös ilman lämpölaajenemisen tuomaa painetta.

Ovaalin pakoputken pään reunojen ja sylinterinkannen välille oli alkuperäiseen malliin jätetty 0,30 mm:n välitys, mutta analyysien perusteella sitä saisi kasvattaa hiukan. 0,50 mm:n välyksellä painetta saataisiin kyseisillä reunoilla alennettua, tämä välitys olisi parempi myös siksi, että lämpölaajeneminen tapahtuu enimmäk-

seen leveyssuunnassa. Pituussuuntaiseksi välykseksi ovaalille pakoputkelle olisi sopiva 0,4 mm:n välys, siis hiukan pienempi kuin holkillisella kokoonpanolla. Tämä rako pakoputken pään ja sylinterinkannen välillä on riittävän iso, että se ei aiheuta liian suuria kuormituksia osille, mutta se kuitenkin sallii osien tiivistymisen yhteen lämpölaajenemisen seurauksena.

8.5 Yhteenveto analyyseistä

Analyysien perusteella voidaan todeta, että parhaaseen lopputulokseen pääsemiseksi olisi pakoputkesta mahdollisimman pyöreä, mutta sylinterinkannen asettamien rajoitteiden takia tämä ei onnistu. Tästä syystä kappaleista tehtiin soikean muotoisia, koska analyyssien perusteella näin päästään lähemmäksi pyöreän pakoputken muotoilun tuomia etuja.

Ovaalinmuotoinen pakoputki on parempi vaihtoehto, koska sen välysten ja jännitysten yhteensovittaminen toimii paremmin. Mutta tätäkin vaihtoehtoa kannattaa parannella ennen kuin siitä tehdään tuotantoversiota, pakoputken päätä olisi syytä levittää vielä hiukan lisää, jolloin kuormitukset saataisiin jakautumaan tasaisemmin koko kappaleen alueelle.

Ovaalin pakoputken pään reunojen ja sylinterinkannen välyksenä 0,5 mm:ä toimii parhaiten, sillä silloin pakoputki pääsee laajenemaan riittävästi myös pituus suunnassa. Tällä välyksellä myös kuormitukset pysyvät hyväksytyissä rajoissa, ja leveysuuntainen laajeneminen ei rajoita liiaksi pituussuuntaista laajenemista.

Holkillisessa kokoonpanossa sylinterinkannen ja holkin kylkien välisen sovitteen tulisi olla 0,1 mm:ä, että kuormitukset saataisiin pysymään sallituissa rajoissa. Mutta tämä saattaa olla turhankin väljä sovite, jos tavoitteena on asentaa holkki niin, että se pysyisi paikoillaan myös ilman lämpölaajenemista. Jos kyseisen välyksen laskee 0 mm:iin, niin paineet ja jännitykset nousevat 800–900 MPa:iin, jolloin ne ovat materiaalin kestämiä rajoja korkeampia.

Mitoitettaessa pituussuuntaista välystä on huomioitava osien väliin tulevan tiivisteiden paksuus. Osat on mitoitettu niin, että tiiviste on paikoilleen asennettuna, jolloin sen paksuus asennettuna on huomioitava osien pituuksia mitoitettaessa.

8.6 Analyysien luotettavuus

Analyysien luotettavuutta voidaan arvioida asetettujen reunaehtojen ja kuormitusten perusteella. Tässä käsiteltyihin analyyseihin on kuormitukset jouduttu arvioimaan, koska kyseessä on uusi tuote, josta ei ole vielä mitattua tietoa.

Kappaleiden verkotukset pyrittiin toteuttamaan samankokoisilla elementeillä, koska näin tulokset saadaan luettua samankokoisella jaolla osien pinnalta. Elementtiverkot jätettiin ulkoreunoiltaan suuremmaksi, koska näin pystyttiin säästämään laskenta kapasiteettia, sinne missä sitä tarvitaan. Tällä ei kuitenkaan pitäisi olla vaikutusta analyysien lopputulokseen, koska näiden alueiden tulokset eivät ole tässä yhteydessä tarkastelun alaisina.

Lämpötilat näihin analyyseihin arvioitiin kokemusten perusteella, joita on saatu aiemmista sylinterinkansimalleista. Kaikissa malleissa käytettiin samoja lämpötilaehtoja, joten niiden pitäisi olla vertailukelpoisia keskenään. Kappaleiden tuennat pyrittiin asettamaan samoin kaikkiin analyyseihin, jotta ne käyttäytyisivät kaikissa kokoonpanoissa samalla tavoin ja näin olisivat vertailtavissa luotettavasti.

Pakoputken kiinnitystä jäljittelemään asetettu voima on arvioitu vastaamaan vaadittavaa kiinnitysvoimaa. Voiman on arvioitu sellaiseksi, että se jaksaa pitää pakoputken paikoillaan, mutta sallii kuitenkin sen sivuttaisen liikkeen.

Materiaalit oli määriteltävä analyyseihin, koska käytössä oli uusi ohjelmisto, johon ei vielä valmiina yrityksen omaa materiaalikirjastoa. Materiaalit määriteltiin analyyseihin valmistajien ilmoittamien taulukkoarvojen perusteella.

9 KEHITELTÄVÄÄ

Aiemmissa kappaleissa esitettyjen tulosten perusteella ja mallin geometriaa tutki-
malla, on kappaleista löytynyt erilaisia ongelmakohtia, joihin on puututtava ennen
kuin tuote on valmis tuotantoon. Näitä ongelmia ei kuitenkaan tämän työn puit-
teissa yritetty lähteä ratkaisemaan, koska se olisi vaatinut sylinterinkannen uudel-
leen mallintamista ja mahdollisesti muidenkin osien. Tämä ei ollut aikataulullises-
ti mahdollista, koska näiden uudelleen mallintaminen, yhteen sovittaminen ja las-
kentojen laatiminen olisi vienyt aikaa enemmän kuin tämän opinnäytetyön teke-
miseen pystyttiin varaamaan.

9.1 Muoto

Muodon kannalta parhaan lopputuloksen saamiseksi olisi suunniteltava kiinnitys-
päästään täysin pyöreä pakoputki, koska silloin lämpölaajeneminen tapahtuisi ta-
saisesti joka suuntaan. Tämä kuitenkin vaatisi muutoksia sylinterinkanteen ja pa-
kokanavien muotoiluun. Jotta pyöreä pakoputki saataisiin mahtumaan sylinterin-
kannen sisään, olisi kiinnityskohtaa nostettava ja mahdollisesti myös kiinnitys-
kulmaa olisi muutettava.

Pyöreää pakoputken päätä suunniteltaessa on huomioitava kiinnitysasennon ja ti-
lan lisäksi muodon aiheuttamat muutokset pakokaasujen virtauksessa. Pakoputkea
muotoiltaessa on huomiota kiinnitettävä myös pakokanavien muotoiluun ja siihen
kuinka pakokaasujen virtaus saadaan tapahtumaan tasaisesti.

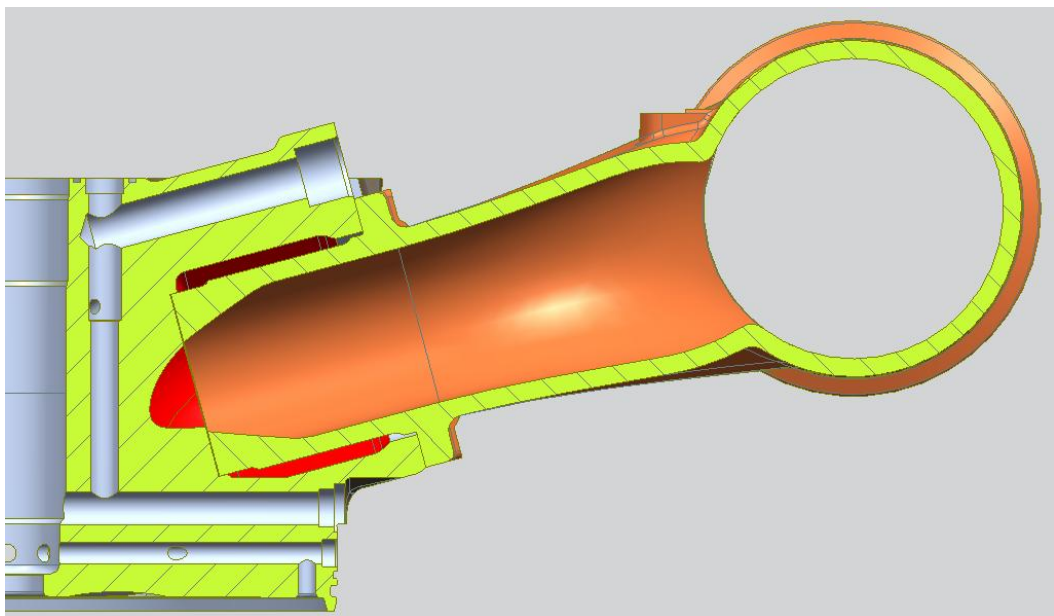
Parhaaseen lopputulokseen päästään pyöreällä pakoputken päällä, mutta ovaalilla
muotoilulla voidaan päästä kohtuullisen lähelle tätä. Ovaalin muodon täytyy vain
olla tarvittavan kaareva, että se laajenee kohtuullisen tasaisesti. Ovaalimuoto olisi
helpommin sovitettavissa sylinterinkannen muotoiluun, jolloin muutoksia osiin
täytyisi tehdä vähemmän.

Lisäksi yksi mahdollisuus voisi olla muuttaa pakoputki kaksiosaiseksi niin, että
molemmista pakokanavista lähtee oma pakoputkensa, jotka sitten yhdistyvät sy-
linterinkannen ulkopuolella. Tällöin pakoputket voisivat olla kokonaan pyöreää

putkea, jolloin laajeneminen olisi tasaista. Tämän vaihtoehdon voisi toteuttaa kääntämällä pakokanavat sivuille, tällöin sylinterinkannen kiinnitys täytyisi kuitenkin miettiä uudelleen.

9.2 Pakoputken kiinnityskulma ja -korkeus sylinterinkannessa

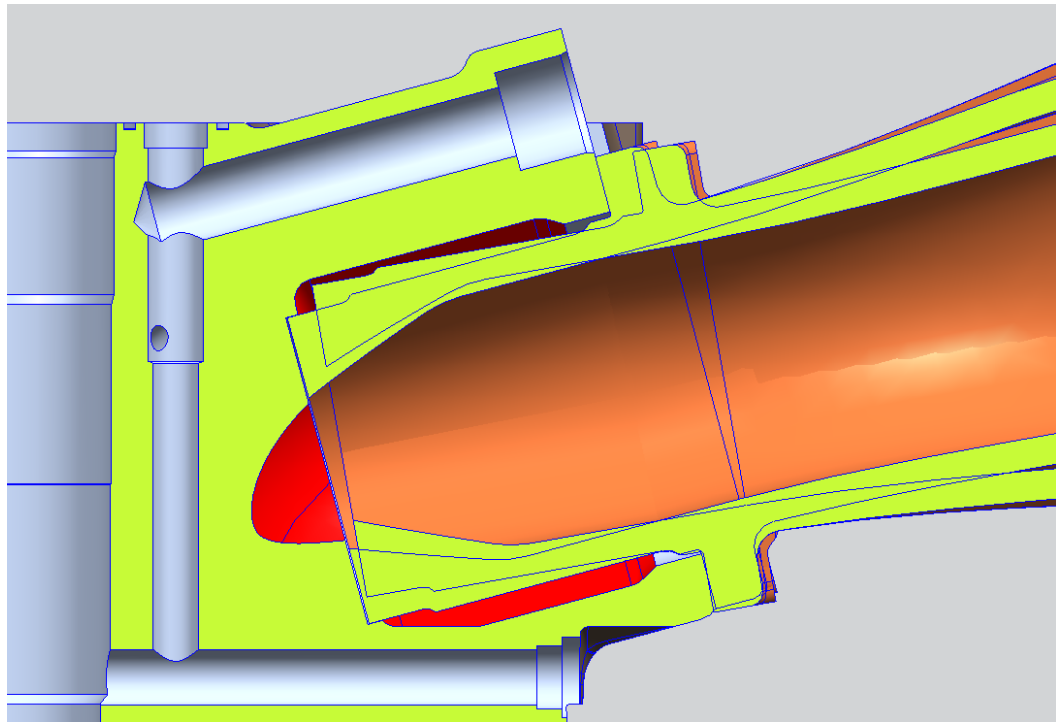
Tarvittavaa lisätilaa sylinterinkanteen pakokanavan ympärille saataisiin muuttamalla pakoputken kiinnityskulmaa ja -korkeutta sylinterinkannessa. Sylinterinkannessa olisi tilaa nostaa pakoputkea, jolloin alapuolelle saataisiin enemmän tilaa, mikä mahdollistaisi pakoputken paremman muotoilun (**Kuva 14.**) Tämä kuitenkin muuttaisi pakokanavan muotoilua, jolloin myös pakokaasujen virtauksiin ja virtausmatkaan sylinterinkannen sisällä tulisi muutoksia, jotka taas saattavat vaikuttaa moottorin toimintaan. Jos pakoputkea nostetaan, olisi kiinnityslaippaan tehtävä lovi sen yläpuolella olevalle kanavalle.



Kuva 14. Halkaistu kokoonpanokuva, jossa on alkuperäinen pakoputki kiinnitettyä sylinterinkanteen. Kuvassa näkyy, minne vapaata tilaa sylinterinkannessa jää.

Sylinterinkannen alkuperäinen muotoilu salli pakoputken kiinnityskohtaa nostettavan noin 10 mm, ilman muita muutoksia. Tällä muutoksella väli yläpuolen vesikanavan ja pakoputken välillä säilyisi kuitenkin riittävän suurena.

Alkuperäisessä mallissa pakoputki kiinnittyy sylinterinkanteen 15 asteen kulmassa. Tätä kulmaa pienentämällä voidaan rakoa vesikanavaan kasvattaa, jos kulman käännön nollakohtaksi otetaan pakokanavan tiivistepinta (**Kuva 15.**) Tällä kulmamuutoksella saataisiin lisättyä tilaa pakoputken pään muotoilua varten. 5 asteen muutoksella saadaan tilaa lisää noin 6,5 mm sylinterinkanteen vesikanavan ja pakoputken kiinnityskohdan välille. Tämä muutos mahdollistaisi 140 mm korkean pakoputken käyttämisen, koska väli alapuolen vesikanavaan saataisiin kasvamaan riittävästi. Vaikka pakoputken päätä korotettaisiin 15 mm alkuperäisestä, niin sen ja vesikanavan välille jäisi 9–10 mm, jolloin sen voisi olettaa kestävän rasitukset.



Kuva 15. Pakoputken kiinnityskulman 5° muutoksella sylinterinkannen rakenteeseen saatava lisätila.

Pakoputken kiinnityskulmaa hieman suoristamalla ja samalla kiinnityskohtaa nostamalla, olisi mahdollista saada sylinterinkanteen tilaa lisää, jolloin pakoputken voisi asentaa syvemmälle sylinterinkannen sisään. Tällä saatettaisiin saada lämmöt pakokaasuista paremmin ohjattua pakoputkeen, jolloin sylinterinkannen jäähdytystarvetta voitaisiin arvioida uudelleen. Kulman muuttaminen ja kiinnityspaikan nostaminen vaikuttavat todennäköisesti pakokaasujen virtaukseen, mutta vasta simuloimalla voidaan selvittää miten paljon muutoksilla on vaikutusta, ja olisivatko ne parannuksia.

10 YHTEENVETO

Aihe tähän opinnäytetyöhön löytyi sylinterinkansien koneistus-osaston kautta, jossa työskentelin aiemmin. Työ toteutettiin tuotekehitysosastolla pääasiassa NX-ohjelmistoa käyttäen, jota yrityksessä ollaan ottamassa käyttöön, mistä syystä myös opinnäytetyö toteutettiin kyseisellä ohjelmistolla. Tällä pyrittiin helpottamaan käyttöönottoa ja löytämään ratkaisuja ohjelmiston vaihdoksesta aiheutuviin ongelmiin.

Työ alkoi tutustumalla pakoputken ja sylinterinkannen rakenteeseen, sekä kartoittamalla niiden rasituksen alaisia kohtia. Tämän jälkeen päädyttiin mallintamaan kahta erilaista versiota pakoputkesta ja niiden liittymisestä sylinterinkanteen. Kun osat oli saatu mallinnettua, suoritettiin niiden lujuuslaskennat, joiden avulla osia pystyttiin vertailemaan. Laskentojen perusteella myös pyrittiin optimoimaan osien väliset välykset mahdollisimman hyväksi.

Yhteenvetona työn tuloksista voidaan sanoa, että pakoputken pään tulee olla mahdollisimman pyöreä tasaisen laajentumisen takaamiseksi. Tämän onnistumiseksi on kuitenkin tehtävä isoja muutoksia sylinterinkanteen, mikä tätä opinnäytetyötä tehtäessä päätettiin rajata työn ulkopuolelle. Koska pakoputkesta ei ole mahdollista tehdä täysin pyöreää, olisi siitä tehtävä mahdollisimman ovaalinmuotoinen.

Analyysien perusteella parempaan lopputulokseen pääsee ovaalinmallisella pakoputkella, koska sen kuormitukset pysyvät kohtuullisina. Holkki vaatisi vähintään 0,05 mm välyksen kylkien ja sylinterinkannen väliin, joten jos tavoitteena olisi asentaa se paikalleen ahdistussovitteella, jolloin kappaleet olisivat yhdistettynä toisiinsa sellaisella liitoksella, että holkki ei pääse liikkumaan sylinterinkannen sisällä. Mutta tämä ei onnistu, koska jos holkin ja sylinterinkannen välyksen asettaa nolnaan tai pienemmäksi, niin kuormitukset nousevat liian korkeiksi että materiaalit kestäisivät niitä.

Sylinterinkannen ja pakoputken ensimmäiset valut oli jo tilattu ennen kuin opin-
näytetyötä päästiin tekemään. Työn tuloksena saatuja mallinnuksia ei siis testattu
käytännössä, koska niitä ei pystytty valmistamaan tilatuista valuista. Uusia valuja
taas ei kannattanut tilata, koska sylinterinkannen ja pakoputken yhdistämistä kehi-
tetään edelleen ennen kuin uudet testikappaleet tilataan. Tästä syystä päätettiin
myös, että tuotteista ei tehdä piirustuksia, koska 3D-malleista saadaan kaikki tar-
vittava tieto jatkokehittelyihin.

LÄHTEET

- /1/ Balmer, Robert T. (1997). Thermodynamics. 8. painos. St. Paul, MN, USA. West Publishing Company.
- /2/ Hietikko, Esa (2004). Palkki, Lujuuslaskennan perusteet. Keuruu. Otava.
- /3/ Hietikko, Esa (2008). Tuotekehitystoiminta. Kuopio. Savonia-ammattikorkeakoulun kuntayhtymä.
- /4/ Inkinen, Pentti & Tuohi, Jukka (2005). Momentti 1. 3. painos. Helsinki. Otava.
- /5/ Morris, Alan (2008). A Practical Guide to Reliable Finite Element Modelling. Chichester. John Wiley & Sons, Ltd.
- /6/ Ulrich, Karl T. & Eppinger, Steven D. (2008). Product design and development. 4. painos. New York, NY, USA. The McGraw-Hill Companies, Inc.
- /7/ Wärtsilä's geographical markets 2010. [viitattu 24.3.2011] Saatavilla Internetissä:<URL:<http://wartila.com/en/investors/markets/geographical-markets>>
- /8/ Wärtsilän historia. [viitattu 21.2.2011] Saatavilla Internetissä:<URL:<http://www.wartsila.com/fi/about/yhtio-johto/Historia>>
- /9/ Wärtsilän huolto- ja tukipalvelut. [viitattu 22.2.2011] Saatavilla Internetissä:<URL:<http://www.wartsila.com/en/services-support/service-solutions/overview>>
- /10/ Wärtsilä laivamoottorit. [viitattu 22.2.2011] Saatavilla Internetissä:<URL:<http://www.wartsila.com/en/marine-solutions/overview>>
- /11/ Wärtsilä's markets. [viitattu 24.3.2011] Saatavilla Internetissä:<URL:<http://wartila.com/en/investors/markets/wartsila-markets>>
- /12/ Wärtsilän tiedote 28.10.2010. [viitattu 22.2.2011] Saatavilla Internetissä:<URL:<http://www.wartsila.com/fi/tiedotteet/newsrelease964>>
- /13/ Wärtsilä voimalaitos. [viitattu 22.2.2011] Saatavilla Internetissä:<URL:<http://www.wartsila.com/en/power-plants/power-generation/overview>>
- /14/ Wärtsilän vuosikertomus 2010. [viitattu 22.2.2011] Saatavilla Internetissä:<URL:<http://www.annualreport2010.wartsila.com/fi/kestava-kehitys/henkilosto-ja-sosiaalinen-vastuu/henkilosto-1>>

/15/ Wärtsilän yhtiö rakenne. [viitattu 21.2.2011] Saatavilla Internetissä:
<URL:<http://www.wartsila.com/fi/about/yhtio-johto/yhtiorakenne>>