



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Karim Abdelwahed

# Ottomoottorin imusarjan suunnittelu ja valmistus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

30.11.2020

Tekijä Otsikko	Karim Abdelwahed Ottomoottorin imusarjan suunnittelu ja valmistus
Sivumäärä Aika	49 sivua 30.11.2020
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine	Ajoneuvosuunnittelu
Ohjaajat	Projektipäällikkö Joel Kontturi
<p>Tämän insinööriyön tarkoituksena oli suunnitella ja valmistaa kokoonpanoon ja käyttötar- koitukseen sopiva ottomoottorin imusarja osittain käännteissuunnitteluperiaatteella. Tavoit- teena työssä oli perehtyä imusarjan toimintaperiaatteisiin sekä valmistaa mahdollisimman toimiva lopputuote kokoonpanon kannalta.</p> <p>Imusarjan mitoitus arvioitiin alustavasti laskennalla, minkä lisäksi komponentin rakenteelli- set geometriat suunniteltiin käyttäen apuna tietokoneavusteisia laskentaohjelmia. Moni- mutkaisista komponentin mitoituksesta, rakenteesta ja valmistusmenetelmistä johtuen pää- dyttiin komponentin mallin muuttaminen kokoonpanoksi, jossa voidaan hienosäätää imu- sarjan sisäisiä geometrioita ja tehollisia mittasuureita sen toiminnan optimoimiseksi.</p> <p>Työssä käytettiin alkuperäisen ja valmistettavan tuotteen vertailuun virtaussimulaatioita, jossa alkuperäisen tuotteen mitat ja rakenteen geometriat saatiin tarkasti 3D-skannaa- malla. Uuden ja alkuperäisen mallin virtauksia voidaan myös verrata käyttäen virtauspenk- kiä, jossa saadaan mahdollisesti hieman konkreettisempaa dataa niiden eroista.</p> <p>Valmistettavan imusarjan ja alkuperäisen ominaisuudet eivät kuitenkaan ole suoraan ver- tailukelpoisia mittaamalla suurinta moottorin tuottamaa tehoa ja vääntömomenttia dynamo- metrissä, koska ne on molemmat suunniteltu erilaisia applikaatioita varten.</p> <p>Havainnollisempaa sekä realistisempaa dataa olisi saatu käyttämällä moottorin simuloin- tiohjelmaa, jossa voitaisiin ottaa huomioon imusarjassa vallitsevat erilaiset muuttujat, kuten esimerkiksi painepulssit ja niiden aiheuttamat resonoinnit.</p>	
Avainsanat	Imusarja, Tuplaplenum, Lehmann.

Author Title	Karim Abdelwahed Designing and manufacturing an intake manifold for an internal combustion engine
Number of Pages Date	49 pages 30 Nov 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Professional Major	Vehicle Design Engineering
Instructors	Joel Kontturi, Project Manager
<p>The purpose of this thesis was to design and manufacture an engine intake manifold suitable for assembly and use, partly on the principle of reverse engineering. The aim of the work was to become familiar with the operating principles of the intake manifold set a little more deeply, and to produce the most functional end product possible in terms of assembly. The nature of the work is good in terms of mechanical design, and it involves many different methods of engineering.</p> <p>The dimensions were estimated and the structural geometries of the component were designed with the help of computer-aided calculation programs. Due to the complex dimensioning principles, structure and manufacturing methods of the component, it was decided to transform the component model into an assembly that can fine-tune the internal geometries and effective dimensions of the intake manifold set to optimize its operation.</p> <p>Computational Fluid Dynamics were used to compare the original and the manufactured product, in which the dimensions and structural geometries of the original product were obtained by precise 3D scanning. The flows of the new and original models can also be compared using a flow bench, which could provide possibly more concrete data on their differences.</p> <p>However, the characteristics of the intake manifold and the original to be manufactured are not directly comparable by measuring the maximum power and torque produced by the engine on the Dynamometer, as they are both designed for different applications.</p> <p>More illustrative as well as more realistic data would have been obtained, using an engine simulation program that could take into account various variables in the intake manifold, such as pressure pulses and the resonances they cause.</p>	
Keywords	Intake Manifold, Dual plenum, Lehmann.

## Sisällys

### Lyhenteet ja käsitteet

1	Johdanto	1
1.1	Opinnäytetyön tausta	2
1.2	Tavoitteet ja työn rajaaminen	2
2	Imusarjan rakenteet ja niiden vaikutukset	3
2.1	Perusteet	4
2.2	Volymetrinen hyötysuhde	5
2.3	Kaasuläppä	6
2.4	Ensiöputket	6
2.5	Kokoojakammio	7
2.6	Helmholtz-resonaattori	7
2.7	Muuttuvageometrisuus	9
3	Alkuperäinen malli	10
3.1	Ongelmakohtat ja niiden ratkaiseminen	10
3.2	3D-skannaus	10
4	Laskenta ja mitoitus	12
4.1	Volymetrisen hyötysuhteen arviointi	12
4.2	Ensiöputket	14
4.3	Ensiöputkien päiden muoto	16
5	Suunnittelu	17
5.1	Polttoainesuuttimet	17
5.2	Yksi kokoojakammio	17
5.3	CFD-laskenta	20
5.4	Tuplaplenum-tyyppinen imusarja	23
5.5	Lujuuslaskenta	29
6	Valmistus	32

6.1	Työstömenetelmät	33
6.2	Työstökeskuksen komennot	38
6.3	Valmistusmateriaali	40
7	Vaihtoehtoiset valmistusmenetelmät	43
7.1	3D-metallitulostus	43
7.2	Valaminen	45
7.3	Ohutlevykokoonpano	45
7.4	Kuitukokoonpano	46
8	Yhteenveto ja pohdinta	46
	Lähteet	48

## Lyhenteet ja käsitteet

CAD	Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CAM	Computer Aided Manufacturing, tietokoneavusteinen valmistus
CFD	Computational Fluid Dynamics, tietokoneavusteinen virtauslaskenta
CNC	Computerized Numerical Control, tietokoneavusteinen numeerinen ohjaus
FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä, jossa lasketaan numeerisesti rakenteiden kestävyyyksiä, optimoidaan muotoja ja materiaaleja käyttökoh- teeseen sopivaksi
NC	Numerical Control, numeerinen ohjaus
3D-Skannaus	Mittausmenetelmä, jolla saadaan geometriset pinnat mitattua ja hyödynnettyä CAD-suunnittelussa
Fikstuuri	Kiinnitin, johon työstettävä kappale kiinnitetään
Reverse engineering	Käänteissuunnittelu, jossa olemassa olevasta komponentista valmistetaan uusi versio

## ALKULAUSE

Tämän insinööri työn aiheena oli Ottomootorin suunnittelu sekä valmistus. Työn tarkoituksena oli suunnitella mahdollisten resurssien puitteissa mahdollisimman soveltuva lopputuote kokoonpanon kannalta sekä valmistaa se käyttäen apuna käytössä olevia valmistusmenetelmiä. Lopputuote on suunniteltu henkilökohtaista projektia varten, mutta työn luonteen vuoksi on ollut mahdollista harjaantua useissa eri mekaanisen suunnittelun perusteissa, joita opintojen aikana on käytetty.

Suuret kiitokset työssä ansaitsevat Onni Humalajoki CFD-simuloinneista, joita on käytetty apuna suunnittelussa, Mathias Karlqvist alkuperäisen imusarjan 3D-skannaamisesta sekä Alumeco laadukkaiden valmistusmateriaalien toimittamisesta. Ilman näitä tahoja opinnäytetyön valmistuminen ei olisi ollut käytännössä mahdollista.

Haluan kiittää myös työn ohjaajaa Joel Kontturia erinomaisesta ohjauksesta ja avustuksesta työn valmistumisen kannalta.

29.11.2020

Karim Abdelwahed

## 1 Johdanto

Työn tarkoituksena on suunnitella ja valmistaa monesta eri komponentista kokoontuva imusarja ottomoottoriin. Tarve työlle syntyi, kun kyseessä olevaa ottomoottoria tullaan käyttämään erilaisissa olosuhteissa kuin mihin se on alun perin suunniteltu ja moottorin imusarjan pitää vastata tätä tarvetta.

Useasta komponentista koostuva kokoonpano myös mahdollistaa suorituskykyyn ja moottorin luonteeseen vaikuttavien mittojen muuttamisen, jolloin valmistettava imusarja voidaan muokata vastaamaan myös tehtyjä muutoksia jälkikäteen, kuten nokka-akselien tai venttiilikoneiston muuttumista.

Imusarja on moottorin sylinterinkanteen yhteydessä oleva komponentti tai kokoonpano, jonka tehtävänä on jakaa moottoriin saapuva ilmamassa sylinterien välillä. Vaikka suunnitteluprioriteetit imusarjalle ovat yleensä polttoaineenkulutus ja valmistuskustannukset, autovalmistajat osaavat tehdä nämä asiat huomioon ottaen nykyään varsin hyviä imusarjoja.

Tässä työssä ei prioriteettina ole polttoaineen kulutus vaan enemmänkin kestävä rakenne ja riittävän suuri virtauskapasiteetti ilmamassalle, kuitenkin niin, että moottorin luonne pysyy käyttökelpoisena tieliikennettä ajatellen.

Kohdemoottorina suunniteltavaa imusarjaa varten toimii kuusisylinterinen ottomoottori, jossa volymetristä hyötysuhdetta parannetaan yhdellä pakokaasuauhimella.

Aiheessa pääsee soveltamaan paljon koulutuksen aikana opittuja taitoja sekä erityyppisiä laskentaohjelmia käytännössä.



## 1.1 Opinnäytetyön tausta

Opintojeni suuntautumisvaihtoehtoon ajoneuvosuunnitteluun liittyen oli luonnollista, että työn aiheena on suunnittelu ja tässä työssä onkin tarkoitus käyttää hyväksi jo opittuja taitoja. Työn kohde on valittu myös niin, että kaikki menetelmät suunnittelun taustalla eivät ole täysin tunnettuja tai en niitä täysin hallitse, joten työn edetessä on myös mahdollista oppia uutta aihealueesta.

Koska kyseessä oleva työ oli myös tarkoitus itse valmistaa, täytyi komponentit myös suunnitella huomioiden oma osaaminen ja niiden valmistettavuus käytännössä.

Erittäin tärkeänä osana opiskelua on toiminut Metropolia Motorsport -tiimi, jonka toimintaan aktiivinen osallistuminen vuosina 2017–2019 on ollut kehittävässä roolissa opintoja. Tiimissä formulatyypisten kilpa-ajoneuvojen alustojen suunnittelu, kehitys ja valmistus erilaisin työstömenetelmin on auttanut käsittämään suunnitteluprosessien eri vaiheita. Työskentely tiimissä on tuonut mekaanisen suunnittelun lähemmäs käytäntöä. Kun komponentit on suunniteltu ja valmistettu itse, on suunnittelussa oppinut ottamaan huomioon erilaiset valmistusmenetelmät ja erityisesti, mitä on mahdollista valmistaa, mikä on tärkeää suunnitteluprosessissa kokonaisuuden kannalta.

## 1.2 Tavoitteet ja työn rajaaminen

Opinnäytetyön tavoitteena on kuitenkin valmistaa ajan ja resurssien puitteissa mahdollisimman toimiva lopputuote, ajattelen käyttökohdetta. Koko projektin tavoitteena on harjaantua mekaanisessa suunnittelussa. Työssä tutkitaan moottorissa vallitsevia muuttujia, jotka vaikuttavat imusarjaan ja ottamaan huomioon mahdollisimman monet tiedossa olevat arvot ajatellen lopputuotteen optimointia

Työssä tulee ottaa huomioon moottorin imusarjan mitoitukseen liittyviä komponentteja ja suureita, kuten nokka-akselit, venttiilikoneisto, pakosarja sekä muuttuva ja vallitseva ilmanpaine, kohdemoottorin iskunpituus ja sylinterin halkaisija sekä paljon muita muuttu-

jia. Kuitenkin käytettävissä olevan ajan ja resurssien vuoksi on jouduttu tekemään kompromisseja ja olettamuksia joistakin arvoista. Tästä syystä myös imusarjan säädettävyys korostuu, jotta se voidaan optimoida myöhemmin vastaamaan muita tehtyjä muutoksia.

Tässä työssä lopputuotteen tavoitteiksi asetettiin seuraavat:

- mahdollisimman hyvä virtaus
- mahdollisimman tasajakoinen sylinteritäytös
- kokoonpanon säädettävyys
- kestävä rakenne
- mahdollisesti kevyempi rakenne.

Ottaen huomioon kuitenkin kohdeajoneuvon ja käyttötarkoitukset ei suunnittelussa ollut välttämätöntä priorisoida kevyttä rakennetta vaan enemmänkin käytännöllisyyttä ja kestävyyttä. Mahdollisimman hyvällä virtauksella tarkoitetaan imusarjan läpi kulkevan ilmassan optimointia rakenteen sallimien geometrioiden puitteissa.

## 2 Imusarjan rakenteet ja niiden vaikutukset

Imusarjan tehtävä on johtaa ilmassa moottoriin ja sylintereiden kesken. Ilmassan jakaminen tasaisesti sylintereiden kesken ei kuitenkaan ole täysin yksiselitteistä johtuen yleensä tilan puutteesta moottoritulasta sekä mahdollisimman yksinkertaisesta rakenteesta valmistusmenetelmät huomioiden. Aina ei imusarjaa kuitenkaan edes tarvita; esimerkiksi vapaasti hengittävissä kilpamoottoreissa on erilliset läppärungot ensiöputkissa ja ensiöputket loppuvat suoraan atmosfääriseen ilmanpaineeseen moottoritulassa. Näissä kokoonpanoissa yleensä polttoainejärjestelmä toimii kaasuttimilla, koska imettyä ilmassaa ja ilmanpainetta on haastava mitata moottorinohjainlaitetta varten, joka ohjaisi polttoaineruiskutusta kuormituksen mukaan.

## 2.1 Perusteet

Luonteeltaan epätasaiset virtaukset imusarjassa ja pakosarjassa aiheuttavat sen, että imusarjan painetaso on hyvin riippuvainen moottorin kierrosnopeudesta. Imusarjan impedanssi eli tässä tilanteessa kapasiteetti kaasun virtaukselle on imusarjaan virtaavien pulssien taajuuden funktio, jonka takia voidaan imusarjalle määrittää haluttu kierrosalue, jolla moottori toimii parhaiten. [1 s. 3.]

Tähän liittyy kuitenkin aina kompromisseja, etenkin kokoonpanossa, jossa teholliset geometriat eivät muutu kierrosnopeuden mukaan.

Imusarja koostuu yksinkertaisimmillaan ensiöputkista, kokoojakammioista ja siihen liitetyistä komponenteista kuten kaasuläppäkotelosta, polttoainesuuttimista sekä mahdollisista tunnistimista, joilta moottorin ohjainlaite saa tarvittavan tiedon moottorin kuormitus-tilanteesta ja osaa siten säätää parametrejä tilanteen mukaan.

Ensiöputkien volyymilla eli tehollisen pituuden ja läpileikkauspinta-alan suhteen mitoituksella on suuri vaikutus moottorin käytökseen ja sen tuottamaan vääntömomenttiin tietyllä kierrosnopeudella. Kokoojakammion tilavuudella voidaan myös vaikuttaa moottorinluonteeseen ja käyttöalueeseen. [1, s. 15.]

Kuvassa 1 on esimerkki perinteisestä ottomoottorin imusarjasta ilman siihen liitettäviä komponentteja.



Kuva 1. Perinteinen ottomoottorin imusarja

## 2.2 Volymetrinen hyötysuhde

Volymetrinen hyötysuhde kuvaa moottorin imemän ilman täytösastetta suhteessa puristustilavuuteen ja iskuilavuuteen. Ilman massasta johtuvan inertian eli hitausmomentin takia imusarjalla on suuri rooli tämän kanssa. Volymetrinen hyötysuhde ei alhaisilla kierrosnopeuksilla voi tavallisesti olla 100 %, mutta korotetulla kierrosnopeudella ylipaineella toimivissa kokoonpanoissa hyötysuhde voi olla huomattavasti suurempi. [1, s. 171–175.]

### 2.3 Kaasuläppä

Ottomootorissa kaasuläppä ja venttiilit toimivat volymetrinen hyötysuhteen rajoittajana. Kaasuläppiä voi kokoonpanoissa olla useampi, esimerkiksi poikkileikkaus pinta-alaltaan pieni sekä suuri rinnakkain, jolloin voidaan kompensoida kaasun hitautta alhaisilla kierrosnopeuksilla pienellä kaasuläpällä sekä saavuttaa suuri vääntömomentti suuremmalla kaasuläpällä. Näin voidaan saada moottorin luonteesta hieman lineaarisempi kierrosnopeuden kasvaessa. Kaasuläpän sijainnilla imusarjassa voi olla suurikin vaikutus tasaisen kaasun jakamisen kannalta sylinterien välillä samoin kuin muodolla, joka jatkuu läpän jälkeen imusarjaan. Esimerkiksi suuri poikkileikkauspinta-alan muutos kaasuläpän jälkeen aiheuttaa helposti ilmiön, jossa kaasu jatkaa inertian vuoksi tangentiaalisesti eli suoraan kaasuläpälle tulevan muodon mukaan. [2, s. 211–214.]

Yhdellä isolla kokoojakammioilla, jossa kaasuläppä sijaitsee toisessa päässä ensiöputkien riviä, tämä ilmiö helposti aikaan saa eriarvoisen sylinteritäytöksen. Kun kaikki sylinterit eivät saa yhtä paljon ilmaa, lisääntyy nakutusriski moottorilla tai saatavilla oleva vääntömomentti heikkenee joka tapauksessa, vaikka onkin mahdollista säätää polttoaineen syöttöä sylinterikohtaisesti. Moottorin sisäisten komponenttien kuten kampiakselin kannalta ei myöskään ole optimaalista, jos eriarvoista palamista sylinterien välillä ilmenee. [3]

### 2.4 Ensiöputket

Pääperiaatteena voidaan pitää ensiöputken suuren halkaisijan tai pinta-alan ja lyhyen putken mallia toimivammaksi suurella moottorin kierrosnopeudella ja vastaavasti pitkää ensiöputkea ja pientä pinta-alaa sopivammaksi alhaisella kierrosnopeudella. Kuitenkin tähän liittyy kompromissi, jossa pieni pinta-ala rajoittaa riittävän ilmamassan virtaamista ajatellen suurinta vääntömomenttia, kun taas suuri pinta-ala on riittävä ilmamassan virtaamiseen, mutta virtausnopeus on hidas alhaisilla kierrosnopeuksilla. [1, s. 172–174.] Tämä ilmiö korostuu kokoonpanoissa, jotka ovat yhdellä pakokaasuauhimella, koska sen tuottama paine on hyvin riippuvainen moottorin pyörintänopeusta.

## 2.5 Kokoojakammio

Imusarjoissa voi olla useampi kokoojakammio, mutta yleisesti niitä on yksi kokoonpanon yksinkertaisuuden vuoksi. Kokoojakammion tilavuus ei vapaasti hengittävissä moottoreissa ole yleensä rajoittava tekijä, koska imusarjassa vallitsee atmosfääristä ilmanpaineesta pienempi ilmanpaine eli alipaine eikä kokoojakammion tilavuus rajoita juurikaan imetyksen ilmassa suuruutta. Ylipaineistetuissa kokoonpanoissa kokoojakammion tilavuus sen sijaan voi olla moninkertainen suhteessa iskutilavuuteen, jotta volymetrinen hyötysuhde voisi olla suurempi. [4]

Kuitenkin kokoojakammion tilavuus voi vaikuttaa moottorin luonteeseen samalla tavalla kuin aiemmin mainitut ensiöputken pituuden ja poikkileikkauspinta-alat. Liian pieni kokoojakammio voi myös rajoittaa ilmassa, kun liian suuri kokoojakammio voi heikentää suuresti alemmilla kierrosnopeuksilla moottorin vääntömomenttia. [1, s. 171, 178.]

## 2.6 Helmholtz-resonaattori

Vapaasti hengittävissä kokoonpanoissa eli moottoreissa, joissa ei ole minkäänlaista atmosfäärin ilman ylipaineistustapaa volymetrin hyötysuhteen parantamiseen, voidaan ja yleensä käytetäänkin imusarjan mitoittamiseen Helmholtzin teoriaa [1, s. 5].

Kaasun nopeus ensiöputkissa on normaalisti yli äänennopeuden, vapaastihengittävissäkin moottoreissa korotetulla kierrosnopeudella (noin 343 m/s), jolloin imuventtiilin sulkeutuessa kaasun hitaus aiheuttaa paineaallon tai pulssin takaisin kokoojakammioon. Helmholtzin teoriassa ensiöputken pituus mitoitetankin niin, että paineaallon palatessa uudelleen kokoojakammioista sylinterikanteen pitäisi imuventtiilin aueta juuri, kun paineaalto saapuu imuventtiilin taakse. Näin voidaan saavuttaa parempi sylinteritäytös ilman imusarjan ulkopuolisia ylipaineistusmenetelmiä. Menetelmä parantaa volymetrin hyötysuhdetta sekä toimii ”luontaisena ahtamisena”. Kuitenkin menetelmä toimii vain hyvin kapealla kierrosalueella, mutta parantaa oikein laskettuna ja mitoitetuna polttoainekulutusta ja vähentää virtaushäviöitä, kun ilman saapuessa akustisena heijastuksena kokoojakammioista kaasun hitaus kerää myös jäännöskaasuja mukaansa. Teoria toimii vain lasketulla kierrosnopeudella, koska laskettua resonanssi kierrosnopeutta alemmalla

moottorinkierrosnopeudella paineaalto kokoojakammiolta saapuu liian myöhään imuventtiilille, jolloin siitä ei ole hyötyä, kun taas laskettua suuremmalla kierrosnopeudella saapuu paineaalto liian aikaisin ja törmää näin ilmapatsaaseen, joka kulkee sylinteriin imuventtiin auetessa. [5]

Pakokaasuahdetuissa kokoonpanoissa imusarjan mitoitukseen voidaan käyttää kuitenkin hieman yksinkertaisempia menetelmiä, koska kompressori ja turbiini toimivat paineaaltojen vaimentajina, jolloin imusarjaan saapuva kaasua on tavallaan lineaarisempaa eikä ole niin herkkä aalloille. [1, s. 5.]

Helmholtzin resonaattoria käytetään myös usein ajoneuvotekniikassa moottorin sisäisten äänien hiljentämiseen, kuten mäntien ja venttiilien liikkeestä aiheutuvien pulssien, jotka voivat aiheuttaa melua imusarjassa ja moottorin imuputkistossa hiljentämään värähtelyistä johtuvia ääniä. [6]

Ohata ja Ishida olivat havainneet kokeissaan, että imusarjan paineella on suuri merkitys volymetriseen hyötysuhteeseen silloin, kun mäntä on alakuolokohdassa imutahdin aikana, juuri ennen kuin imuventtiili menee kiinni. Ohatan ja Ishidan mukaan myös painepulssit/paineaallot muuna imutahdin aikana eivät ole niin merkittäviä. [1, s. 159.]

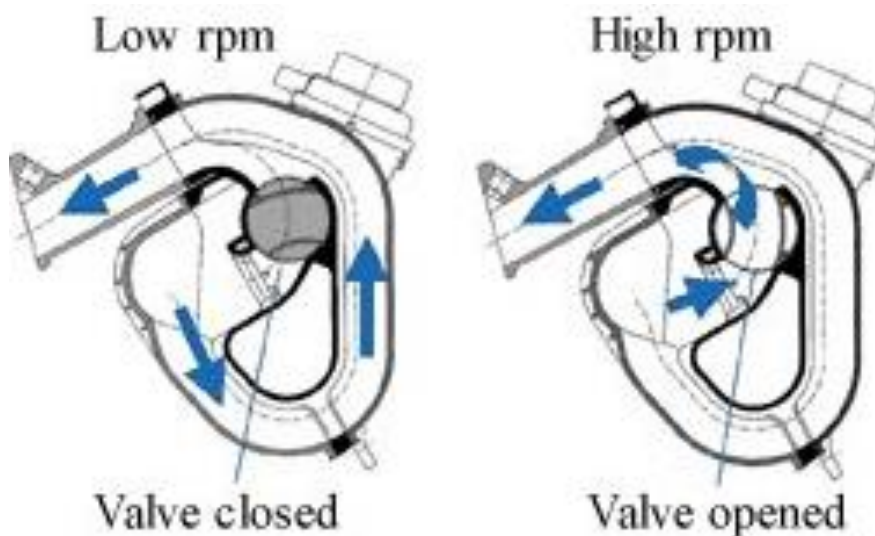
Venttiiliä ei kannata kuitenkaan sulkea männän alakuolokohdassa, koska sisään tulevan seoksen inertia eli massan hitaus on vielä niin suuri, että sillä saadaan aikaan parempi täytös sulkemalla venttiili vasta, kun mäntä on matkalla ylös. [7]

Sylinteriin saapuvan ilmapatsaan optimoimiseksi imuventtiin pitäisi aueta juuri ennen kuin mäntä saavuttaa yläkuolokohdan pakotahdin aikana. Jos imuventtiili aukeaa liian aikaisin, kun imusarjan paine on pienempi kuin sylinteripaine, osa palamisjätteistä voi joutua imusarjaan pakosarjan sijaan. [7]

## 2.7 Muuttuvageometrisuus

Muuttuvageometrisella imusarjalla voidaan kuitenkin kompensoida imusarjan toimintaa laajemmalla alueella. Tässä työssä ei kuitenkaan valmisteta muuttuvageometrista/muuttuvapituuksista imusarjaa, koska se on työstömenetelmiin nähden hankala valmistaa. Usein muuttuvageometrisissa imusarjoissa tilankäytön takia joudutaan usein käyttämään muutenkin kapeita ensiöputkia, jolloin luonnollisesti ilman massavirta pienenee. Muuttuvageometrisella imusarjalla voitaisiin kuitenkin saavuttaa parempi polttoainekulutus, mutta kuten aiemmin todettiin se ei ole prioriteettinä. [3, s. 443.]

Esimerkiksi kuvassa 2 imusarjan volymetristä hyötysuhdetta on parannettu kääntyvällä kanavalla, joka kääntyy moottorin kuormituksen vaatimuksien mukaan. Alemmilla moottorinkierrosluvuilla ilmamassa kiertää pidemmän ja poikki-pinta-alaltaan kapeamman ensiöputken läpi, mikä parantaa moottorin luonnetta esimerkiksi osakuormituksella. Moottorin huipputehoa varten kanava kääntyy niin, että ilmamassa voi kulkea lyhyemmän matkan ja käyttää vain suurempaa ensiöputken poikki-pinta-alaa. [8]



Kuva 2. Muuttuvageometrinen imusarja [8].



### 3 Alkuperäinen malli

#### 3.1 Ongelmakohdat ja niiden ratkaiseminen

Ensiöputkien muodon jatkuvuus sylinterikannen ja imusarjan tiivistyspinnan muodon mukaan on tärkeää. Epätäydellinen muodon jatkuvuus esimerkiksi sylinterikannessa olevan poikkileikkaus pinta-alan ollessa pienempi kuin imusarjassa ensiöputkien päässä oleva tai muodoltaan sopimaton aiheuttaa turhia turbulenttisia virtauksia, jotka kertaantuvat virtausnopeuksien kasvaessa. Lisäksi polttoainesuuttimien sijoitus tulee todennäköisesti hyvin lähelle sylinterikantta, jolloin suuri turbulenttisuus tai jopa patoutunut ilmanpaine kohdassa, jossa polttoaineensuihkutus tapahtuu, aiheuttaa ylimääräisiä komplikaatioita.

#### 3.2 3D-skannaus

3D-mittausmenetelmällä (kuva 3) voidaan analysoida reaali maailman kohteita ja tuottaa dataa sen muodoista ja piirteistä hyvin mittatarkasti. Mittaustapa perustuu kuvion kohdistamiseen kappaleen pintaan. Kuvion deformaatiosta kappaleen pinnalla voidaan laskennallisesti todeta syvyys ja pinnan muodot pisteverkon muodossa, eikä tällä periaatteella kappaletta tarvitse erikseen koskettaa. Kappaleen pinnoista mitatusta pistejoukosta voidaan koostaa näin kolmiulotteinen.

Menetelmä toimii hyvin ns. käänteissuunnittelussa eli applikaatioissa, joissa halutaan esimerkiksi valmistaa olemassa olevasta komponentista uusi malli, kuten tässäkin työssä. 3D-skannattua mallia voidaan käyttää CAD-kokoonpanoissa käytännössä sellaisenaan esimerkiksi hahmottamaan olemassa olevien komponenttien kokoa sekä tilantarvetta tai mallintaa skannatun mallin pohjalta eri CAD-mallintamismenetelmillä käyttökelpoinen 3D-solidmalli.

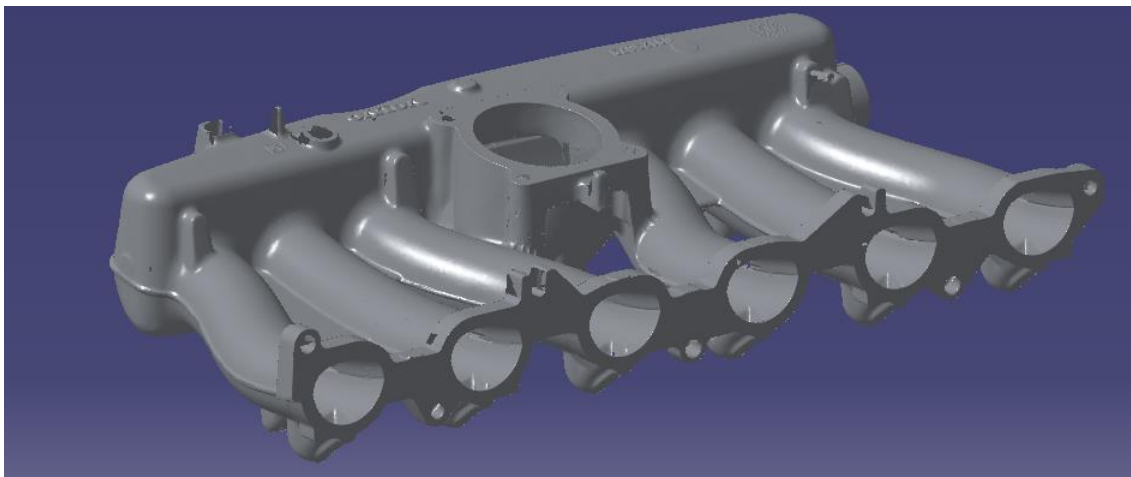
Kuva mittaustapahtumasta on kuvassa 3. Käytännössä mittausprosessissa skannataan ensin mahdollisimman suuri pinta-ala liikuttamatta mitattavaa kappaletta, minkä jälkeen kappale käännetään niin, että siitä voidaan mitata aikaisemmin piiloon jääneet piirteet.



Kuva 3. 3D-mittausmenetelmä.

Tällä mittausmenetelmällä oli mahdollista saada mitattua esimerkiksi imusarjan ja sylinterikannen välisen laippapinnan ruuvijako, ensiöputkien sisäpuoliset muodot, polttoainesuuttimien sijainti ja suihkutuskulman suunta. Näin voitiin varmistua varmistettavan tuotteen yhteensopivuudesta olemassa olevien mittojen kanssa. Jos kohdejoneuvon moottoritila olisi ahdas, voitaisiin myös samalla menetelmällä helposti 3D-skannata kaikki pinnat moottoritilasta. Näin voitaisiin nähdä yhteensopivuus olemassa olevaan tilaan, johon imusarjan tulee asettua. Tätä mittausta ei nähty kuitenkaan tarpeelliseksi kohdejoneuvon kohdalla.

3D-skannamisen jälkeen voidaan aloittaa alkuperäisen komponentin analysointi (kuva 4)



Kuva 4. 3D-skannattu alkuperäinen imusarja.

## 4 Laskenta ja mitoitus

Lasketaan arviolta kokoonpanoon soveltuvat geometriset mitat. Laskennassa oli yksinkertaistettava asioita, koska mitattuja arvoja kohdemoottorin uudesta kokoonpanosta ei ollut mitattavissa tämän työn suunnitteluhetkellä. Koska kaikki moottorin värähtelyt ja kaasunvaihtoon liittyvät prosessit vaikuttavat imusarjan toimintaan, voidaan laskentaa pitää suuntaa antavana.

### 4.1 Volymetrinen hyötysuhteen arviointi

Volymetrinen hyötysuhde ei alhaisilla kierrosnopeuksilla yleisesti voi olla 100 %, mutta korotetulla kierrosnopeudella se voi olla ylikin etenkin ahdetuissa kokoonpanoissa.

Volymetrinen hyötysuhde kuvaa moottorin imemän ilman täytösastetta suhteessa puristustilavuuteen ja iskutilavuuteen. Ilman massasta johtuvan inertian takia imusarjalla on suuri rooli tämän kanssa. Ympäröivä ilmanpaine ja lämpötila vaikuttavat ilman tiheyteen, joten hyötysuhde muuttuu ajettaessa esimerkiksi korkealla vuoristossa, jossa ilma on harvempaa. Tosin pakokaasuahdetuissa kokoonpanoissa voidaan menetettyä hyötysuhdetta kompensoida ahtimen painesuhteella, jolloin moottorin tuottama teho ei kuitenkaan laske.

Hyötysuhteen arviointi ilman mitattua dataa on kuitenkin haastavaa, koska laskentaan pitäisi ottaa huomioon käytännössä kaikki moottorissa tapahtuvat virtaukset ja massavirrat.

Volymetrinen hyötysuhteen  $nv$  peruskaava, jossa  $Va$  on arvioitu moottoriin kulkeva ilmassa ja  $Vd$  teoreettinen sylinterin iskutilavuus imutahdin aikana, on

(1)

$$nv = \frac{Va}{Vd}$$

Kaavasta voidaan johtaa yhtälö, jossa  $ma$  on pakokaasuahtimen suurin mahdollinen tuotettava ilmassa,  $nr$  kampiakselin kierroksia yhtä täyttä moottorin tahtia kohden,  $pa$  imuilman tiheys ja  $Ne$  moottorin kierrosluku kyseisellä ajanjaksolla:

(2)

$$nv = \frac{ma \cdot nr}{pa \cdot Vd \cdot Ne}$$

Siitä lasketaan ensin arvioidulla ilmanpaineella vallitseva ilman tiheys kaavalla, jossa  $Ra$  eli kuivan ilman kaasuvakio on 286,9 J/kgK ja lämpötila (+40 °C) muutetaan kelvineiksi sekä absoluuttinen ilmanpaine barista pascaliksi.

(3)

$$pa = \frac{3.0 \cdot 10^5}{286.9 \cdot (40 + 273.15)} = 3,339 \text{ kg/m}^3$$

Kaavassa 4 muunnetaan kierrosnopeus minuuteista sekunneiksi sekä moottorin iskutilavuus kuutiosenttimetreistä kuutiometreiksi

(4)

$$nv = \left( \frac{0.5 \text{ kg/s} \cdot 2}{3.339 \text{ kg/m}^3 \cdot 2.783 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{6000}{60}} \right) \cdot 100 = 111.91\%$$

Imuilman lämpötilan arviointi on karkeasti laskennallinen adiabaattisista prosesseista, joissa oletetaan imuilman jäähdytys erittäin tehokkaaksi, hyvin pieni painehäviö välijäähdyttimellä sekä muutenkin optimaaliset olosuhteet moottorin toiminnan kannalta.

#### 4.2 Ensiöputket

Ensiöputkien määrittäminen Heimholtzin resonanssi -teorialla, jossa kaavasta johdetaan yhtälö, jolla voidaan määrittää ensiöputken laskennallinen pituus. Siinä  $n$  on moottorin kierrosluku, jolla resonanssitaajuus halutaan ilmenevän.  $Fp$  on ensiöputken poikkileikkaus pinta-ala kohdassa, jossa pinta-ala on pienin putkessa.  $lp$  on ensiöputken pituus imuventtiililtä putken päähän ja  $Vc$  yhden sylinterin iskutilavuus. [1, s. 5, 161.]

(5)

$$n = \frac{15a}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{Fp}{lp \cdot Vc}}$$

Kaavasta voidaan johtaa haluttu ensiöputken pituus:

(6)

$$l_p = \frac{15^2 \cdot a^2 \cdot F_p}{n^2 \cdot \pi^2 \cdot V_c}$$

(7)

$$l_p = \frac{15^2 \cdot (343\text{m/s})^2 \cdot 13 \cdot 10^{-4}}{6000^2 \cdot \pi^2 \cdot 0.4637 \cdot 10^{-3}} = 0.208\text{m}$$

Kuitenkin ensiöputkien poikkileikkauspinta-alan muuttuessa mallissa ei arvoa voida pitää täysin realistisena. Nokka-akselin asteluku vaikuttaa myös ensiöputken pituuteen. Asteluku kuvastaa aikaa, jolloin imuventtiili on auki suhteessa kampiakselin kiertokulmaan.

David Vizardin vieläkin karrikoidummassa teoriassa ensiöputken pituus on ensin 178 mm, kun moottorin kierrosluku on 10000 rpm. Teoriassa lisätään 43 mm ensiöputken pituutta jokaista vähennettyä 1000 moottorin kierrosta kohti, jotta päästään tavoitteelliseen moottorinkierroslukuun, jolla moottori tuottaa suurimman vääntömomentin. Tällä teorialla saadaan ensiöputken pituudeksi 350 mm. [9, s. 9.]

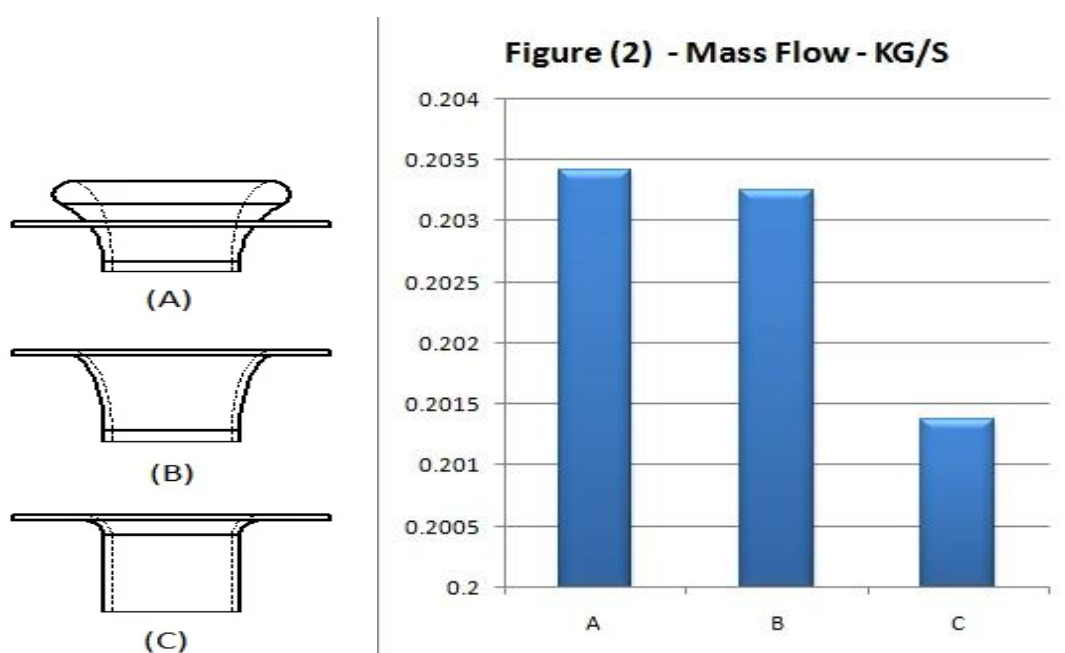
Ensiöputkien pituuden laskentaan löytyy niin paljon teorioita, että tarkan tehollisen pituuden selvittäminen, jossa voitaisiin hyödyntää Heimholtzin resonanssi -teoriaa ei lopputuotetta ajatellen ole välttämätöntä. Myös sylinterinkannen imukanavan pysyessä vakiona ei koko ensiöputken poikkipinta-alaan voida vaikuttaa kuin suurentamalla putken laskennallista halkaisijaa sylinterinkannen kohdalta kokoojakammioon päin 12 mm.

Alkuperäisessä moottorissa huipputeho saadaan kierrosluvulla 5400 rpm ja huippuvääntö 2000–5000 rpm. Kokoonpano on ollut kuitenkin täysin erilainen ja suunniteltu tuottamaan vääntömomenttia hyvin pieniltä kierrosluvuilta saakka. Kuitenkin alkuperäisten ensiöputkien pituus tuntuu sopivalta, joten valmistettavan kokoonpanon säädettävyydessä voitaisiin mahdollistaa samanpituisten ensiöputkien käyttö, mutta myös pidempien

ja lyhyempien. Näin voidaan säätää ensiöputkien pituus vastaamaan haluttua moottorin luonnetta käytännössä

### 4.3 Ensiöputkien päiden muoto

Ensiöputkien päiden muodolla kokoojakammiossa voidaan hieman parantaa tehollista putken poikkipinta-alaa. Kokoojakammion suuren tilavuuden vuoksi ilmamassan nopeus on pieni verrattuna ensiöputkiin. Ensiöputkien päissä tapahtuukin tästä syystä suuri nopeuden muutos, ja tätä muutosta voidaan parantaa geometrisesti. Ilman nurkkapyöritystä tai pienellä pyörityksellä kaasun virtaus pyrkii kulkemaan pyöritysten mukaisesti, jolloin virtaus ei pysy ensiöputken sisäpinnalla heti pyörityksen jälkeen. Tämä johtaa siihen, että kaasu pyrkii virtaamaan keskelle putkea eikä pysty palautumaan kohti seinää suuren virtausnopeuden takia. Virtausnopeuden kasvaessa paine laskee ja ilmamassan määrä vähenee. Tämä selvenee hyvin kuvasta 5.



Kuva 5. Ensiöputkien päiden vertailu [10].

Tapauksessa (A) pään muoto on ensiöputken mukaan tangentiaalinen ja sillä on elliptinen muoto. Tässä suurella nopeudella kiihtyvä kaasu kykenee pysymään pyöreän muodon pinnassa irtoamatta, ja näin saadaan käytettyä koko putken halkaisija hyväksi. Kuvan perusteella voidaan todeta, että elliptistä pään muotoa voidaan soveltaa tässäkin työssä. [10]

## 5 Suunnittelu

Tietokoneavusteisessa suunnittelussa käytettiin pääasiassa Catia V5 -ohjelman sovelluksia sekä Ansys-laskentaohjelmaa havainnoimaan ongelmakohtia. Catian ollessa tuttu opinnoista tuntui sen käyttö luontevalta myös tämän työn suunnittelussa

### 5.1 Polttoainesuuttimet

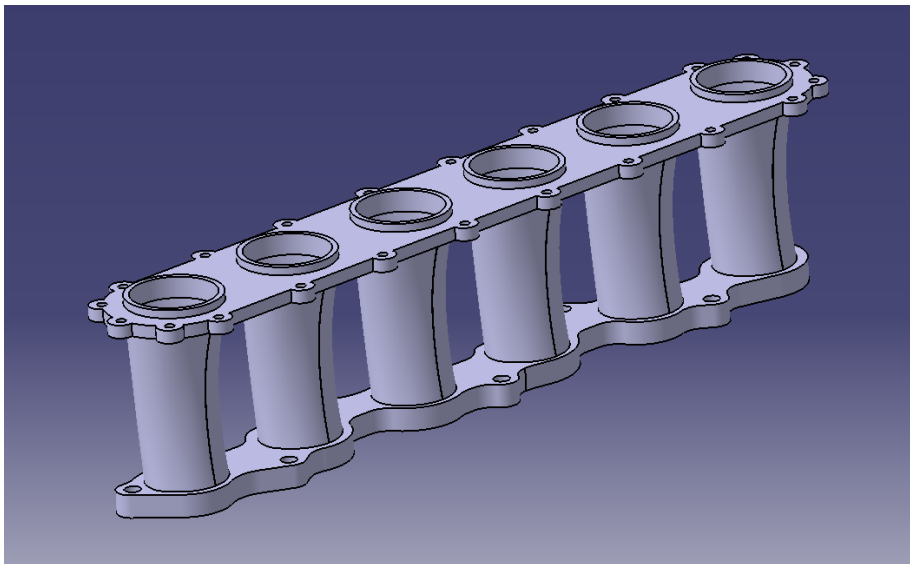
Suuttimet sijoitettiin sinne, missä virtausnopeus on suurin, eli lähimmäksi imuventtiiliä ensiöputkessa, jotta polttoaine ei hidastaisi nopeaa ilmavirtaa. Suuttimen suihkutus-suunta mahdollisimman tangentiaalinen kanavan mukaan. Suuttimien sijoituksella ensiöputkessa voidaan myös vaikuttaa moottorin luonteeseen. Esimerkiksi kokoonpanoissa, joissa tavoitteena on suuri moottorinkierrosluku, voidaan suutin sijoittaa ulkopuolelle ensiöputkesta ja suihkutusta tapahtuu ensiöputken päähän. Polttoaine sumun sekoituessa kauemmin ilmaan ensiöputkessa on polttoaineella jäähdyttävä vaikutus sylintereihin kulkevan ilman kanssa. Polttoainesuuttimien paikat eivät ole vielä sisältyneenä CAD-malliin, mutta niitä ei tässä työssä simuloida tai lasketa teoreettisesti niin, että ne olisivat tarpeellisia kyseisessä mallissa.

### 5.2 Yksi kokoojakammio

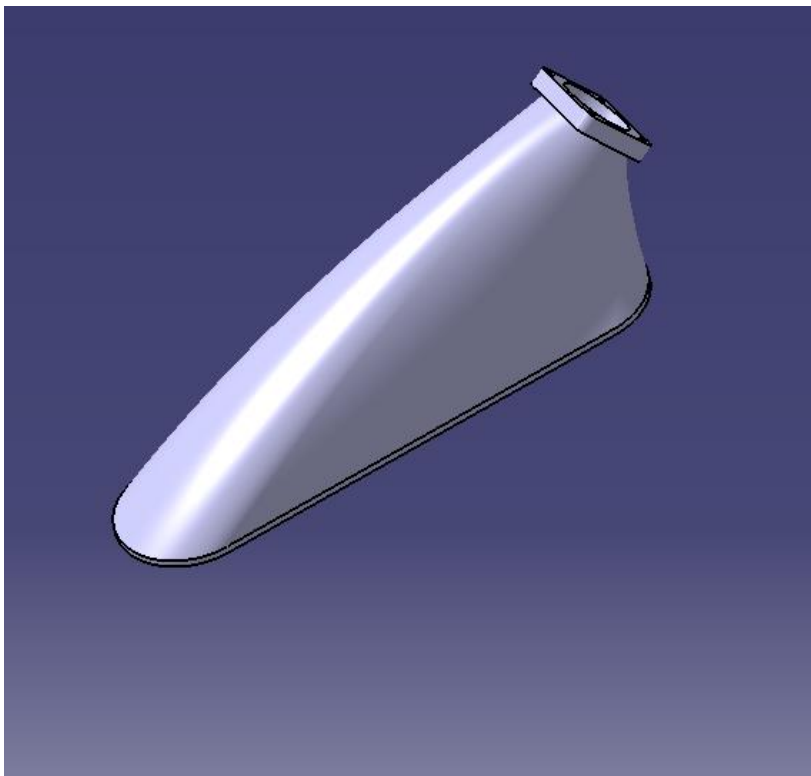
Imusarjoissa, joissa on vain yksi iso kokoojakammio, kaasun hitaus ja nopeus aiheuttaa sen, että ilma voi jakautua sylintereiden kesken epätasaisesti. Tässä kokoonpanossa yleensä tilavuus myös muuttuu äkisti, jolloin kaasu pyrkii jatkamaan suoraan tangentiaalisesti sen tulokulman suhteen. Suunnittelin yhden mallin, jossa käytetään yhtä suurta



kokoojakammiota (kuva 7), kuitenkin ensiöputkien pysyessä samana. Kokoonpanoon kuuluu ensiöputkien laipparunko (kuva 6), joka pysyy samana eri kokoojakammioversioilla. Laipparunko kiinnittyy ruuveilla sylinterikanteen, ja laipparunkoon kiinnittyvät ensiöputkien päät sekä tässä mallissa yksi kokoojakammio.



Kuva 6. Alustava ensiöputkien laipparunko.

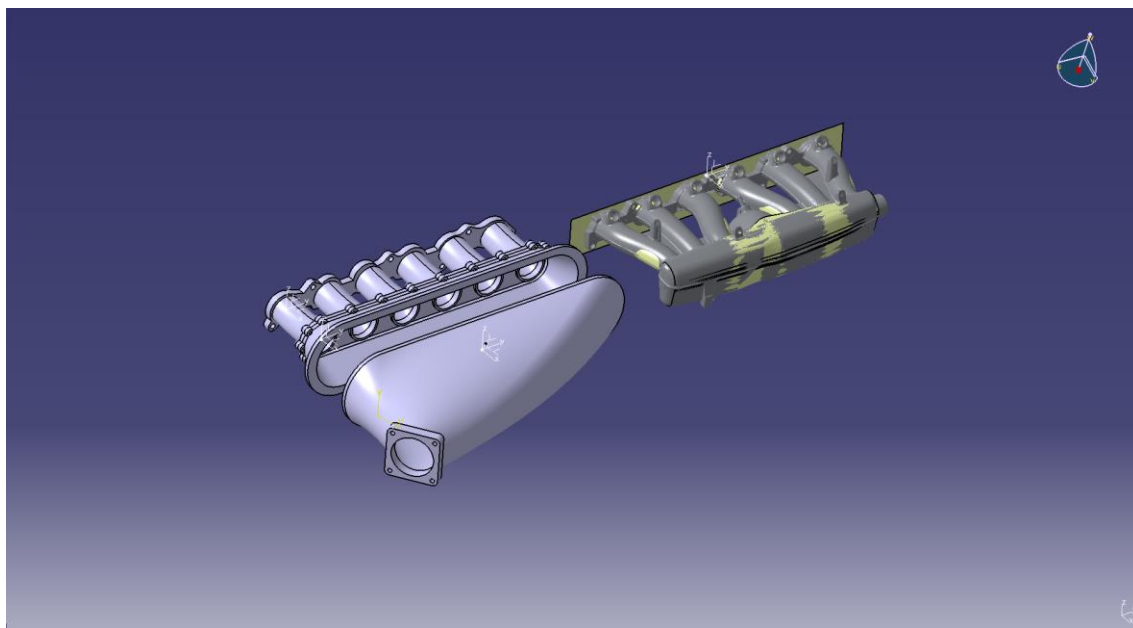


Kuva 7. Kokoojakammion CAD-malli.

Tässä kokoonpanossa haluttiin tutkia kyseisen mallin virtausominaisuuksia. Kokoojakammion muoto ei ole niin optimaalinen kuin se tässä kokoonpanossa voisi olla, mutta se havainnoi kuitenkin virtaus ominaisuuksia, joita pyritään pohtimaan. Kokoonpanossa voidaan teoreettisesti muuttaa kokoojakammion tilavuutta sekä hieman ensiöputkien pituuksia. Tilavuutta voitaisiin lisätä esimerkiksi laipparungon ja kokoojakammion väliin sijoittuvalla välilevyllä.

Kokoojakammion muoto ei ole tässä mallissa kuitenkaan optimaalinen rakenteen lujuuden kannalta. Ilmanpaineen kasvaessa kammion sisällä liian suureksi, voi sen seinämät ja rakenne pyrkiä pullistumaan keskeltä pyöreään muotoon. Ilmiö voi myös komponentin materiaalista sekä rakenteen geometriasta riippuen johtaa konstruktion vaurioitumiseen. Deformaatiota kammion keskellä voidaan vähentää kuitenkin lisäämällä esimerkiksi tukipilareita, jotka toimivat rakennetta jäykistävinä elementteinä. Tukipilarit kuitenkin ovat ilmassan virtauksen tiellä joka tapauksessa, jolloin ne aiheuttavat turhaa turbulentista virtausta kammiossa. Tämä pyörteily ei todennäköisesti kuitenkaan juuri vaikuta

moottorin tuottamaan suurimpaan vääntömomenttiin käytännössä. Suuren kokoojakammion kokoonpanon ja alkuperäisen imusarjan suuruuserot voi havaita kuvasta (kuva 8)



Kuva 8. Vertailukuva alkuperäisen imusarjan ja kokoonpanon välillä.

### 5.3 CFD-laskenta

Virtaussimulointi on suoritettu paine-eron avulla, jossa ei ole otettu huomioon ilman yli-painetta, sekä virtaus on jatkuvaa ja yhtäaikaista sylintereihin. Kyseisessä simulointimenetelmässä ei ole siis huomioitu imusarjassa imuventtiilin sulkeutumisesta johtuvia pulseja ja värähtelyitä, jotka vaikuttavat paljon imusarjan toimintaan todellisuudessa. Kuitenkin kaikki mallit simuloitiin samalla paine-erolla, laipparungolla ja ensiöputkien päällä, jolloin suurempi laskennallinen massavirta kuvastaa pienempää virtausvastusta kokoojakammion läpi.

Kuitenkin simuloinnissa voidaan laskennan tulosten pohjalta muuttaa komponenttien rakennetta optimaalisemmaksi ilmassan virtausten kannalta ja havainnoida visuaalisesti hyvin eroja mallien välillä.

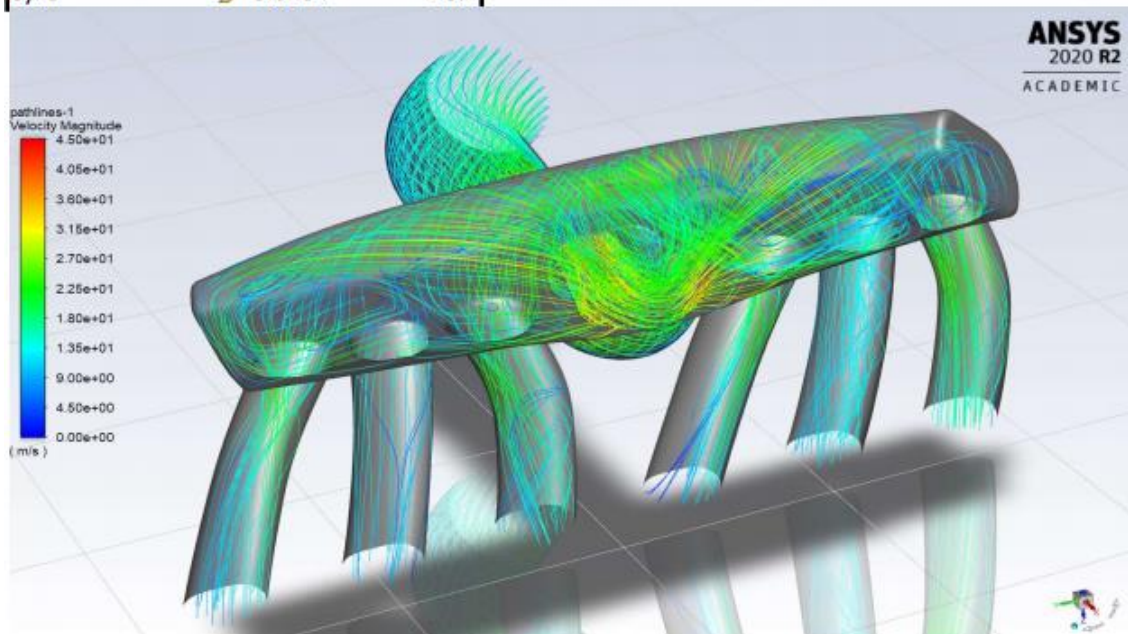
Simuloinnissa on otettu huomioon kaasulämpen aiheuttama asema ja sijoitus, joka aiheuttaa myös virtausten jakaantumista ja vaikuttaa ilman pyörteilyyn juuri ilman saapuessa kokoojakammioon.

Simuloinnissa kaikissa malleissa kaasulämpen aukiolokulmaksi on määrätty noin 75 %, jotta voitaisiin ottaa huomioon kaasulämpen aiheuttavat vaikutukset osakuormalla.

Kuvassa 9 voidaan nähdä 3D-skannatun alkuperäisen imusarjan pohjalta tehty hieman yksinkertaistettu malli. Kapeampien ensiöputkien ja kokoojakammion muotojen vuoksi mallissa ilman massavirran määrä on rajoittunut. Tässäkin mallissa kaasulämpen jälkeen tapahtuu suuri tilavuuden muutos, mutta sen kokoojakammion muoto, johon ilma tulee, ohjaa massavirtaa melko hyvin koko kammioon.

#### Imusarja-ei-evo

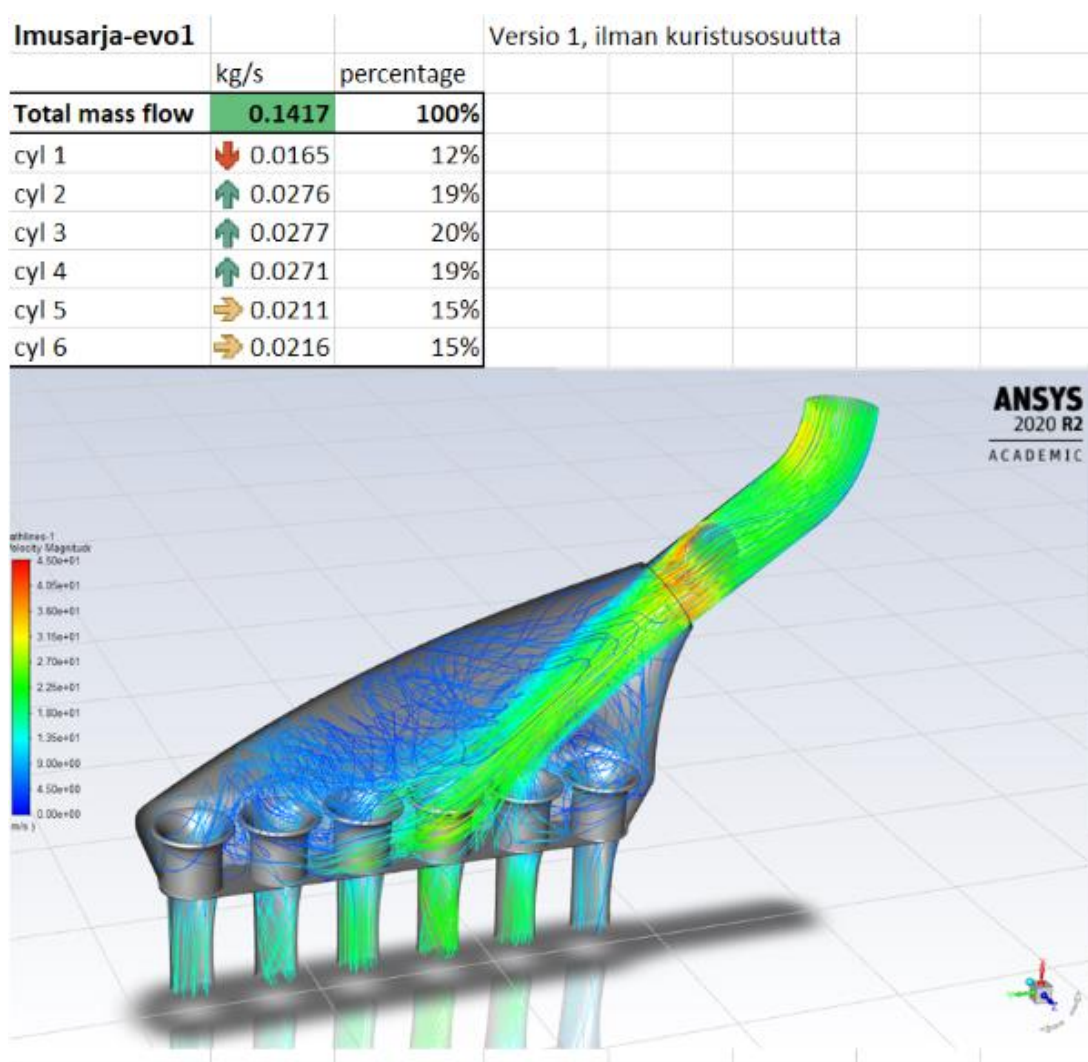
	kg/s	percentage
<b>Total mass flow</b>	<b>0.1009</b>	<b>100%</b>
cyl 1	↑ 0.0219	22%
cyl 2	→ 0.0168	17%
cyl 3	↓ 0.0130	13%
cyl 4	→ 0.0169	17%
cyl 5	↓ 0.0158	16%
cyl 6	→ 0.0164	16%



Kuva 9. Alkuperäisen imusarjan virtauslaskenta.

Yllättävää simulaatiotuloksissa tämän mallin osalta oli massavirran jakaantuminen suu-  
resti kohti ensimmäistä sylinteriä eli ensiöputkea, joka on kuvassa oikeassa laidassa  
kammiota. Tämä johtuu todennäköisesti kuitenkin simuloinneissa käytetyn kuvitteellisen  
putken muodosta, joka sijaitsee ennen kaasuläppää.

Kuvasta 10 voidaan päätellä, että kaasuläpän jälkeen ilman virtaus ei jaksa pysyä suuren  
äkillisen paineen ja tilavuuden muutoksen vuoksi kokoojakammion sisäseinämällä vaan  
jatkaa tangentiaalisesti keskelle ensiöputkien laipparunkoa. Mallissa massavirtaus on  
hyvä ilman saapuessa suoraan ensiöputkien päille, mutta ilman jakautuminen sylinterei-  
den kesken ei ole optimaalista.

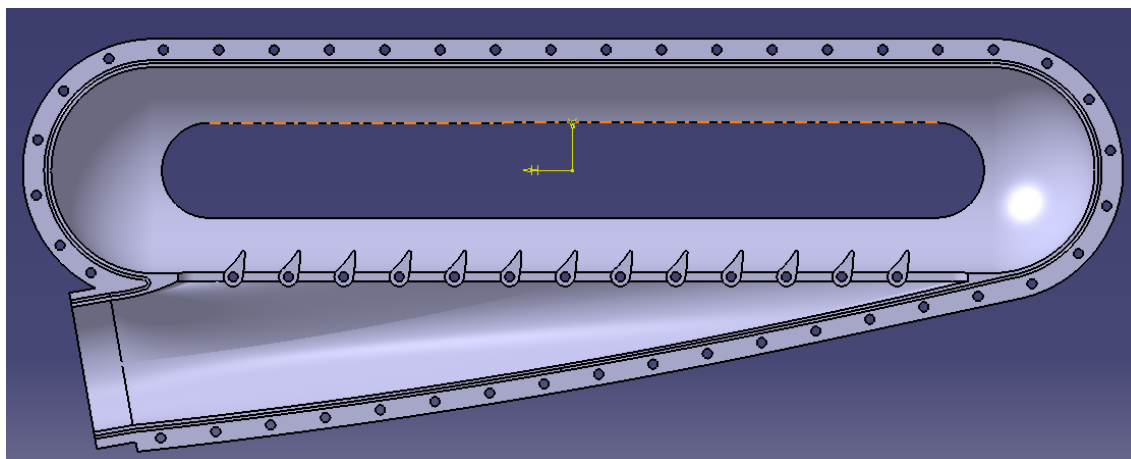


Kuva 10. Havainnekuva CFD-laskennan tuloksesta.

#### 5.4 Tuplaplenum-tyyppinen imusarja

Tuplaplenum-tyyppisessä imusarjassa (kuva 11 ja 12) voidaan puhua pääplenumista, joka voi olla kartiomainen tai auki leikattu putki heti kaasuläpän jälkeen, sekä kollektorista, johon ensiöputkien päät tulevat. Paine kollektorissa tasaantuu, koska siihen ei vaikuta suoraan kaasun nopeus ja hitaus/inertia, kun kaasu saapuu pääplenumin ja kollektorin välisen suorakaiteen muotoisen kuristuksen läpi. Tämä myös parantaa konstruktiosta riippuen tasaisempaa ilman jakoa sylintereille johtuen kuristuksen painetta tasavista ominaisuuksista kollektorin ja pääplenumin välillä. Sylintereille jakaantuvaa ilmaa voidaan vielä parantaa rivoituksella kuristuksessa, jotka ohjaavat kokoonpanon geometrista riippuen ilmaa kohtisuoraan ensiöputkien päitä kohti. Samasta syystä nykypäivänä käytetäänkin usein välijäähdyttimiä suoraan imusarjassa, jolloin jäähdyttimen rivoitus tekee saman tehtävän. Koska laskennallisesti virtausnopeus on nopeus kertaa pinta-ala, virtausnopeuden lasku kuristuksessa on yhtä suuri kuin plenumin pinta-ala, jos ajatellaan nopeuden olevan vakio [3].

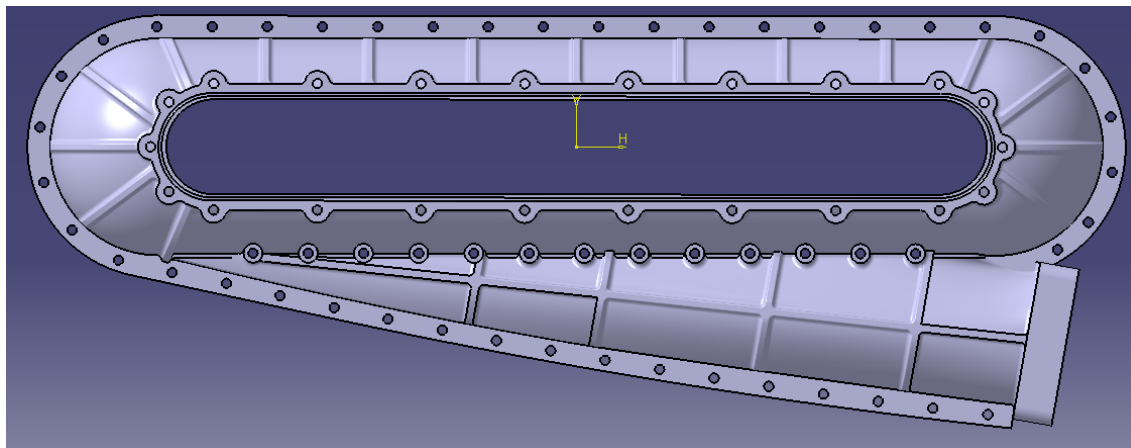
Suurimmat erot käytännön kannalta tulevatkin tuplaplenumin ja yhden plenumin välillä alemmilla moottorin kierrosnopeuksilla, eikä kokoonpanojen välillä ole välttämättä suurta huipputehoeroa.



Kuva 11. Tuplaplenumin poikkileikkaus.

Kyseinen malli koostuu kahdesta tuplaplenumin puolikkaasta, jotka kiinnittyvät toisiinsa ruuvein. Kuristuksen kohdalla on pisaran tyyppisen ilmanohjaimet, joiden tarkoitus on

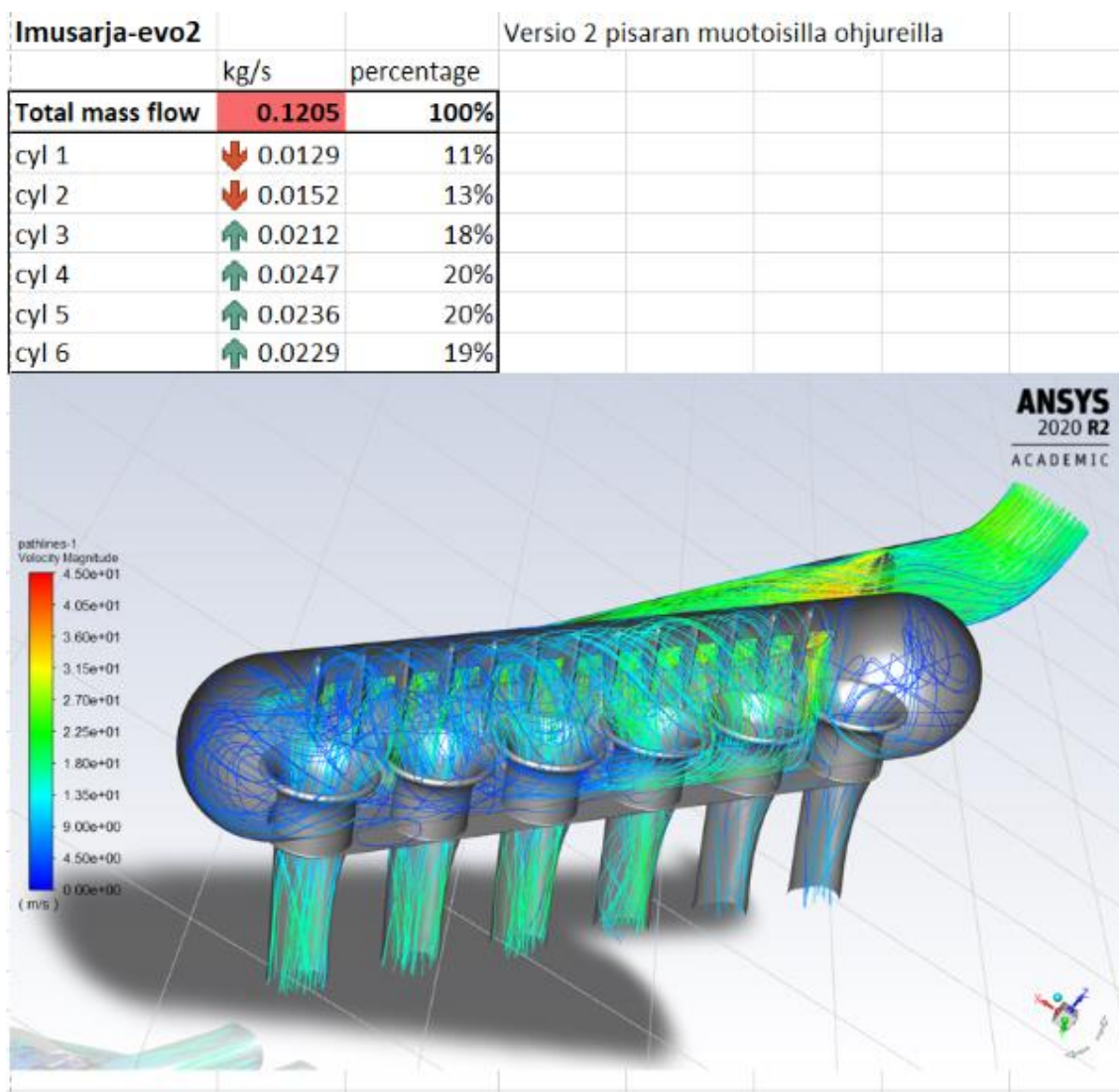
ohjata kokoojakammioon saapuvan ilman jakautumista tasaisemmin sylintereihin nähden. Ohjaimien läpi voidaan myös sijoittaa ruuvit jäykistämään rakennetta, koska kuristuksen kohdalla paine jakaantuu pienelle alueelle, joka lisää deformaatoriskiä.



Kuva 12. Tuplaplenumin poikkileikkauksen ulkopuoli.

Kokoojakammion muoto mallissa on kapselin muotoinen, koska sillä on lujuuden kannalta optimaalisimmat geometriat kestämään painetta. Lisäksi ulkopinnoille on lisätty jäykistäviä piirteitä, joilla voidaan mallin puitteissa saada luja rakenne. Tämä rakenne mahdollistaa suhteellisen pienen seinämävahvuuden käyttämisen, joka on tässä mallissa 3,5–4 mm. Pienen seinämävahvuuden ansiosta rakenne voi olla kevyt, vaikka se ei olekaan tässä työssä tärkeimpänä prioriteettina.

Kuvasta 13 on esitetty tulokset kyseisen mallin virtausominaisuuksista pisaran tyyppisillä ilmanohjaimilla.

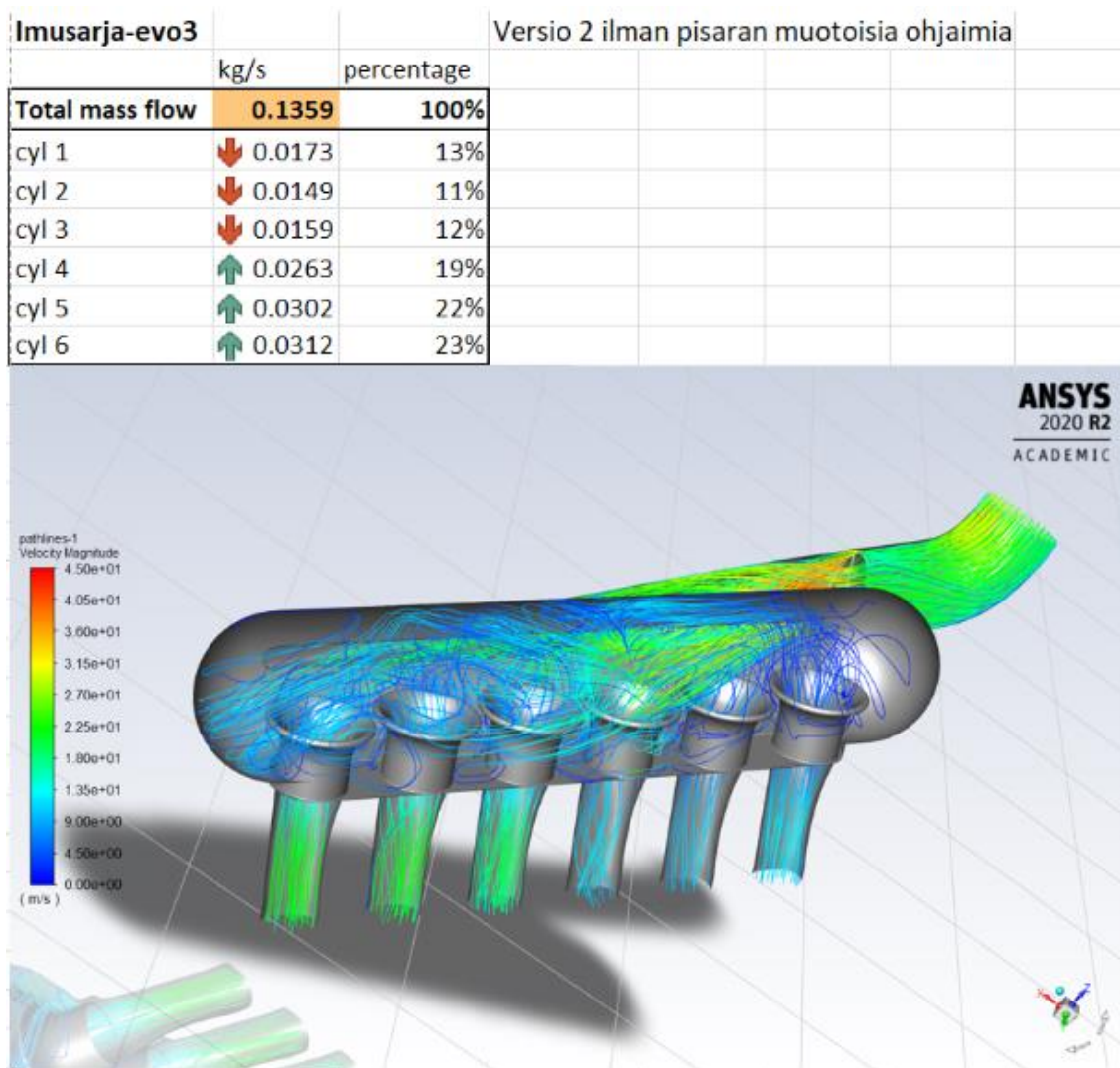


Kuva 13. Virtauslaskennan tulokset.

Tässä mallissa kuristuksen ja ilmanohjaimien myötä ilman massavirta pienenee. Simuloinnin perusteella ilma jakautuu hyvin kolmannen ja kuudennen välillä, mutta kuristuksen sijainnista kaasuläpältä saapuvan ilman suhteen ei ilma kulkeudu etummaisille sylintereille yhtä hyvin ilmanohjaimista huolimatta. Kuitenkin pääplenumin muoto jatkuu kaasuläpältä tangentiaalisesti niin, että ilma jakautuu kohtalaisen homogeenisesti ilmanohjaimista.

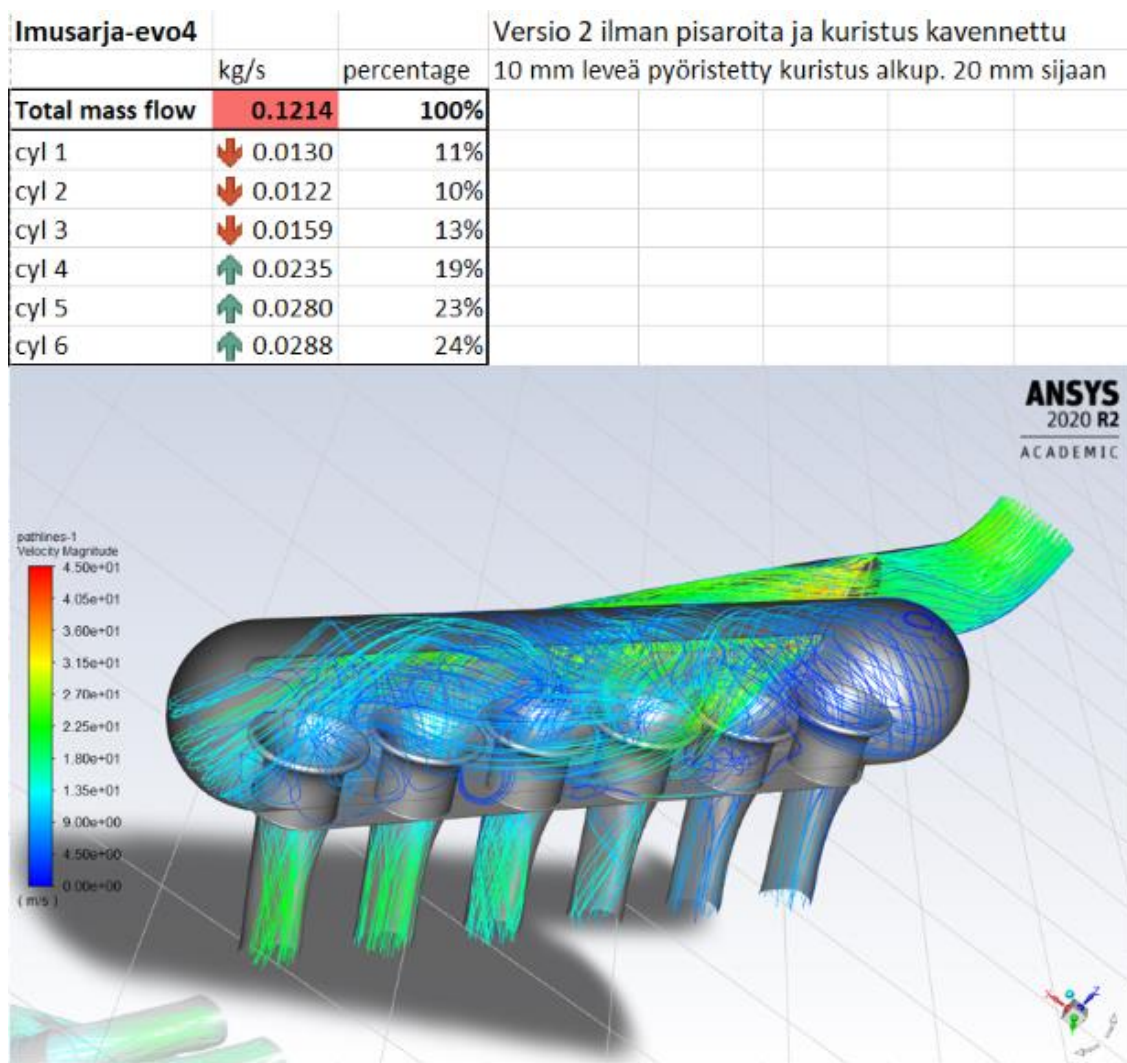


Kokoonpanossa ilman ohjaimia kuristuksessa, massavirta luonnollisesti kasvaa. Kun kuristuksessa ei ole ohjaimia, ilma pyrkii kulkeutumaan massansa vuoksi kuitenkin vielä enemmän takimmaisille sylintereille eli kuvan 14 suhteen vasempaan reunaan.



Kuva 14. Tuplapienum, jossa ei ole ilmanohjausta erikseen kuristuksessa.

Kuvassa 15 pyritään laskennallisesti todentamaan, kuinka kuristuksen tehollinen pinta-ala vaikuttaa ilman massavirtaan ja jakautumiseen.



Kuva 15. Tuplaplenum, jossa kuristuksen poikkipinta-ala on puolitettu.

Kuristuksen kaventuessa massavirta pienenee entisestään. Nurkkapyöristykset kuitenkin kuristuksessa vaikuttavat positiivisesti massavirtaan. Ilmanohjaimilla, jotka ovat vertikaalisesti kohtisuorassa ensiöputkien päitä kohti, olisi mahdollista parantaa massavirran jakautumista sylintereiden kesken. Ilman saapuessa suhteellisen pienestä kohtauskulmasta suoriin ilmanohjaimiin lisääntyy kuitenkin taas virtausvastukset. Suorilla ilmanohjaimilla pitäisi rakenteen olla myös melko jäykkä ja vaatisi kohtalaisen suuren riivoituksen, jotta voitaisiin käyttää kuristuksen läpi meneviä ruuveja vahvistamassa raken-

netta. Ilman kuristuksen lisätukemista suorilla ilmanohjaimilla, on mahdollista suuren paineen saapuessa pääplenumiin rivoituksen murtuminen, jolloin ilmanohjaimet voivat päästä sylintereihin ja aiheuttaa moottorivaurion.

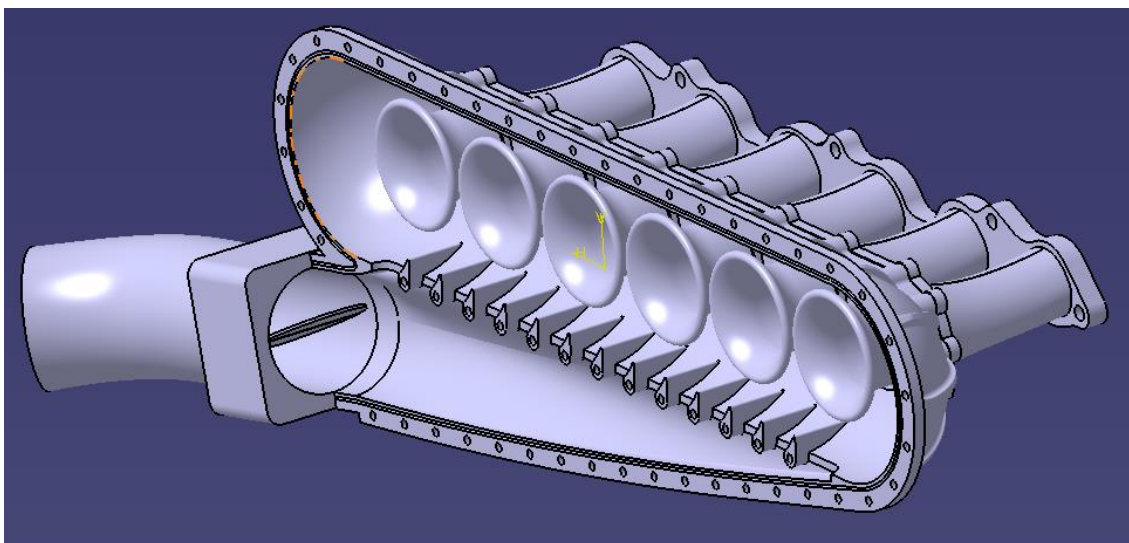
Tässä työssä päädyttiin tuplaplenum-tyyppiseen kokoonpanoon johtuen sen teoreettisesti paremmasta toiminnasta alemmilla moottorin kierrosluvuilla ja sen toiminnasta pakokaasuahhtimen kanssa ajatellen nopeampaa ahtopaineen kasvua. Kyseisessä kokoonpanossa voidaan vielä myös kehittää ominaisuuksista jakaa ilmamassa tasaisemmin sylintereiden välillä ennen valmistusta kokoojakammioden kuristuksen alueelta. Käytössä olevat valmistusmenetelmät myös mahdollistavat monimutkaisen kokoonpanon valmistuksen. Lisäksi imusarjaa voidaan myös käyttää eri ottomoottoreissa valmistamalla mallikohtainen ensiöputkien laipparunko, joten kokoonpanoa on mahdollista käyttää ja kehittää tulevaisuutta ajatellen.

Tuplaplenum-tyyppisessä kokoonpanossa mahdollistetaan myös ensiöputkien tehollisten mittojen muuttaminen. Kyseisessä mallissa ensiöputkia voidaan muuttaa välillä 200–310 mm, jossa myös samalla kokoojakammion tehollinen tilavuus putoaa noin seitsemästä litrasta noin viiteen litraan.

Kokoojakammioden mallin ollessa symmetrisiä poikkileikkauksia toisiinsa nähden on myös kokoojakammiokotelot mahdollista myös kääntää ylösalaisin ensiöputkien laipparunkoon nähden. Vastakkaiselle puolelle ensiöputkia tulevaan koteloon valmistetaan myös kansi, johon voidaan työstää tarvittavat mittauspisteet esimerkiksi imusarjassa vallitsevasta paineesta moottorin ohjainlaitteelle. Kotelon rakenne voidaan esimerkiksi muuttuvasta kokoonpanosta riippuen valmistaa laskennallisesti myös pettämään tietyn lasketun paineen ylittyessä, jolloin kannen pettäessä se estäisi itse kokoojakammioden vaurioitumisen eli toimisi tavallaan sulakkeena kokoonpanolle.

Kuitenkin kannen rakenne täytyisi suunnitella geometrisesti niin, että se ei pettäessään vaurioita muita moottoritilassa olevia turvallisuuden kannalta kriittisiä osia kuten polttoainejakeluun liittyviä komponentteja. Lähtökohtaisesti tälle menetelmälle ei ole kuitenkaan tarvetta, koska ylipainetta voidaan rajoittaa monilla paremmillakin menetelmillä.

Kuvassa 16 voidaan vielä nähdä CAD-malli kokoonpanosta, jota käytettiin simuloinneissa.



Kuva 16. Kokoonpanosta hahmotelma, jota käytettiin myös virtauslaskennassa. Kyseissä mallissa kuristuksessa on pisaranmalliset ilmanohjaimet.

## 5.5 Lujuuslaskenta

Imusarjan rakenteen suunnittelussa on otettava huomioon tilanteet, joissa esimerkiksi korkeapaineinen pulssi syntyy imusarjassa. Tämä voi johtua esimerkiksi polttoaine-seoksen syttymisestä imusarjassa tai väärästä sytytyksen ajoituksesta.

Tämä paine voi olla kokoonpanosta riippuen yli seitsemän baaria ja nopeasti kasvava paine piikki voi aiheuttaa vaurioita imusarjassa, riippuen imusarjan geometriasta. Kuitenkin korkea paineenousu voi avata imuventtiileitä ja sylintereistä, joissa on pakoventtiilit auki, jolloin voi paine päästä imusarjasta pois. Silti imusarjan rakenne olisi hyvä suunnitella kestämään kyseisiä nopeasti syntyviä paineaaltoja.

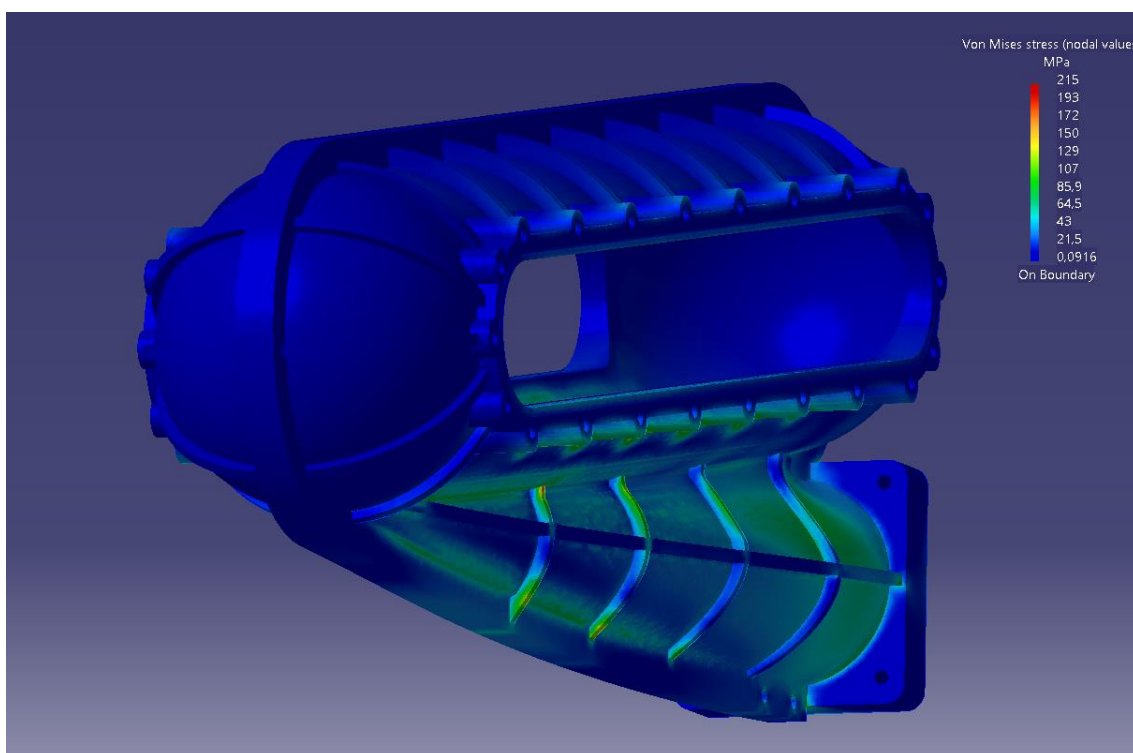
Lieriön ja pallon muodot kestävät muodoltaan parhaiten painetta, ja niitä onkin pyritty käyttämään valmistettavassa kokoonpanossa. Muodon ollessa epäsymmetrinen voidaan pinnalle lisätä tukevia piirteitä tai tukirivoitusta, jotka pyrkivät estämään seinämän leikkautumisen tai murtumisen suuressa paineessa.

Kokoonpanon monimutkaisesta rakenteesta johtuen ei ole mahdollista laskea paineen aiheuttamia kohdistuvia voimia ja niiden vaikutuksia käsin, joten konstruktion laskemisessa oli käytettävä apuna FEM-laskentaa. (Kuva 17.)

Valmistettavassa kokoonpanossa tullaan käyttämään valmistusmateriaalina AW-6082 T651 -alumiinia sen riittävän lujuuden ja työstettävyyden vuoksi. Materiaalivalintaa pohditaan valmistuksessa enemmän.

Murtolujuus tarkoittaa suurinta voimaa pinta-alayksikköä kohti eli painetta, jonka aine kestää murtumatta. Myötölujuus määritellään vastaavasti sen mukaan, millainen paine aiheuttaa sen, että aine antaa myöten mutta ei murru. Nämä suureet ovat käytännössä paineita, mutta niiden yksikkönä käytetään yleensä newtonia neliömillimetriä kohti ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ), joka on samansuuruinen kuin megapascal (MPa).

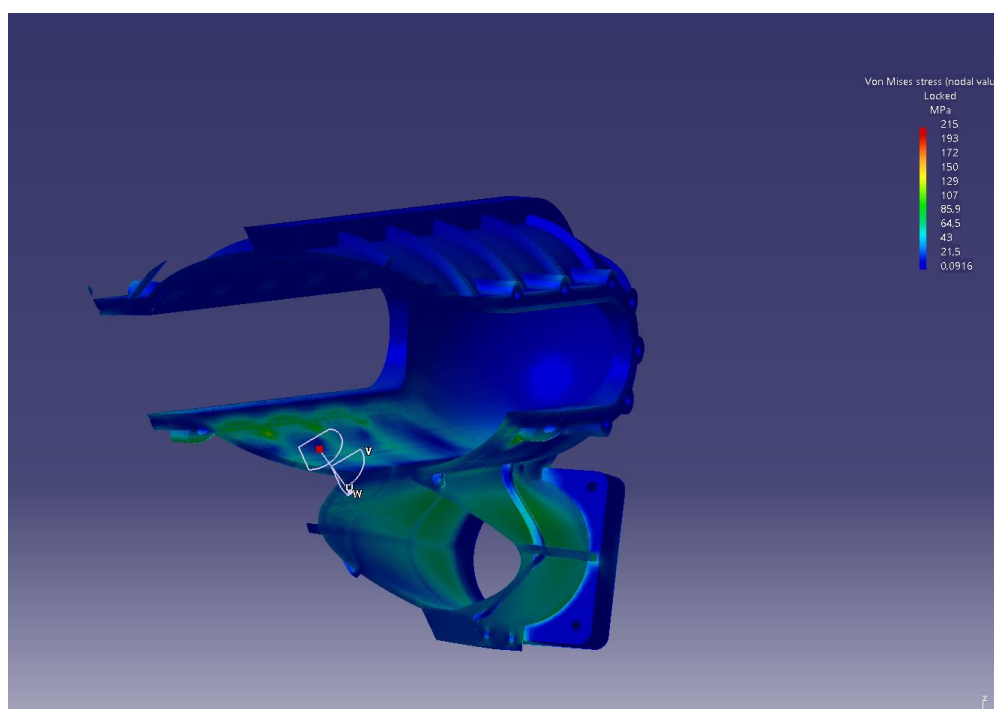
Valmistettavan materiaalin vetomurtolujuus on 140–330 MPa ja myötöraja 280 MPa.



Kuva 17. FEM-analyysin tulos vallitsevan paineen ollessa 1 MPa / 10 bar imusarjassa.

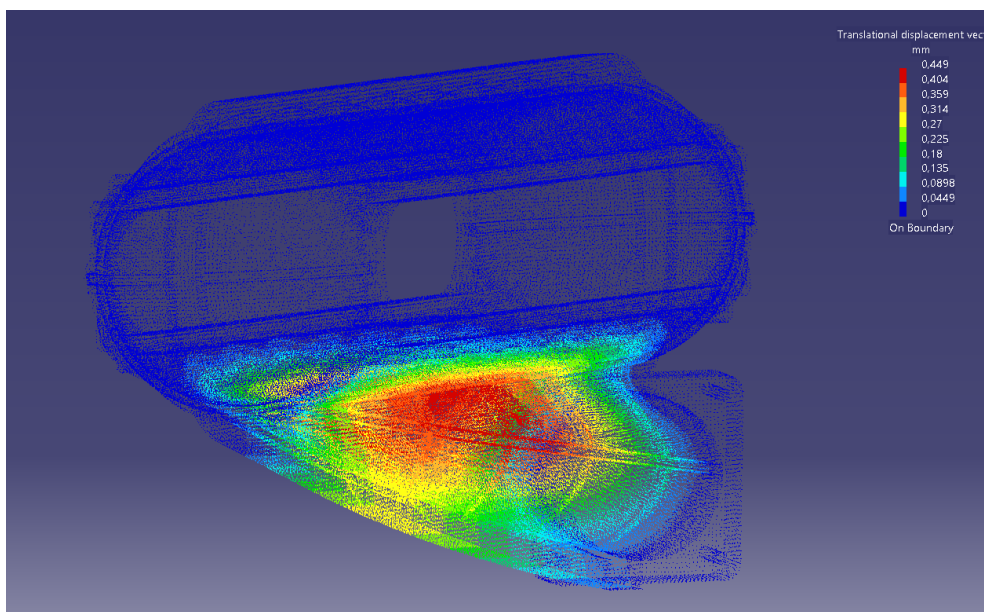
Analyysin perusteella voidaan todeta, että suurimmat voimat vaikuttavat juuri pääple-numissa, jossa suurimmat rasitukset lähtevät reunoilta. Nurkkapyörityksillä onkin suuri vaikutus rakenteen kestävyYTEEN, ja tässä mallissa niitä ei vielä ole havainnollistavista syistä. Tässä mallissa ei myöskään ole kuristuksentuentaa erikseen, mikä vaikuttaa paljon rakenteeseen. Ottaen huomioon kuitenkin varmuuskertoimen pitäisi materiaalin myötöraja sekä murtolujuuden riittää kyseiseen rakenteeseen hyvin, kun suurin rakenteeseen kohdistuva paine on 215 MPa. (Kuva 18.)

Täytyy ottaa huomioon myös, että laskentatapa ei ole täysin tarkka johtuen luonnollisista muuttujista, kuten materiaalin mahdollisista sisäisistä ja valmistuksessa syntyvistä poikkeamista. Kuitenkin FEM-laskenta kuvastaa parhaiten todellisuutta, kun kappale valmistetaan yhdestä aihioista käyttäen vain lastuavaa työstöä. Vertailukohtana ovat esimerkiksi valukappaleet tai ohutlevytuotteet, jotka on valmistettu ainetta lisäämällä, joissa tuntemattomat muuttujat ovat huomattavasti suurempia.



Kuva 18. Poikkileikkaus konstruktion sisältä.

Kuvan 19 deformaatiota voidaan vähentää juurikin kuristuksen lisätukemisella ruuveilla, toimenpide ei kuitenkaan ehkä ole välttämätön rakenteen jäykkyyden ja lujuuden kannalta. Alustavasti imusarjassa tulee vallitsemaan korkeintaan kolmen baarin ylipaine, joten rakenteen lujuus on analyysien perusteella enemmän kuin riittävä



Kuva 19. Havainnekuva, josta nähdään, missä deformaatiota tapahtuu eniten

## 6 Valmistus

Komponentit tullaan valmistamaan alumiiniaihiosta, käyttämällä vain lastuavaa työstöä. Edullista työstömenetelmässä on mittatarkkuus, valmistettavan kappaleen vastaavuus CAD-mallinnettua kappaletta ja mahdollisuus valmistaa komponentteja, jotka vaativat suurta lujuutta. Valmistusmenetelmällä voidaan myös tehdä pieniä määriä esimerkiksi prototyyppikomponentteja. Toisaalta valmistusmenetelmä on kallis, jos komponentteja pitää valmistaa suuria määriä, koska työstettävästä aihosta yleensä menee materiaalia paljon hukkaan

Kokoonpanon valmistus tapahtuu pääosin käyttämällä CNC-ohjattua Haas UMC - 750 - pystykaraista työstökeskusta, mutta ensiöputkien päät valmistetaan tangosta käyttäen CNC-ohjattua Mazak T32 -karusellisoria.

Mazak T32 karusellisorvilla työstöarvot ja koordinaatit kappaleen työstämiseksi syötetään manuaalisesti suoraan koneeseen, mutta Haas UMC – 750:ssa työstöradat tehdään käyttäen CAM-laskentaa sen monimutkaisten työstöratojen takia.

CAM-laskenta suoritetaan CAD-mallin pohjalta käyttäen Autodeskin Fusion 360 -ohjelmistoa. Ohjelman etuina on sen helppokäyttöisyys sekä kaikkien tuotekehitysprosessien kuuluminen samaan pilvipohjaiseen käyttöympäristöön.

Varsinainen työstöprosessi käydään läpi karrikoidusti sen suuresta aihealueesta johtuen. Käytettävänä koneena toimii myös kuvassa 21 näkyvä työstökeskus.

## 6.1 Työstömenetelmät

Kokoojakammion puolikkaat työstetään todennäköisesti vain kolmiakselisena eli käyttäen kuvissa 20 ja 21 näkyviä xyz-akseleita. Aihoiden x-suuntainen mitta on  $700 \pm 3$  mm, jolloin aihion pituus ylittää työstökeskuksen pöydän ja aihio pitää kiinnittää mahdollisimman tukevasti suoraan pöytään, jotta se on mahdollista työstää koneen akselien äärialueiden mukaan.

Suurten aihokokojen takia ei niitä voida työstää yhdellä kiinnityksellä, koska aihioita ei voida kiinnittää torniin, jolloin aihio olisi pöydän pinnasta kauempana koneen z-akselin mukaan. Käytössä ei ole riittävän tukevaa tornikiinnitystä, jota soveltamalla olisi mahdollista b- ja c-akseleita kääntämällä työstää aihiota myös sivuilta käyttäen yhtä aihion kiinnitystä.





Kuva 20. Esimerkki materiaalin poistosta ensimmäisessä kokoojakammioiden kiinnityksessä, itse työstöradat ja siirtymät on piilotettu työstettävän kappaleen havainnoimiseksi.

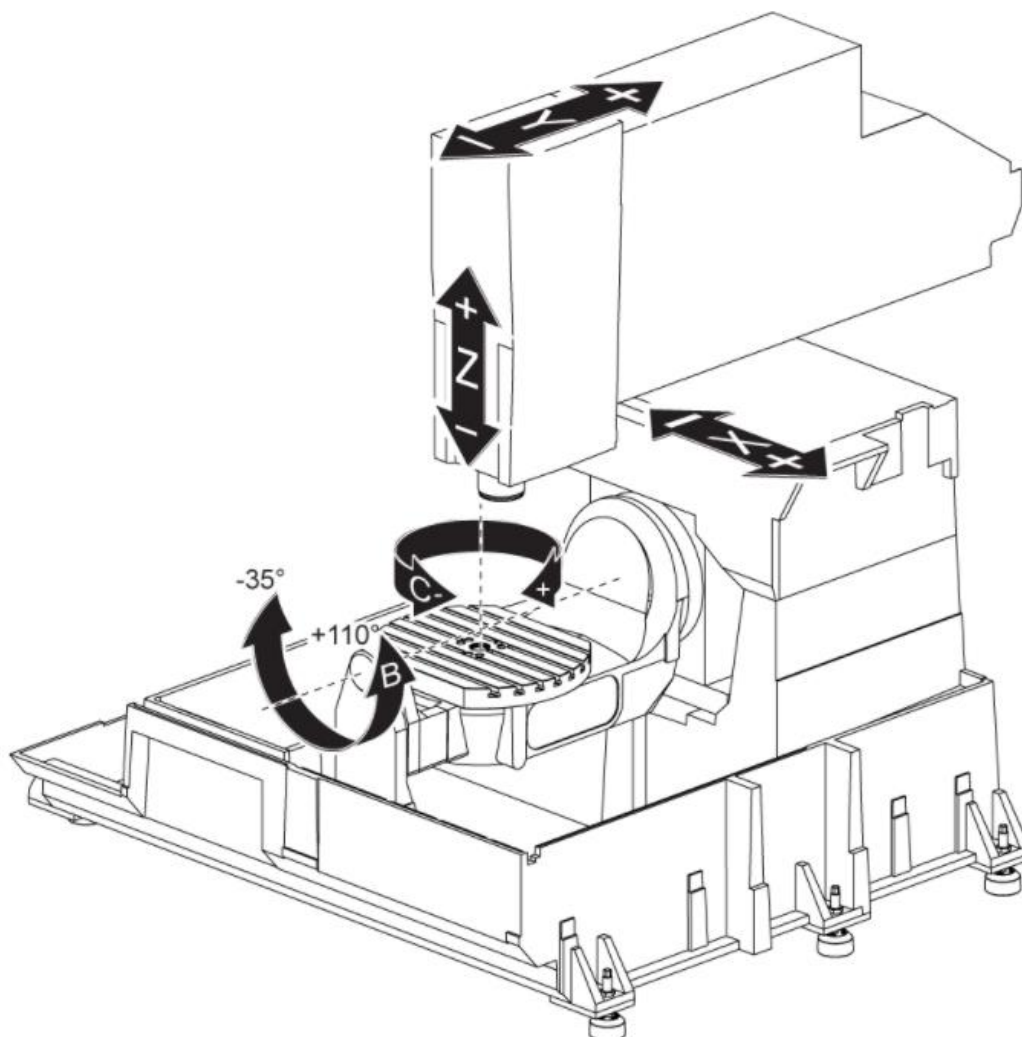
Kappaletta työstäessä yhdellä kiinnityksellä tulevat muotojen ja mittojen paikoitus geometrisesti aina tarkemmin, mutta työstettävien kappaleiden piirteistä ja suurista mitoista johtuen ne on työstettävä käyttäen kahta eri kiinnitystä ja kahta eri kiinnitysmenetelmää. Ensin työstetään kokoojakammioiden sisäpuoliset muodot, jotta kappale voidaan kiinnittää isommalta pinta-alalta suoraa tasoa vasten fikstuuriin. Ensimmäisessä työvaiheessa tehdään myös kokoojakammioiden puolikkaiden poikkileikkauksien ruuvijako, jota hyödyntämällä voidaan sisäpuolelta työstetty kappale kiinnittää tukevasti fikstuuriin.

Toisen kiinnityksen fikstuuri valmistetaan myös lastuavalla työstöllä ja kiinnittämällä osittain työstetty painekoteloiden puolikas suoraan työstettyyn tukifikstuuriin olisi mahdollista vähentää kulmavirhettä, joka voi aiheutua kappaleen kiinnittämisestä uudelleen koneeseen. Näin voitaisiin optimoida fikstuurin ja ruuvijaon yhteensopivuus työstökeskuksen toleranssien ja koordinaattien mukaan.

Kokoojakammioita työstettäessä ensimmäisessä kiinnityksessä aihion alle voidaan asettaa koneistettavissa oleva tukifikstuuri, jotta aihion läpi voidaan työstää pohjaan ensiöputkien laipparungon ikkuna z-akselin mukaan. Tätä muotoa voidaan käyttää hyväksi kappaleen paikoituksessa xyz-koordinaattien mukaan uudestaan. Luonnollisesti ei kuitenkaan toisessa kiinnityksessä käytettävä kiinnitysmenetelmä ole yhtä tukeva kuin ensimmäinen johtuen poistetusta materiaalista. Tämän takia toisessa kiinnityksessä käytetään varovaisempia työstöarvoja, jotta kappale ei vaurioituisi työstöprosessissa.



Kuva 21. Työssä käytettävä Haas UMC-750.

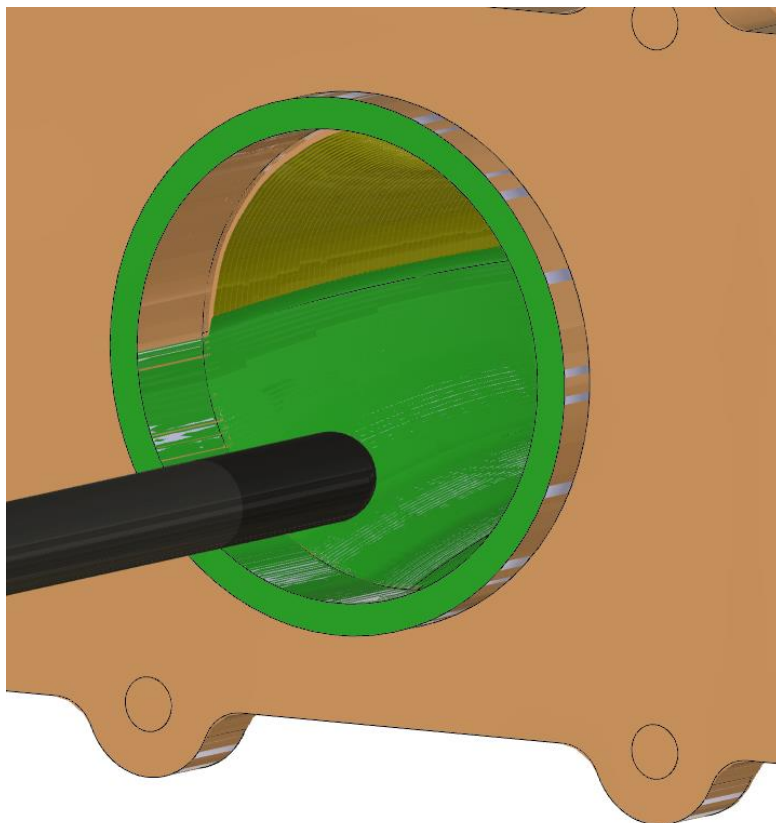


Kuva 22. Haas UMC-750:n akselit [11].

Ensiöputkien laipparungon piirteiden takia on käännettävä b- ja c-akseleita, jotta on mahdollista työstää polttoainesuuttimien kiinnitys ja tiivistys muodot sekä ensiöputkien sisä- ja ulkopuoliset geometriat. Työstön mahdollistamiseksi aihion kaikilta sivuilta on aihio kiinnitettävä torniin, mikä taas mahdollistaa työkalujen ulottuvuuden työstettäviin pintoihin niin, että työkalupidin ei törmää pöytään b-akselin kääntyessä.

Tornin kiinnittimen lyhyen leukojen pituuden takia x-akselin suhteen täytyy aihioon tehdä ensin muotolukitus työstämällä viisteura, joka vastaa kulmaltaan puristinleukojen kulmaa, näin saadaan aikaan tukeva kiinnitys työstettävään kappaleeseen.

Muotolukituksen lisäksi on aihion päissä x-akselin suhteen tehtävä lisätuenta. Muuten puristimen leukojen ulkopuolelle jäävä aihiomateriaali pääsee mahdollisesti värisemään työstöprosessissa, mikä voi johtaa huonoon pinnan laatuun tai kappaleen vaurioitumiseen.



Kuva 23. Ensiöputkien sisään voidaan työstää esimerkiksi virtauksen suuntaa myötäilevä muoto.

Puristimen päähän jäävän laipan muodon ja jäljelle jääneen aihion poistamiseksi on kuitenkin valmistettava tukifikstuuri, jossa käytetään myös hyväksi jo työstettyä ruuvijakoa toisessa kiinnityksessä. Ensimmäisessä kiinnityksessä pyritään kuitenkin työstämään mahdollisimman suuri osa piirteistä, jolloin toisessa kiinnityksessä voidaan fikstuuri kiinnittää suoraan koneen pöytään ja työstää jäljelle jäänyt materiaali pois.

## 6.2 Työstökeskuksen komennot

Kuvan 24 prosessissa on kyseessä ensiöputkien ulkopinnan viimeistely rouhinnan jälkeen. Työstöradat perustuvat normaalisti M- ja G-koodeihin, joita kone noudattaa. Käydään hieman läpi, mitä koodit tarkoittavat. Ensin luetellaan koneen pikaliikkeiden siirtymistä alkaen riviltä kolme, jossa G0 tarkoittaa lyhintä mahdollista siirtymistä määrättyihin koordinaatteihin.

```
1 %
2 O01001
3 (Using G0 which travels along dogleg path.)
4 (Machine)
5 ( vendor: Haas Automation)
6 ( model: HAAS UMC-750)
7 (T20 D=10. CR=5. - ball end mill)
8 N10 G90 G94 G17
9 N15 G21
10 N20 M31
11 N25 G53 G0 Z0.
12
13 (Parallell)
14 N30 T20 M6
15 N35 S12000 M3
16 N40 G54
17 N45 G53 G0 X-736.6 Y-203.2
18 N50 G0 B90. C-90.
19 N55 G254
20 N60 M8
21 N65 G0 X24.454 Y-256.505
22 N70 G43 Z67. H20
23 N75 G0 Z14.922
24 N80 G1 Z12.672 F900.
25 N85 G18 G3 X23.116 Z11.731 I-1. K0.
26 N90 G1 X22.01 Z12.129 F1800.
27 N95 X22.001 Z12.136
28 N100 X22. Y-256.38 Z12.53
29 N105 X22.004 Y-256.255
30 N110 X22.001 Y-256.13 Z12.727
```

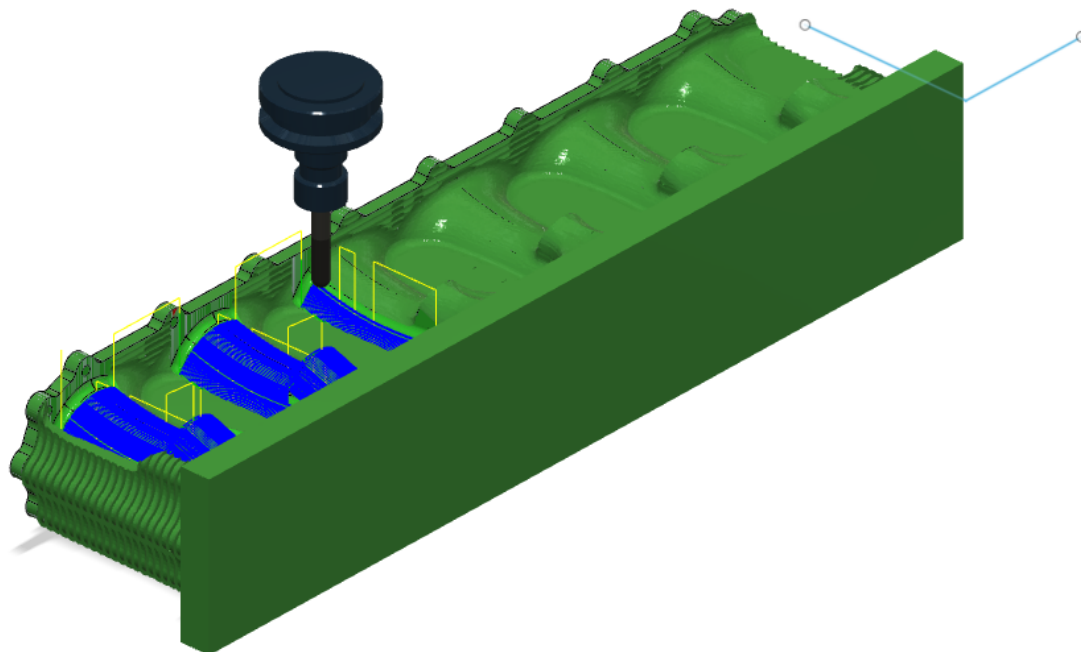
Kuva 24. Esimerkki työstöohjelman alusta.

Riveillä 5 ja 6 luetellaan työstökeskuksen valmistaja ja malli, jonka jälkeen rivillä seitsemän kerrotaan työkalutiedot, kuten sijainti, koko ja tyyppi, jotka ovat lähinnä käyttäjää varten suunnattua tietoa. Tämän jälkeen luetellaan alustavasti työstöradassa käytetyt koordinaatistot, paikoitukset, siirtymismenetelmät, lastunkuljettimen käyttö ja lopuksi työkalun paikoituksen työstöradan alkaessa.

Rivillä 13 alkaa varsinainen työstöohjelma. Kyseessä on esimerkki, joten ohjelman nimi tulee suoraan CAM-ohjelman työstömenetelmästä (Parallel1), joka tarkoittaa kaltevien pintojen suhteen kulkevia työstöratoja. T20 M6 merkitsee työkalun vaihtoa määrättyyn työkalunumeroon.

Seuraavaksi määritetään työkalun pyörintänopeus ja suunta, jossa työkalun pyörintänopeus on määritetty työstökeskuksen suurimman mahdollisen pyörintänopeuden mukaan. G54 tarkoittaa käyttöön otettavaa työkoordinaatistoa, joka viittaa mitattuun aihion kokoon ja sijaintiin koneessa. Seuraavaksi määritetään siirtymistapa ja koordinaatit, johon kone siirtyy. Käytännössä tässä siirrytään toiseen päähän konetta G28:n suhteen, joka on määrätty absoluuttinen koneen nollapiste, koska seuraavaksi määritetään pöydän kääntökulmat ja työkalun jäädessä koneen nollapisteen puolelle b-akselin akselin suhteen, voi pitkä työkalu törmätä pöytään siirryttäessä työstettävän aihion luokse. M8-komenolla määrätään lastuamismesteen suihkutustapa ja otetaan suihkutus käyttöön. Kun pöydän kierto ja kääntökulmien komennot on suoritettu, määrätään koneelle otettavaksi käyttöön G254 eli dynaaminen työkoordinaatisto. G254 otetaan yleensä käyttöön aina kun b- ja c-akselit arvot poikkeavat nolasta, jotta kone osaa laskea työstettävän aihion sijainnin uudelleen. Kyseistä työkoordinaatistoa käytetään yleensä, kun b- ja c-akselin määrätty arvot pysyvät koneen siirtymisen jälkeen vakioina, eli kaikkia viittä akselia ei ohjata samanaikaisesti.

Tämän jälkeen siirrytään lähemmäs työstettävää kappaletta pikaliikkeellä, minkä jälkeen otetaan työkalun z-akselin kompensointi käyttöön laskennallisesti. Kompensoinnin käyttöönoton jälkeen siirryttäessä lähemmäs kappaletta määrätään rivillä 24 työkalun syöttönopeus, jolla kappaleeseen siirrytään kyseisessä radassa z-akselin suhteen kohtisuoraan. Eli riviltä 24 alkaa käytännössä vasta itse lastuava työstö.



Kuva 25. Esimerkki työstöohjelman (Parallel1) simuloinnista. Kuvassa vihreä väri ilmaisee jäljellä olevaa materiaalia, siniset piirteet varsinaisia työstöratoja, joissa siirrytään käyttäen määrättyjä syöttöarvoja ja keltaiset piirteet pikaliikkeitä radoista siirtymisen välillä. Kuvakulma on käytännössä sama kuin itse työstöoperaatiota seurattaessa työstökeskuksessa.

### 6.3 Valmistusmateriaali

Valmistusmateriaali AW-6082 T651 on liuoshehkutettu ja keinovanhennettu, sekä sen sisäiset jännitykset poistettu vetämällä. Sisäisten jännitysten poisto vähentää mahdollista riskiä, joka ilmenee, kun aihioista poistetaan paljon materiaalia ensin toiselta puolelta esimerkiksi tuplaplenumin puolikkaissa, jolloin jäljelle jäävä materiaali voi muuttua muotoaan, kun aihio irrotetaan työstöleuoista. [12] (Taulukko 1 & kuva 26.)

Materiaalilla on hyvät ominaisuudet hitsauksen ja lastuavan työstön kannalta sekä hyvä korroosionkestävyys ja pinnoitusominaisuudet kuten anodisointi. Korroosionkesto on myös tärkeä ominaisuus, koska materiaalin pinnoille altistetaan erilaisia kemikaaleja ja

aineita kuten etanolia, jolla on myös syövyttäviä ominaisuuksia. Muutenkin suuret lämpötila vaihtelut ja ympäristön ilmankosteus voivat vaikuttaa materiaaliin.

Materiaalin ominaisuudet ovat seuraavat

- kimmomoduuli = 70 kN/mm<sup>2</sup>
- vetomurtolujuus = 140–330 MPa
- myötöraja = 280 MPa
- kovuus Brinell = 91 HB

[11].

Taulukko 1. Valmistusmateriaalin käsittely [12].

**Erkautuskarkaisu** ja siihen liittyvä liuoshehkus, sekä luonnollinen vanhentaminen tai keinovanhentaminen.

Alumiiniseosten lämpökäsittelytilojen tunnukset (esim. T6, liuotushehketty ja keinovanhennettu) on määriteltä standardissa SFS-EN 515.

Taulukko 1 Eri alumiiniseosten lämpökäsittelyjä

Alumiiniseos	Pehmeäksihetkutuslämpötila °C	Liuotushehkuslämpötila °C	Luonnollinen vanhentaminen h	Keinovanhennuslämpötila °C	Keinovanhennusaika h
EN AW-2011	380...420	535±5	5...7	175 ± 5	6
EN AW-2014	380...420	505 ± 5	5...7	170 ± 5	8
EN AW-2024	380...420	505 ± 5	5...7	170 ± 5	8
EN AW-6460	380...420	510 ± 10	2	170 ± 5	8
EN AW-6063	380...420	510 ± 10	2	175 ± 5	8
EN AW-6201	380...420	530 ± 10	2	175 ± 5	8
EN AW-6082	380...420	535 ± 10	2	175 ± 5	8
EN AW-6351	380...420	535 ± 10	2	175 ± 5	8
EN AW-6005	380...420	530 ± 10	2	175 ± 5	8
EN AW-7020	400...450	460 ± 10	30	120 ± 5	24
EN AW-7075	400...450	460 ± 10	-	120 ± 5	24





Kuva 26. Imusarjakokoonpanon alumiinaihiot, jossa vasemmalla kokoojakammioiden puolikkaat ja oikealla ensiöputken laipparunko.

Työstettävien aihoiden mitat (mm) ovat seuraavat:

Ensiöputkien laipparunko

- x 570.
- y 120.
- z 150.

Tuplalenumin puoliskot (2)

- x 700.
- y 260.
- z 80.

## 7 Vaihtoehtoiset valmistusmenetelmät

Valmistusmenetelmillä on suuri vaikutus tavoitellun rakenteen lujuuden, mittatarkkuuden ja kustannuksien puolesta tuotteen lopputulokseen.

### 7.1 3D-metallitulostus

3D-metallitulostus on ainetta lisäävä menetelmä; siinä lisätään paljon ohuita kerroksia materiaalia, joista lopulta valmistuu komponentti. Suurena etuna esimerkiksi lastuavaan työstöön tai ainetta poistavaan valmistukseen verrattuna on komponenttien sisäisten muotojen tai onteloiden valmistus, jotka eivät olisi mahdollisia muuten. (Kuva 27.)

Menetelmällä ei myöskään tulisi niin paljon hukkamateriaalia kuin yhdestä aihioista työstämällä. Lopputuotteessa ei myöskään ole tarkkoja toleransseja, kuten liuku- tai ahdistussovitteita. Käsittelemättömän materiaalin rakeisesta muodosta johtuen 3D-tulostetun komponentin pinnan karheus ei kuitenkaan välttämättä ole riittävän hyvä tiivistyspinnaksi, jolloin kuitenkin kaikki tiivistyspinnat pitäisi työstää lastuamalla mahdollisimman suoriksi.

Tiivistyspinnat olisi mahdollista kuitenkin suoristaa esimerkiksi kiinnittämällä tulostetut komponentit ruuvien kiinnityspisteistä fikstuureihin ja työstämällä tasopinnat suoraan työstökeskuksen koordinaattien mukaan.



Kuva 27. Esimerkki 3D-tulostetuista metallikomponenteista.

Lopputuotteet tulostamalla olisi mahdollista saada myös riittävä materiaalin lujuus rakenteelle, koska tulostusmateriaaleina voitaisiin käyttää esimerkiksi titaania tai niin sanottuja superseoksia, jotka sisältävät esimerkiksi nikkeliä, kromia ja kobolttia. Esimerkiksi 99,2-prosenttisesti puhtaalle titaanille on ilmoitettu vetomurtolujuus 434 MPa, mutta seostettuna voi olla huomattavasti suurempikin. Kyseisellä materiaalilla on myös hyvät lujuusominaisuudet verrattuna sen ominaispainoon, jolloin se soveltuisi hyvin valmistusmateriaaliksi tulostamalla.

Suunnitellut komponentit ovat kuitenkin suhteellisen suuria ja tulostusmenetelmissä käytettävät pulverit kalliita, jolloin valmistustapa olisi myös kallis eikä sitä voisi suorittaa myöskään itse. Silti lastuavan työstön jälkeen tulostus olisi soveltuvin menetelmä ajatellen valmistettavan kokoonpanon monimutkaisuutta, jolloin mallia voitaisiin myös yksinkertaistaa hieman.

## 7.2 Valaminen

Valaminen on myös ainetta lisäävä menetelmä, jossa sulaa metallia kaadetaan tai syötetään paineella muottiin. Sulan metallin jäähtyessä muotissa jää jäljelle valumuotin muotoinen lopputuote. Valmistusmenetelmä soveltuu hyvin suuriin komponenttimääriin hinta-laatusuhteensa vuoksi, mutta ei ole yleensä kovin mittatarkka. Valutuotteesta voidaan kuitenkin lastuavalla työstöllä koneistaa kaikki mittatarkat piirteet jälkeensä.

Kyseinen menetelmä on kuitenkin suhteellisen työläs ajatellen prototyyppikomponentteja tai hyvin pieniä valmistuseriä, minkä lisäksi valmistusmenetelmässä voi esiintyä materiaalin sisäisiä poikkeavuuksia ja deformaatiota tuotteen jäähtyessä muotissa. Kuten aiemmin todettiin, ei myöskään FEM-laskenta ole näistä syistä johtuen myöskään realistinen, koska ei voida tietää valutuotteen sisäisiä ominaisuuksia.

## 7.3 Ohutlevykokoonpano

Kokoonpanon valmistus yksinkertaistettuna esimerkiksi ilman rakennetta vahvistavia geometrioita kokoojakammioden pinnalla voisi olla myös mahdollista valmistettuna useista ohutlevyistä. Rakenteen monimutkaisuuden vuoksi levyjen liittäminen toisiinsa hitsaamalla, niin että kokoonpano pysyisi mittatarkkana, olisi haasteellista. Jos imusarjan kokoonpanon olisi tarkoitus pysyä kuitenkin kiinteänä, voitaisiin tuote valmistaa yksinkertaistettuna esimerkiksi hitsaamalla prässättyjä levyprofiileita toisiinsa.

Menetelmä olisi halpa, mutta tuotteen muodoista johtuen kohtalaisen työläs, ellei profiileita prässättäisi muotoonsa. Ohutlevykokoonpano on yleensä edullinen vaihtoehto, eikä siihen vaadita kalliita työstömenetelmiä, mikä tekee menetelmästä yleensä alan harrastajien keskuudessa suosittu.

## 7.4 Kuitukokoonpano

Esimerkiksi hiilikuidusta ja alumiinista valmistettu hybridikokoonpano olisi myös mahdollinen vaihtoehto, jossa osa ensiöputkien laipparungosta valmistettaisiin lastuavalla työllä ja kokoojakammio tai kammiot hiilikuidusta. Tällä menetelmällä voitaisiin saavuttaa myös helposti riittävä kestävyys hiilikuidun erittäin suurten lujuusominaisuuksien ja kevyen rakenteen vuoksi. Tässä työssä suunniteltujen kokoojakammioiden pyöreät muodot soveltuisivat hyvin kuidusta valmistettaviksi johtuen materiaalin hyvästä vetokestäväydestä. Kuidusta valmistetuissa kokoojakammioissa olisi myös mahdollista, että pinnalla ei olisi välttämätöntä käyttää tukevia rakenteita. Toisaalta materiaalin ominaisuuksien takia ei rakenne olisi yhtä iskun kestävä kuin esimerkiksi alumiini.

Hybridirakenne olisi silti erittäin työläs valmistaa. Kuitenkin moottoriurheilun kannalta, jossa komponenttien pieni massa ja kestävyys on prioriteettina, menetelmä on varsin toimiva.

## 8 Yhteenveto ja pohdinta

Työn tavoitteena oli suunnitella ja valmistaa mahdollisimman kohdemoottoriin soveltuva imusarja olemassa olevan tuotteen tilalle. Tarkoituksena oli harjaantua mekaanisessa suunnittelussa ja resurssien puitteissa valmistaa mahdollisimman toimiva kokoonpano käyttäen myös apuna eri tietokoneavusteisia laskentaohjelmia. Teoreettinen osuus työstä onnistui hyvin, ja suurin osa tavoitteista ennen työn aloitusta saatiin toteutettua.

Työ paljastui aihealueeltaan odotettua laajemmaksi, koska imusarjan toimintaan kuuluu paljon laskennallisesti monimutkaisia fysiikan ilmiöitä ja niiden kokoonpanoon vaikuttavien muuttujien määrä, joista voitaisiin saada käytännön mittauksien kautta luotettavampaa dataa ja kehittää tuotetta paremmaksi, on suhteellisen suuri. Projektin edetessä korostuikin kokoonpanon säädettävyyden tarve, jolla voidaan optimoida kohdemoottorin volymetrinen hyötysuhde kokoonpanon tai käyttötarkoitusten muuttuessa.

Imusarjaa, jossa geometriat eivät ole muutettavissa, korostuu myös ottomoottorin simuloitiohjelman käyttö, jossa voitaisiin ottaa enemmän vallitsevia muuttujia huomioon lopputuotteen optimointia ajatellen. Alkuperäinen imusarja paljastui kuitenkin ennalta oletettua paremmaksi virtausominaisuuksiltaan ottaen huomioon, että alkuperäisessä kokoonpanossa kohdemoottori on asennettu riviin eikä suoraan ajoneuvon kulkusuuntaan nähden. Imusarjan ollessa ahtaassa tilassa sylinterikannen ja jäähdytyskennojen välissä on myös varmasti jouduttu tekemään kompromisseja tuotteen rakenteesta ja mitoista.

Yllättävän työlään projektin ja tiukan aikataulun takia ei työhön ehditty sisällyttämään varsinaista valmistusta, joka on isotöinen prosessi ja työstäjät hyvin pitkiä johtuen myös saatavilla olevista koneista ja työkaluista. Kuitenkin valmistusprosessi on suunniteltu työn tavoitteiden sekä resurssien osalta, joten ehdottomasti suurin työ projektin osalta on tehty.

Komponentit tullaan valmistamaan kuitenkin mahdollisimman pian ja valmiin kokoonpanon jälkeen voidaan oppilaitoksen virtauspenkissä tutkia vielä uuden ja vanhan mallin ominaisuuksia, ennen kuin valmistettu kokoonpano kiinnitetään kohdemoottoriin ja voidaan säätää siinä kokoonpanoon luonteeseen sopivaksi.

## Lähteet

1. Winterbone, D. E. & Pearson, R. J. 1999. Design Techniques for Engine Manifolds. London and Bury St Edmunds, UK: Professional Engineering Publishing Limited.
2. Analysis for Prediction of the Volumetric Efficiency. Verkkoaineisto. Ijjsrt. <<https://ijjsrt.com/wp-content/uploads/2017/10/Analysis-for-Prediction-of-the-Volumetric-Efficiency-with-Continuous-Variable-Valve-Lift-Mechanism-in-Single-Cylinder-SI-Engine-2.pdf>>. Luettu 19.10.2020.
3. Intake Manifolds. Verkkoaineisto. Bufkinengineering <<http://www.bufkinengineering.com/intake%20manifolds.htm>>. Luettu 15.10.2020.
4. The Effects of Intake Plenum Volume on the Performance of a Small Naturally Aspirated Restricted Engine. Verkkoaineisto. Researchgate. <[https://www.researchgate.net/publication/267576458\\_The\\_Effects\\_of\\_Intake\\_Plenum\\_Volume\\_on\\_the\\_Performance\\_of\\_a\\_Small\\_Naturally\\_Aspirated\\_Restricted\\_Engine](https://www.researchgate.net/publication/267576458_The_Effects_of_Intake_Plenum_Volume_on_the_Performance_of_a_Small_Naturally_Aspirated_Restricted_Engine)>. Luettu 15.10.2020.
5. How intake resonators improve volumetric efficiency. Verkkoaineisto. Brighthubengineering <<https://www.brighthubengineering.com/machine-design/84316-how-intake-resonators-improve-volumetric-efficiency/>>. Luettu 24.10.2020.
6. A Study on Duct Integrated Resonator of Automobile Intake System. Verkkoaineisto. Republication. <[https://www.ripublication.com/ijaer17/ijaerv12n18\\_79.pdf](https://www.ripublication.com/ijaer17/ijaerv12n18_79.pdf)>. Luettu 19.10.2020.
7. Valve timing events and the order o importance. Verkkoaineisto. Enginebuildermag. <<https://www.enginebuildermag.com/2016/04/valve-timing-events-and-the-order-of-importance/>>. Luettu 14.11.2020.
8. Intake Manifold. Verkkoaineisto. Autozine. <[https://www.autozine.org/technical\\_school/engine/Intake\\_exhaust.html](https://www.autozine.org/technical_school/engine/Intake_exhaust.html)>. Luettu 10.11.2020.
9. Intake Manifold Tech: Runner Size Calculations. Verkkoaineisto. Hred. <<http://hred.free.fr/Download/Articles%20Techniques/Runner%20Size%20Calculations.pdf>>. Luettu 10.11.2020.
10. The right bellmouth. Verkkoaineisto. Performancebyie. <<https://performancebyie.com/blogs/ie-auto-blog/the-right-bellmouth>>. Luettu 10.11.2020.

11. UMC-750 Service General Information. Verkkoaineisto. haascnc. <<https://aemqas.haascnc.com/service/troubleshooting-and-how-to/how-to/umc-750---service---general-information.html>>. Luettu 17.11.2020
12. Material properties 6082-T651 Aluminum. Verkkoainesto. makeitfrom. <<https://www.makeitfrom.com/material-properties/6082-T651-Aluminum>>. Luettu 21.11.2020
13. Lämpökäsittelyn ohjelehdet. Verkkoaineisto. sten. <[https://www.sten.fi/document/1/37/119689f/muuram\\_4f09d35\\_lampokasittelyn\\_ohjelehdet.pdf](https://www.sten.fi/document/1/37/119689f/muuram_4f09d35_lampokasittelyn_ohjelehdet.pdf)>. Luettu 21.11.2020
14. Winterbone, D.E & Pearson, R.J. 2000. Theory of Engine Manifold Design. Professional Engineering Publishing Limited, London and Bury St Edmunds, UK
15. Mauno. Esko. 2002. Virittäjän Käsikirja. 1 : Nelitahtimoottorit. Alfamer