



Riku Aittokoski

# Kilpa-auton imusarjan valmistaminen muovikomposiiteista ja 3D-tulostamalla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

12.5.2022

# Tiivistelmä

Tekijä:	Riku Aittokoski
Otsikko:	Kilpa-auton imusarjan valmistaminen muovikomposiiteista ja 3D-tulostamalla
Sivumäärä:	80 sivua
Aika:	12.5.2022
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine:	Ajoneuvosuunnittelu
Ohjaajat:	Lehtori Joel Kontturi

---

Tämän insinöörityön tavoitteena oli suunnitella ja valmistaa muovikomposiiteista ja 3D-tulostamalla kilpa-autokäyttöön suorituskykyinen ja moottoriurheilun haastavat olosuhteet kestävä imusarjan painekotelo ja kokoonpanoon sisältyviä komponentteja.

Suunnitteluprosessin alkuvaiheessa perehdyttiin virtaustekniikan ja kaasujen teoriaan, jotta voitiin suunnitella mahdollisimman hyvin ja tasaisesti virtaavia komponentteja. Suunnittelutyön jälkeen suoritettiin imusarjalle virtaussimulointi tuotekehityksen tueksi.

Projektin kohdeajoneuvona oli 1987 Buick Regal Turbo-T, jonka tehdasmallin 3,8-litrainen V6-moottori korvattiin NASCAR-sarjaan kehitetyllä alumiinilohkoisella Stage-2 On-center -V6-moottorilla. Tämänkaltaisen erikoismoottorin jälkituotanto-osien heikon saatavuuden vuoksi komponentteja joudutaan pääsääntöisesti valmistamaan itse tai teettämään tilaustyönä.

Opinnäytetyössä haluttiin selvittää, olisiko 3D-tulostamalla mahdollista valmistaa laadukkaita ja muotoilultaan sellaisia komponentteja, joiden valmistus alumiinista koneistamalla ei olisi kannattavaa. Kokoonpanon komponenttien lisäksi 3D-tulostamista hyödynnettiin myös kevytrakennekomposiiteista valmistettavien osien muottien tuottamiseen.

Opinnäytetyön lopputuloksena saatiin valmistettua kevyt ja kestävä imusarjakokonaisuus, jossa on komposiittiplenum ja jonka kokonaispituutta on mahdollista säätää. Imusarjan kokonaispituuden muokkaaminen imutorvia vaihtamalla mahdollistaa moottorin vääntöominaisuuksien ratakohtaisten säätämisen. Tarvittaessa imutorvia voidaan valmistaa lisää eripituisina ja -muotoisina. Kokoonpano viimeistellään käyttökuntoon opinnäytetyön jälkeen.

Avainsanat: Imusarja, painekotelo, Nascar, polyamidi-6, nailon, lujitemuovi, komposiitti, hiilikuitu, Kevlar, aramidikuitu

## Abstract

Author: Riku Aittokoski  
Title: Manufacturing an Automotive Racing Intake Manifold by using 3D-Printing and Composites  
Number of Pages: 80 pages  
Date: 12 May 2022

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Automotive Design Engineering  
Professional Major: Joel Kontturi, Lecturer

---

The aim of this Bachelor's thesis was to design and manufacture an intake plenum assembly for an ethanol- powered racing engine by 3D-printing and from fiber-reinforced polymers. Due to the intended use of the vehicle, the aim was to maximize the volumetric efficiency of the engine by studying the theory of intake manifold design and utilizing flow measurements to finish the final product.

The vehicle used in this project was 1987 Buick Regal Turbo-T. Its original 3.8-liter turbocharged V6 engine was replaced with an aftermarket engine based on Buick Motorsport Stage 2 V6 Nascar engine. For a very special racing engine like this it is common that the aftermarket parts needed for a complete and fully functional unit are not always available. Because of this problem the components for a similar project must usually be manufactured in-house or they are outsourced.

Now that the 3D-printers in private use are getting more common, the aim was to find out whether it would be possible to produce high-quality and durable components around the engine long block by 3D printing, with such a design or with other features that a similar product made for example by machining aluminum would not be as profitable for this project.

The result of this Bachelor's thesis, the lightweight and durable dual plenum intake assembly with adjustable total length, was manufactured. Adjusting the total length of the intake manifold by changing inlet bell mouths will allow the engine torque properties to be modified to suit specific tracks better, and it is easily possible to manufacture more bell mouths, if needed. Intake manifold assembly finishing will be carried out after the new engine block and cylinder heads have been machined to fit together properly.

Keywords: Buick, Grand National Series, Nascar, Motorsport, dual plenum, intake manifold, automotive racing, Nylon, Carbon Fiber, Kevlar

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Ilmanvaihto ottomoottorissa	2
3	Imusarja komponenttina ottomoottorissa	5
3.1	Single plenum -imusarjat	6
3.2	Dual plenum -imusarjat	7
4	Virtaustekniikan ja kaasujen teoriaa	8
4.1	Ilman ja kaasujen ominaisuuksia	8
4.2	Ideaalikaasun tilayhtälö	11
4.3	Fluidien ominaisuuksia	11
4.4	Laminaarinen ja turbulenttinen virtaus	13
4.5	Bernoullin yhtälö	14
4.6	Reynoldsin luku	16
4.7	Rajakerros	17
5	Teorian sovellukset ottomoottorissa	19
6	Valmiiden primääriputkien vaikutukset projektissa	20
7	Imusarjan kokoonpanon suunnittelu ja valmistus	21
7.1	Pääplenumin pohjan suunnittelu	21
7.2	Primääriputkien laipat	24
7.3	Pääplenumin kannen suunnittelu	26
7.4	Pääplenumin kannen ja pohjan tiivistys	31
7.5	Tuloplenumin suunnittelu	34
7.6	Imutorvien suunnittelu	37
7.7	Imutorvien pituus ja pulssiahtaminen	38
7.8	Virtaussimulointi	53
8	Komponenttien valmistusmenetelmät	55
9	3D-tulostaminen	56
9.1	Muottien 3D-tulostus ja valmistelu	57
9.2	Imutorvien ja tuloplenumin 3D-tulostus	61

10	Komposiitit yleisesti	69
	10.1 Lujiteaineen valinta	70
	10.2 Komposiittituotteiden valmistaminen	71
11	Pääplenumin laippojen valmistus	75
12	Primääriputkien muutostyöt	76
	12.1 Polttonestesuuttimien valinta	77
	12.2 Suutinpaikkojen koneistus	77
	12.3 Lämpärunkojen poistaminen	78
13	Yhteenveto	80
	Lähteet	1

## Lyhenteet

YKK: Yläkuolokohta

AKK: Alakuolokohta

CFD: Computed Fluid Mechanics, virtaussimulointi

DWB: Drive by wire, sähkömoottoritoiminen kaasuläppä

MAP: Manifold Absolute Pressure Sensor, imusarjan painesensori

CFM: Cubic Feet Per Minute, kuutiojalkaa minuutissa

## ALKULAUSE

Insinööri työ keskittyi opiskelijan henkilökohtaisen kilpa-autoprojektin ottomoottorin komponenttien suunnitteluun ja valmistamiseen. Työn keskeisenä tavoitteena oli syventää omaa mekaanisen suunnittelun osaamista kehittämällä käytötarkoitukseen vaadittavilta ominaisuuksiltaan suorituskykyinen lopputuote. Projektin toteutuksessa hyödynnettiin Metropolia Motorsport -tiimissä ja opintojen aikana yleisesti sisäistettyjä suunnittelu- sekä valmistusmenetelmiä.

Haluan kiittää formulatiimistä erityisesti Miika Niemistä vaativien komposiittituotteiden valmistusavusta ja Kian Hazratia sekä Eero Toivosta, jotka auttavilla käsitönsä mahdollistivat alumiinikomponenttien valmistamisen suunnitellussa aikataulussa. Suuret kiitokset ansaitsevat myös Juho Ketola ja Onni Humalajoki CFD-virtaussimuloinnin toteuttamisesta suunnitteluprosessin tueksi.

Erityiskiitos myös Kevra Oy:lle ja Henkel Finland Oy:lle, jotka olivat mukana tukemassa projektia ja mahdollistivat tarjoamallaan korkealaatuisilla tuotteilla laadukkaiden komposiittiosien valmistamisen sekä luotettavan kokoonpanoliimauksen.

Helsingissä

15.5.2022

Riku Aittokoski

# 1 Johdanto

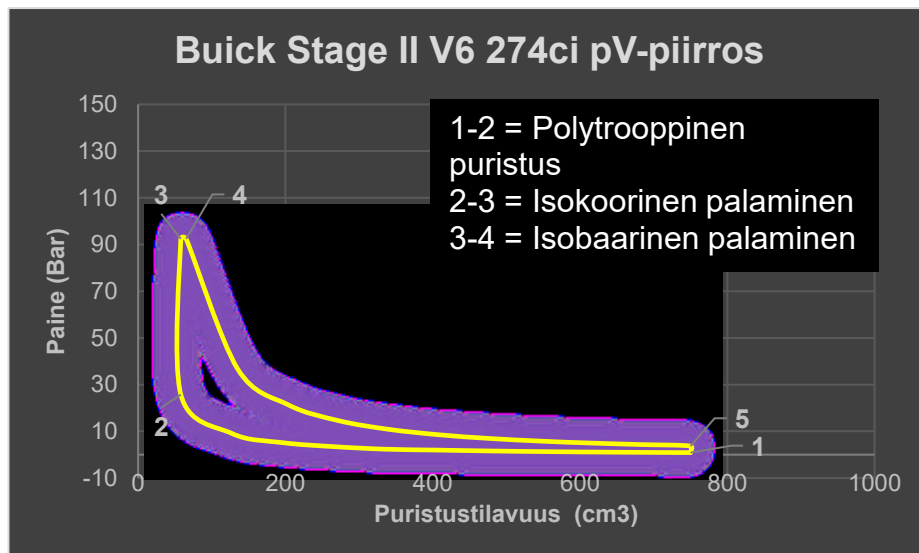
Tässä insinööriyössä tavoitteena oli suunnitella ja valmistaa imusarjan painekotelo ja siihen sisältyviä komponentteja pääosin 3D-tulostamalla ja lujite-muoveista sekä modernisoida 80-luvulta lähtöisin olevia Kinslerin IMSA GTP-sarjaan valmistettuja erikoisosia soveltuvaksi pakokaasuahtimella varustettuun kohdemoottoriin. Kohdeajoneuvo on 1987 Buick Regal Turbo-T, joka on työn tekijän henkilökohtainen kilpa-autoprojekti.

Idea imusarjan komponenttien valmistamiseen 3D-tulostamalla syntyi, kun perehdyttiin Chevrolet LS-moottoriperheen tehdasvalmisteisiin imusarjoihin ja niissä käytettyjen muoviseosten raaka-aineisiin. Selvisi, että 3D-tulostuskäyttöön on saatavilla samoja materiaaleja sisältäviä filamentteja, joiden lämpö- ja rasituskestävyys ovat erinomaiset käytettäväksi moottorin ulkopuolisen imusarjan komponenttien valmistamiseen.

Komponenttien ja komposiittiosien muottien suunnittelu tullaan tekemään CATIA V5 -ohjelmistolla ja valmiiden mallinnusten 3D-tulostukseen liittyvät esiase-tukset hoidetaan Ultimaker Cura:lla. Alumiinin käyttö materiaalina tässä kokoonpanossa minimoidaan, mutta pitkän elinkaaren ja kriittisten toleranssien varmistamiseksi koneistetaan alumiinista ainakin painekotelon kontaktipinnat painekotelolta primääriputkille.

## 2 Ilmanvaihto ottomoottorissa

Kaasuille on ominaista pyrkiä tasaamaan paine-erot sekoittumalla keskenään, mikä selittääkin kaasun virtauksen sylinteriin ja sieltä ulos. Moottorin normaalin käyntiprosessin aikana on sylinterissä merkittäviä paineen ja lämpötilan muutoksia lyhyessä ajassa, ja niiden ulos vapautumista ja sisään virtausta ohjataan sylinterikannen imu- ja pakoventtiileillä. Kaikki arvot yli normaalin ilmanpaineen luokitellaan positiiviseksi tai ylipaineeksi ja vastaavasti negatiiviset arvot alipaineeksi. [1, s. 15.] Sylinterissä kiertoprosessin aikana tapahtuvista paine- ja tilavuuseroista voidaan kehittää pV-piirroskuvaaja (kuva 1), josta selviää yhden täyden työkierron paineen ja tilavuuden muutokset.



Kuva 1. Paine- ja tilavuuden muutokset yhden työkierron aikana.

Imutahdilla männän kulkiessa sylinteriputkessa YKK:sta alaspäin kohti AKK:ta, syntyy sylinteriin alipaine, jonka atmosfäärinen ilmakehän paine pyrkii tasaamaan ryntäämällä imujärjestelmän läpi sylinteriin. Sylinteriin imutahdin aikana virtaavaan ilmamäärään vaikuttaa mm. paine-eron suuruus ja imusarjan mitoitustekniset ratkaisut. Putkivirtauksessa virtauspoikkipinta-alan kasvattaminen ja paineen lasku hidastavat virtausnopeutta, mikä pätee myös ottomoottorin imujärjestelmään. Imusarjan ylivoimittamisella voidaankin siksi myös menettää tehoa.

Ottomoottorin ilmanvaihdon tehokkuuden mittarina voidaan yleisesti pitää volymetrinen hyötysuhteen arvoa, joka ilmaisee prosentteina moottorin sylinterin täyttöasteen. Mitä enemmän moottorin pystyy työkiertonsa aikana prosessoimaan ilmaa läpi, sitä parempi maksimitehopotentiaali sillä on. Volymetrinen hyötysuhde määräytyy moottorin staattisen ilmakapasiteetin tai sylinteritilavuuden mukaan. Kun moottorin sylintereihin virtaa imutahdin aikana koko iskutilavuutensa verran ilma-polttoaineseosta, on volymetrinen hyötysuhde tällöin täysi 100 %. [2, s. 24.]

Vapaasti hengittävälle ottomoottorille optimitilanne olisi saada imutahdilla ilmaa iskutilavuutensa verran jokaisen imutahdin aikana, mutta tämän tavoitteen saavuttaminen koko moottorin kierrosalueella on yleensä todella haastavaa johtuen rajoittavista tekijöistä, kuten venttiilien ajoituksista, ilmavirran inerttiasta ja pakokaasujen poiston tehokkuudesta. Keskimääräinen volymetrinen hyötysuhde tehdasvalmisteidelle bensiinikäyttöiselle ottomoottorille ilman mekaanista ahtamista on noin 85 %. [2, s. 24.]

Kilpa-autokäytössä vapaasti hengittävien moottoreiden sylinterikannen virtausominaisuuksia parannetaan kasvattamalla venttiililautasten halkaisijaa, muotoilemalla imu- ja pakokanavia paremmin virtaavaksi, mitoittamalla imusarjan kokonaispituus huomioiden imuventtiilien sulkeutumisesta syntyvät jäännöspulssit (pulssiahtaminen), kasvattamalla kaasuläpän kokoa ja parantamalla imuilman reititystä virtauskanavan avulla ilmansuodattimelle. Imujärjestelmän optimoinnilla voidaan parantaa läpivirtausta ja laskea imulämpötiloja, mikä mahdollistaa vapaasti hengittävälle moottorillekin yli 100 %:n volymetrinen hyötysuhteen (kuva 2).

Virtausesteet, mitoitusvirheet komponenteissa ja äkilliset virtaussuunnan muutokset imujärjestelmässä hidastavat virtausnopeuksia ja aiheuttavat sisäisiä painehäviöitä. Huomioitava asia on myös mahdollinen lämmönjohtuminen ilmansuodatinkotelosta, imusarjasta ja imukanavasta imuilman sekaan, sillä ilma lämmitessään menettää tiheyttä, josta seuraa huonompi sylinterintäytösprosentti.

Table 1 Engines Sampled for Analysis

Item Cyl. No.	Cam Train	Number of Valves	Displacement (cc)	Max. Engine Speed (rpm)	Max. Volumetric Efficiency (%)	Number of Engines
Single-Cylinder	chain	2	50 ~ 360	8,000 ~ 11,000	90 ~ 105	59
		4				3
Four-Cylinder (L-4)	chain	2	350 ~ 750	9,000 ~ 11,000	95 ~ 105	11
		4	900 ~ 1,100	9,000 ~ 10,000	95 ~ 100	18
	gear	4	250 ~ 750	11,000 ~ 16,000	105 ~ 120	9
Four-Cylinder (V-4)	chain	4	400 ~ 770	12,000 ~ 15,000	105 ~ 115	4
	gear					12

Kuva 2. Esimerkkitaulukko vapaasti hengittävien kilpamoottoripyörien ottomootoreiden volymetrisistä hyötysuhteista [3, s. 2].

Moottorin ahtaminen perustuu sylinterin täytösasteen kasvattamiseen lisäämällä imujärjestelmän sisäistä painetta, jolloin saman pituisen imutahdin aikana saadaan pakattua sylinteriin enemmän ilmaa. Hyvin läpivirtaavan moottorin volymetrinen hyötysuhde voidaan teoriassa helposti kaksinkertaistaa kasvattamalla imujärjestelmän paine kaksinkertaiseksi, mutta todellisuudessa ahdettuun moottoriin pätevät samat virtausmekaniikan ja fysiikan lait kuin vapaasti hengittävään moottoriinkin, ja ne laskevat nopeasti ahdetunkin moottorin sylinterin täytösastetta, mikäli niitä ei niitä huomioida.

Ideaalikaasun tilayhtälön mukaisesti paineen kasvun seurauksena ilman lämpötila lisääntyy laskien kaasun tiheyttä. Paineen noustessa imujärjestelmässä kasvaa sen mukana myös virtausnopeus, mikä lisää turbulentsuutta ja sitä kautta virtausvastuksia. Ahtoilman kunnollisella jäähdytyksellä, imujärjestelmän lämpöeristämällä ja ilmansuodatinkotelon optimoinnilla imulämpötilat saadaan pidettyä kuitenkin alhaisina, jolloin sylinteriin saatu ilma on happirikkaampaa.

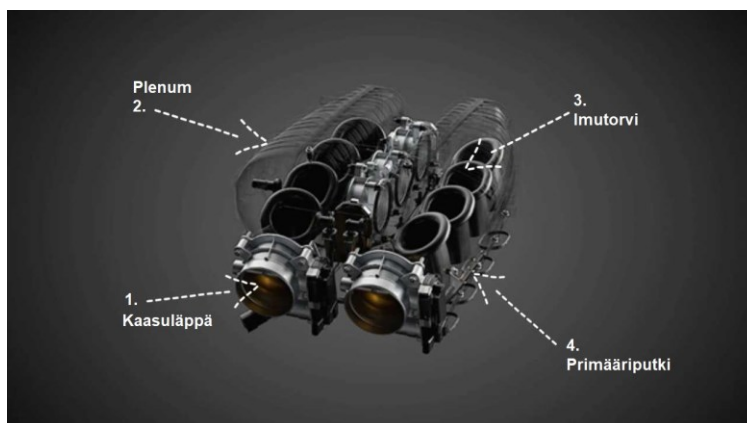
Yhteenvetona moottorityypistä riippumatta kaikki imuvirtauksen tehokkuutta rajoittavat ja lämpötilaa korottavat tekijät laskevat lopullisen ilma-polttoaineseoksen massaa sylinterissä.

### 3 Imusarja komponenttina ottomoottorissa

Imusarja on moottorin sylinterikannen imukanavien kontaktipintaan kiinnitettävä komponentti, jonka tehtävänä on jakaa moottorin sylintereihin virtaava ilma tasaisesti käyntinopeudesta riippumatta. Imusarja muodostuu yleisesti kaasuläpistä, plenumkotelosta, imutorvista ja primääriputkista, joiden poikkileikkausprofiili mukailee sylinterikannen imukanavan muotoa kiinnityspäässä (kuva 3).

Käyttökohteesta riippuen imusarjan konstruktioita voidaan muuttaa ja usein esimerkiksi vapaasti hengittävien kilpa-autojen ottomoottoreiden plenumkotelo jätetään kokonaan pois, jolloin imusarjasta jää jäljelle ainoastaan imutorvet, primääriputket ja läppärunko. Tällä systeemillä kaasuläpät sijaitsevat lähellä imuventtiileitä primääriputkissa, mikä tekee moottorista kierrosherkän, mutta haasteeksi jää kuitenkin imulämpötilojen kontrollointi, sillä moottori itsessään, pakoputkisto ja jäähdytysjärjestelmä luovuttavat lämpöä moottorin ilman sekaan.

Imusarjan suunnittelulla voidaan vaikuttaa oleellisesti moottorin käyttöalueeseen ja tehdasautoissa sitä hyödynnetään useimmiten polttoaineen kulutuksen minimointiin. Imusarjan primääriputkien pituutta, halkaisijaa ja profiilia sekä ilmapirran kulkua muuta konstruktioita muuttamalla pystytään mitoittamaan kohdemoottoriin halutulla kapasiteetilla virtaava kokonaisuus, jota hienosäätämällä saavutetaan moottorin maksimitehot halutulla kierrosalueella.



Kuva 3. 2023 Chevrolet Corvetten LT6 V8-moottori, jossa sylinteriryhmäkohtaiset plenumit on muutettu yhdeksi aktiiviseksi järjestelmäksi, mikä mahdollistaa hienosäätämisen moottorin käyntinopeuden muuttaessa pulssien kulkua imusarjan sisällä [4].

### 3.1 Single plenum -imusarjat

Yleisin imusarjatyyppeä niin tehdasautoissa kuin kilparadoillakin on yksikammioinen single plenum -imusarja, jossa pääsääntöisesti sylinterikohtaiset primääripotket johtavat yhteiseen kiinteään tilavuuden omaavaan plenumiin. Myös sellaiset imusarjat, joiden plenum on osittain tai kokonaan jaettu kuuluvat tähän kategoriaan.

Yhden pääplenumin kanssa ilmavirta etenee esteettömästi ahtopotkesta tai vapaasti hengittävässä moottorissa ilmansuodatinkotelon paluupotkea pitkin suoraan painekotelon sisään. Painekoteloon siirtyessä tyypillisesti tilavuuden kasvun ja virtauspinta-alan äkillisen muutoksen seurauksena virtausnopeus hieman laskee, paine kasvaa ja laminaarinen potkivirtaus hajoaa turbulenttiseksi.

Usein tehdasvalmisteisissa henkilöautoissa painekotelon tilavuudet ovat melko pieniä ja ne on suunniteltu toimimaan optimaalisesti moottorinohjauksen tehdasasetuksilla. Ahtopaineen radikaali kasvattaminen yksiplenumisen imusarjan kanssa voi johtaa herkästi epätasaiseen sylinterien täyttöön, sillä ilmassa pyrkii pitämään virtauskurssinsa ja näin ollen sulloutumaan painekotelossa sisään tulon vastakkaiseen päähän. Tähän ongelmaan on jälkituotantomarkkinoilla erinomaisia ratkaisuja, joista yleisimpiä ovat plenumin tilavuuden kasvattaminen, kaasuläpän sijainnin uudelleen määrittäminen ja painekotelon muotoileminen niin, että virtaussuunnassa painekotelon tilavuus pienenee (kuva 4). [5.]



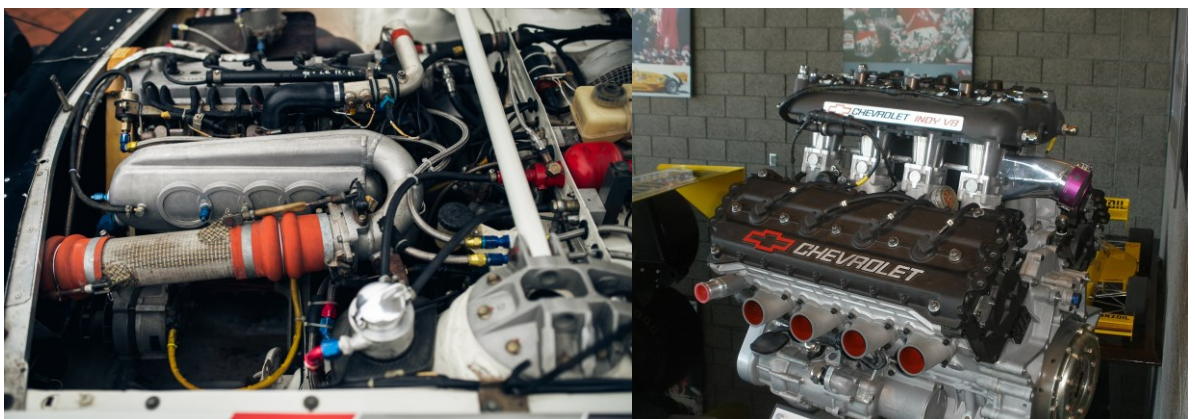
Kuva 4. Perinteinen single plenum -imusarja [6].

### 3.2 Dual plenum -imusarjat

Dual plenum -imusarja koostuu normaalista poiketen tulo- ja pääplenumista. Tuplaplenum-imusarjat saivat alkunsa 80-luvulla, kun useissa eri autourheilu-luokissa turboahdetut moottorit nauttivat ensimmäistä kertaa suosiota. Ahdettujen kilpamoottoreiden huipputehoja ja elinkaarta optimoidessa pyrittiin kehittämään ratkaisu epätasaisen sylinteritäytön ongelmaan.

Audi oli yksi ensimmäisistä valmistajista, joka mm. vuoden 1985 B-ryhmän ralli-autossa otti käyttöön uniikin dual plenum -imusarjan. Tässä imusarjassa ahtoputkea pitkin tuleva ilmavirta jakautuu y-haarasta kahteen tuloplenumiin pääplenumin kyljille, joista ilma johdetaan matalista suorakaiteen muotoisista aukoista pääplenumiin. Tällä konstruktiolla ilmavirta saatiin johdettua pääplenumiin koko sylinteriryhmän pituudelta tasaisesti vastakkaisilta sivuilta, mikä mahdollisti tasan sylinterien täytöksen moottorin käyntinopeudesta riippumatta.

Samalla vuosikymmenellä Ilmor-Chevrolet 265-A:n V8-moottoriin suunniteltiin dual plenum -imusarja, jossa ilma reititetään sylinteriryhmien välistä tuloplenumia pitkin pääplenumin pohjasta sisään. Tässä imusarjassa ilmamassa törmää plenumin kattoon ja jakautuu siitä tasaisesti pääplenumin sisällä kaikille sylintereille (kuva 5). Samankaltaisia imusarjoja oli myös muissa Indy ja IMSA GTP -autoissa.



Kuva 5. Kaksi erityyppistä dual plenum -imusarjaa, vasemmalla Audi Quattro S1:n 5-sylinterinen rivimoottori ja oikealla Ilmor-Chevrolet 265-A:n V8.

## 4 Virtaustekniikan ja kaasujen teoriaa

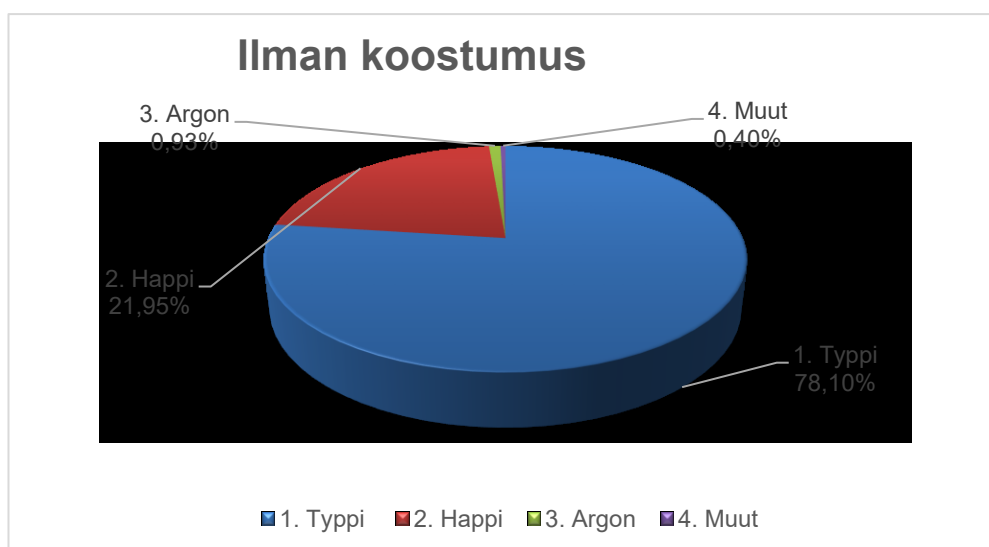
Imusarjan suunnitteluvaiheessa on välttämätöntä ymmärtää ottomoottorin ilmanvaihdon teoria, jotta kriittiset pääkomponentit pystytään luotettavasti mitoittamaan haluttuihin toiminnallisiin tavoitteisiin sopiviksi. Ottomoottorin ilmanvaihtoon keskittyvää kirjallisuutta on julkaistu jo vuosikymmenien ajan moottorien ja testimenetelmien kehittyessä, mikä helpottaa tietojen yhdistämistä ja valintojen tekemistä aihealueissa, joista ei esimerkiksi tämän projektin puitteissa ole mahdollista tehdä fyysisiä kokeita tai se ei aikataulullisesti olisi järkevää.

Opintojen aikaisemmassa vaiheessa Innovaatioprojekti-nimisellä opintojaksolla oli mahdollisuus toteuttaa ryhmässä ajoneuvotekniikkaan liittyvä vapaavalintainen projekti. Teimme ryhmässä projektin ottomoottorin imusarjan suunnittelusta, johon sisältyi paljon perehtymistä siihen, miten imusarjan poikkivirtausprofiili ja imutorvien muotoilu vaikuttavat virtausnopeuksiin ja massavirtaan. Innovaatioprojektin mittaustuloksia, teoriaa ja yhteenvetoja hyödynnetään tämän insinöörityön suunnitteluvaiheessa säästämällä merkittävä määrä aikaa. Näin tehden saadaan hyvä pohja tuotteen suunnittelulle ja voidaan eliminoida huonoksi todettuja variaatioita ominaisuuksien perusteella suoraan analysoimalla mittaustuloksia.

### 4.1 Ilman ja kaasujen ominaisuuksia

Käyttökohteesta riippumatta yksi ottomoottorin toiminnan kannalta pakollisista pääaineista on sellainen, jota ei paljaalla silmällä voi nähdä. Kyseessä on tietenkin sama happea sisältävä ympäröivä ilma, jota me ihmisetkin hengitämme tullaksemme toimeen ja jonka ansiosta palotapahtuma moottorin sylinterissä työtahdilla on mahdollinen. Ilmalla ja yksittäisilläkin kaasuilla on mitattavia termisiä tilasuureita, joita ovat paine, tilavuus ja lämpötila. Edelliset suureet ovat riippuvaisia toisistaan, joten kaasun tilanmuutoksessa yhden suureen muutos vaikuttaa myös muihin arvoihin. Termodynaamisia kaasun suureita puolestaan ovat ominaislämpökapasiteetti, viskositeetti, lämmönjohtavuus ja sisäenergia.

Ilma on usean eri kaasun sekoitus, jonka kolmena pääkaasuina ovat typpi ( $N_2$ ) 78,084 %, happi ( $O_2$ ) 20,946 % ja argon (Ar) 0,934 % (kuva 6). Näiden pääkaasujen lisäksi loput kaasut yhdistettynä muodostavat jäljelle jäävän 0,04 %:n osuuden [7]. Nämä kaasut ovat hiilidioksidi, neon, helium, metaani, krypton, vety ja otsoni. Kaasujen lisäksi ilmassa on myös vaihtelevia määriä kosteutta ja erilaisia pienhiukkasina tunnettuja aerosoleja kuten pölyä, sekä siitepölyä ja saastuttavia hiukkasia, kuten savua ja nokea. Ilman kaasusisältö ilmakehässä pysyy pitkälti vakiona, mutta ilman lämpötila, tiheys ja kosteus sen sijaan voi vaihdella paljon lyhyelläkin aikavälillä.



Kuva 6. Pääkaasujen jakautuminen ilmakehässä [7].

Ilmanpaine, joka tarkoittaa meteorologiassa ilman massaa pinta-alayksikköä kohden, vaihtelee ilmakehässä etäisyyden mukaan korkeussuunnassa merenpinnasta. Noustessa ilmakehässä korkeammalle on yläpuolella olevan ilman massa aina pienempi. Tämä johtuu siitä, että ilmakehän korkeudelta ilmapatseen massa pakkaa alimman kerroksen kaikista tiiveimmiksi. Ilmanpaine maan pinnalla on perinteisesti noin 1013 hPa ja ilman tiheys  $1,250 \text{ kg/m}^3$

Ilman tiheydellä on merkittävä rooli tavoitellessa moottorille korkeaa hyötysuhdetta, sillä tuottaakseen suuren määrän tehoa moottori vaatii siihen suuren määrän happea. Kaasuille on ominaista, että kaasun paineen noustessa tai

lämpötilan laskiessa seoksen tiheys kasvaa. Tämä sääntö pätee myös ilmaan, joten ottomoottorin imujärjestelmän painetta kasvattamalla esimerkiksi mekaanisesti ahtamalla voidaan moottorin volymetristä hyötysuhdetta kasvattaa merkittävästi. Parhaat tehot moottorista saadaan merenpinnan korkeudella.

Ahdetuissa ottomoottoreissa imuilmaa pyritään jäähdyttämään erilaisilla lämmönvaihtimilla ja kilpa-autoissa on yleistä jopa lämpöeristää imusarja (kuva 7), jotta kuumien moottorin komponenttien ilmaan luovuttama hukkaenergia ei siirtyisi imusarjan rakenteeseen ja sitä kautta imuilman sekaan laskien ilman tiheyttä.



Kuva 7. Honda HR22T:n V6-moottori. LMP1- ja LMP2-sarjan moottorin imusarjan lämpöeristys on toteutettu heijastinpintaisella lämpöeristeteipillä [8].

Aineet täyttävät kaasumaisessa olomuodossa aina vapaana olevan tilan kaasun määrästä riippumatta, kuten esimerkiksi huoneen asunnossa, suljetun säiliön tai moottorin sylinterin. Tästä johtuen tilavuus ei ole sovelias suure kaasujen määrän mittaamiseen, sillä se ilmaisee ainoastaan esimerkiksi säiliön tilavuuden eikä niinkään anna osviittaa kaasun sisällöstä. Kun halutaan mitata tarkasti kaasun määrää, käytetään yksikkönä ainemäärää (g/mol) tai massaa (g). [9, s. 411.]

## 4.2 Ideaalikaasun tilayhtälö

Normaalin tasapainossa olevan kaasun tilaa kuvataan paineen  $p$  (absoluuttinen), lämpötilan  $T$  (kelvin) ja tilavuuden  $V$  ( $\text{dm}^3$ ) avulla. Ideaalikaasun tilayhtälön perustana on, että mikäli kahden edellä mainitun muuttujan arvo on tiedossa, niin kolmas tuntematon voidaan aina selvittää laskukaavasta. Suljetussa systeemissä ainemäärä on muuttumaton, mutta systeemin energiamuutokset ovat mahdollisia. Esimerkiksi ajosuorituksen aikana kitkan rajoittamista pitkittäis- ja sivuttaisvoimista lämpenevä auton rengas ottaa vastaan energiaa, joka vaikuttaa rengaspaineeseen kasvattamalla sitä.

Idealikaasun tilayhtälö suljetussa tilassa on

$$pV = nRT \quad (1)$$

jossa

- $p$  = paine (absoluuttinen)
- $V$  = tilavuus ( $\text{dm}^3$ )
- $n$  = ainemäärä (m/M)
- $R$  = yleinen kaasuvakio  $8,3144 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
- $T$  = lämpötila (kelvineinä).

## 4.3 Fluidien ominaisuuksia

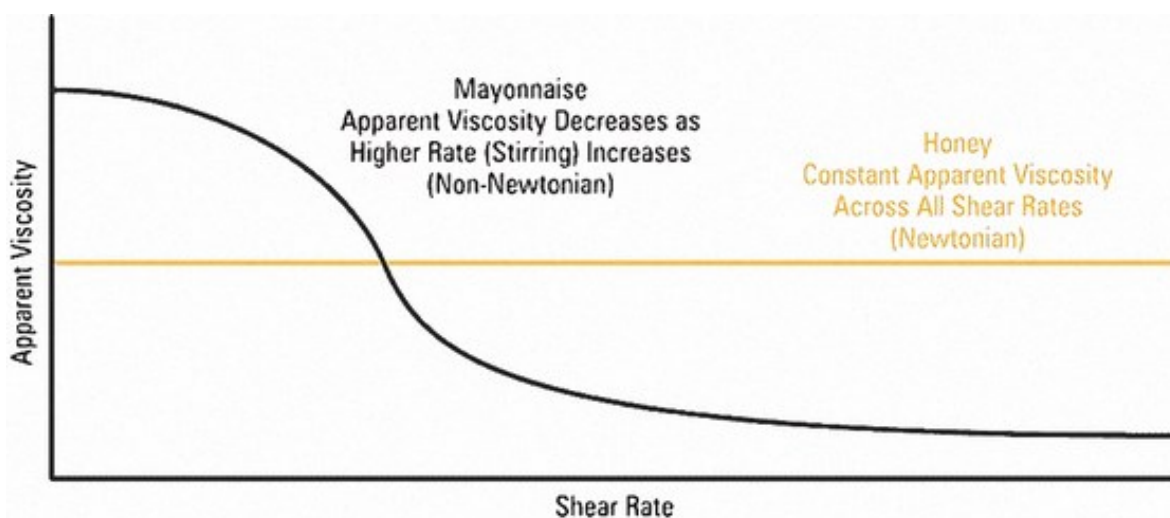
Jos aine pystyy virtaamaan, niin se luokitellaan fluidiksi olomuodosta riippumatta; siitä johtuen myös kaasut luokitellaan tähän ryhmään. Virtausmekaniikassa fluidit jaetaan ominaisuuksiltaan kahteen kategoriaan: newtonilaisiin ja ei-newtonisiin fluideihin. Erona näiden kahden välillä on viskositeettimuutokset tilanteessa, jossa aineeseen kohdistetaan leikkausvoimia.

Esimerkki fluidiin kohdistuvasta leikkausvoimasta on moottorissa pyörivä liuku-laakeroitu nokka-akseli, jonka voitelu tapahtuu hydrodynaamisesti moottoriöljyllä. Metallipinnoista toinen on paikallaan (laakerointi), ja välissä on öljykalvo, johon pyörivä nokka-akseli kohdistaa jatkuvasti leikkausvoimia.

Newtonilaisten fluidejen viskositeetti pysyy leikkausvoimia kohdistessa vakiona, kun taas ei-newtonilaisten fluidejen viskositeetti puolestaan pienenee leikkausnopeuden noustessa ja kasvaa leikkausnopeuden pienentyessä [10]. Ilmavirta kuuluu newtonilaisiin fluideihin, joten esimerkiksi putkivirtauksessa tapahtuvilla leikkausvoimilla ei ole sen viskositeettiin mitään vaikutusta.

Muita esimerkkejä newtonilaisista fluideista ovat mm. moottoriöljy, bensiini, alkoholi ja vesi. Näiden esimerkkiaineiden viskositeettia ei ole mahdollista ohentaa ja paksuntaa leikkausvoimin [11].

Kuvassa 8 on esitettyä tilanne, jossa kohdistetaan leikkausvoimia ei-newtoniseen ja newtoniseen fluidiin.



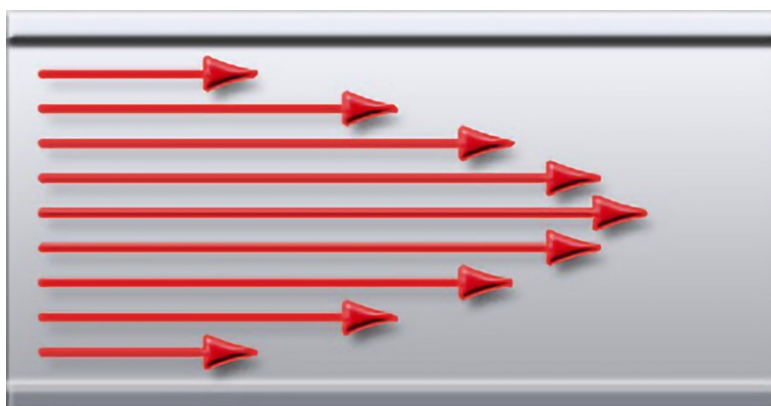
Kuva 8. Ei-newtonisen majoneesin viskositeetti, joka laskee leikkausvoiman vaikutuksesta, sekä hunajan viskositeetti, joka pysyy vakiona [10].

#### 4.4 Laminaarinen ja turbulентtinen virtaus

Putkivirtauksia esiintyy kahdenlaista, laminaarista (kuva 9) ja turbulenttista. Laminaarisessa virtauksessa aineen molekyylirakenne pysyy virtaussuunnassa hyvin suoraviivaisena ja järjestelmällisenä. Turbulenttisessa virtauksessa kerroksen sekoittuvat keskenään sekä molekyylin eteneminen on epätasaista eikä niinkään suoraviivaista.

Tyypillistä turbulenttisessa virtauksessa on fluidin poikittaisliike, joka vaikeuttaa virtauksen ennakoimista sekä voi hidastaa ilmavirran etenemistä ja aiheuttaa epätasaista paineen jakautumista. Lisäksi huomioitavaa on, että äkilliset suunnanmuutokset virtausputkessa aiheuttavat turbulenssia, joka vaikuttaa negatiivisesti potentiaaliseen maksimivirtausmäärään.

Laminaarinen putkivirtaus johtaa aina putken poikkivirtauspinta-alan läpi maksimimäärän fluidia ja suurin virtausnopeus on putken keskellä. Nopeuserot putkivirtauksessa kerrosten välillä ovat täysin riippuvaisia fluidin tiheydestä, ja mitä tiheämpi fluidi on kyseessä, sitä suuremmista nopeuseroista on kyse. Tilanteissa, jossa tiheys kasvaa riittävästi, suuremman virtausnopeuden kerrokset aiheuttavat hitaammassa kerroksissa pyörteilyä, joka huonontaa kokonaisvirtausta putken läpi. [12.]



Kuva 9. Laminaarinen putkivirtaus, jossa suurin virtausnopeus on putken keskellä [12].

## 4.5 Bernoullin yhtälö

Bernoullin yhtälö on oleellinen osa fluidien eli kaasujen ja nesteiden virtausmekaniikkaa. Yhtälön periaatteena on, että kitkattomassa ja kokoon puristumattomassa virtauksessa virtausnopeuden ja staattisen paineen välinen suhde on vakio. Virtausnopeus putkessa on riippuvainen putken poikkivirtauspinta-alasta, ja pinta-alan pienentyessä virtausnopeus kasvaa. Kineettinen energia lisääntyy virtausnopeuden kasvun mukana, mikä laskee potentiaalienergiaa eli painetta.

Perusmuodossaan Bernoullin yhtälö kokoon puristumattomassa ja kitkattomassa putkivirtauksessa kertoo yhteyden paineen, virtausnopeuden ja korkeuseron välillä:

$$p + \frac{\rho v^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h = \text{vakio} \quad (2)$$

jossa

$p$  = paine

$\rho$  = tiheys

$v$  = tilavuus

$g$  = 9,8 m/s

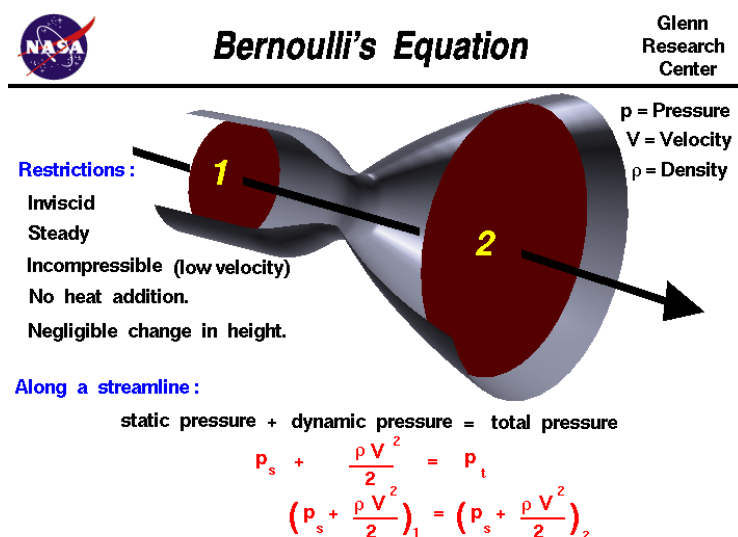
$h$  = hydraulinen korkeus.

Hyvä esimerkki Bernoullin yhtälön soveltamisesta teknisessä ratkaisussa on pitot-putki (kuva 10), jota hyödynnetään mm. ilma-aluksen lentonopeuden määrittämiseen ja Formula 1 -kilpa-autoissa ilmapirran nopeuden mittaamiseen halutuissa sijainneissa. F1-autoissa mittaustuloksia voidaan hyödyntää auton aerodynaamisten ominaisuuksien suunnittelutyössä ja ratakohtaisia säätöjä tehdessä. Pitot-putken toiminta perustuu staattisen ja kokonaispaineen tietojen keräämiseen, joita hyödyntämällä virtaus tai kulkunopeus voidaan laskea Bernoullin yhtälöstä. [13.]



Kuva 10. Airbus A321:n pitot-putki, jolla mitataan lentonopeutta.

Kuvassa 11 on esitetty tilanne, jossa matalalla virtausnopeudella etenevä kaasu virtaa putkessa. Virtaussuunnassa putken poikkivirtauspinta-ala kutistuu ja sen jälkeen kasvaa alkupään kokoa suuremmaksi. Putken poikkivirtauspinta-alan keskipisteessä virtausnopeus on aina suurin, joten sitä käytetään usein virtausnopeuden mittauspisteenä. Esimerkissä virtausnopeus on alhainen ja fluidi kokoon puristumaton, joten tiheyttä voidaan pitää vakiona. Bernoullin yhtälö voidaan yksinkertaistaa alueiden 1 ja 2 staattisen paineen ja virtausnopeuden suhteiksi toisistaan. Putken suuntaisessa virtaviivaisessa virtaustilanteessa Bernoullin yhtälöä voidaan hyödyntää helposti tuntemattoman paine-eron tai virtausnopeuden määrittämiseen.



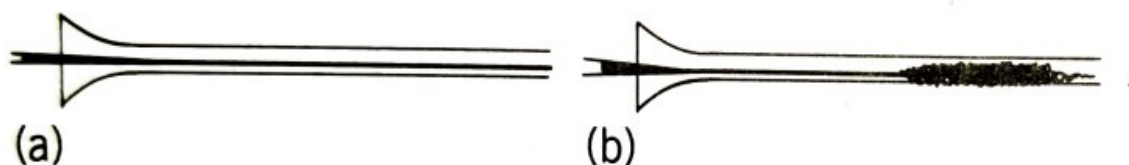
Kuva 11. Bernoullin laki kuvaamassa paineen, virtausnopeuden ja tiheyden välistä suhdetta [13].

## 4.6 Reynoldsin luku

Fluidien ominaisuuksissa viskositeetin lisäksi toinen merkittävä parametri on englantilaisen fyysikon Osbourne Reynoldsin mukaan nimetty Reynoldsin luku. Vuonna 1883 Osbourne Reynolds teki kirkkaan lasiputken läpi virtauskokeita veden avulla ja lisäsi virtaavan veden sekaan väriainejuovia, jotta virtauksen käyttäytymistä putkessa olisi helpompaa tulkita. Kokeita tehdessään Reynolds huomasi, että  $Re$ :n ollessa alle 2000 oli virtaus kokeen kestosta riippumatta aina laminaarista. Arvon vaihdellessa välillä 2000–3000 vaihteli virtaus laminaarisen ja turbulenttisen välillä, mutta kehittyi lopulta turbulenttiseksi. [14, s. 173.]

Reynoldsin luku ilmaisee inertiaivoimien (muutosta tai liikettä vastustavia) suhdetta viskoottisiin (väliaineen sisäinen kitka) voimiin. Kaasun kulkiessa virtausputkessa kaasun molekyylit pyrkivät tarrautumaan putken sisäpintaan. Tämä aiheuttaa putken pinnan tuntumaan ilmakerroksen, jota kutsutaan rajakerrokseksi. Esimerkkinä kaasun putkivirtauksessa pieni Reynoldsin luku tarkoittaa, että virtausta vastustavat (kaasun viskositeetti) voimat ovat huomattavia ja että pienemmän viskositeetin omaavalla kaasulla saavutettaisiin suurempi Reynoldsin luku. [15.]

Kuvassa 12 havainnollistettuna kohdassa a) laminaarinen virtaus, jonka  $Re > 2000$ , sekä kohdassa b) turbulenttinen virtaus, jonka  $Re > 3000$ .



Kuva 12. Virtauksen kehitys  $Re$ :n kasvaessa [14, s.173].

Yleisesti luvun ollessa pienempi kuin 2300 on kyseessä laminaarinen virtaus. Laminaarisen ja turbulenttisen virtauksen siirtymäalueena putkivirtauksessa pidetään 2400:n ja 4000:n välistä asteikkoa. Siirtymäalueen sisällä on mahdollista ilmetä vaihtelevassa määrin sekä laminaarista että turbulenttista virtausta. Reynoldsin luku on hyvä aloitustyökalu virtauksen ominaisuuksien päättelyyn, mutta realistisessa tilanteessa virtaus, jonka pitäisi Re:n mukaan olla laminaarista, on kuitenkin turbulenttista johtuen muista tekijöistä, kuten virtauselementin pinnanlaadusta rajapintojen muodosta.

$$Re = \frac{dv\rho}{\mu} \quad (3)$$

jossa

d = putken halkaisija (m)

v = virtausnopeus (m/s)

$\rho$  = tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$\mu$  = dynaaminen viskositeetti (Pa\*s)

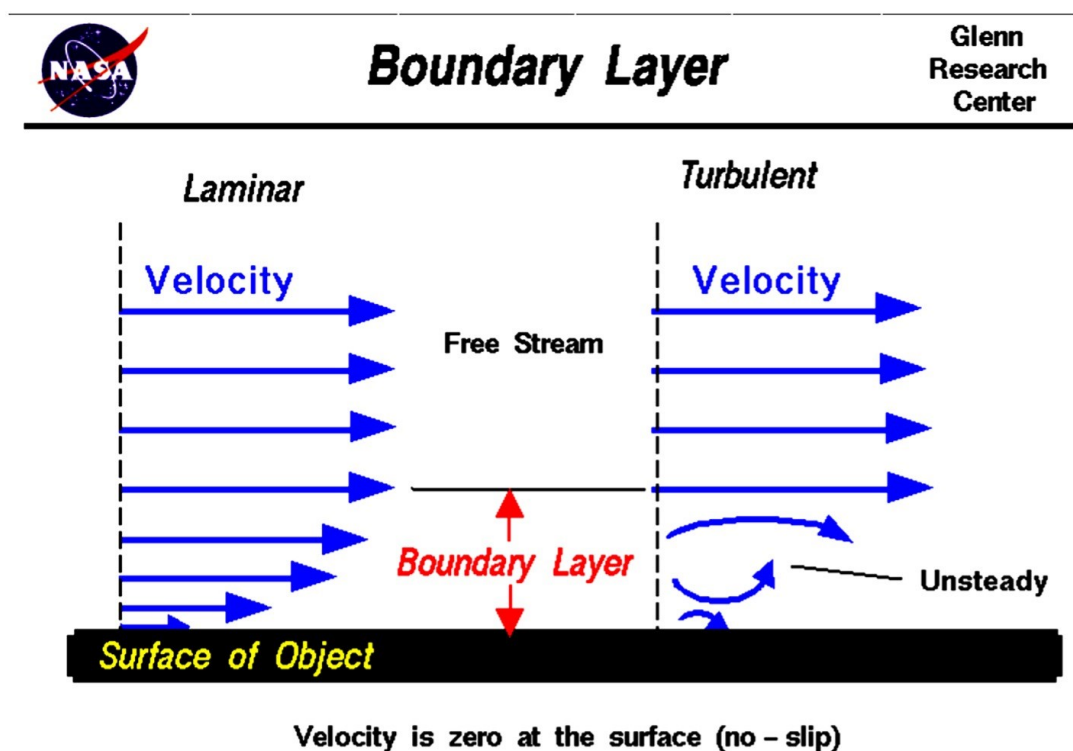
#### 4.7 Rajakerros

Kappaleen liikkuessa fluidin läpi tai toisin päin kappaleen pintaa lähellä virtaavat kyseisen fluidin molekyylit häiriintyvät ja pyrkivät tarrautumaan kohteen pintaan. Fluidin ja kappaleen välille syntyy siis aerodynaamisia kitkavoimia, joiden vahvuus on riippuvainen kappaleen nopeudesta, muodosta, pinnanlaadusta, sekä fluidin massasta, viskositeetista ja paksuudesta.

Aivan esineen tai virtausputken pinnassa kiinni olevat molekyylit ovat käytännössä paikallaan (virtausnopeus nolla). Molekyylikerrosten lisääntyessä erkaantuessa kappaleen pinnasta ulospäin molekyylin nopeus kehittyy lopulta normaalivirtauksen kanssa identtiseksi.

Laminaarisessa putkivirtauksessa suurimmat virtausnopeudet sijaitsevat putkea pitkin tarkasteltuna putken poikkileikkausprofiilin keskipisteessä. Rajakerroksen muoto voi saada joissain tapauksissa hyvinkin erilaisen muodon kappaleen fyysiseen muotoon nähden.

Kuvassa 13 havainnollistetaan ero rajakerroksessa laminaarisen ja turbulentiin virtauksen välillä.



Kuva 13. Vasemmalla rajakerroksessa laminaarinen virtaus, oikealla turbulentiin [16].

## 5 Teorian sovellukset ottomoottorissa

Edellytyksenä moottoriin syötetyn polttonesteen täydelliselle palamiselle on riittävä määrä happea suhteessa polttonesteen määrään. Mitä suurempi määrä happirikasta ilmaa sylinteriin saadaan tuotua imuventtiilin aukiolon aikana, sitä enemmän polttonestettä voidaan lisätä ilmamassan sekaan ylläpitäen ilma-polttoaineseos optimaalisena täydelliselle palamiselle. Kun poltetaan suurempi määrä polttonestettä, vapautuu enemmän energiaa kasvattaen painetta sylinterissä ja sitä kautta moottori tekee enemmän työtä.

Yksinkertaistettuna haluttaessa kasvattaa moottorin maksimitehoja imusarjan avulla pitää imusarja suunnitella sellaiseksi, ettei se ole ilmavirran kuristimena ennen sylinterikannen imukanavia vaan pikemminkin ilmavirtauksen jakajana. Primääriputket tulisi mitoittaa huomioiden venttiileiden sulkeutumisesta aiheutuvat ilman jäännöspulssit, muotoilla imutorvet oikein, miettiä paras sijainti kaasuläpälle ja imusarjatyypistä riippumatta kartoittaa ilman jakautuminen plenumin sisällä. Jo ainoastaan huonosti sijoitettu tai alimitoitettu halkaisijalla oleva kaasuläppä voi aiheuttaa sen, ettei plenumkoteloon pääse riittävästi ilmamassaa suhteessa primääriputkien ja sylinterikansien maksimivirtauspotentiaaliin. Tuloilman virtauksen suunnittelu on ahdetussa moottorissa todella kriittinen tekijä, jonka huomiotta jättäminen johtaa usein epätasaiseen sylintereiden täyttöasteeseen.

Imusarjan kokoonpanossa käytetyillä materiaaleilla, jäähdytysrivoilla sekä mm. imusarjan lämpöeristämällä voidaan vaikuttaa lämpömäärään, joka imusarjan rakenteesta siirtyy imuilman sekaan. Virtauksessa, jossa väliaineen lämpötila on matalampi kuin ympäröivän rakenteen, luovuttaa rakenne lämpöä virtaavan väliaineen sekaan. Ottomoottorin imusarjan läpi virtaavan lämpötilan nousemiseen vaikuttavat mm. suora lämmönjohtuminen moottorista sekä lämpösäteily moottoritilassa sijaitsevista ulkolämpötilaa kuumemmista komponenteista, kuten esimerkiksi pakosarjasta tai moottorin jäähdyttimestä. Imuilman reititys kannattaa tästä johtuen etumoottorisessa autossa reitittää useimmiten auton etuosasta suljettua ilmakehää pitkin ilmansuodatinkoteloon.

## 6 Valmiiden primääriputkien vaikutukset projektissa

Projektissa käytetyt Kinslerin valmistamat primääriputket on suunniteltu keski-moottoriin IMSA GTP- ja Indy Car -tyyppisiin kilpa-ajoneuvoihin, joissa imuilma johdetaan moottorille tyypillisesti ajoneuvon ylivirtausilmasta suoraan moottorin yläpuolelta. Tähän toteutustapaan perustuen vapaasti hengittävässä 90 asteen V-moottoreissa oli yleistä, että primääriputket suunniteltiin osoittamaan suoraan kohti taivasta. Rakenteellinen ratkaisu mahdollisti myös ahtoilman jäähdyttimien asentamisen suoraan primääriputkien päälle, käytännössä osaksi imusarjaa hoitamaan samalla plenumin virkaa. Näin tehtiin useissa IMSA GTP -luokan kilpa-autoissa (kuva 14).

Etumoottorisessa kohdeajoneuvossa Buick Regal 1987 suurin haaste on imusarjakokoonpanon mahdolluttaminen moottoritilaan. Painekotelo on pyrittävä mitoittamaan mahdollisimman matalaksi, niin ettei plenumin kannen etäisyys imutorvista kuitenkaan ala rajoittaa virtausta. Primääriputkien fyysisistä ominaisuuksista johtuen painekotelo tulee kokonaisuutena sijaitsemaan moottoritilan korkeimmassa pisteessä. Tästä syystä kokoonpanon yksittäiset osat pyritään valmistamaan ensisijaisesti kevyistä materiaaleista, jotka ominaisuuksiltaan kestävät luotettavasti painerasituksen ja korkeat lämpötilat.



Kuva 14. BUICK 85G GTP, ahtoilmanjäähdytin Kinsler-primääriputkien päällä [17].

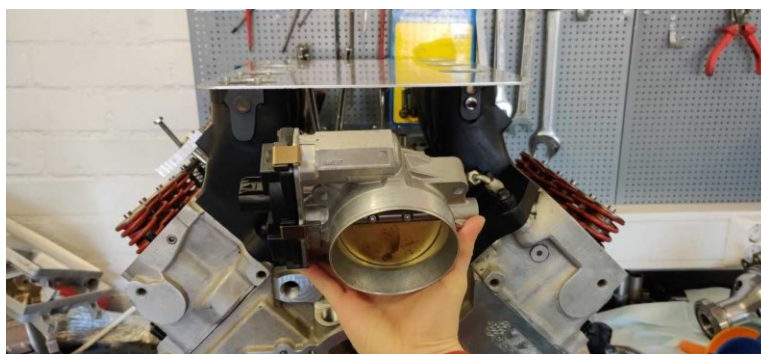
## 7 Imusarjan kokoonpanon suunnittelu ja valmistus

Plenumin suunnittelu valikoitiin valmistusjärjestyksessä ensimmäiseksi, sillä kokoonpanon pääkomponenttien valmistaminen lujitemuoveista (hiilikuitu ja aramidi) ja 3D-tulostamalla on monimutkainen prosessi, joka pitää sisällään esimerkiksi lastuavasta työstöstä poiketen laajan skaalan erilaisia työvaiheita, joiden onnistuminen on välttämättömyys, jotta lopputuotteesta tulee fyysisesti mitoiltaan 3D-mallinnuksien mukainen tuote.

Komposiittiosien suunnittelu, muottien suunnittelu, muottien valmistaminen, muottien maalaustyö, muottien esikäsitely, komposiittiosien valmistaminen alipaineistamalla käyttäen muotteja on jo itsessään iso projekti, jossa useat muutujat vaikuttavat lopputuotteen todellisiin ulkomittoihin. Komposiittituotteen lamiinaatin lopullisen vahvuuden määrittämiseen on olemassa valmiita materiaali-kohtaisia arvoja, mutta valitsemalla työjärjestyksen oikein on mahdollista varmistaa manuaalisesti mittaamalla, että kokoonpanon osat tulevat sopimaan toisiinsa.

### 7.1 Pääplenumin pohjan suunnittelu

Suunnittelutyöhön ryhdyttäessä asennettiin ensimmäiseksi primääriputket moottoriin paikalleen, jotta suunnittelun kannalta kriittiset päämitat, kuten sylinteriryhmien etäisyys toisistaan ja imusarjan laippapintojen pulttijakojen ristimitat, voitiin määrittää. Samalla mietittiin tuloilman reititystä plenumiin ja selviteltiin mahdollista toteutustapaa dual plenum -tyyppiselle imusarjalle (kuva 15).



Kuva 15. Tuloilman reitityksen suunnittelua kohdemoottoriin.

Primääriputkien aiheuttamat tilan puutteeseen liittyvät haasteet olivat jo ennestään tiedossa, joten päätös tuloilman ohjauksesta painekoteloon pohjan kautta pituussuuntaisesti sylinteriryhmien välistä tehtiin jo heti visuaalisen näkemyksen perusteella. Reitittämällä tuloilma plenumiin alakautta voidaan osa imusarjan kokoonpanon komponenteista siirtää korkeussuunnassa alemmaksi, millä säädetään kokoonpanolle matalammalle sijoittuva massakeskipiste.

Jos tuloilma plenumiin johdettaisiin suoraan edestä tai hieman yläviistosta, määräytyisi plenumin kannen minimikorkeus automaattisesti kaasuläpän fyysisten ulkomittojen mukaan. Yhtenä vaihtoehtona harkittiin tuloilma jakamista ennen imusarjaa Y-haaralla yhden pääplenumin molemmille sivuille, jolloin kahden pienemmän kaasuläpän käyttäminen olisi mahdollistanut imusarjan kokonaiskorkeuden laskemisen (kuva 16). Monimutkaisemman rakenteen takia, jossa käytettäisiin kahta halkaisijalta pienempää kaasuläppää ja tuloplenumia, laskettiin kuitenkin ilman suorituskyvyllisiä hyötyjä kasvattavan ainoastaan kokoonpanon kokonaismassaa.



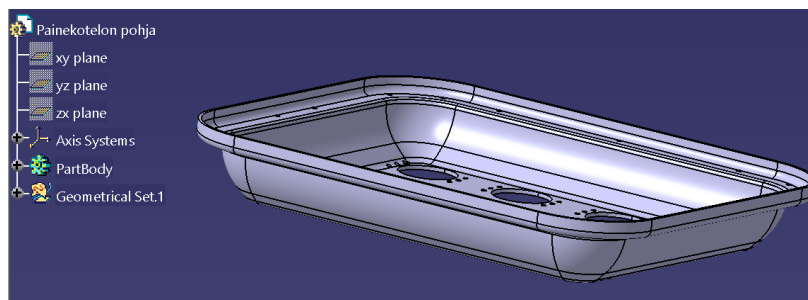
Kuva 16. Buick V6:n imusarja, jossa on kaksi kaasuläppää.

Primääriputkien etäisyydet oli tässä vaiheessa jo määritelty mittaamalla, joten pääplenumin pohjan suunnittelu aloitettiin 3D-mallintamalla Catia V5 -ohjelmalla ohutlevyrakenne, johon sijoitettiin tarvittavat reiät kiinnitystä varten, primääriputkien virtauskanavat ja suuntaa antava reikä keskelle sisääntulovirtaukselle.

Ohutlevyrakenteen mallintamisen jälkeen kartoitettiin imusarjan ympäriltä puuttuvien osien mahdollinen vaikutus pääplenumin pohjan ulkomittoihin. Primääriputket ovat niin korkeat, että moottoritilan ainoat komponentit, jotka voisivat ylittää pääplenumin pohjan korkeudelle ovat sylinteriryhmien mukaan pituussuunnaltaan kulkevat polttonestekiskot. Minimaalinen rajoitus pohjan muotoiluun on ajoneuvon pituusakseliin nähden leveysuunnassa ja on helposti ratkaistavissa.

Paineenkeston kannalta pitkät täysin suorat pinnat ovat hyvin alttiita muodonmuutokselle paineistetussa järjestelmässä, jonka sisällä tapahtuu suuria paineenmuutoksia. Paineenkeston pohjan suoruus tässä tilanteessa on kuitenkin välttämätön, sillä kontaktipinta primääriputkiin tullaan toteuttamaan joko paperi- tai o-rengas tiivisteillä. Pintojen kiinnitysmenetelmäksi pyritään suunnittelemaan ratkaisu, joka tiiveyden lisäksi ajaa samalla myös tukirakenteen virkaa.

Optimaalisin muotoilu paineenkeston kannalta on aina pallomainen tai muuten pyöristetty profiili kuten lieriö. Tämä pyrittiin huomioimaan mahdollisimman hyvin pohjan suunnittelussa, jossa pystysuorien seinämien sijaan käytettiin hyödyksi pyöreäprofiilista nousua ylöspäin. Muotoilulla saavutettiin vaadittava tila polttonestekiskoille, deformaation ehkäisemiseksi erinomainen profiili, sekä miellyttävä ulkonäkö (kuva 17).



Kuva 17. Pääplenumin pohja pyöristyksin, kokonaiskorkeus 70 mm.

Tässä vaiheessa pääplenumin pohjan malli oli halutunlainen, mutta ratkaistavana oli vielä pohjan ja kannen sekä primääriputkien ja pohjan välisten tiivistyksien suunnittelu. Pohjan ja kannen välinen kontaktipinta haluttiin toteuttaa kulu- tusta ja ikääntymistä kestäväällä menetelmällä, jolla myös o-rengas tiivistäminen on mahdollista, sillä imutorvia vaihtaessa pääplenumin kansi on aina irrotettava.

3D-tulostamalla olisi mahdollista valmistaa laippa pääplenumin pohjaan o-ren- gasuralla, mutta edellytyksenä tällöin on laipan 1-osainen rakenne. Käytössä olevilla 3D-tulostimilla ei pinta-alaltaan riittävän suurta 1-osaista laippaa pystyisi plenumin pohjaan valmistamaan, mistä johtuen päätettiin, että alkuperäisestä suunnitelmasta poiketen työn kaikki kriittiset tiivistepinnat tullaan valmistamaan lastuavan työstön menetelmillä ja laserleikkausta hyödyntäen alumiinista.

Komposiiteista valmistettuihin tuotteisiin alumiinisten laippojen kiinnitys onnistuu erinomaisesti siihen tarkoitelluilla rakenneliimoilla. Liimasauman riittävän lujuu- den lisäksi huomioitavia asioita tässä käyttökohteessa ovat myös erinomainen kemikaalisieto ja lämpötilan kesto varsinkin primääriputkien laipan liimauksessa.

## 7.2 Primääriputkien laipat

Primääriputkien ja pääplenumin välisen liitoksen suunnittelu aloitettiin mittaa- malla primääriputkien yläkontaktipinnasta kiinnityspisteet ja fyysiset mitat, joista Catia V5:llä luotiin 3D-malli pienillä muutoksilla (kuva 18). Alkuperäiseen sylinte- rikohtaiseen 4-pulttiseen jakoon lisättiin imutorvien kiinnitystarpeita varten kaksi lisäreikää ja alkuperäiset tuumaiset UNC 5/32 (3,97 mm) -kierteet mitoitettiin uudelleen sopivaksi M5-pulteille.

6-pulttisella jaolla ja kierteen kasvatukselle pyrittiin parantamaan kiinnityksen kestävyyttä, sillä alkuperäinen 5/32":n kierre oli mitoitettu ainoastaan yksittäis- ten sylinterikohtaisten imutorvien kiinnitykselle. Ruuvien halkaisijaa kasvatta- malla niiden kovuus ja myötöraja kasvaa, vaikka lujuusluokka pidettäisiin sa- mana. Lisäksi puristuspinna-ala kasvaa jo standardoidun kannan kasvun myötä.

[18.]



Muista komponenteista poiketen laipat päätettiin valmistaa heti 3D-mallinnuksien jälkeen, sillä niiden sovitus pääplenumin pohjaan joudutaan joka tapauksessa toteuttamaan manuaalisesti. Laipat valmistettiin Metropolia Ammattikorkeakoulussa 5-akselisella Haas UMC-750 -työstökeskuksella AW-6082-lattaprofiilista sen hyvän koneistettavuuden, lujuusominaisuuksien, pintakäsittelymahdollisuuksien ja korroosionkeston takia (kuva 20).



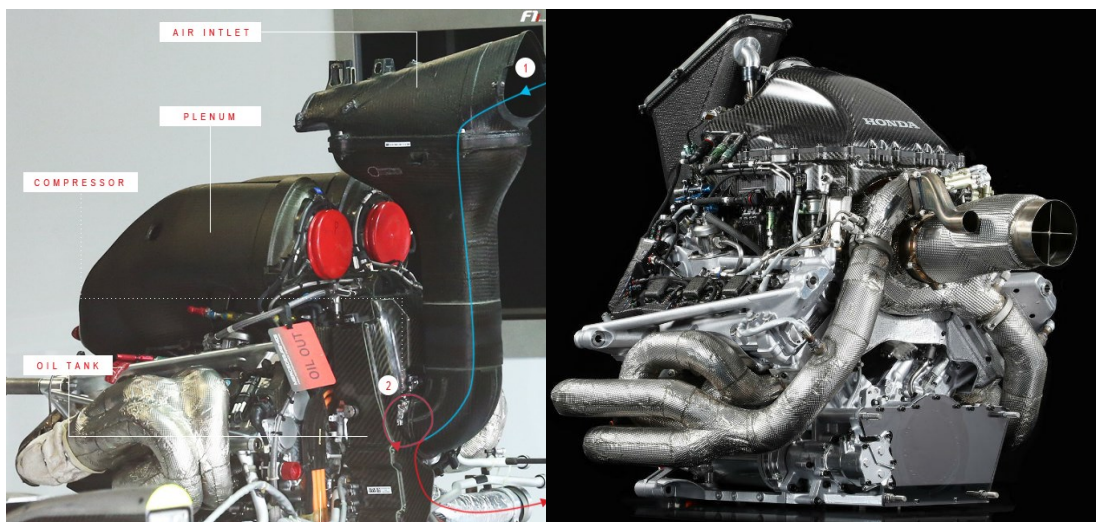
Kuva 20. AW-6082-alumiinista koneistettu laippa.

### 7.3 Pääplenumin kannen suunnittelu

Tärkeimmät asennuspinnan päämitat kopioitiin pohjan mallista kannen suunnittelua varten, mutta geometriaa muutettiin siten, että yhteen koottuna pääplenumin kansi tulee asettumaan noin 5 mm syvyydelle pohjan kontaktipinnan yli. Rakenne kohdistaa kannen ja pohjan välisen pulttijaon kohdalleen, ja kansi ylittäessään saumakohdan jättää kaikki merkit kokoonpanon liimauksesta piiloon.

Tässä vaiheessa imusarjan suunnittelun kannalta alettiin myös kartoittaa plenumin kokonaistilavuutta. Aiheesta on useita eri teorioita ja lähteestä riippuen tieto on usein hyvin ristiriitaista. Yhdistävänä tekijänä mitoituskaavoissa on kuitenkin jokin suhdeluku moottorin litratilavuuden ja plenumin tilavuuden välillä. Yleisin mainittu mitoitusääntö turboahdetulle imusarjalle on, että plenumin kokonaistilavuus kannattaisi olla noin kaksi kertaa moottorin iskutilavuus.

F1-sarjassa vapaasti hengittävät V8-moottorit korvattiin kaudella 2014 turboahdetuilla 1,6-litraisilla V6-moottoreilla. Pienehköstä iskuutilavuudesta huolimatta moottorit on varustettu silti yli 10-litraisilla plenumilla, mikä tarkoittaa 500 %:n eroa moottorin iskuutilavuuden ja plenumin koon välillä (kuva 21). Sähköavusteisella pakokaasuahdimella kehitetään imujärjestelmään yli 3 bar:n ylipaine, joten virtausnopeutta on paljon, mutta paikallisesti virtausnopeus laskee suureen plenumiin siirryttyään.



Kuva 21. 1,6-litraiset Mercedes PU106C ja Honda RA616H F1-sarjan V6-moottorit kaudelta 2016 [19 ja 20].

Todella suurella plenumilla varustettu imusarja vapaasti hengittävässä käyttökohteessa toimii kuin imusarja ilman plenumia, ja tilavuutta muuttamalla saavutetut erot ovat todella pieniä. Yhdysvaltalainen Motortrend-lehti suoritti tehonmittauksia Chevroletin 6,2-litraisella V8-moottorilla, joka varustettiin omavalmisteisella imusarjalla, jonka plenumin tilavuus oli noin 30 litraa (kuva 22). Ero maksimitehossa normaalikokoiseen imusarjaan oli koko moottorin kierrosalueen läpi vain noin 1 kW. [21.]

Ahdetussa moottorissa pienellä plenumin tilavuudella virtausnopeus pysyy suurena koko plenumin pituudelta, joka luo omat haasteensa muotoiluun ja virtauksen ohjaamiseen liittyen. Putkivirtauksessa väliaineen inertia pyrkii pitämään aina virtauskurssinsa riippumatta siitä, onko virtaus laminaarista vai turbulenta. Mikäli virtausputken hetkellisessä tilavuudessa ei tapahdu merkittäviä

muutoksia (pieni plenum) eikä virtauksen yhdensuuntaisuuteen vaikuteta mitenkään, sulloutuu plenumin tuloaukon vastakkaisiin sylintereihin eniten ilmaa.



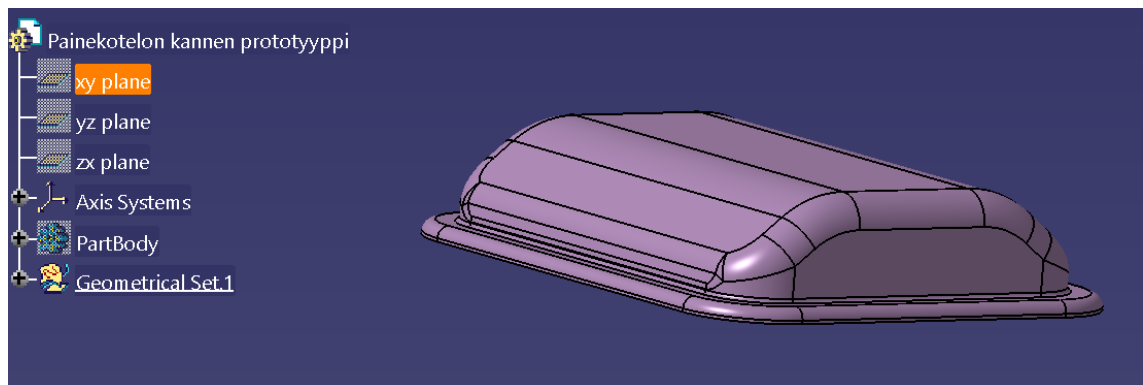
Kuva 22. 30 litran plenumtilavuuden vaikutus huipputehoon oli alle 2 kW [21].

Suurella plenumin tilavuudella kuten ahdetuissa F1- ja Indy-autoissa virtausnopeus laskee ja paine kasvaa paikallisesti virtauspoikkipinta-alan äkillisen kasvun seurauksena. Putkivirtauksen suuntainen nopeasti tapahtuva sisätilavuuden kasvu aiheuttaa virtauskerrosten välille poikittaisliikettä (turbulenssia), joka jakaa väliaineen suuremmalle alueelle tasaisesti. Lisäksi sisäänmenoaukon muotoilulla voidaan vaikuttaa virtausalueen etenemiseen plenumissa tai törmäyttämällä virtaus seinän kautta rikkoa yhdensuuntainen virtausrintama tasaisemmaksi ylipaineeksi, joka paine-eron voimalla sulloutuu sylintereihin.

Imusarjatekniikkaan perehtymällä saatiin hyvää lisätietoa ja inspiraatiota plenumin kannen suunnitteluun. Kohdeajoneuvon moottorin iskuilavuudeksi tulee noin 3,8 litraa, joka tarkoittaisi F1-tyylisellä mitoituksella todella suurta lähes 20 litran plenumia. Näin isoa plenumia varten pitäisi käytetyn ahtopaineen olla todella suuri, jotta todelliset hyödyt olisivat jossain määrin saavutettavissa. Suunniteltu maksimiahtopaine kohdeajoneuvon moottorille on noin 1,5 bar, ja moottoritalan kannen etäisyys määrittää tietyt raja-arvot maksimikorkeudelle, joten päätettiin, että ahdetujen V6-moottoristen F1-autojen käyttämä plenumin 10 litran tilavuus soveltuu hyvin myös tähän projektiin.

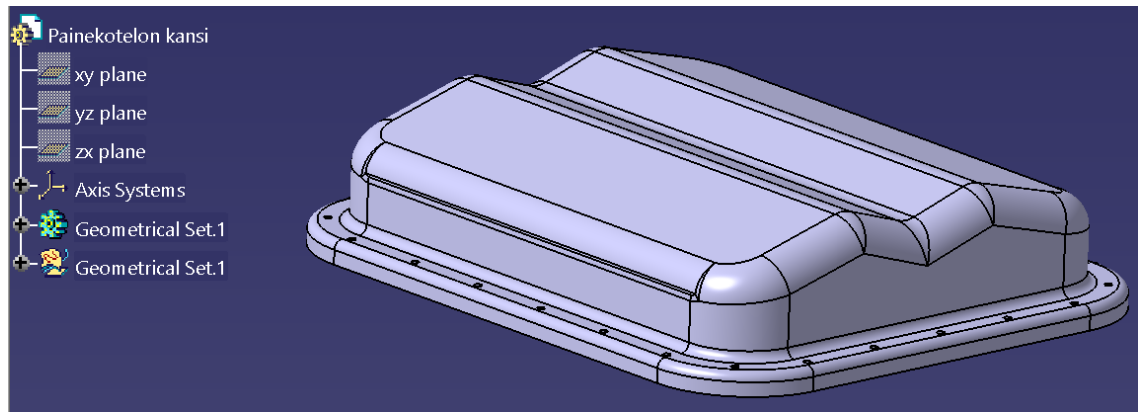
Plenumin kannesta mallinnettiin muutama erilainen prototyyppi, jotta voitiin vertailla eroja mallien välillä kokonaistilavuuden, rakenteellisen kestävyuden ja virtauksen optimoimiseksi. Ensimmäiseen prototyyppiin (kuva 23) tehtiin vain haluttunlaiset pyöristykset, jotta paineensietokyky sopivalla materiaalivahvuudella olisi riittävä. Koska päätettiin aikaisemmin toteuttaa dual plenum -tyyppinen ratkaisu, niin virtaus plenumiin ohjataan suoraan kannen alapuolelta koko plenumin pituudelta. Näin ollen ilmamassan jakautumiseen voidaan vaikuttaa merkittävästi kannen muodolla ja plenumin keskelle sijoitettavalla tulosuuttimella.

Ensimmäisen prototyypin mahdollisina ongelmana pidettiin sitä, että ilman jakaantuminen sylintereille ei ehkä olisi optimaalinen ja johtuen tasaisesta yläpinnasta riski muodonmuutokselle paineen alla olisi mahdollinen.



Kuva 23. Painekotelon kannen prototyyppi 1.

Seuraava kannen malli haluttiin muotoilla sellaiseksi, ettei se kurista virtausta imutorville sivuilta tai yläpuolelta ja korkeuden puolesta pidempien imutorvien käyttö on mahdollista. Lisäksi pohdittiin mahdollisuutta ohjata kannen muodolla ilmavirtausta sylinteriryhmien yläpuolelle. Hahmoteltiin suunnitelma, jossa kannen yläpinnan lujuutta parannetaan lisäämällä pituusakselin suuntainen alaspäin syvenevä V-muoto, johon alapuolelta tuleva ilmavirta jakaantuu tasaisesti molemmille sivuille (kuva 24). Tämä malli vaikutti ehdottomasti parhaalta vaihtoehdolta ottaen huomioon kokonaistilavuuden ja ilmamassan jakautumisen.



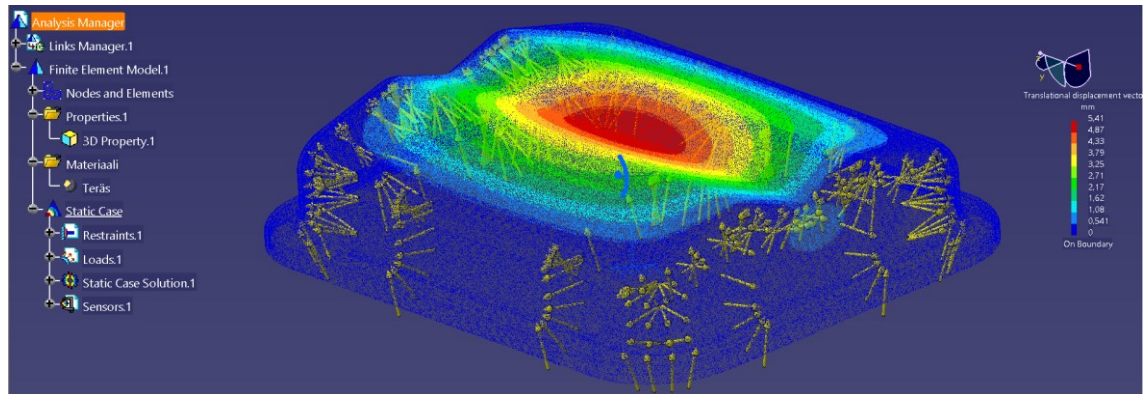
Kuva 24. Painekotelon kannen viimeisin malli.

Kannen prototyypille oli välttämätöntä suorittaa tässä vaiheessa lujuussimulointeja Catia V5:llä, jotta voitiin selvittää laskennallisia arvoja mahdolliselle deformaatiolle ylipaineen alaisena ja parantaa jäykkyyttä tuloksia analysoimalla. Normaalin mekaanisen ahtimen tuottaman ylipaineen lisäksi huomioitiin myös mahdollisuus paineen karkaamiselle sylinteristä imusarjaan vikatilanteessa.

Tehdasvalmisteisten muoviseosimusarjojen yleistyessä fyysiset imusarjan painetaukset ovat yleistyneet, ja niistä on saatu hyvää tietoa mahdollisesta maksimipaineesta imusarjan sisällä. Imusarjan sisäisen paineen ollessa 5–7 bar paine on niin suuri, että se pyrkii purkautumaan kaasuläpän välistä ja raottaamaan niiden sylintereiden imuventtiileitä, joissa pakoventtiili on samalla ajan hetkellä auki. [22.] Voimakas painepiikki voi tilanteesta riippuen olla niin voimakas, että imusarja valmistusmateriaalista riippuen halkeaa heikoimmasta kohdasta tai rakenteeseen syntyy pysyviä huomattavia muodonmuutoksia.

Suuntaa antava paineenkeston lujuusanalyysi pääplenumin kannelle suoritettiin Catia V5:llä 500 000 Pa:n paineella. Simulointimateriaaliksi valittiin teräs, koska yleisesti samalla seinämävahvuudella homogeenisen hiilikuitulaminaatin vetolujuus on jopa viisi kertaa suurempi ja sen yksi ominaisuuksista on myös terästä parempi kyky vastustaa muodonmuutosta.

Teräksisellä testimallilla, jonka seinämävahvuus oli 3 mm, saavutettiin maksimissaan rakenteen 5,41 mm:n muodonmuutos pystysuorisesti kannen keskialueella (kuva 25). Simuloinnin tuloksista tehtiin johtopäätös, että mitoittamalla komposiittituotteiden seinämävahvuudeksi 3,2 – 3,5 mm saavutetaan varmasti erinomainen paineenkesto jopa järjestelmän sisäiselle jatkuvalle 5 bar:n paineelle.



Kuva 25. Muodonmuutos ylöspäin 500 000 Pa:n paineella.

Aikaisemmin suunnitellussa pääplenumin pohjassa on koko pinta-alaltaan suuri täysin suora pinta, joka voidaan tuotteen valmistusvaiheessa huomioida kasvatamalla laminaatin seinämävahvuutta hieman osan muita alueita vahvemmaksi.

Komposiittituotteiden valmistamiseen käytetyistä lujitemateriaaleista, kudostyyppistä ja muotin muodosta johtuen valmiin tuotteen laminaatti tulee olemaan niin epähomogeeninen, että erillisen painesimulaation suorittaminen komposiittimallille Catia V5:llä ei katsottu olevan kannattavaa, sillä saadut tulokset eivät vastaisi todellisuutta ja mahdollisesti hankaloittaisivat ainevahvuuden määrittystä.

#### 7.4 Pääplenumin kannen ja pohjan tiivistys

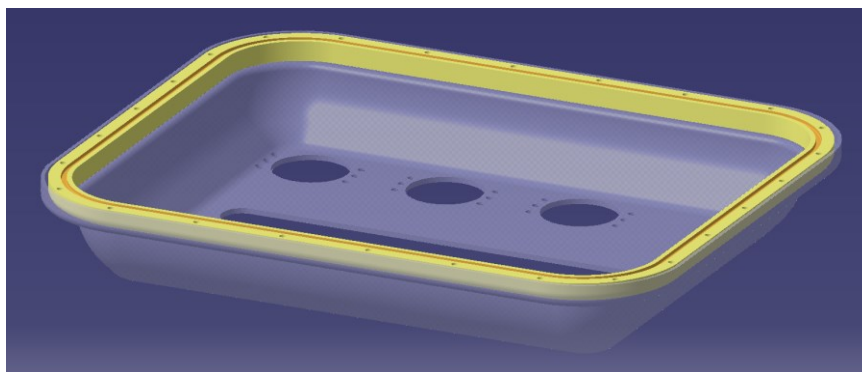
Pääplenumin pohjan ja kannen välisestä tiivistyksestä haluttiin toimintavarma ja ajan tuomaa kulutusta kestävä, mistä johtuen jo aikaisemmassa vaiheessa päätettiin, että komponentit valmistettaisiin lastuavan työstön menetelmällä ja laserleikkaamalla alumiinista. Hyvä valmistusmateriaali tässäkin käyttökohteessa on

AW-6082-alumiini, josta valmistettiin myös primääriputkien laipat. T6 AW-6082 on kaikista 6000-sarjan alumiinityypeistä lujin ja korroosiokestoltaankin erinomainen, joten sen katsottiin soveltuvan hyvin kuitukokoonpanoon integroitavaksi [23].

Pääplenumin pohjan alumiinilaipan 3D-mallinnukseen vaadittavat ulko- ja sivumitat määritettiin kotelon laippapintaan suunnitelluista mitoista. Tässä vaiheessa huomioitiin, että lopullisen komposiittituotteen todellisissa tarkoissa lopumitoissa saattaa olla pientä poikkeamaa, varsinkin kun suunniteltu 3 mm:n seinämävahvuus vaatii 200 g/m<sup>2</sup>:n twill-hiilikuitukangasta 15 kerrosta.

Laipan ja pääplenumin pohjan suorien reunojen välykseksi määritettiin tasaisesti 1 mm ja pyöristettyihin kulmiin 1,5 mm, sillä komposiittituotteille ominaista on, että neliskulmaisessa muotissa hiilikuitukudosta pakkautuu muodosta johtuen tiheämmin kulmiin, mikä kasvattaa valmiin tuotteen lopullista ainevahvuutta paikallisesti.

Kuvassa 26 pääplenumin pohjaan on 3D-mallinnettu laippa o-rengasuralla.



Kuva 26. Pääplenumin pohja laippa 3D-mallinnettuna.

Laippaliitostyyppi on staattinen ja järjestelmän sisäisen ylipaineen keskiarvo on alle 2 bar, joten sopivaksi tiivistemalliksi valikoitui o-rengastiiviste johtuen sen pitkäikäisyydestä, helposta saatavuudesta ja hyvistä tiivistysominaisuuksista suorien alumiinipintojen välillä.

Tiivisteuran mitoitus 3D-malliin tehtiin luotettavasta verkkolähteestä saadun mitoitustaulukon mukaan (kuva 27). Laippapinnan ristimittojen pitkistä etäisyyksistä johtuen pyrittiin valikoimaan tiivisteen halkaisija niin, ettei pinnan minimaalinen kierous johtaisi välittömään painevuotoon. Kuvassa olevista o-renkaan poikkileikkauksista 3,15 mm:n koko mahtui juuri sopivasti mitoitushjeen mukaisella 4,25 mm:n uraleveydellään laipan malliin niin, että suunniteltu M5-pulttijako oli toteutettavissa riittävällä seinämävahvuudella.

Pääplenumin kannen tiiviste pinta suunniteltiin ohutlevyrakenteena ilman tiivisteuraa Catia V5:llä, sillä se valmistetaan laserleikkaamalla alumiinilevystä, kun komposiittituotteet ovat valmiita ja lopulliset mitat saadaan varmistettua.

O-renkaat	Uran mitoitus							
	Dynaaminen käyttö			Staatinen käyttö				Pyörästysväli
	Uran syvyys E +0,00	Uran leveys F +0,10 -0,00		Laippatiiviste		Muu staatiset osat		
		Edestakainen F +0,10	Pyörivä F +0,10	Uran syvyys E +0,00	Uran leveys F +0,10	Uran syvyys E +0,00	Uran leveys F +0,10	
Poikkileikkaus mm Ø	0,05	0,00	-0,00	-0,05	F +0,10	-0,05	F +0,10	R
1,00 - 1,02	0,81	1,57	1,20	0,68	1,57	0,73	1,30	0,2
1,20	1,00	1,80	1,40	0,82	1,80	0,88	1,60	0,2
1,25 - 1,27	1,04	1,85	1,45	0,85	1,85	0,92	1,70	0,2
1,30	1,10	1,90	1,50	0,88	1,90	0,95	1,80	0,2
1,42	1,16	2,08	1,60	0,96	2,08	1,03	2,00	0,2
1,50 - 1,52	1,24	2,16	1,70	1,02	2,16	1,10	2,20	0,2
1,60 - 1,63	1,30	2,20	2,10	1,10	2,20	1,15	2,20	0,5
1,78	1,45	2,40	2,30	1,20	2,40	1,30	2,30	0,5
1,83	1,50	2,45	2,35	1,20	2,45	1,30	2,40	0,5
1,98 - 2,00	1,60	2,70	2,50	1,50	2,70	1,55	2,40	0,5
2,08	1,70	2,75	2,50	1,60	2,75	1,65	2,50	0,5
2,21	1,80	3,00	2,55	1,70	3,00	1,75	2,70	0,5
2,40	2,10	3,25	2,70	1,90	3,25	2,00	2,90	0,5
2,46	2,15	3,30	2,75	1,95	3,30	2,00	3,00	0,5
2,50	2,20	3,40	2,80	2,00	3,40	2,05	3,10	0,5
2,62	2,30	3,60	2,90	2,10	3,60	2,20	3,20	0,5
2,75	2,45	3,70	3,10	2,20	3,70	2,30	3,40	0,5
2,95 - 3,00	2,65	4,05	3,35	2,40	4,05	2,50	3,70	0,5
3,15	2,85	4,25	3,50	2,50	4,25	2,60	3,90	0,5
3,50 - 3,53	3,10	4,80	3,90	2,80	4,80	2,90	4,30	1,0
4,00	3,55	5,50	4,35	3,30	5,50	3,50	4,60	1,0
4,50	4,00	6,20	4,90	3,70	6,20	3,90	5,20	1,0
5,00	4,40	6,80	5,50	4,10	6,80	4,30	5,70	1,0
5,33	4,80	7,20	5,80	4,40	7,20	4,60	6,10	1,0
5,50	4,95	7,50	6,30	4,55	7,50	4,70	6,30	1,0
5,70	5,15	7,80	6,35	4,70	7,80	4,80	6,50	1,0
6,00	5,40	8,20	6,70	4,95	8,20	5,20	6,90	1,0
6,30 - 6,35	5,55	8,60	7,00	5,20	8,60	5,30	7,10	1,0
7,00	6,10	9,50	7,80	5,80	9,50	5,90	8,00	1,5
8,00	7,20	10,80	8,90	6,70	10,80	6,80	9,30	1,5
8,40	7,55	11,40	9,40	7,00	11,40	7,20	9,60	1,5
10,00	9,00	13,70	11,20	8,30	13,70	8,50	11,40	1,5
12,00	10,40	16,40	13,40	10,00	16,40	10,20	13,70	1,5

Kuva 27. Tiivisteuran mitoitustaulukko o-renkaille [24].

## 7.5 Tuloplenumin suunnittelu

Dual plenum -imusarjassa tuloplenumin tehtävänä on jakaa pääplenumiin saapuva tuloilma tasaisesti koko sylinteriryhmien pituudelle. Kuitenkaan pelkkä imusarjatyypin toteuttaminen ei anna takeita siitä, että sylinterien välinen täytösaste saadaan tasaiseksi helposti vaan päinvastoin virtauksen kulun ennakointi voi jopa hankaloitua entisestään verrattuna yksiplenumiseen imusarjaan.

Tässä käyttökohteessa ilman jakautuvuus haluttiin maksimoida törmäyttämällä sisään virtaava tuloilma pääplenumin kattoon suurella virtausnopeudella. Tämä ei ole virtausteknisesti ideaalinen tapa johtaa ilmaa sylintereihin, sillä tilanteessa, jossa fluidi törmää virtaussuunnasta poikkeavaan suoraan pintaan, menettää se merkittävän määrän virtausnopeutta ja hyödynnettävissä olevaa yhdensuuntaista liike-energiaa. Kyseinen toteutustapa ei kuitenkaan kurista maksimivirtausta millään tavalla vaan ainoastaan rikkoo putkivirtauksen tasaiseksi paineeksi pääplenumin sisällä.

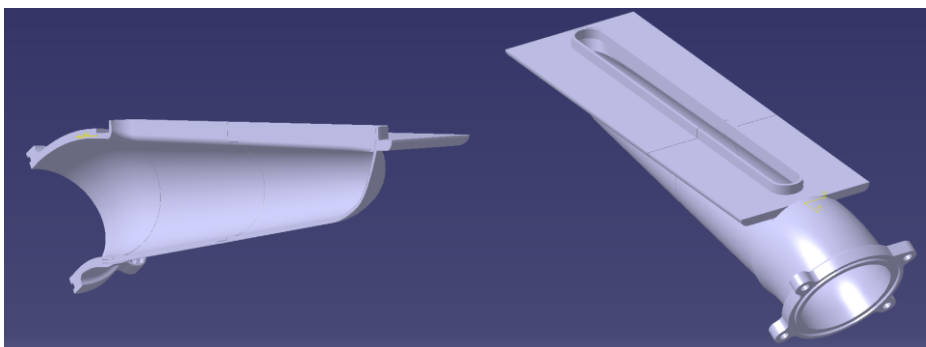
Suunnittelutyöhön ryhdyttäessä tuloplenumin alkuarvot määräytyvät pitkälti käytetyn kaasuläpän halkaisijan ja pääplenumin pituuden mukaan, sillä kaasuläpän koko määrää alkumitan ja halkaisijaa supistetaan pienemmäksi virtaussuuntaisesti kohti tuloplenumin loppupäätä (kuva 28).



Kuva 28. Skoda Octavia 1999:n WRC-imusarjan tuloplenumin halkaisijan supistuminen loppua kohden [25].

Primääriputkista tullaan mekaaniset läppärungot poistamaan ja korvaamaan yhdellä ennen imusarjaa sijoitettavalla Cadillac CTS-V 2016:n LT4-moottorin 87 mm:n DWB-kaasuläppärungolla. Käytetyn kaasuläpän virtauspoikkipinta-ala on  $59,4 \text{ cm}^2$ , joka valittiin ehdottomaksi sisäänmenoaukon minimiarvoksi siksi, ettei aiheuteta kohtuutonta virtauskuristusta juuri ennen pääplenumia. Sisäänmenoaukon korkeudeksi määrittämällä 25 mm koko pituudelta saavutettiin noin  $85 \text{ cm}^2$ :n virtauspoikkipinta-ala, joka ei mitoituksen perusteella varmasti kurista virtausta mutta edesauttaa silti virtauksen jakautuvuutta imusarjan pituussuunnasta.

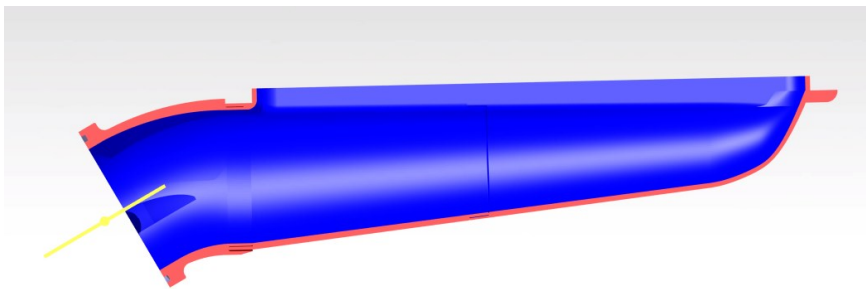
Tuloplenumin tilavuuden kutistaminen virtauksen etenemissuunnasta toteutettiin pienentämällä putkivirtauksen halkaisijaa lineaarisesti 87 mm alkuhalkaisijasta 40 mm:n halkaisijaan, jotta aivan loppupäähän jäi varaa toteuttaa virtausta tasaisesti ylöspäin ohjaava pyöritys (kuva 29). Putken halkaisijaa kutistamalla saadaan tasattua ilmamassan jakautumista sisäänmenoaukolla, sillä ilman inertiaa johtuen pakkautuisi se muuten virtausputkea seuraten loppuosaan, jolloin pääplenumin toiseen päähän päätyisi herkästi enemmän ilmaa muista suunnitelmista riippumatta.



Kuva 29. 3D-malli tuloplenumista LT4:n kaasuläppärungolle.

Virtauksen jakautuvuutta pituussuunnassa pyrittiin parantamaan lisäksi kaasuläpän asennuskulman optimoinnilla. LT4-moottorin kaasuläppä aukeaa edestäpäin katsottuna yläreuna eteenpäin, joten läpän akselin alapuolinen ilma kulkee vapaammin osakaasualueilla kaasuläpän asennuskulman mukaisesti kohti pääplenumia.

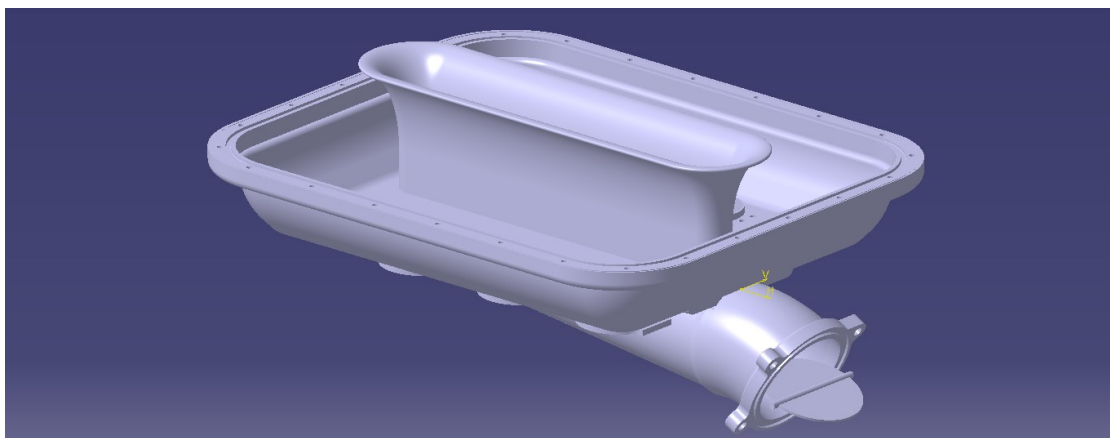
Kuvassa 30 poikkileikkaus tuloplenumista, jonka kaasuläppä on täysin auki.



Kuva 30. Tuloplenumin 3D-mallin poikkileikkaus.

Ilmavirran tulosuunta pääplenumin sisään on päinvastainen primääriputkien imusuuntaan nähden, joten katsottiin tärkeäksi reitittää tuloilma tulevien imutorvien yläpuolelle. Vastakkaiset virtaussuunnat kohdatessaan pyrkisivät kumoamaan toisensa, josta aiheutuisi voimakas imusuunnan vastainen turbulenttinen efekti, joka pyrkisi jopa kehittämään alipaineen imun vastaiseen suuntaan.

Ongelma ratkaistiin 3D-mallintamalla sisääntuloaukkoon virtauskanava pyöriste-tyillä jättöpäillä, joita pitkin tuloilma virtaa pääplenumin imutorvien yläpuolelta, eikä virtaus näin ollen pääse vapaasti seuraamaan imutorvien ulkopintaa (kuva 31).

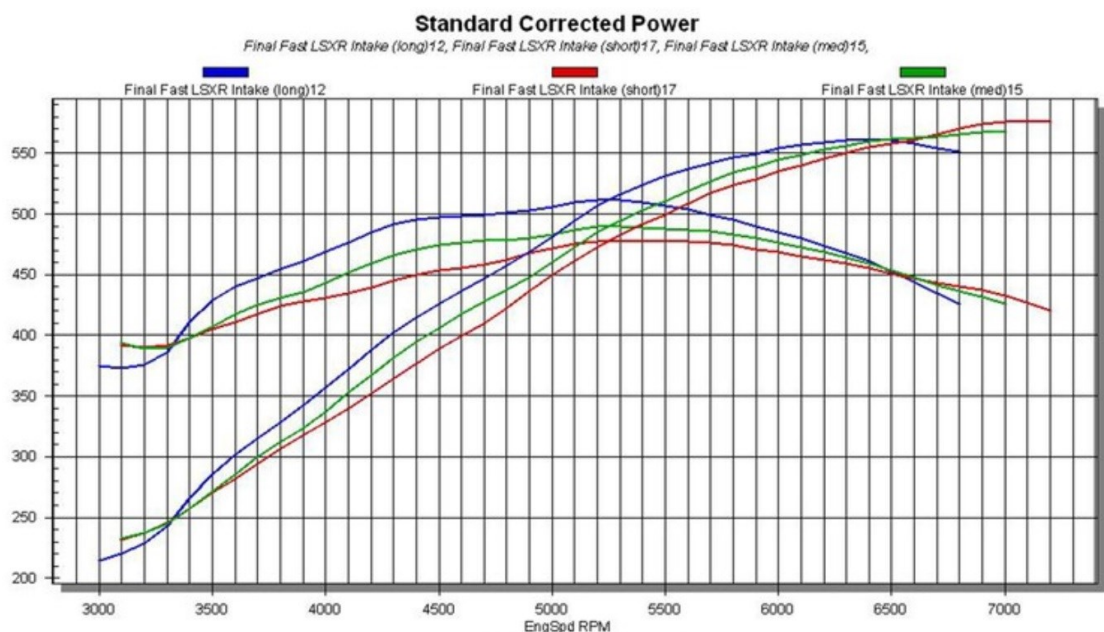


Kuva 31. Virtauskanava 3D-mallinnettuna.

## 7.6 Imutorvien suunnittelu

Kokoonpanotyyppisissä imusarjoissa on yleistä, että primääriputket virtaussuunnassa on jaettu kahteen osaan. Sylinterikannen imukanavan tasolle kiinnitettävään primääriputkiin ja sisäänmenoputkiin, jotka kiinnitetään primääriputkien jatkoksi. Sisäänmenoputkia, joita pitkin ilma virtaa primääriputkien sisään, kutsutaan yleisesti imusuppiloiksi tai imutorviksi johtuen torvimaisesta pyöristetystä putkiprofiilin muodosta. Koottavilla primääriputkilla imusarjan kokonaispituus on helposti säädettävissä juuri haluttuun mittaan imutorven geometriaa muuttamalla [26].

Imusarjan kokonaispituuden säätömahdollisuus kilpa-autossa on hyödyllinen muutos, sillä mittojen muuttamisella voidaan vaikuttaa oleellisesti moottorin vääntökäyrään ja käyttöalueeseen. Lyhyellä imusarjan kokonaispituudella virtauksen sisäiset kitkavastukset ovat pienemmät, jolloin saavutetaan virtaviivaisempi ja tehokkaampi kokonaisvirtaus. Moottorin korkeilla pyörimisnopeuksilla virtausnopeus ja ilmamäärä imusarjassa on suurimmillaan, jolloin virtausvastukselliset erot korostuvat. Tähän perustuen lyhyemmällä imusarjalla saavutetaan enemmän maksimitehoa, joka tulee ulos korkeilla moottorin pyörintänopeuksilla (kuva 32).



Kuva 32. Chevrolet LS3:n moottoridynamometritulokset eripituisilla imutorvilla [26].

## 7.7 Imutorvien pituus ja pulssiahtaminen

Sylinterin täyttöastetta voidaan myös kasvattaa huomattavasti hyödyntämällä moottorin käyntiprosessista aiheutuvia ilmiöitä dynaamiseen imuvirtaukseen. Vapaasti hengittävän ottomoottorin imuvirtaus kokonaisuudessaan on tiheä sarja imutahdeista aiheutuneita alipainepulsseja, jotka virtaavat kohti moottorin sylinteriä. Moottorin varustaminen mekaanisella pakokaasu- tai keskipakoahtimella suodattaa pulssien terävyyttä imujärjestelmässä ja mahdollistaa kierrosnopeuden mukaan lineaarisesti kasvavan ylipaineistamisen.

Imuventtiilin sulkeutuessa imutahdin päättyessä on ilman sisään virtausnopeus sylinteriin edelleen suuri, tyypillisesti yli äänennopeuden. Virtauksen törmätessä imuventtiilin seetipuolelle syntyy paikallisesti ilman inertiasta ja massasta johtuen paineen äkillinen nousu, joka vapautuu imuvirtauksen vastaiseen suuntaan kohti plenumia. Jäännöspulssi päästyään plenumiin heijastuu kuitenkin takaisin kohti sylinteriä johtuen plenumissa vallitsevasta voimakkaammasta kokonaispaineesta.

Imuvirtauksen tehokkuutta voidaan parantaa, kun jäännösaallon värähtelytaajuus synkronoidaan sopivaksi sylinterin ja imujärjestelmän ominaisvärähtelytaajuuden kanssa, jolloin jäännöspulssin suunnanmuutos takaisin kohti sylinteriä on mahdollista kohdistaa seuraavalle imutahdille siten, että venttiilin auetessa jäännösaalto virtaa sylinteriin tietyllä moottorin pyörintänopeudella.

Jäännöspulsseja syntyy imutahtien välissä useita, joista käyttökelpoinen hyöty saavutetaan käytännössä ainoastaan toisesta, kolmannesta ja neljännestä. Korkealle kiertävissä kilpamoottoreissa hyödynnetään eniten toista ja kolmatta jäännöspulssia. Neljäs pulssi näihin verrattuna on heikompi ja lyhytkestoisempi sekä vaatii todella lyhyen etäisyyden venttiilin ja plenumin välille. Parhaimmillaan vapaasti hengittävän kilpamoottorin volymetrinen hyötysuhde voidaan kasvattaa 100 prosentista jopa 130 prosenttiin käyttämällä toista ja kolmatta jäännöspulssia [3, s. 2.].

Moottorin käyttötarkoitus ja moottoritilan ahtaus määrittävätkin pääasiallisesti imusarjan primääriputkien kokonaispituuden ja pulssiahtamisen mahdollistamisen. Kriteerinä pulssiahtamisessa on myös sylinterikohtaiset primääriputket, jotka ovat keskenään saman mittaisia. Virtausesteet primääriputkissa kuten esimerkiksi kaasuläppärungot voivat heikentää jäännöspulssin voimakkuutta, joka vaikuttaa saavutettuun lopulliseen hyötyyn.

Resonanssipulssien hyödyntämiseen imutahdilla on olemassa useita hieman toisistaan poikkeavia kaavoja. Näistä yleisimmin käytettyjä ovat Hermann von Helmholtzin mukaan nimetty akustisen värähtelyn kaava vuodelta 1863 ja 1960-luvulta peräisin oleva Chryslerin Ramcharger-kaava

Chrysler Ramcharger-kaavasta voidaan määrittää pulssiahtamiseen optimaalinen kokonaispituus imuventtiililtä plenumille [2, s. 59]:

$$N \times L = 84\,000 \quad (4)$$

jossa

$N$  = haluttu pyörintänopeus RPM

$L$  = pituus venttiililtä plenumille tuumina

84 000 = matemaattinen vakio pituuden määrittämiseen.

Kohdemoottorin maksimipyörimisnopeus tullaan rajoittamaan välille 8000–8200 RPM, ja käyttöalue rata-ajossa on enimmäkseen välillä 3000–7600 RPM.

Chrysler laskukaavaa käyttämällä haluttiin ensimmäiseksi selvittää optimietäisyys venttiilin ja imutorven pään välille 7400 RPM:n kohdalla.

$$\frac{84\,000}{7400 \text{ RPM}} = 11,351" = 288,32 \text{ mm}$$

Kohdemoottorissa imuventtiilin ja primääriputken imupään välinen etäisyys on 270 mm, joten kyseiselle pyörintänopeudelle imutorvea ei voida toteuttaa.

Pääplenumin pohjan ja kannen välinen matalin korkeussuuntainen etäisyys tulee olemaan noin 140 mm, joka mahdollistaa helposti noin 100 mm pitkien imutorvien käyttämisen. Tavoitteena on selvittää pulssiahtamisen kannalta optimipituuksia imutorville ja valmistaa niitä useampi täydellinen sarja. Näin ainoastaan imutorvia pääplenumin sisään vaihtamalla voidaan moottorin vääntökäyrään tehdä huomattavia muutoksia.

Matalammilla moottorin pyörintänopeuksilla Chrysler-kaavalla saadaan pidempi etäisyys venttiilin ja imutorven pään välille, joten pulssiahtamiseen käytettyä moottorin pyörintänopeutta päätettiin laskea 1000 RPM:n välein 5400 RPM:ään asti.

$$\frac{84\,000}{6400\,RPM} = 13,125'' = 333,38\,mm$$

$$\frac{84\,000}{5400\,RPM} = 15,555'' = 395,11\,mm$$

6400 RPM:n pyörimisnopeudella kokonaispituudeksi saatiin 333,38 mm, jolloin imutorvet jäisivät 59,88 mm pitkiksi, ja 5400 RPM:n kierrosnopeudella 121,61 mm pitkiksi, kun vähennetään kokonaispituudesta 270 mm pitkät primääriputket ja pääplenumin pohjan 3,5 mm:n seinämävahvuus.

Noin 60 mm:n pituiset imutorvet ovat helposti toteutettavissa ja mahtuvat myös pääplenumin sisään erinomaisesti ilman korkeussuuntaisia tilaongelmia. Jälkimmäinen reilumman pituinen imutorvi menisi pääplenumin sisäänmenotorven yläpuolelle ja niin lähelle pääplenumin kantta, että se rajoittaisi virtausta.

$$\frac{84\,000}{6000\,RPM} = 15,555'' = 355,56\,mm$$

Tasan 6000 RPM:n kierroksilla imutorven pituudeksi saataisiin 82,06 mm, joka olisi myös erinomaisesti toteutettavissa oleva imutorven pituus. Tässä vaiheessa alettiin selvittämään muita kaavoja, joista selviäisi paremmin käytetty pulssi ja voitaisiin verrata saatuja kokonaispituuksia keskenään.

Imutorvien muodon suorituskyvyn vertailuun aikaisemmin opintojen aikana käytetyn Superflow SF-1020 -virtauspenkin käyttömanuaali sisältää Chryslerin Ramchargerin tapaisen kaavan (kuva 33), joka puolestaan antaa mahdollisuuden valikoida käytettävän jäännöspulssin omaan käyttökohteeseen sopivaksi [27, s. 98].

**Table 7-9. Inlet Pulsation Chart**

Harmonic	Length (inches)	(cm)	Lower rpm	Upper rpm	Pulse Strength*
2nd	132,000/rpm	335,000/rpm	89%	108%	±10%
3rd	97,000/rpm	246,000/rpm	91%	104%	± 7%
4th	74,000/rpm	188,000/rpm	93%	104%	± 4%

\* Pulse strength varies with inlet flow and inlet valve opening.

Kuva 33. Imusarjan pituuden mitoituskaava SF-1020 käyttömanuaalista [27, s. 98].

$$L = \frac{k}{N} \quad (5)$$

jossa

L = etäisyys imuventtiililtä plenumille senttimetreinä

k = pulssikohtainen vakio pituuden laskemiseen

N = moottorin pyörintänopeus

Tämän kaavan aloitusarvoksi valittiin sama 7400 RPM kuin aikaisemmalla Chryslerin Ramcharger-kaavallakin, jolloin imuventtiilin ja plenumin väliseksi etäisyydeksi eri pulsseilla saatiin seuraavat mitat:

$$\text{Toinen pulssi, } \frac{335000}{7400 \text{ RPM}} = 45,26 \text{ cm} = 452,6 \text{ mm}$$

$$\text{Kolmas pulssi, } \frac{246000}{7400 \text{ RPM}} = 33,24 \text{ cm} = 332,4 \text{ mm}$$

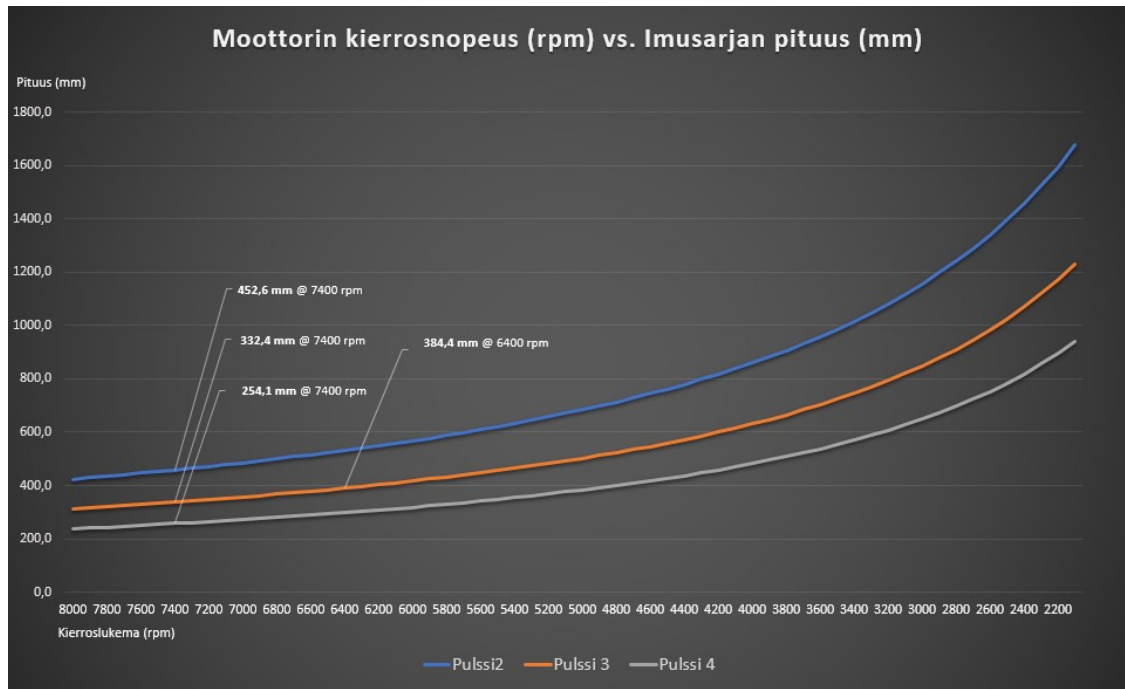
$$\text{Neljäs pulssi, } \frac{188000}{7400 \text{ RPM}} = 25,40 \text{ cm} = 254,0 \text{ mm}$$

Toisen pulssin kaavasta saatu kokonaispituus olisi niin pitkä, ettei imutorvi mahdusi pääplenumin sisään, ja neljännen pulssin tapauksessa jo pelkästään primääriputket ilman imutorvia ovat liian pitkät. Kolmannen pulssin kokonaispituus 7400 RPM:n pyörintänopeudella on 332,4 mm, joka on erittäin lähellä Chrysler-kaavasta 6400 RPM:n pyörintänopeudella saatua 333,38 mm:n pituutta.

Erikoisena pidettiin, että 1000 RPM:n erotuksella kaavoista saatiin lähes identtinen kokonaisuus venttiilin ja plenumin välille. 6400 RPM:n pyörintänopeudella Superflow'n pulssivakioita käyttämällä lähin kokonaispituus saavutettiin neljännellä pulssilla (293,8 mm).

Imutorven keskiarvoinen pituus Chryslerin 6400 RPM:n ja Superflow'n 7400 RPM:n välillä oli 59,39 mm, joka huomioitiin määrittäessä ensimmäisen imutorvisarjan pituutta. Superflow'n mitoituskaavasta tehtiin kolmea eri pulssivakioita käyttäen myös kuvaaja, jotta loppujen imutorvien pituuden määrittäminen helpottuisi visuaalisen tulkinnan perusteella (kuva 34). Etäisyys mitattuna imuventtiililtä suunnitellun imusarjakokoonpanon kannen matalimpaan kohtaan on noin 430 mm, joka määrittää selkeän raja-arvon imutorven maksimietäisyydelle imuventtiilistä.

Pääplenumin kannen sisäpinta ei ole kohtisuorassa imutorvien sisäänmenoaukkoon nähden vaan nousee viistosti ylöspäin kohti pituussuuntaista keskilinjaa. Tämä huomioidaan pidempiä imutorvia suunnitellessa, sillä pääplenumin sisäänmentuloaukon suunnasta imutorvet saavat paremmin ilmaa.



Kuva 34. Pystyakselilla venttiilin etäisyys imutorvesta, vaaka-akselilla moottorin pyörintänopeus.

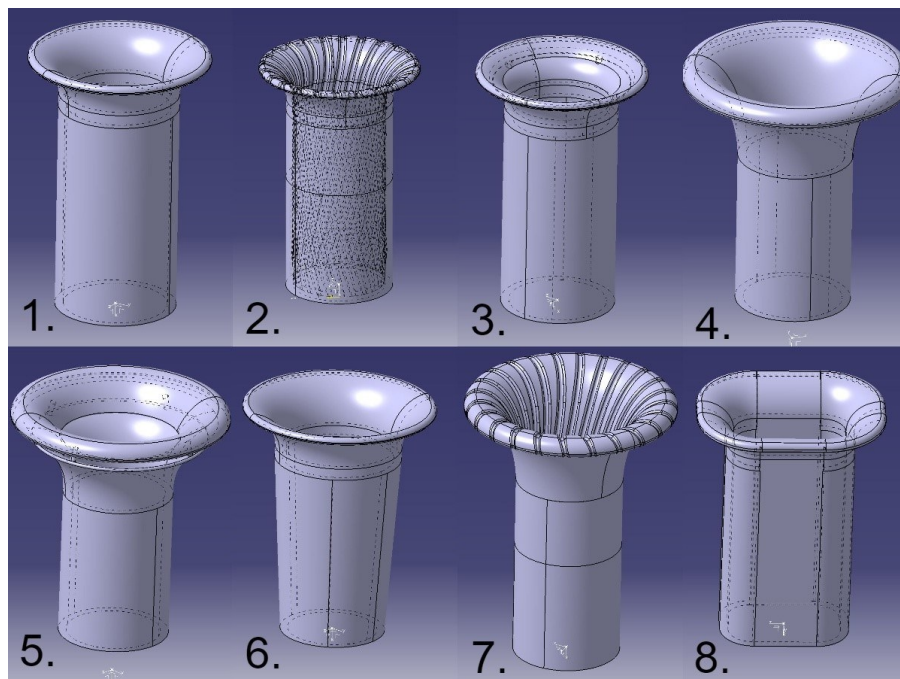
Kuvaajan sinisestä käyrästä on tulkittavissa, ettei tällä imusarjakokoonpanolla toista pulssia voida hyödyntää, sillä kokonaisetäisyys imuventtiililtä imutorven päähän olisi moottorin maksimi pyörintänopeudella (8000 RPM) yli 400 mm, jolloin imutorvi osuisi pääplenumin kanteen. Neljättä pulssia voitaisiin hyödyntää alemmilla kierroksilla, mutta koska pulssiahtamisen suurin hyöty saadaan suurella moottorin pyörintänopeudella ja neljännen pulssin voimakkuus on muita heikompi, päätettiin sen hyödyntäminen tässä käyttökohteessa sivuuttaa.

Superflow-kaavan kolmatta jäännöspulssia hyödyntämällä imutorvia voidaan valmistaa inhimillisillä mitoilla useampia sarjoja eri kierrosalueille, samalla hyödyntäen voimakkainta käyttökelpoista pulssia. Ensimmäinen sarja päätettiin valmistaa 60 mm:n mittaisena ja toinen 110 mm:n mittaisena. Lyhyemmällä imusarjan kokonaispituudella sisäiset virtausvastukset ovat pienempiä, jolloin saavutetaan hieman enemmän maksimitehoa moottorin korkeilla pyörintänopeuksilla. Pidemmällä imutorvisarjalla saavutetaan parempi vääntö moottorin matalilla pyörintänopeuksilla, mutta maksimitehossa hävitään hieman korkeilla pyörintänopeuksilla.

Imusarjan primääriputkien pituuden ja virtauspoikkipinta-alan lisäksi ilman vaihdon tehokkuuteen vaikuttava tekijä on myös imutorvien muotoilu. Tähän aiheeseen perehdyttiin jo opintojen aikaisemmassa vaiheessa innovaatioprojektissa, jossa 3D-tulostettiin laaja skaala erimallisia ja -pituisia imutorvia sekä Kinsler-tyylisiä primääriputkia pienillä muutoksilla.

Valmistettujen komponenttien virtausominaisuuksia vertailtiin keskenään Superflow SF-1020 -virtausmittauspenkissä asennettuna tämän insinööriyön kohde-moottorin sylinterikanteen keräten luotettavaa tässä opinnäytetyössä hyödynnettävää dataa. Imusarjoissa, joissa imutorvia ei ole integroitu kiinteäksi osaksi primääriputkia, on mahdollista parantaa kokonaisvirtausta sylinteriin muotoilemalla imutorvet virtausteknisesti laminaarista putkivirtausta ylläpitäviksi.

Innovaatioprojektissa valmistettiin erimallisia primääriputkia, joista kaksi oli jäljitelmiä Kinslerin tuotteesta 50 mm:n sisähalkaisijalla ja kasvatetulla 60 mm:n halkaisijalla. Pyöreitä imutorvia näihin valmistettiin useita kappaleita erimallisilla profiileilla. Lisäksi valmistettiin suorakulmaisena alusta loppuun pysyvä imusarja, joka vastasi sisätilavuudeltaan 60 mm:n imusarjaa (kuva 35).



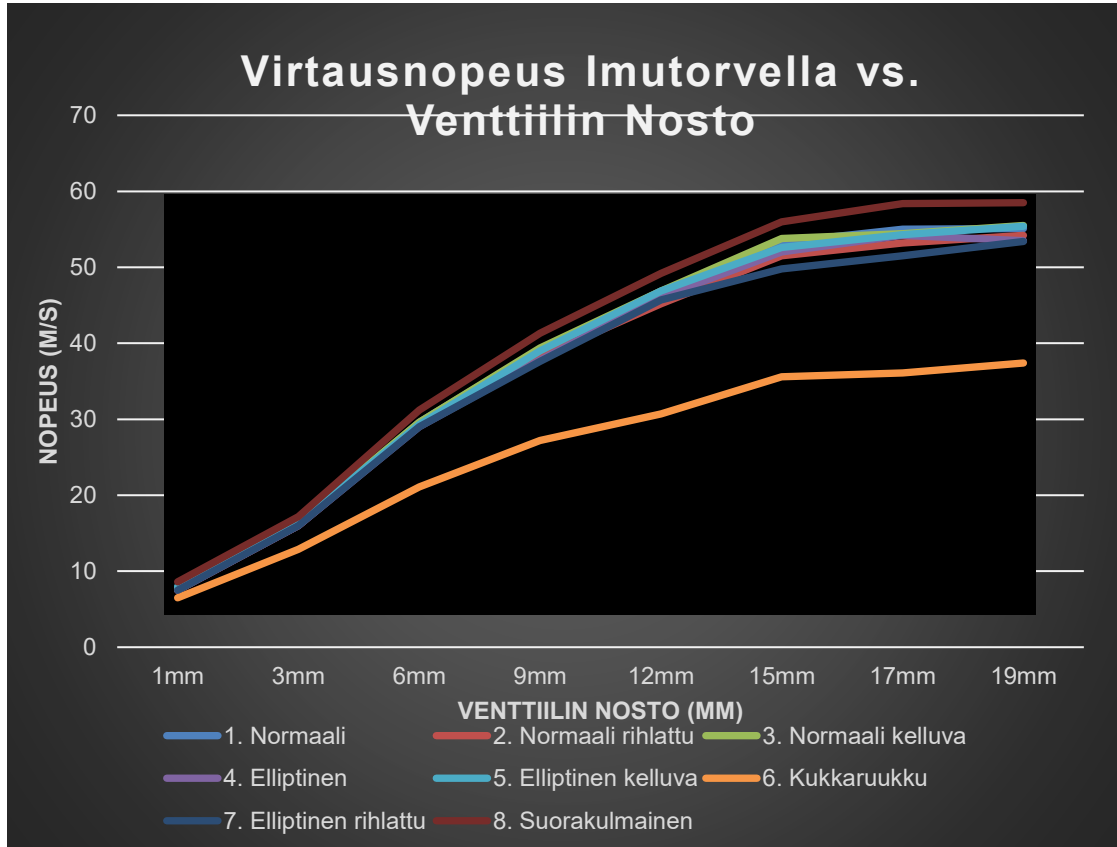
Kuva 35. Eri malliset imutorvet 60 mm halkaisijalla ja yksi suorakulmainen.

Virtauskäytökseen pyrittiin vaikuttamaan mallintamalla mm. kahteen torveen rihlaukset (mallit 2 ja 7), muuttamalla imutorven kaulus kelluvaksi (mallit 3 ja 5) ja pienentämällä putken halkaisijaa virtaussuunnassa (malli 6).

Suuremmalla kauluksella olevissa imutorvissa käytettiin elliptistä muotoilua (mallit 4, 5 ja 7), jonka luotettiin usean eri testiin ja simuloiteihin perustuvan lähteen perusteella olevan paras ominaismuoto imutorvelle.

Virtausmittaukset suoritettiin Superflow SF-1020 -virtausmittauspenkissä 28 vesituuman imupaineella, joka muodostui autoteknisten virtausmittausten standardiksi 1960-luvulla, kun yhdysvaltalainen moottorivirittäjä Smokey Yunick totesi omavalmisteisella laitteistollaan, että kyseisellä testipaineella sylintereiden väliset paine-erot yksiplenumisella kaasutininusarjalla ovat riittävän pienet [28, s. 2].

Virtausmittauksissa käytetyllä laitteistolla mitattiin tilavuusvirtaa ja virtausnopeutta virtauspenkkiin kuuluvalla pitot-putkella paikallisista sijainneista.



Kuva 36. Virtausnopeuksia mitattuna pitot-putkella imutorven sisäänmenolta.

Virtauksen muodostumisessa ja paikallisessa virtausnopeudessa imutorven sisäänmenolla oli havaittavissa venttiilin maksimi nostolla huomattavia eroja muutamien testimallin välillä, mikä johtui putkien muoto- ja tilavuuseroista (kuva 36). Putkivirtauksessa yleisesti tehokkain muoto fluidin kuljettamiseen on pyöreä putki, jonka virtauskeskipisteessä virtausnopeus on suurin ja hidastuu reunoja kohti.

Ottomoottorin sylinterikannen imukanava on kuitenkin harvoin täysin pyöreä ja usein primääriputken poikkileikkausprofiili muuttaa muotoa sylinterikannesta ulospäin. Vaikka muodonmuutos toteutetaan mahdollisimman sulavaksi, virtauksen virtaviivaisuus häiriintyy poikkileikkausprofiilin muuttuessa virtaussuunnassa. Jos virtausputken profiili muuttuu liian äkillisesti, seuraa siitä turbulentsuutta virtaukseen, mistä aiheutuu paikallisia painehäviöitä ja virtausnopeuden heikentymistä.

Ideaalista olisi siis muuttaa virtausprofiilin muotoa mahdollisimman sulavasti pitkällä matkalla tai pitää primääriputket imutorven päähän asti samanmuotoisina kuin imukanava, kuitenkin kasvattaen halkaisijaa siten, ettei primääriputken liian pieni sisätilavuus kurista virtausta.

Koko matkalta pyöreiden ja halkaisijaltaan 60 mm imutorvien väliset erot virtausnopeudessa olivat pieniä ja tulokset 19 mm:n nostolla sijoittuivat välille 53,4–55,5 m/s. Elliptisellä profiililla (malli 4) ei saavutettu parempaa virtausnopeutta verrattuna pienempään normaali imutorveen (malli 1) koko imusarjan matkalla. Elliptisen profiilin ja samalla rihlauksen omaava imutorvi suoriutui näistä kaikista huonoiten johtuen siitä, että elliptinen muoto piti virtauksen hyvin imutorven pinnassa, jolloin virtaussuunnan vastaiset urat aiheuttivat primääriputken sisään vahvaa pyörteilyä. Suurin paikallinen virtausnopeus (58,5 m/s) imutorven sisäänmenolla saavutettiin suorakulmaisella imusarjalla, joka piti saman poikkileikkausprofiilin muodon sylinterikanneilta imutorven päähän asti.

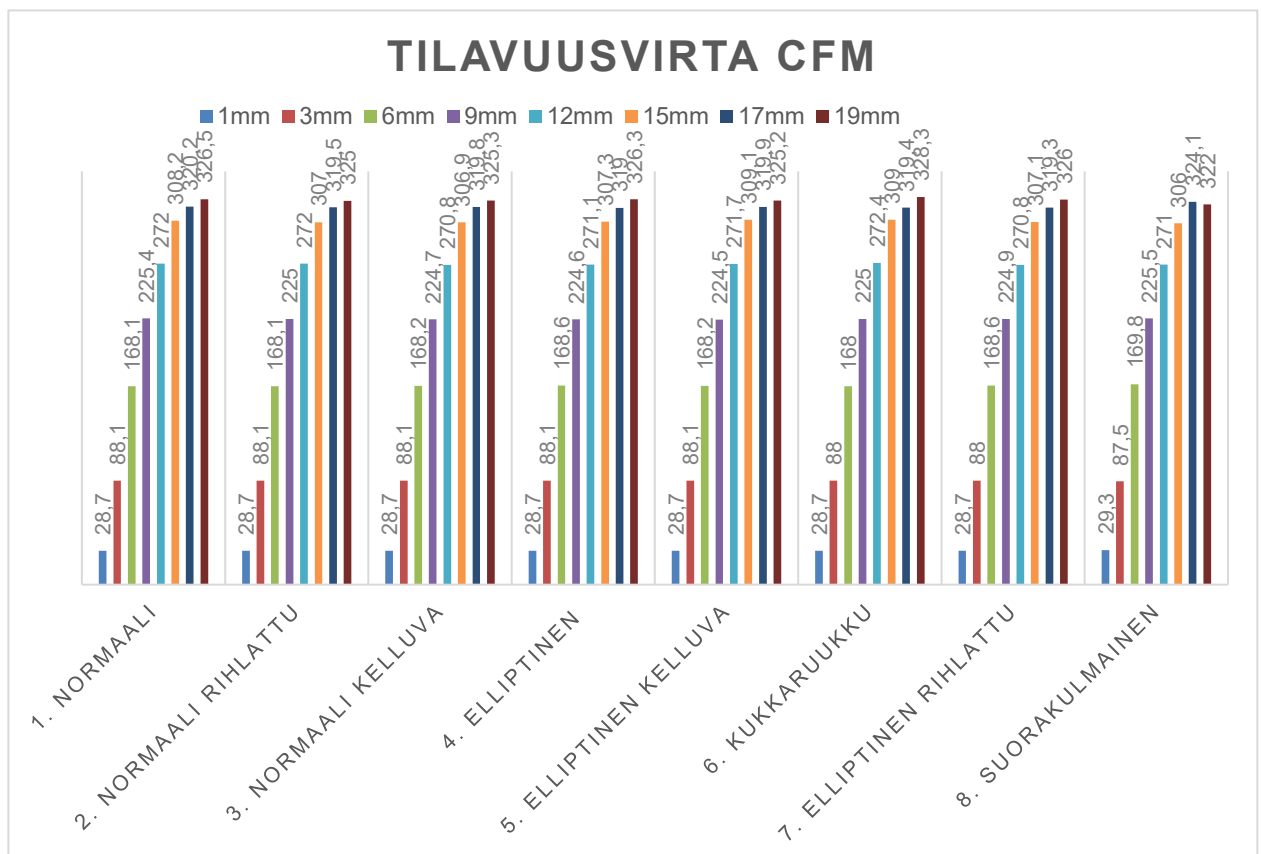
Suurimman määrän ilmaa sylinteriin 28 vesituuman testipaineella sulloi kukkaruukuksi nimetty imutorvi, (malli 6) 328,3 CFM 19 mm:n venttiilinnostolla. Virtausnopeus kukkaruukun sisällä oli kuitenkin keskimääräisesti hitain imusarjan

kokonaispituudelta, joten imutahdilla kiertoprosessin aikana ei todellisuudessa saataisi yhtä tehokasta sylinterin täytösastetta kuin muilla malleilla.

Suorakulmainen imusarja alkoi kärsiä tilavuusvirtauksen huomattavasta heikkenemisestä 17 mm:n venttiilinnoston jälkeen, ja 19 mm:n nostolla tilavuusvirta oli enää 322 CFM muiden mallien virratessa yli 325 CFM. Vaikutti siltä, että viimeisessä mittauspisteessä virtausnopeus oli niin suuri, että imutorven neliskulmainen muoto alkoi sekoittaa kokonaisvirtausta, mikä laski virtausnopeutta.

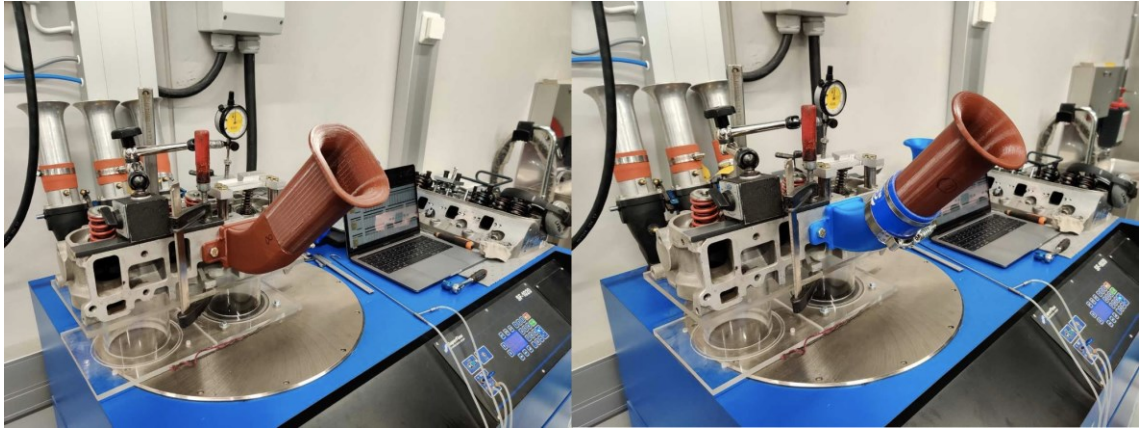
Erot pelkästään normaalin (malli 1) ja elliptisen (malli 4) imutorven välillä 60 mm:n primääriputkilla olivat niin pieniä, että saavutettava hyöty vapaasti hengittävässä moottorissa olisi lähes olematon. 60 mm:n pyöreällä ja suorakulmaisella primääriputkella sylinterikansi hengitti niin hyvin läpi, että suuren sisätilavuuden epäiltiin hävittävän imutorvilla saavutettavia eroja.

Kuvassa 37 tilavuusvirran mittaustuloksia ensimmäisistä mittauksista.



Kuva 37. Pyöreiden ja suorakulmisen 60 mm:n imusarjan tilavuusvirrat.

Kuva 36 sisältää kaksi virtauspenkillä testattua mallia. Vasemmalla suorakulmainen sylinterikannen imukanavan muotoinen imusarja (malli 8) ja oikealla 60 mm primääriputki imutorvella (malli 3).

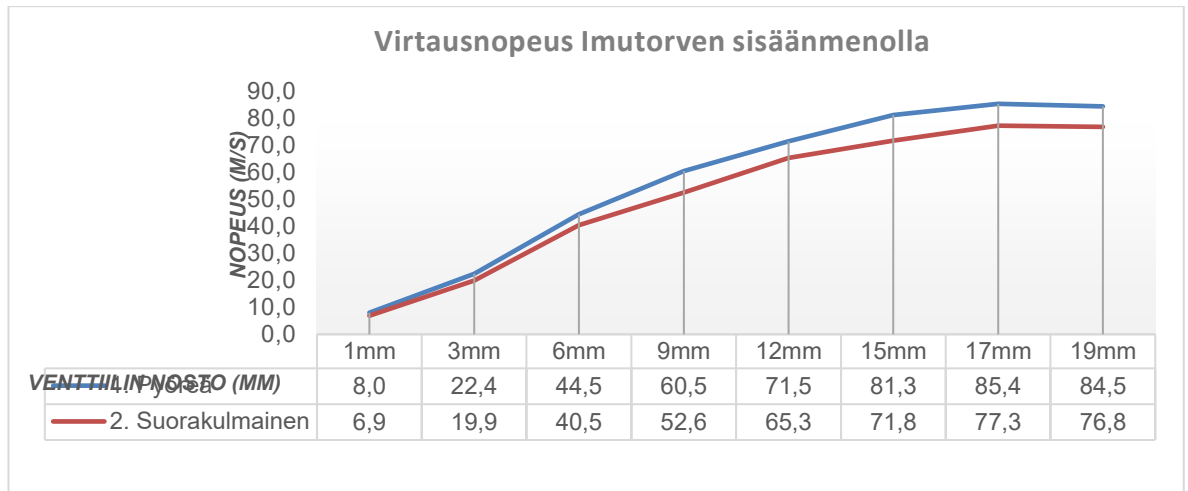


Kuva 38. 3D-tulostettuja imusarjoja virtausmittauksessa.

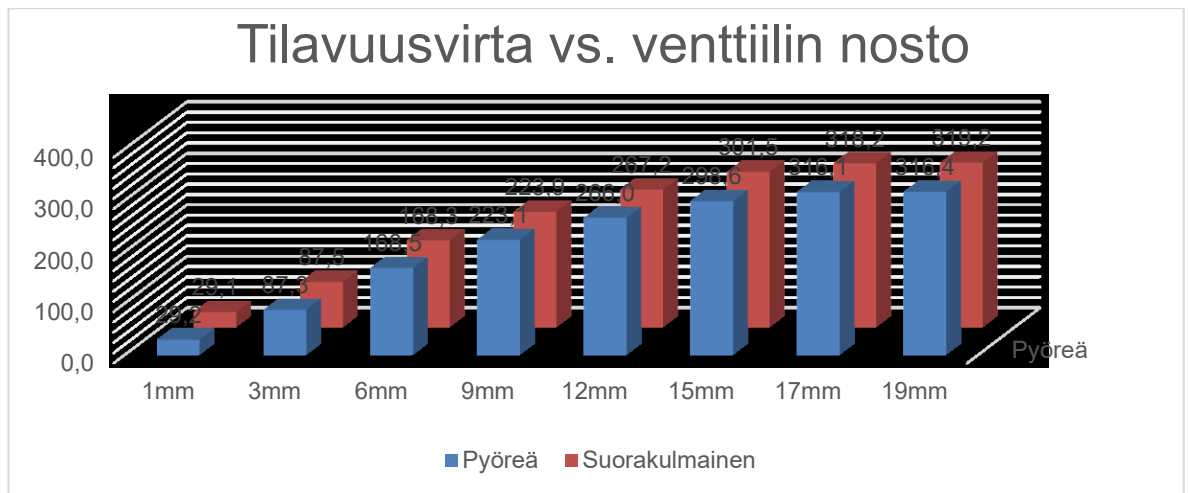
Virtausnopeuden kehittymistä pienemmällä sisätilavuudella haluttiin tutkia lisää, joten seuraavia mittauksia varten valmistettiin primääriputki 50 mm:n halkaisijalla, joka oli lähempänä Kinslerin 53 mm:n mitoitusta.

Virtausmittaukset uudella 50 mm primääriputkella suoritettiin samoin menetelmin, käyttäen pyöreää ja suorakulmaista imutorvea, jotka mallinnettiin molemmat identtisellä elliptisellä profiililla. Mittaustuloksista havaittiin, että virtausnopeus pyöreällä elliptisellä imutorvella oli jo 9 mm:n nostolla 60,5 m/s tilavuusvirran ollessa 223,1 CFM (kuvat 39 ja 40). Suorakulmaisella imutorvella virtausnopeus oli samalla venttiilin nostolla 52,6 m/s ja tilavuusvirta 223,9 CFM. Alhaisella venttiilin nostolla saavutettiin 15 % suurempi virtausnopeus pyöreän imutorven sisäänmenolla, tilavuusvirran ollessa molemmilla lähes identtinen.

Suorakulmainen imutorvi 50 mm:n primääriputkeen muutti matkalla poikkivirtausprofiilia suorakulmaisesta pyöreäksi ja sen jälkeen uudelleen suorakulmaiseksi sylinterikannen imukanavaan. Muodonmuutokset primääriputkessa ja imutorvessa hidastivat virtausnopeutta, mutta tilavuusvirraltaan se kuitenkin suoriutui niukasti paremmin.



Kuva 39. 50 mm:n imutorvien virtausnopeudet sisäänmenolla.

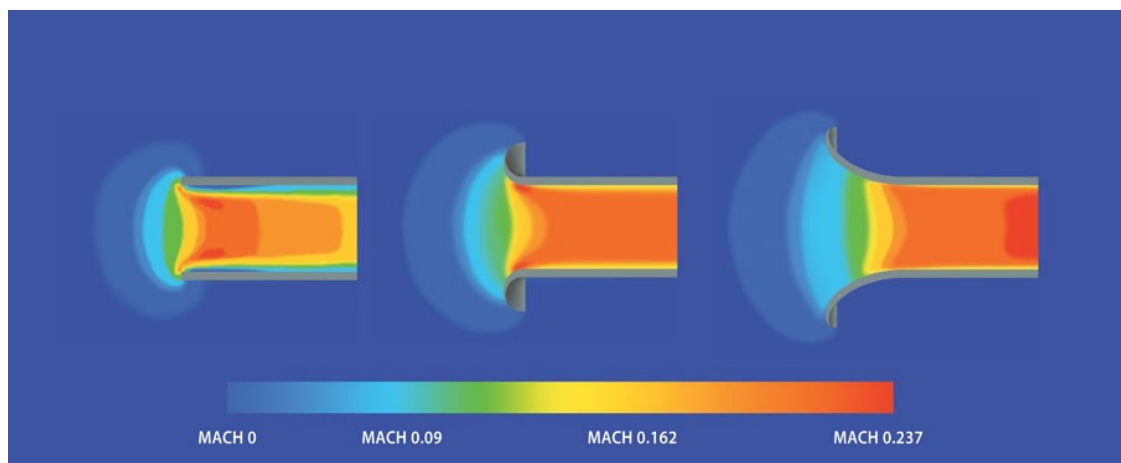


Kuva 40. 50 mm:n imutorvien tilavuusvirrat.

Virtausmittauksista saaduista tuloksista selvisi, ettei imutorven pelkällä muodolla voida saavuttaa yhtä huomattavia eroja virtaukseen kuin primääriputken pituutta tai sisätilavuutta muuttamalla. Projektissa käytetyissä Kinslerin primääriputkissa on kiinteä 53 mm:n poikkivirtaushalkaisija imutorven kiinnityspinnassa, joka mittaustulosten perusteella on sellaisenaan erittäin hyvä. Innovaatioprojektin 50 mm:n primääriputkella hävittiin tilavuusvirrassa 60 mm:n mallille 19 mm:n nostolla 10 CFM, ja virtausnopeus oli 50 mm parempi koko alueella.

Projektissa, jossa primääriputket valmistettaisiin itse, olisi todella tärkeää mitata sylinterikannen maksimivirtauskapasiteetti ja selvittää primääriputkille sopiva halkaisija, jolla virtausnopeus saadaan maksimoitua ennen imukanavaa ilman, että tilavuusvirtaa aletaan kuristaa alimitoittamisella.

Pyöreään primääriputkeen kannattaa suunnitella samaa muotoa loppuun asti ylläpitävä imutorvi (kuva 41), joka on mielellään elliptisen muotoinen varsinkin ahdetussa moottorissa, jossa ylipainetilassa virtausnopeus imutorville on suurempi kuin vastaavassa vapaasti hengittävässä. Imutorven virtauspinnalla tai primääriputkessa ylipäätään ei kannata olla virtaussuunnan vastaisia uria esimerkiksi koneistuksen jäljiltä, sillä muotovastukset virtausputkessa irrottavat ilmavirran putken pinnasta kehittäen turbulentista virtausta, joka hidastaa kokonaisvirtausnopeutta sylinteriin.

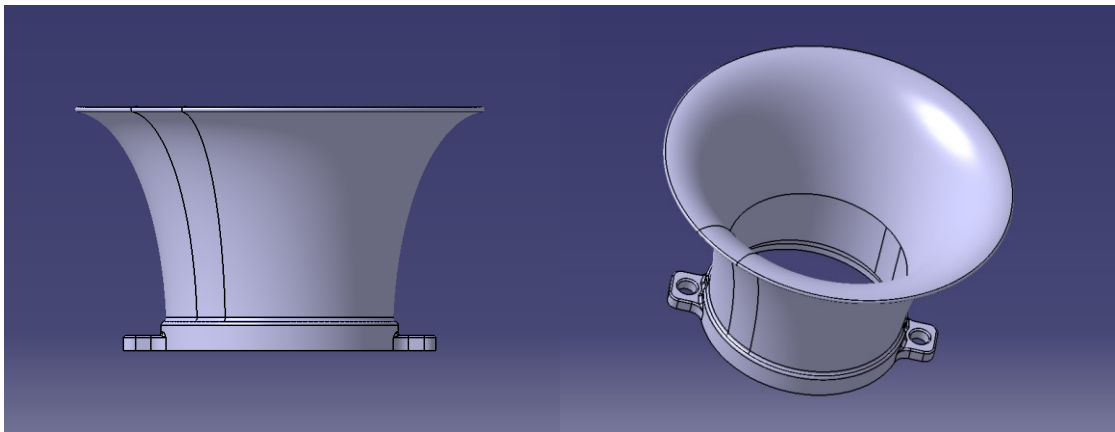


Kuva 41. Havainnollistuskuva reunan pyöristämisen vaikutuksesta virtauskäytökseen imutorvessa [29].

Virtausmittauksiin ja teoreettisiin kaavoituksiin tukeutuen suunniteltiin ensimmäinen sarja 60 mm pitkiä pyöreitä imutorvia 53 mm:n alkuhalkaisijalla. Sen pyöritysprofiilia päätettäessä huomioitiin primääriputkien sylinterikohtainen jako sekä virtauksen kannalta optimaalinen muoto. Imutorven kokonaispituudeksi määritettiin pulssiahtamisen perusteella 60 mm, joten torven haluttiin olevan ilmaa kiihdyttävän suppilon muotoinen alusta loppuun.

Primääriputkien imutorven asennuspäässä sylinterijako on 107 mm, joten imutorvien maksimiulkohalkaisijaksi määritettiin noin 104 mm, sillä kyseiset komponentit valmistetaan 3D-tulostamalla, jolloin pienet muoto- ja mittavirheet saattavat olla mahdollisia.

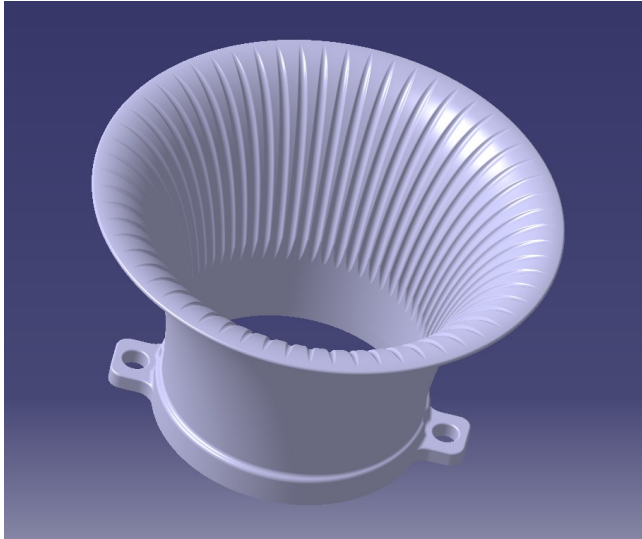
Imutorvien muoto suunniteltiin elliptiseksi käytettävissä olevalla maksimihalkaisijalla, mutta profiilin johtoreunan pyöristys jätettiin tasan 90 asteeseen, sillä yli 90 asteen pyöristyskulma olisi tässä käyttökohteessa ainoastaan merkittävästi loiventanut profiilin kaartuvuuskulmaa (kuva 42).



Kuva 42. 60 mm pitkä imutorvi sivusta ja yläviistosta.

Johtoreunan 90 asteen kulman takia pohdittiin, olisiko mahdollista ohjata ilmaa muilla keinoilla sulavasti imutorven virtauksen ydintä kohti tai mahdollisesti parantaa imutorven lämmönluovutuskykyä suurella kuormalla suoritettun pitkän kiihdytyksen jälkeen. Geometrian pienellä muuttamisella erot suorituskyvyn suhteen ovat todella minimaalisia, eikä tilanpuutteen vuoksi suuria muutoksia ollut mahdollista tehdä.

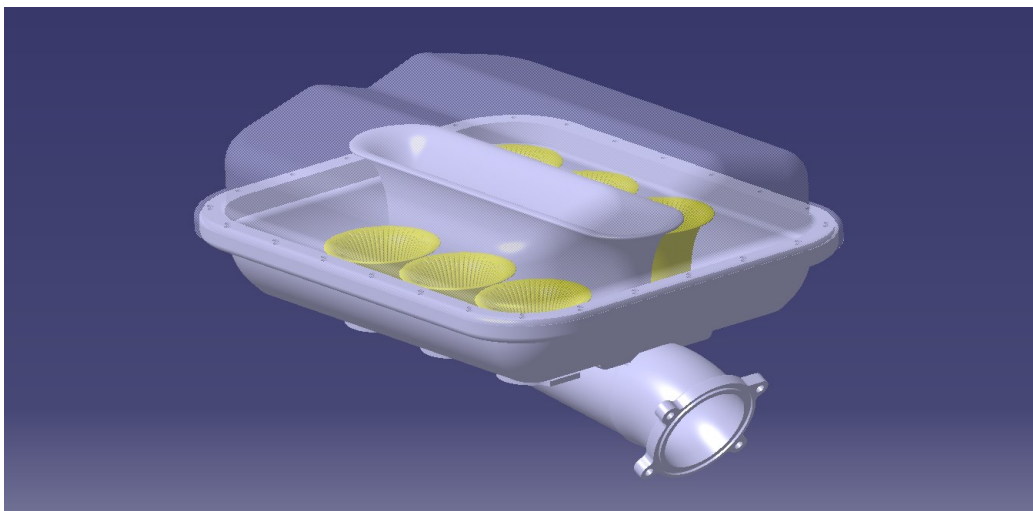
Imutorven muoto päätettiin pitää samana mutta lisätä sisäpintaan virtauksen suuntaisia uria, jotka häivytettiin sulavasti ennen torven kaarevuusprofiilin täydellistä suoristumista 53 mm putkihalkaisijaan (kuva 43). Tämänkaltaista mallia ei virtausmittauksiin valmistettu, joten sen suorituskyvyliset ominaisuudet jäävät selvitetäväksi virtaussimuloinnin perusteella.



Kuva 43. 60 mm pitkä imutorvi yläviistosta uritettuna virtassuuntaisesti.

Urien vaikutus kokonaisvirtausnopeuteen sekä tilavuusvirtaan voitiin olettaa olevan vähäistä. Virtauksen suuntaisilla urilla pyritään jäljittelemään vortex generator -elementeillä saavutettavaa efektiä, sillä pääplenumin kannesta vastakkaiseen suuntaan sinkoava ilmavirta on pääsääntöisesti todella pyörteilevää. Urien terävillä välisuuksilla voidaan lisäksi pienessä mittakaavassa parantaa komponentin lämmönluovutusominaisuuksia.

Imutorvien mallintamisen jälkeen voitiin alustava painekotelon 3D-malli koota kokonaiseksi ja suorittaa suunnittelutyön tueksi virtaussimulointeja (kuva 44).



Kuva 44. Painekotelon 3D-malli kokoonpantuna.

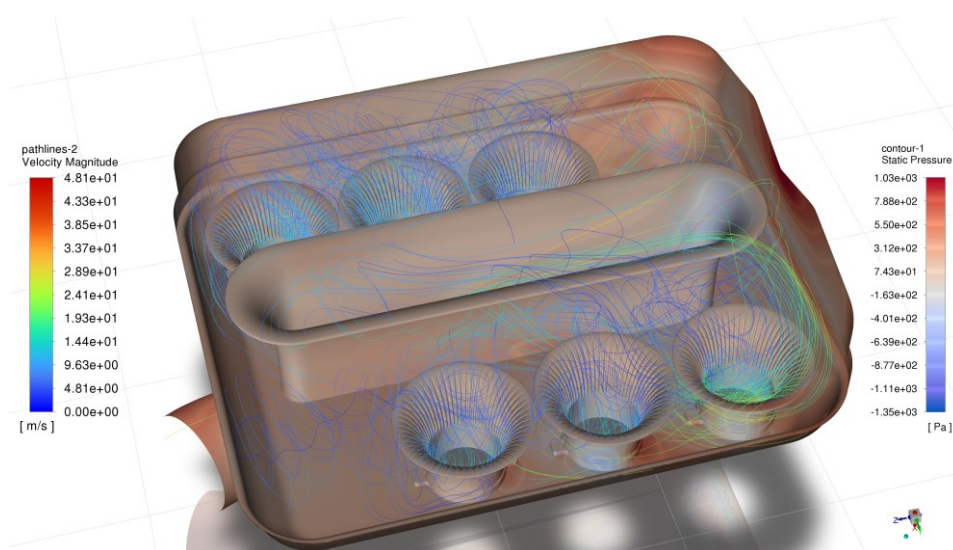
## 7.8 Virtaussimulointi

Ennen varsinaista yksittäisten komponenttien valmistamista, imusarjakokoonpanon virtauskäyttäytymistä haluttiin tutkia CFD (Computational Fluid Dynamics) -simuloimalla. Virtaussimuloinnista saadaan hyödyllistä tietoa ja ennen kaikkea visuaalinen kuva-arvio siitä, miten virtaus etenee imusarjassa.

Painekotelon virtaussimulointi tehtiin Ansys Fluentilla käyttäen K-Epsilon-turbulenssimallia ja melko karkeita verkotusasetuksia. Rajallisen elementtimäärän vuoksi tuloksia ei voida pitää täysin paikkaansa pitävinä.

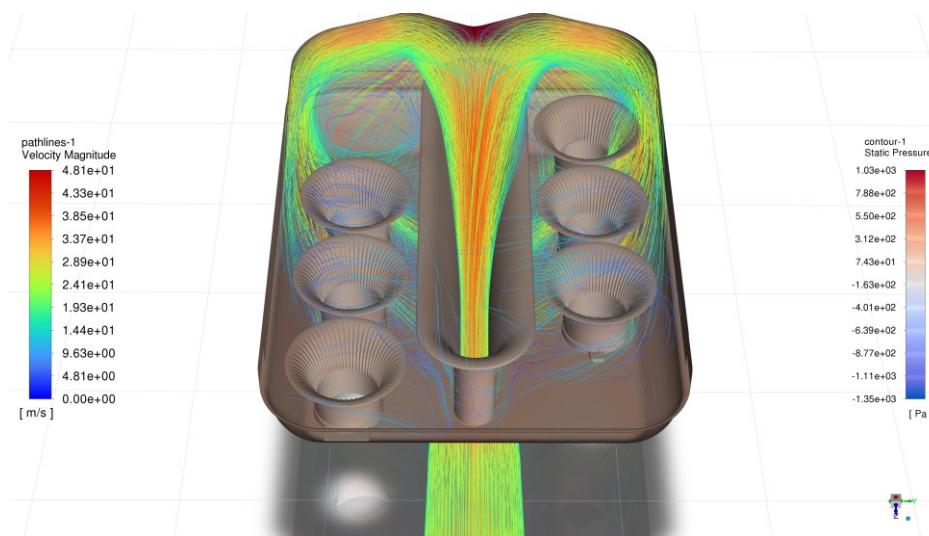
Simuloinnissa tehtiin yksinkertaistuksia, jotta voitiin käsitellä tapausta staattisena tilanteena. Paine-erona sisääntulon ja ulostulojen välillä käytettiin 1000:ta pascalia, jolloin massavirtaus oli noin 0,2 kg/s ja virtausnopeus suurimmillaan noin 45 m/s. Kaikki imukanavat oli määritetty yhtä aikaa auki oleviksi. Näillä yksinkertaistuksilla voidaan lähinnä vertailla sisääntulovirtauksen jakaumaa pääplenumissa eri sylinterien välillä. Yksinkertaistusten vuoksi menetetään mahdollisuus tarkastella moottorin kiertoprosessista aiheutuvien paluupulssien vaikutusta virtaukseen pääplenumissa.

Kuvassa 45 ilma virtaa keskeltä sisään ja jakautuu sylinteriryhmien päälle.



Kuva 45. Havainnekuva CFD-laskennan tuloksesta sivusta.

Tuloplenumin halkaisijamuutoksesta ja sisääntuloaukon kapeasta profiilista huolimatta, pyrkii ilma ryntäämään virtaussuunnan vastakkaiseen pääplenumin pätyyn. Törmätessään pääplenumin kanteen virtaus jakautuu tavoitteiden mukaisesti tasaisesti molempien sylinteriryhmien päälle. Visuaalisen kuvan perusteella virtauksen törmäyssijaintia kanteen voitaisiin halutessa helposti aikaistaa lisäämällä ylöspäin kaartuva virtausta ohjaava elementti tulokanavan alkupäähän tulosuunnasta katsottuna (kuva 46).



Kuva 46. Havainnekuva CFD-laskennan tuloksesta edestä ylhäältä.

Tuloksista nähtiin kuitenkin, että ilman jakautuvuus plenumissa sylinterikohtaisesti oli jo tällaisenaan hyvä, suhteellisen jakauman ollessa 15,5–17,7 % kokonaismassavirtauksesta.

Dual Plenum CFD		
Kokonaismassavirta	0,1949	100 %
Sylinteri 1	↑ 0,0339	17,40 %
Sylinteri 2	↑ 0,0345	17,70 %
Sylinteri 3	↓ 0,0312	16,00 %
Sylinteri 4	↓ 0,0310	15,90 %
Sylinteri 5	↓ 0,0303	15,50 %
Sylinteri 6	↑ 0,034	17,40 %

Kuva 47. Kokonaismassavirran jakautuvuus sylinterikohtaisesti.

## 8 Komponenttien valmistusmenetelmät

Suunnitteluprosessin aikana saatiin hyvä kokonaiskuva komponenttikohtaisista valmistusmateriaaleista. Primääriputkien laipat, joilla pääplenum kiinnitetään osaksi imusarjaa painetiiviisti, valmistettiin ensimmäisenä heti 3D-mallintamisen jälkeen Haas UMC-750:llä lastuavan työstön menetelmin 6082-alumiinista. Niiden kokoonpanoliimaus suoritetaan kohdemoottorin koneistuksien jälkeen, eikä liimattavien komponenttien välillä näin ole riskiä yhteensopimattomuudesta kokoonpanovaiheessa täysin suorasta liimauspinnan muodosta johtuen.

Pääplenumin kansi ja pohja, jotka ovat kokoonpanon suurimmat yksittäiset komponentit, valmistetaan komposiiteista, joiden tuottamiseen vaaditaan muotit. Käytössä olevalla laitteistolla parhaiksi valmistusmenetelmiksi kaavailtiin alumiiniahioista työstämistä tai 3D-tulostusta muovitäyteaineella. Työn tekijän hyvästä 3D-tulostuskokemuksesta johtuen valittiin tulostusvaihtoehto tiedostaen, että valitulla menetelmällä muottien valmistamiseen kuluu useita päiviä. Eduksi 3D-tulostamisessa katsottiin kuitenkin, että lopputuote on kevyttä helposti esikäsiteltävää muovia ja saadaan lisäkokemusta tulostamisesta ennen imutorvisarjan, tuloplenumin ja sisääntulokanavan valmistusta. Projektin 3D-tulostukset suoritettiin Ultimaker S5:llä, jonka tulostusalueen maksimitat ovat 330 mm x 240 mm x 300 mm.

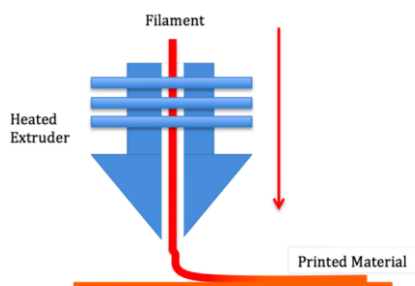
Pääplenumin kannen ja pohjan väliset tiivistepinnat valmistettiin 15 mm vahvuisesta AW-6082-ahioista ja 5 mm:n vahvuisesta AW-6082-levystä käyttäen Haas UMC-750 -työstökeskusta sekä laserleikkuria. Nämä komponentit valmistettiin viimeisenä, jotta komposiittituotteista voitiin mitata manuaalisesti lopulliset sisämitat ja varmistaa osien yhteensopivuus ennen valmistusta.

Imusarja kokonaisuudessaan suunniteltiin monimateriaaliseksi hybridikokoonpanoksi, jossa metalliset insertit integroidaan komposiittituotteiden tiivistepinnoiksi, samalla tukevoittaen rakennetta.

## 9 3D-tulostaminen

Valmistustekniikaltaan 3D-tulostaminen on materiaalia lisäävää valmistusta (Additive Manufacturing), kun taas useissa muissa menetelmissä tuotteita valmistetaan materiaaliahiosta poistamalla, kuten esimerkiksi CNC-koneistamalla ja laserleikkaamalla [30]. Materiaalia lisäävillä 3D-tulostumenetelmillä tuotteet valmistetaan suoraan CAD (Computer-aided design) -ohjelmistolla luodusta 3D-mallista, joka voidaan suunnitella esimerkiksi Catia V5- tai Autodesk Fusion 360 -tyyppisillä ohjelmilla.

3D-tulostamisen valmistamisen raaka-aineina voidaan käyttää mm. useita erilaisia seostettuja muoveja, lasia ja vaihtelevia metallityyppejä. Muovien tulostamiseen yleisin valmistusmenetelmä on FFF (Fused Filament Fabrication), jossa käytettävä filamentti on halutusta materiaalista valmistettua kiinteää muovinauhaa. Filamentit pakataan muovinauhakeloiksi, jota laite syöttää tulostettaessa kuumen tulostussuuttimen läpi sulana kerros kerrallaan (kuva 48).



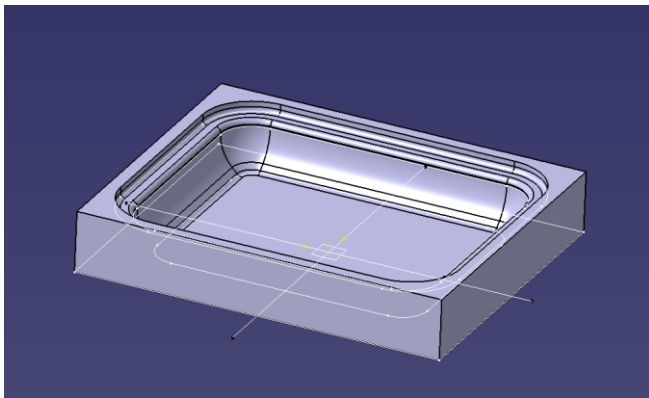
Kuva 48. FFF-menetelmän toimintaperiaate [31].

Kerroksen korkeus ja leveys vaikuttavat tulostetun kappaleen pinnanlaatuun ja tulostusnopeuteen. Pienellä suuttimella sekä pursotuskorkeudella saavutetaan tarkka lopputuote, mutta valmistamiseen käytetty aika voi moninkertaistua.

Tässä insinööriyössä käytettiin FFF-tyyppistä Ultimaker S5 -tulostinta, jolla voidaan tulostaa erilaisia seostettuja ja kuituvahvistettuja muoveja. Suunnitelmana oli valmistaa erilaisia filamentteja käyttäen koko pääplenumin muotit, tulople-num ja ainakin yksi sarja imutorvia.

## 9.1 Muottien 3D-tulostus ja valmistelu

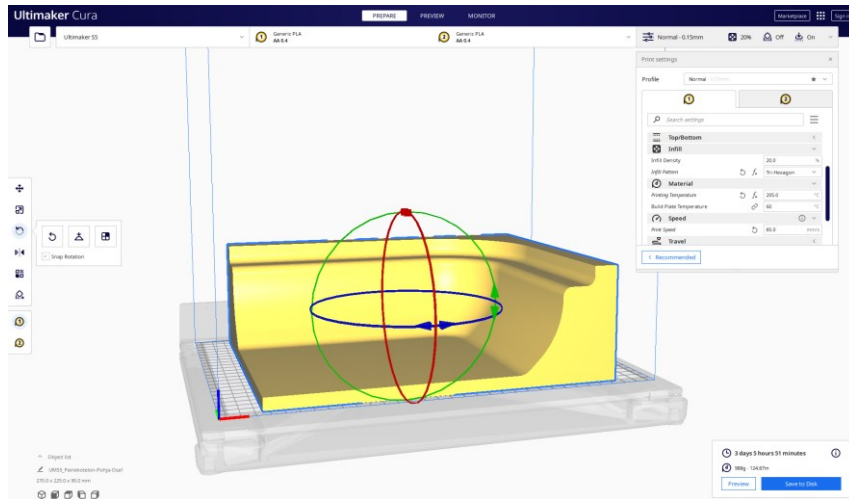
Pääplenumin pohjan ja kannen valmistusprosessi aloitettiin muuttamalla tuotteiden 3D-mallit muoteiksi kopioimalla pintamallista ulkomitat ja kaivamalla 3D-mallinnettuun laatikkoon kolo kyseisillä mitoilla (kuva 49). Muotteja kehitellessä pohdittiin myös tulostusteknisiä haasteita muotin koon suhteen, sillä pääplenumin pinta-alan ulkomitat olivat lähes neljä kertaa suurimman käytössä olevan Ultimaker S5 3D -tulostimen tulostusalueen mittaiset. Siitä johtuen muotit jouduttiin jakamaan neljään osaan, joka sinänsä ei ollut ongelma, sillä komposiittituotetta muotista irrottaessa muotin halkaisemismahdollisuudelle tiedettiin ainoastaan helpottavan irrotusprosessia.



Kuva 49. Pääplenumin pohjan muotti.

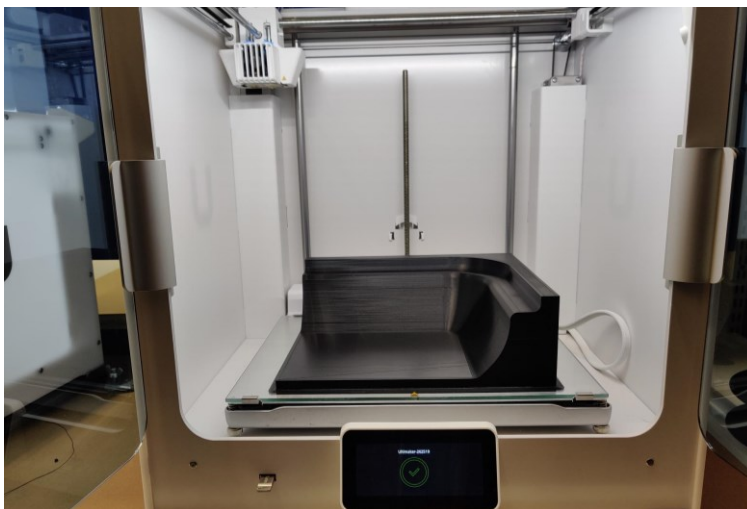
Muottien valmistusmateriaaliksi valittiin edullinen biohajoava PLA (polylaktidi), jonka pehmenemislämpötila on 60 °C ja optimaalinen tulostuslämpötila noin 200 °C riippuen tulostuksen kerrokorkeudesta ja tulostusnopeudesta. Tulostusmateriaalina PLA on hyvä sen erinomaisesta tulostustarkkuudesta johtuen, mutta se ei esimerkiksi lujuudeltaan tai lämmönkestoltaan pärjää vahvemmille muoveille, kuten ABS:lle. Muotit, joista pääplenum valmistetaan, ovat tässä käyttökohdeessa kuitenkin käytännössä kertakäyttöisiä ja tulostus on pintakäsiteltävä joka tapauksessa ennen komposiittituotteiden valmistamista, joten filamentiksi valikoitiin mielellään edullinen ja ympäristömyönteinen tuote.

Tulostusajaksi yhdelle muotin kulmalle 0,4 mm:n suuttimella, 0,15 mm:n kerroskorkeudella ja etenemisnopeudella 85 mm/s saatiin noin 3 päivää ja 6 tuntia (kuva 50) eli pohjan muotin tulostamiseen kului aikaa yhteensä 13 päivää putkeen. Aikataulua olisi voitu nopeuttaa kasvattamalla tulostussuuttimen kokoa, mutta kiireettömästä aikataulusta johtuen haluttiin tulosteen laatu pitää parhaana mahdollisena ja odotella hieman pidempään valmistumisen etenemistä.



Kuva 50. Pääplenumin muotin osa 1/4 Ultimaker Curassa.

Kuvassa 51. ensimmäinen pääplenumin pohjan muotin osa tulostettuna Ultimaker S5 3D-tulostimella biohajoavasta PLA:sta.



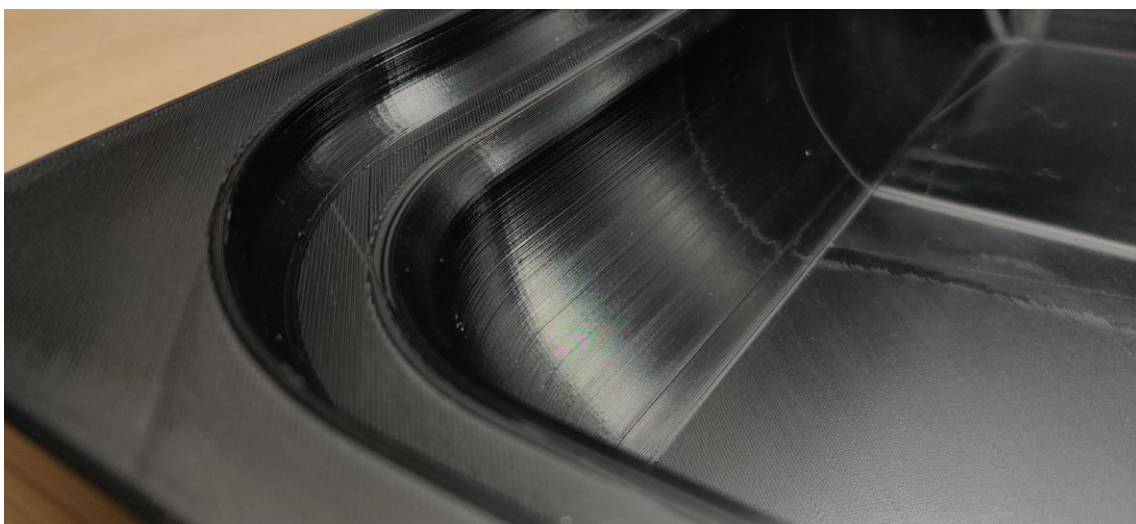
Kuva 51. 3D-tulostimella onnistuneesti valmistettu muotin osa.

Kuvassa 52 muotin neljä osaa yhdistettiin ensimmäisen kerran ja varmistettiin yhteensopivuus liimausta varten.



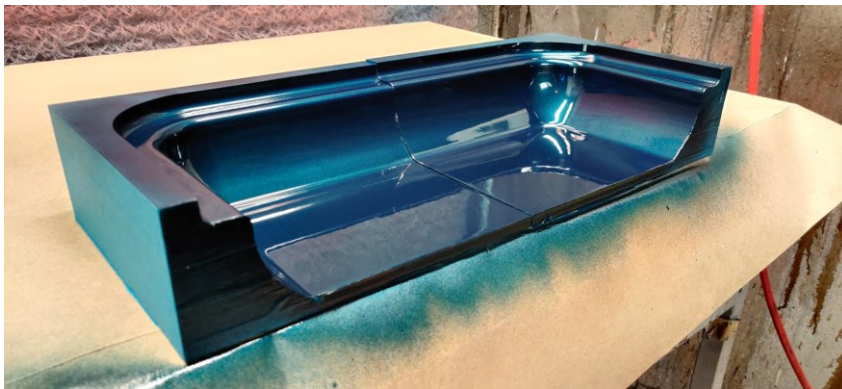
Kuva 52. Pääplenumin pohjan muotin neljä osaa yhdessä.

3D-tulosteiden laatu oli hyvä, mutta ei kuitenkaan riittävä sellaisenaan komposiittiosien valmistukseen, sillä kaikki muotin epätäydellisyydet, kuten kerrosten väliset pienet kolot, kopioituivat identtisinä komposiittilaminaatin pintaan (kuva 53). Siksi tulostetuille muoteille piti suorittaa perusteelliset pohjatyöt ja maalaus.



Kuva 53. Muotin pinta suoraan 3D-tulostimesta.

Muotin epätasaisuudet kerrosten välillä olivat sen verran suuria, että oli välttämätöntä aloittaa hiominen P320-karheuksisella hiomapaperilla ja käyttää auton maalaukseen tarkoitettuja laadukkaita spraypurkeissa myytäviä ruiskukittejä, sekä hiontapohjamaaleja niiden täyttämiseen. Hiomapaperissa siirryttiin kerroksittain sileämpään ja P600-paperin hiomisen jälkeen muotti oli valmis pintavärin ja lakan ruiskutukseen. Pohjatyöprosessi vaati muottia kohden työtunteja odotettua vähemmän, sillä spraytuotteilla vältettiin koriketin käyttö, jonka tasoittaminen täydelliseksi on hieman haastavampaa ja työvaiheiden määrä olisi lisääntynyt.



Kuva 54. Muotin osia Volvo 412 Tropical Green Metallic -värillä maalattuna.

Pohjan muotin kokoonpanoliimaus suoritettiin vasta maalaustöiden jälkeen, sillä suorista pinnanmuodoista johtuen muotin halkaisevat saumat oli helppo kohdistaa tarkasti keskenään samalle tasolle. Kannen muotin valmistusprosessi eteni muuten identtisesti, mutta kokoonpanoliimaus suoritettiin ennen maalausta, jotta sauma ei varmasti jäisi näkyviin komposiittituotteeseen. Kokoonpanoprosessissa käytettiin Loctite EA 9483 -epoksiliimaa, joka soveltuu erinomaisesti kesto- ja kertamuovien rakenneliimauksiin. Viskositeetiltaan kyseinen liima soveltui käyttökohteeseen hyvin, sillä vaadittiin riittävästi täyttökkyä epätasaisten 3D-tulostettujen pintojen välin täyttämiseksi ja samalla saumalinjan häivyttämiseen mahdollisimman hyvin ennen varsinaisia pohjatöitä.



Kuva 55. Kannen muotti koottuna, pohjatyöt kesken.

Kuvassa 56 pääplenumin kannen muotin maalaustyö on valmis.



Kuva 56. Kannen muotti maalattuna Bmw 72281 Sofia Red -värillä.

## 9.2 Imutorvien ja tuloplenumin 3D-tulostus

Imutorvien ja tuloplenumin 3D-tulostaminen suoritettiin samalla Ultimaker S5 -3D-tulostimella kuin pääplenumin muotitkin. Muoteista poiketen materiaalivalinta näissä komponenteissa oli kriittisempi. Vaatimuksina käytetylle filamentille olivat minimissään 150 °C:n lämpötilan jatkuva sieto, mahdollisimman kestävät lujuusominaisuudet sekä hyvä kemikaalisieto erityisesti E85-polttonesteelle, joka sisältää 85 % alkoholia.

Autoteollisuudessa moottoreiden imujärjestelmän metallisia komponentteja on viime vuosikymmeninä korvattu tehokkaasti muoviseoksista valmistetuilla tuotteilla, jotka mahdollistavat monimutkaiset tukirakenteet ja jopa 40 %:n painon- säästön verrattuna vastaavaan metallituotteeseen. Suosituimpia materiaaleja kokonaisten imusarjojen ja imujärjestelmän muiden komponenttien tuottamiseen ovat erilaiset lasikuituvahvisteiset polyamidit (PA6/PA66). Näihin materiaaleihin pohjautuvaa lasikuituosuudeltaan 30-prosenttista DSM Akulon HR-HG6 -polyamidia käyttävät mm. General Motors, Mercedes, PSA, Renault ja Volkswagen. [32.]

Akulon HR-HG6:n teknisestä datalehdessä saatiin hyvät lähtöarvot ja tavoitteet 3D-tulostamiseen käytettävälle filamentille (kuva 57).

Mechanical properties		dry / cond	
Tensile modulus	10000 / 6500	MPa	ISO 527-1/-2
Stress at break	205 / 125	MPa	ISO 527-1/-2
Strain at break	3.6 / 6	%	ISO 527-1/-2
Flexural modulus	9300 / 6400	MPa	ISO 178
Flexural strength	295 / 200	MPa	ISO 178
Thermal properties		dry / cond	
Melting temperature (10°C/min)	260 / *	°C	ISO 11357-1/-3
Temp. of deflection under load (1.80 MPa)	250 / *	°C	ISO 75-1/-2
Temp. of deflection under load (0.45 MPa)	260 / *	°C	ISO 75-1/-2
Coeff. of linear therm. expansion (parallel)	0.2 / *	E-4/°C	ISO 11359-1/-2
Coeff. of linear therm. expansion (normal)	0.7 / *	E-4/°C	ISO 11359-1/-2
Other properties		dry / cond	
Water absorption	6 / *	%	Sim. to ISO 62
Humidity absorption	1.6 / *	%	Sim. to ISO 62
Density	1360 / -	kg/m <sup>3</sup>	ISO 1183

Kuva 57. Akulon HR-HG6:n teknisiä tietoja [33].

Kun vertailuarvot oli selvitetty autoteollisuuden käyttökohteista, alettiin selvittämään saatavilla olevia polyamidipohjaisia kuituvahvisteisiä filamentteja, jotka olivat yhteensopivia Ultimaker S5 -tulostimen FFF-valmistusmenetelmälle.

Saksalaisella kemian alan yhtymällä BASF SE:llä, jonka valmistamalla PLA:lla myös muotit valmistettiin, on hyvä valikoima teolliseen insinöörikäyttöön soveltuvia filamentteja. Yrityksen valikoimasta valittiin kaksi filamenttia vertailuun, jotka olivat Ultrafuse PA6 GF30 (lasikuitunailon) ja PAHT CF15 (hiilikuitunailon).

Ultrafuse PA6 GF30 on PA6-nailonista valmistettu täyteaine, joka sisältää 30 % filamenttikäyttöön optimoitua lasikuitua ja jonka tiheys tulostettuna on 1519 kg/m<sup>3</sup>. Valmistaja lupaa filamentin olevan helppokäyttöinen ja soveltuvan kaikille normaaleille FFF-tulostimille. Korkea kulutuksenkesto, todella jäykkä rakenne ja hyvä kemikaalien sietokyky ovat ominaisia tälle filamentille.

Ultrafuse PAHT CF15 on korkeaan lämpötilan (PAHT = Polyamide High Temp) sietoon kehitetty nailonseos, joka sisältää 15 % hiilikuitua ja jonka tiheys on 1232 kg/m<sup>3</sup>. Kemikaalikestoltaan filamentti on muokattu paremmaksi kuin perinteiset PA6- ja PA66-nailonit, ja osasyynä siihen on myös hiilikuitusisältö. Lujuusominaisuuksiltaan ja lämmönkestoltaan PAHT CF15 on myös parempi kuin toiseksi vaihtoehdoksi valittu lasikuitutäytteinen PA6. Jatkuvaksi lämmönkestoksi luvataan 150 °C, joka riittää pääplenumin alapuolelle jäävälle tuloplenumille hyvin lämpöeristettynä. Tätä filamenttia valmistaja suosittelee ajoneuvo-tekniisiin ratkaisuihin, jossa vaaditaan lujuutta ja pientä lämpölaajenemiskerointa.

Seuraavaksi vertailtiin valmistajan antamia teknisiä ominaisuuksia PA6 GF30:n sekä PAHT CF15 välillä ja verrattiin niitä autoteollisuudessa käytettävään Akulon HR-HG6 -materiaaliin (kuvat 58–60). Vertailun suhteen huomioitava asia oli myös se, että tässä projektissa komponentit valmistetaan FFF-menetelmällä, kun taas autoteollisuudessa kokonaiset imusarjat toteutetaan ruiskuvalutuotteina. Valutuote ei muodostu ohuista kerroksista, vaan koko komponentin raaka-aine ruiskutetaan valuna muotin sisään, mikä tekee lopputuotteesta todella tasalaatuisen.

Mechanical Properties   Dried Specimen		
Print direction	Standard	XY
		Flat
Tensile strength	ISO 527	103.2 MPa / 15.0 ksi
Elongation at Break	ISO 527	1.8 %
Young's Modulus	ISO 527	8386 MPa / 1216 ksi
Flexural Strength	ISO 178	160.7 MPa / 23.3 ksi
Flexural Modulus	ISO 178	8258 MPa / 1198 ksi
Flexural Strain at Break	ISO 178	2.4 %

Kuva 58. PAHT CF15:n mekaaniset lujuusominaisuudet [34].

Mechanical Properties   Dried Specimen		
Print direction	Standard	XY
		Flat
Tensile strength	ISO 527	78.3 MPa / 11.4 ksi
Elongation at Break	ISO 527	2.2 %
Young's Modulus	ISO 527	5036 MPa / 730.4 ksi
Flexural Strength	ISO 178	147.4 MPa / 21.4 ksi
Flexural Modulus	ISO 178	4694 MPa / 680.8 ksi
Flexural Strain at Break	ISO 178	4.0 %

Kuva 59. PA6 GF30:n mekaaniset lujuusominaisuudet [35].

Thermal Properties		Thermal Properties	
HDT at 1.8 MPa (dry)	92 °C / 198 °F	HDT at 1.8 MPa (dried)	82 °C / 179.6 °F
HDT at 0.45 MPa (dry)	145 °C / 293 °F	HDT at 0.45 MPa (dried)	110 °C / 230 °F
HDT at 1.8 MPa (conditioned)	91 °C / 196 °F	HDT at 1.8 MPa (conditioned)	87 °C / 188.6 °F
HDT at 0.45 MPa (conditioned)	128 °C / 262 °F	HDT at 0.45 MPa (conditioned)	114 °C / 237.2 °F
Glass Transition Temperature	70 °C / 158 °F	Glass Transition Temperature	67 °C / 152.6 °F
Crystallization Temperature	180 °C / 356 °F	Crystallization Temperature	167 °C / 332.6 °F
Melting Temperature	234 °C / 453 °F	Melting Temperature	209 °C / 408.2 °F

Kuva 60. Lämmönsieto, vasemmalla BASF CF15 [36] ja oikealla PA6 GF30 [37].

Vahvistamattomien ja esimerkiksi kuituvahvisteisten muovien vetolujuuksia mitataan noudattaen ISO 527 -standardia, joka määrittelee mm. olosuhteet ja yleiset periaatteet muovien ja muovikomposiittien vetolujuuksien mittaamiseen [38]. Vetokokeessa kappale puristetaan molemmista päistä kiinni leukoihin, mikä jälkeen laite kohdistaa testikappaleeseen pituussuuntaista vetoa ja mittaa samalla voima-anturilla kuorman suuruutta sekä toisella anturilla pituuden muutosta.

Tulokseksi vetokokeesta saadaan mm. kimmokerroin (Young's modulus), myötölujuus (Yield strength), murtolujuus (Tensile strength) sekä murtovenymä (ductility). [39.]

Samojen materiaalien taipumiseen liittyviä ominaisuuksia mitataan puolestaan käyttäen ISO 178 -standardin mukaista 3-pisteistä taipumakoemenetelmää, jossa testikappale kiinnitetään molemmista päistä ja kappaleen keskelle kohdistetaan yhteen pisteeseen kuormaa. Mitä pienemmällä voimalla materiaali saavuttaa myötörajan (pysyvän muodonmuutoksen), sitä heikompi materiaali on kyseessä. Standardin mukaisesta testistä saadaan selville kappaleen taivutuslujuus (flexural strength), taivutuskerroin (flexural modulus) ja taivutusjännitys (flexural strain at break) kappaleen murtuessa. [40.]

Teknisistä tiedosta saatiin selville, että BASF CF15 -filamentti on sekä mekaanisilta ominaisuuksiltaan että myös lämpötilankestoltaan huomattavasti PA6 GF30 -filamenttia korkealaatuisempi valmistusmateriaali. Imusarjan sisäiset lämpötilat eivät ylitä kummankaan filamentin deformaatiolämpötilaa, mutta jatkuvat ulkopuoliset korkeat lämpötilat moottoritilassa ja lämmönjohtuminen primääriputkia pitkin imutorviin luovat kuitenkin omat riskinsä, mistä johtuen lämpötilankesto halutaan maksimoida.

Vetokoe- ja taipumatestitulosten perusteella ei lasikuituvahvisteista PA6 GF30 -filamenttia kannattanut tässä projektissa käyttää. Kimmokertoimen perusteella BASF CF15 on todella jäykkä materiaali ja muutenkin mekaanisilta ominaisuuksiltaan vahvempaa kuin vaihtoinen filamentti, mutta hankintakustannukset ovat silti samat.

BASF CF15 on verrattuna Akulon HR-HG6 -materiaaliin kilpailukykyinen mutta ei kuitenkaan yhtä kestävä. Lämpötilankestoltaan molemmat riittävät hyvin imusarjojen valmistukseen jo sulamisrajojen perusteella (234 °C BASF CF15 vs. 260 °C Akulon HR-HG6).

Materiaalivalinnan päätöksenteon jälkeen hankittiin BASF CF15 -filamenttia ja sillä tulostamiseen lujitettu halkaisijaltaan 0,6 mm:n tulostuskärki. Pienemmän suuttimen käyttö ei ole mahdollista johtuen filamentin sisältämästä hiilikuidusta. Hiilikuitulujitteiset filamentin vaativat kovetetun suuttimen, sillä hiilikuitu materiaalina on niin kuluttava, että normaali messinkisuutin kuluisi jo lyhyessä ajassa käyttökelvottomaksi.

Ennen varsinaisten komponenttien tulostamista suoritettiin imutorville testitulokset PLA:lla, jotta saatiin varmistettua sopivuus 6082-alumiinista koneistettuun primääriputkienlaippaan. Lisäksi koettiin järkeväksi varmistaa mahdollinen tarve tukirakenteelle 3D-tulostusprosessissa kaarevia profiileita varten ja selvittää, kuinka hyvin virtauksen suuntaiset urat ovat toteutettavissa käytössä olevalla laitteistolla.

Testikappaleet tulostettiin onnistuneesti ilman tukirakenteita fyysisten mittojen pysyessä 3D-mallin mukaisina (kuva 60). Imutorvissa virtauksen suuntaisesti kulkevat urat tulivat 3D-tulostettuun malliin hieman mallinnusta urapyörityksiltään pehmeämpinä mutta syvyydeltään halutuissa mitoissa.



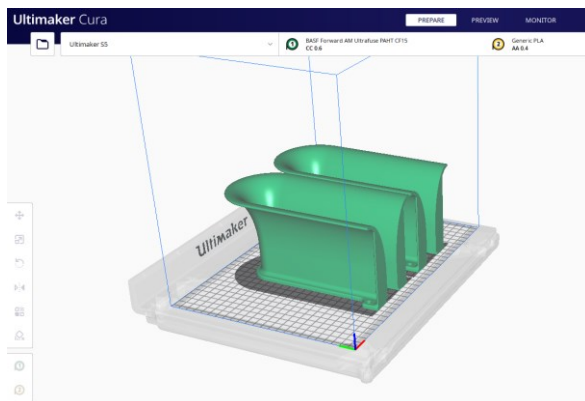
Kuva 60. Testikappaleet PLA:sta valmistettuna.

Kuvassa 61 on ensimmäinen imutorvi 3D-tulostettuna BASF CF 15 -filamentilla.



Kuva 61. Valmis imutorvi.

Imutorvien tulostaminen onnistui ongelmitta alusta loppuun, minkä jälkeentuloplenumin ja sisäänmenotorven valmistaminen oli seuraavana. Tuloplenumin ja siihen kiinnittyvän sisäänmenotorven kokonaispituudet olivat yli 450 mm, kun taas Ultimaker S5:n maksimitulostusmitta oli 300 mm, mistä johtuen molemmat osat oli jaettu erikseen tulostettaviin sektioihin jo suunnitteluvaiheessa (kuva 62).



Kuva 62. Kahteen osaan jaettu tuloplenumin torvi Ultimaker Curassa.

Nailonpohjainen BASF PATH CF15 on 3D-tulostettuna kokoonpanoliimattavissa yhtä luotettavasti kuin muutkin nailonit, joten rakenteen kestävyuden kannalta tämä ei ollut ongelma. Hiilikuituosuus filamentissa itse asiassa tekee materiaalin pinnasta hieman rosoisemman ja huokoisemman, mikä parantaa adheesiota käytetystä liimasta riippuen.

Sopivaa kokoonpanoliimaa selvitellessä käytettiin hyödyksi Henkel-konsernin Adhesives Selector -online-aplikaatiota. Prioriteetteina liimalle valittiin mahdollisimman korkea kemikaalien sieto, minimissään 150 °C:n jatkuva lämpötilankestä ja ylipäätään sopivuus kahden nailonin väliseen liimaukseen. Vaihtoehtoisia tuotteita oli muutama, joista parhaiten käyttökohteeseen soveltuvaksi valittiin Loctite 9483. Se on 2-komponenttinen kirkas epoksiliima, joka kestää erinomaisesti vahvoja myrkkyyjä, kuten asetonia, ja jonka lämpötilankestokin oli riittävä.

Tuotevalinta varmistettiin vielä erikseen Henkel Finland Oy:n asiantuntijalta ja todettiin sen soveltuvan erinomaisesti hiilukuituvahvisteisten nailoneiden yhdistämiseen. Tuloplenumin komponentit tulostettiin onnistuneesti ja kokoonpanoliimattiin Loctite EA 9483 -rakenneliimalla (kuva 63).



Kuva 63. Tuloplenumin kokoonpanoliimaus 2-komponenttirakenneliimalla Loctite EA 9483.

## 10 Komposiitit yleisesti

Komposiiteilla tarkoitetaan materiaaleja, jotka ovat kahden tai useamman ominaisuuksiltaan toisistaan poikkeavan materiaalin yhdistelmiä. Komposiitit koostuvat matriisista ja lujitteesta, joka on yleensä kuitujen muodossa. Matriisi toimii sitovana elementtinä, kun taas lujitteella haetaan lisää lujuutta ja jäykkyyttä komposiittirakenteeseen [41, s. 17].

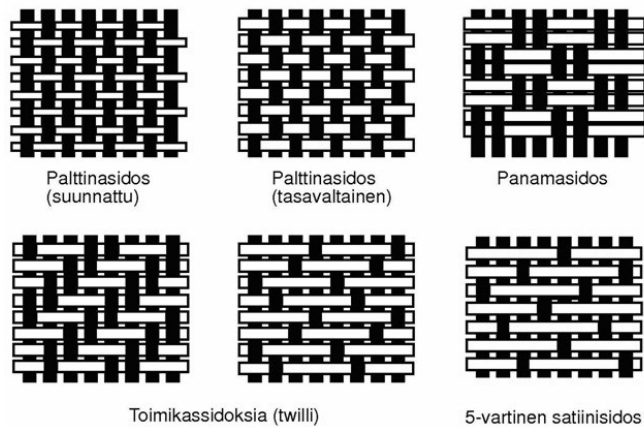
Komposiiteilla voidaan saavuttaa erittäin kestäviä mutta silti kevyitä rakenneratkaisuja lujiteaineesta riippuen (kuva 64), minkä vuoksi komposiittien osuus on lisääntynyt vuosittain kovalla vauhdilla ajoneuvoteknisissä ratkaisuissa ja esimerkiksi ilmailussa. Painonsäästön lisäksi useilla komposiiteilla on myös hyvä kemikaalien sieto ja korroosion kestävyys ilman pinnan jälkikäsittelyä.

Kilpa-autoihin komposiiteista valmistetaan usein mm. korinosia, istuimia, kojelautoja ja moottorin imujärjestelmän komponentteja. Komposiiteissa käytettävät matriisit ja lujiteaineet valikoidaan aina käyttötarkoituksellisesti, mutta pääasiassa lujiteaineena on epoksi ja matriisina erilaiset hiilikuitu ja aramidipunokset.

Material	Mass density (g/cm <sup>3</sup> )	Tensile Strength (MPa)	Specific Strength (kN.m/kg)
Aluminum 7075-T6	2.8	600	214
Magnesium alloy AZ91D	1.7	230	135
Titanium	4.4	950	216
Carbon Steel (0.45 % C)	7.8	850	108
Maraging Steel	8.1	2500	300
Carbon composite	1.6	1240	785

Kuva 64. Hiilikuitukomposiitin lujuusominaisuuksia verrattuna metalleihin [42].

Erilaisia kudostyyppisiä ovat mm. palttinasidokset, panamasidos, toimikassidos (twill) ja satiinisidos. Twill-sidoksessa on vähemmän risteämäkohtia kuin muissa kudostyypeissä, minkä vuoksi se mukautuu paremmin erilaisiin muotoihin verrattuna esimerkiksi ruutukuvioiseen palttinasidokseen (kuva 65).



Kuva 65. Erilaisia hiilikuidun kudostyyppijä [43].

### 10.1 Lujiteaineen valinta

Lujiteaineeksi ottomoottorin imusarjaan hiilikuitu soveltuu erinomaisesti, sillä lopputuotteesta voidaan tehdä erittäin jäykkä ja luja, jolloin painoa säästyy useita kilogrammoja verrattuna vastaavaan metalliseen. Kudostyyppin valinta tehtiin perustuen fyysiseen testiin, jossa 3D-tulostettuun muotin kulmaan sovellettiin erilaisia kudostyyppijä. Twill-sidoksinen hiilikuitukangas muotoutui parhaiten haastavaan muotoon ilman ryppyjä tai kuitusidosten toisistaan venymistä, joten se valittiin laminaatin päämateriaaliksi (kuva 66).



Kuva 66. Testikappale hiilikuituisella 200 g/m<sup>2</sup>:n twill-kudoksella.

## 10.2 Komposiittituotteiden valmistaminen

Komposiittituotteet valmistettiin Metropolia Ammattikorkeakoulussa käyttäen Metropolia Motorsport Formula Engineering -tiimin laitteistoa. Valmistustekniikkana käytettiin alipaineinfuusiota, jossa lujiteaine (epoksi-koveteseos) injektoidaan letkua pitkin alipaineistettuun muottiin matriisikerrosten asetteluun jälkeen. Tällä valmistusmenetelmällä saavutetaan ilman pensselillä sotkemista tasalaatuinen ja kevyt laminaatti.

Komponenttien matriisissa käytettäviksi materiaaleiksi valittiin Primetex® 43200 200 g/m<sup>2</sup> twill -hiilikuitukudos ja Hexforce® 20914 175 g/m<sup>2</sup> twill -aramidikuitukudos, joista aramidia käytettiin ainoastaan laminaatissa pääplenumin sisäpuolelle jäävään osuuteen.

Aramidia päätettiin soveltaa sisäpuolelle siksi, että pääplenumin kontaktipintojen laipat valmistetaan alumiinista, jonka fyysinen pysyvä kontakti hiilikuitulaminaattiin johtaa lähes poikkeuksetta pitkällä aikavälillä pintojen väliin muodostuvaan galvaaniseen korroosioon. Galvaanisen korroosion seurauksena alumiinin pinnalle muodostuu valkoista hyytelömäistä ainetta, joka heikentää sekä koonpanoliimauksen pitävyyttä sekä myös laminaatin lujuutta. Galvaanisen korroosion eteneminen on nopeimmillaan silloin, kun pinta-alaltaan pieniä metalliosia kiinnitetään suuriin hiilikuidusta valmistettuihin komponentteihin. [42.]

Laipoissa käytetyllä AW-6082-alumiinilla on jo itsessään hyvä korroosionkesto, jota tullaan parantamaan kova-anodisoinnilla, mutta aramidin sijoittamisella kontaktipintoihin minimoitiin riski galvaaniseen korroosioon, sillä se ei reagoi alumiinin kanssa samalla tavalla kuin hiilikuitu.

Pääplenumin 3,5 mm:n seinämävahvuuden saavuttamiseksi vaadittiin 200 g:n twill-hiilikuitupunoskerroksia yhteensä 17 kpl (yhden kerroksen paksuus 0,2 mm) ja päälle 175 g:n twill-aramidia kaksi kerrosta [48]. Näin hybridilaminaatin seinämävahvuudeksi saatiin noin 3,75 mm, joka täyttää erinomaisesti käyttökohteen lujuusvaatimukset.

Lujitevalintaa pohtiessa kysyttiin neuvoa Kevra Oy:n ammattilaisilta, jotka suosittelevat korkean lämpötilan käyttökohteeseen kaksikomponenttista Sicomin SR 1720 -epoksia. Tuote soveltuu erinomaisesti injektio-laminoimalla valmistettaville komposiittituotteille matalan viskositeettinsa ansiosta. Lämpötilansieto epoksilla on noin 200 °C, joka riittää imusarjan pääkomponenteille erittäin hyvin. [44.]

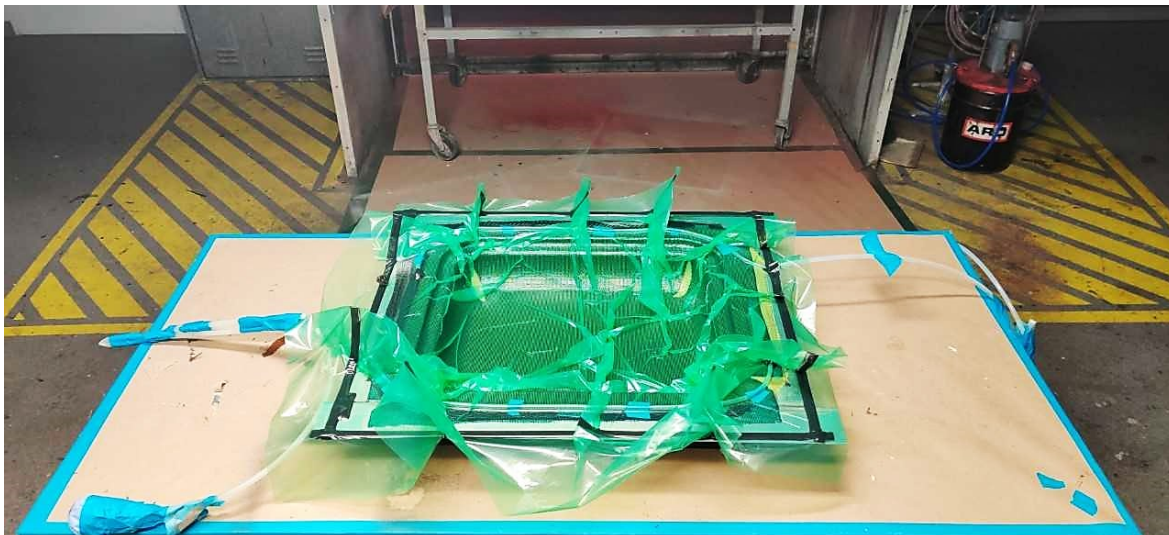
Pääplenumin komponenteista ensimmäiseksi valmistettiin pohja, sillä se oli muotoilultaan yksinkertaisempi, ja saatiin hyvää kokemusta haastavamman kannen laminointiprosessiin. Kerrokset pyrittiin laminoimaan niin, ettei hiilikuitukudokseen tarvinnut tehdä lainkaan leikkauksia. Kappaleen muodossa olevat pyöristyksen ja kulmat aiheuttivat haasteita laminointiprosessissa, mutta ylimääräinen muuten rypylle jäävä materiaali kerroksista saatiin häivytettyä lopulta muotin uloimpiin kulmiin ilman leikkauksia.

Kuvasta 67 nähdään, että twill-kudoksella hiilikuitukangas muotoutuu erinomaisesti haastavan muotoiseen muottiin. Muotin neljään kulmaan kuitua pakkaantuu tiheimmin kuin muihin sijainteihin, joten lopputuotteessa kulmien seinämävahvuus voi olla hieman paksumpi kuin muun osan.



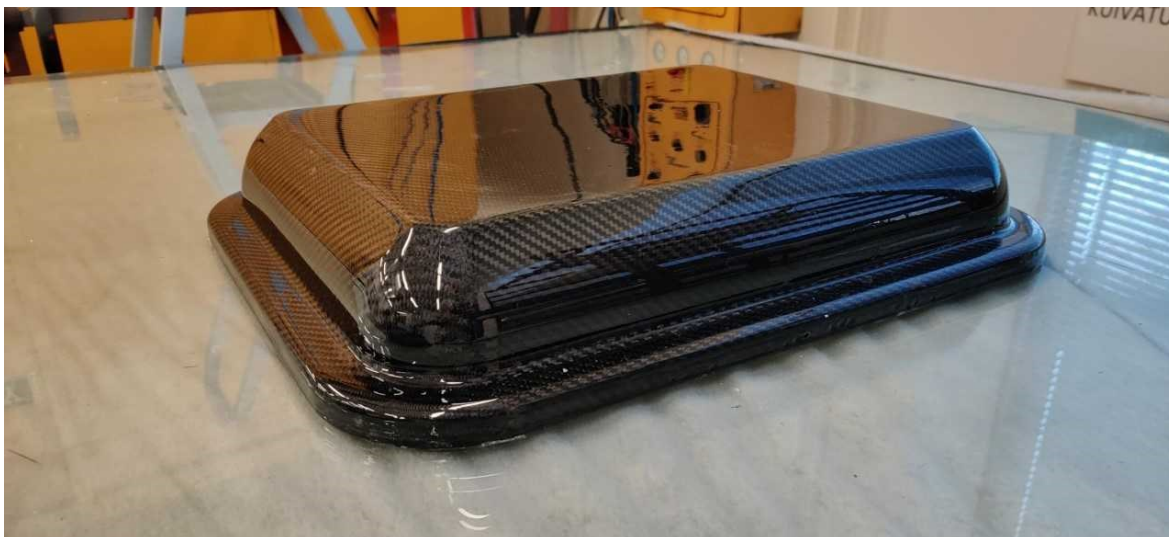
Kuva 67. Pohjan laminointiprosessi keskeneräisenä.

Kuvassa 68 kaikki kuitukerrokset on aseteltu muotin pintaan, minkä jälkeen muotti on tyhjiöpumpulla alipainestettu ja matriisi injektoitu lujitteen sekaan syötötietä pitkin.



Kuva 68. Muotti alipaineistettuna.

Kuvassa 69 pääplenumin pohja on irrotettu muotista ja pintaan on lisätty viimeistelykerros matriisiaineena käytettyä epoksia.



Kuva 69. Pääplenumin pohja valmiina tuloplenumin ja primääriputkien laippojen reikien työstämiseen.

Alkuperäisestä suunnitelmasta poiketen pääplenumin näkyvän puolen vastakaisille suorille pinnoille päätettiin lisätä palat Primetex® 43161 161 g/m<sup>2</sup> -hiilikuitukangasta miellyttävämmän kosmeettisen lopputuloksen vuoksi (kuva 70). Käytetty hiilikuitukudos on tyypiltään palttinasidoksinen.



Kuva 70. Pääplenumin kansi valmiina.

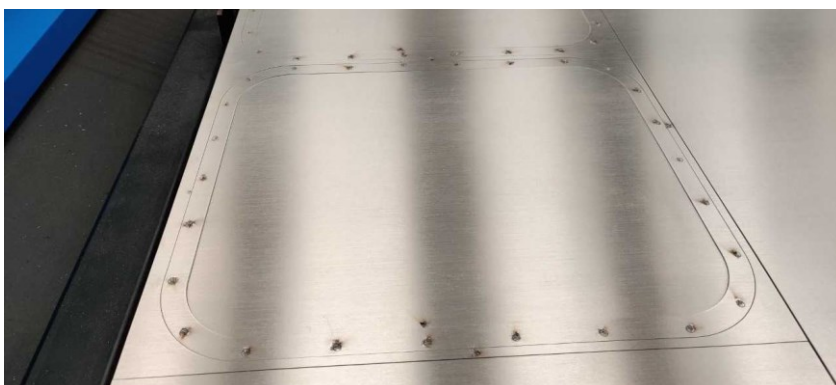
## 11 Pääplenumin laippojen valmistus

Pääplenumin laippojen valmistusmateriaaliksi valittiin sama lämpökäsitelty T6 AW-6082 -alumiini, josta myös primääriputkien laipat työstettiin.

Pääplenumin pohjan laipan valmistustarpeita varten hankittiin 15 mm:n vahvuisen levyaihio, josta Haas UMC-750 -työstökeskuksella koneistettiin ylimääräinen materiaali pois ja oikaistiin molemmat pinnat suoraksi. Kappaleen muotoon työstämisen lisäksi toteutettiin myös aikaisemmin suunniteltu pulttijako ja o-rengasura 3,15 mm:n halkaisijan o-rengastiivisteelle (kuva 71). Kannen kontaktipinta leikattiin 6 mm paksusta 6082-alumiinilevystä Platino Fiber Evo PLTF 1530 -laserleikkurilla (kuva 72).



Kuva 71. Pääplenumin pohjan laippa työstettynä Haas UMC-750:llä.



Kuva 72. Kannen laippa laserleikattuna.

## 12 Primääriputkien muutostyöt

Primääriputket ovat Kinslerin 80-luvulla magnesiumista valmistamia harvinaisia erikoisosia Buick IMSA GTP- ja Indycar-kilpa-autoihin (kuva 73). Kyseisten tuotteiden valmistusmäärät ovat olleet todella alhaisia ja osia on valmistettu lähtökohtaisesti ainoastaan tehdastallikäyttöön. Komponenttien harvinaisuudesta ja korkeasta arvosta johtuen pyrittiin primääriputkien muutostyöt toteuttamaan valmistusmenetelmillä, joilla saavutetaan virheetömiä ja tarkkoja lopputuloksia.

Sarja sisältää sylinteririvikohtaiset primääriputket läppärungoilla vivustoineen, laippaliitoksen imutorville ja mekaanisen polttoaineensyötön, jossa on kaksi suutinta sylinteriä kohden. Kohdejoneuvon moottori pohjautuu samanlaiseen Buick On-Center V6 -kilpamoottoriin, johon kyseinen Kinslerin imusarja on suunniteltu, mutta pakokaasuahtamisen ja teknologiakehityksen takia katsottiin järkeväksi modernisoida sitä paremmin omaan projektiin sopivaksi.

Mekaaninen polttonesteensyöttö haluttiin muuttaa pietsosähköisille suuttimille, läppärungot korvata yhdellä 87 mm:n sähkötoimisella kaasuläpällä ja päivittää kierrekokoja pääplenumin kiinnittämiseen suunnitelmien mukaisesti. Kaikki muutokset oli määrä toteuttaa niin, että primääriputket pystytään pitämään alkuperäisessä maalissa ja ulkonäkö pysyy mahdollisimman tehdastekoisena.



Kuva 73. Yhdysvalloissa 80-luvulla valmistetut Kinslerin N/A-imusarjat.

## 12.1 Polttonestesuuttimien valinta

Suunnittelu aloitettiin päättämällä tässä projektissa käytettäväksi sopiva suutinmalli, jonka mukaan koneistukset ja tiisteiden kontaktipintojen toleranssit tulitaiisiin määrittämään. Suuttimen kulmasta suhteessa imukanavaan ja materiaalin vahvuudesta johtuen tarvittiin mielellään 20–35 mm pitkällä kärjellä varustettu suutin, jotta polttoainesuihku saadaan suoraan keskelle putkivirtausta, jossa virtausnopeus on suurimmillaan. Syöttämällä polttoneste lähelle virtauksen ydintä parannetaan polttonesteen sekoittuvuutta ohivirtaavan ilmamassan sekaan.

Suutinmalliksi valittiin varmatoiminen ja yleinen Boschin valmistama EV14-sarjan suutin, jonka tiivistys imusarjan päähän on toteutettu 14 mm o-rengastiivisteellä ja suihkutuskärkiä on hyvä valikoima eripituisina kaikkiin käyttökohteisiin.

## 12.2 Suutinpaikkojen koneistus

Suutintyyppin valinnan jälkeen mitattiin tarkasti kanavien keskilinjan etäisyys toisistaan suuttimien kohdalla, joka oli tarkalleen 104 mm. Mittojen ottamisen jälkeen kiinnitettiin ensimmäinen Kinslerin tuote tukevasti Haas UMC-750 -työstökeskukseen manuaalipuristimella ja Autodeskin 360-Fusion-ohjelmistolla määritettiin mittojen mukaiset työstöradat.

Tiiveyden varmistamiseksi mitoitettiin koneistettavaksi reikien halkaisijaksi tavoittemitasta poiketen 13,6 mm, jotta pystyttiin varmistamaan pinnanlaatu työstön jäljiltä ja sovittamaan suutinta paikalleen. Näin toimien eliminoitiin riski halkaisijan liian suureksi työstämisestä ja voidaan ajaa viimeistelytyöstöllä kappale lopulliseen mittaan.

Ensimmäisen työstön jälkeen todettiin koneistuksen pinnan laadun olevan riittävän tasainen. Samalla sovittiin myös suutinta paikalleen todeten sopivuuden olevan tässä vaiheessa liian tiukka, kuten oli tavoitteenakin. Suuttimen o-rengas öljyllä voideltuna meni jämäkästi paikalleen, mutta tiivistetyypin huomioiden lyhentää liian jäykkä sovite o-renkaan elinkaarta.

Laatutarkastuksen jälkeen suoritettiin viimeistely, jolla lopulliseksi halkaisijaksi muutettiin 13,85 mm ja lisättiin pienet viisteet asennuspintaan, jotta minimoidaan o-renkaan rikkoutumisen riski teräväksi koneistettuun reunaan paikalleen asentaessa. Lopputuloksena työstöjälki oli erinomainen ja -0,15 mm:n soviteella suutin 14 mm:n O-renkaalla asentui paikalleen erinomaisen tiiviisti (kuva 74).



Kuva 74. Suutinpaikat koneistettuna Haas UMC-750 -työstökeskuksella.

### 12.3 Lämpärunkojen poistaminen

Kohdemootorin pakokaasuahtamisesta ja sähköteknisestä modernisoinnista johtuen päätettiin sylinteriryhmäkohtaiset mekaaniset läppärungot korvata yhdellä 87 mm:n sähkötoimisella kaasuläpällä. Kaasuläppien poikittaisakseli tässä Kinslerin mallissa ei olisi myöskään ollut sellaisenaan riittävän ilmatiivis ahdin-käyttöön vaan laakeroitu ainoastaan messinkisillä liukuholkeilla.

Lisäksi ITB-tyyppisessä ratkaisussa kaasuläppien poikittaisakselit ovat virtauspoikkipinta-alaltaan prosentuaalisesti suurempana virtausesteenä verrattuna ennen plenumia sijoitettavaan yhden halkaisijaltaan suuremman kaasuläpän akselin halkaisijaa suhteessa kaasuläpän kokoon.

Imusarjan kokonaispituuden määrittäminen ottomoottorissa perustuu keskeisesti imuventtiileiden sulkeutumisesta aiheutuneiden paluupulssien hyödyntämiseen, ja jotta primääriputkissa edestakaisin resonoivista pulsseista saavutetaan laskentakaavojen mukainen hyöty, ei imuventtiilin ja plenumin välisessä virtauskanavassa saisi olla pulssien etenemistä häiritseviä virtausesteitä.

Korvaamalla kaasuläppärungot yhdellä sähkötoimisella 87 mm:n kaasuläpällä voidaan systeemiä yksinkertaistaa ja lisäksi mahdollistaa MAP-sensorin käyttö (Manifold Absolute Pressure), joka ei läppärungoilla olisi onnistunut.

Ahdetuissa moottoreissa MAF (Mass Air Flow Sensor) -sensorin sijaan käytetään imuilman määrän arvioimiseen yleisesti MAP-sensoria. Moottorinohjausyksikkö mittaa MAP-sensorilla hetkellistä imusarjan painetta, josta yhdessä imuilman lämpötilan ja moottorin pyörintänopeustiedon perusteella määritetään ajotilanteeseen syötettävä polttonestemäärä ja sytytyksen ajoitus.

Läppärunkoakseleiden reikien tulppaaminen ja kierremuutostyöt jätettiin toteutettavaksi tämän opinnäytetyön jälkeen, sillä kohdemoottorin valmistumisella ei opinnäytetyön kirjoituksen aikaan ollut kiirettä ja kyseiset työvaiheet on helppo toteuttaa joustavalla aikataululla omilla työvälineillä.

## 13 Yhteenveto

Tämän insinööriyön tavoitteena oli suunnitella- ja valmistaa Buick Regal Turbo-T -kohdeajoneuvon pakokaasuauhimella varustettuun Stage 2 V6 -kilpamoottoriin imusarjakokoonpano pääosin 3D-tulostamalla ja muovilujitteisista komposiiteista sekä toteuttaa tarvittavia muutostöitä ennalta projektiin hankittuihin Kinslerin valmistamiin primääriputkiin.

Suunnittelutyöhön valmistautuminen edellytti ottomoottorin ilmanvaihtoon perehtymistä, kaasujen ominaisuuksiin tutustumista ja virtaustekniikan perusteiden opiskelua. Saatavilla olevaa kirjallisuutta ja omaa käytännön kokemusta soveltamalla pyrittiin suunnittelemaan imusarjakokoonpano mahdollisimman suorituskykyisin ominaisuuksin. Suunnittelutyössä käytettiin Catia V5 -ohjelmistoa, jolla suunniteltiin kaikki työssä valmistetut komponentit. Myös NX- ja Ultimaker Cura -ohjelmistoja käytettiin aktiivisesti komponenttien valmistusvaiheessa.

Valmistusprosesseiltaan työn oli todella monipuolinen ja pelkästään yhtäjaksoiseen komponenttien valmistamiseen koneiden tekemänä ja omatoimisesti kului yhdistettynä satoja työtunteja. Omia kädentaitoja päästiin soveltamaan 3D-tulostettujen muottien valmistelussa käyttökuntoon ja erityisesti komposiittiosien valmistamisessa.

Työkokonaisuuden laajuudesta huolimatta toteutettiin kaikki sallitun aikamarginaalin sisällä tehdyt työvaiheet Metropolia Ammattikorkeakoulun toimitiloissa itsenäisesti ja Metropolia Motorsport Formula Engineering -tiimin jäsenten avustuksella.

Imusarjakokoonpanon viimeistely käyttökuntoiseksi jäi osittain toteutettavaksi insinööriyön jälkeiseen aikaan, mutta projektin valmistumisen kannalta merkittävät pääkomponentit valmistettiin onnistuneesti ja suunnitellussa aikataulussa.

## Lähteet

- 1 Davis, Earl. 2001. Supercharging, turbocharging, & Nitrous Oxide. Motor-book an Imprint of MBI Publishing Company, ST. Paul, Minnesota, USA.
- 2 Baechtel, John. 2015. Practical Engine Airflow. Cartech Inc. USA.
- 3 Harralson, Joseph. 1995. Design of Racing and High Performance Engines. SAE International, Warrendale, United States.
- 4 Flat-Plane Cran DOHC LT6 to Power the 2023 Corvette Z06. Verkkoaineisto. Motortrend. <<https://www.motortrend.com/how-to/lt6-engine-2023-corvette-z06-details>>. Luettu 20.11.2021.
- 5 Tech Feature: Custom Racing Intake Manifolds. Verkkoaineisto. Chevy-Hardcore. <<https://www.chevyhardcore.com/tech-stories/engine/tech-feature-custom-racing-intake-manifolds/>>. Luettu 20.11.2021.
- 6 The Right Bellmouth. Verkkoaineisto. Performancebyie. <<https://performancebyie.com/blogs/ie-auto-blog/the-right-bellmouth>>. Luettu 12.12.2021.
- 7 Air – Composition and Molecular Weight. Verkkoaineisto. Engineeringtoolbox. <[https://www.engineeringtoolbox.com/air-composition-d\\_212.html](https://www.engineeringtoolbox.com/air-composition-d_212.html)>. Luettu 20.12.2021.
- 8 Honda Introduces New Sport Car Engine Based On Indycar Platform. Verkkoaineisto. Enginelabs. <<https://www.enginelabs.com/news/honda-introduces-new-sports-car-engine-based-on-indycar-platform/>>. Luettu 10.1.2022.
- 9 Suvanto, Kari. 2012. Tekniikan Fysiikka 1. Helsinki: Edita Publishing.
- 10 Newtonian vs. Non-Newtonian. Verkkoaineisto. Selectsynthetics. <<https://www.selectsynthetics.com/newtonian-vs.-non-newtonian.html>>. Luettu 25.1.2022.
- 11 The importance of newtonian and non-newtonian fluid dynamics in processing. Verkkoaineisto. Csideesigns. <<https://www.csidesigns.com/blog/articles/newtonian-and-non-newtonian-fluids>>. Luettu 26.1.2022.
- 12 How Air Flows. Verkkoaineisto. Bankspower. <[https://official.bankspower.com/tech\\_article/how-air-flows/](https://official.bankspower.com/tech_article/how-air-flows/)>. Luettu 5.2.2022.

- 13 Bernoulli's Equation. Verkkoaineisto. Nasa.  
<<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/bern.html>>. Luettu 15.2.2022.
- 14 Reynolds. Verkkoaineisto. Nasa.  
<<https://www.grc.nasa.gov/www/BGH/reynolds.html>>. Luettu 25.2.2022.
- 15 Hill, McGraw. 1998. Fluid Mechanics Source Book. McGraw-Hill, USA.
- 16 Boundary Layer. Verkkoaineisto. Nasa.  
<<https://www.grc.nasa.gov/www/K-12/airplane/boundlay.html>>. Luettu 29.2.2022.
- 17 1985 MARCH BUICK 85g GTP RACE CAR. Verkkoaineisto. Mecum.  
<<https://www.mecum.com/lots/CA0813-161547/1985-march-buick-85g-gtp-race-car/>>. Luettu 12.3.2022.
- 18 Teräsruuviin myötörajat. Verkkoaineisto. Ruuvihankinta. <<http://www.ruuvihankinta.fi/images/pdf/HRHMyotorajat.pdf>>. Luettu 17.3.2022.
- 19 Under the skin of the Force India VJM90. Verkkoaineisto. F1i.  
<<https://f1i.com/magazine/83838-skin-force-india-vjm09.html>>. Luettu 19.3.2022.
- 20 Honda's F1 Troubles explained. Verkkoaineisto. Racecarengineering.  
<<https://www.racecar-engineering.com/articles/f1/hondas-f1-troubles-explained/>>. Luettu 19.3.2022.
- 21 Introducing "Kegalodon": Shark Week Made Us Do It. Verkkoaineisto. Motortrend. <<https://www.motortrend.com/how-to/introducing-kegalodon-shark-week-made-us-do-it/>>. Luettu 22.3.2022.
- 22 Introduction To Simulated Backfire Testing. Verkkoaineisto. Raetech.  
<<https://www.raetech.com/Manifold/manifold.php#data>>. Luettu 22.3.2022.
- 23 Aluminium 6082. Verkkoaineisto. Highgrademetals. <<http://highgrademetals.co.nz/aluminium/aluminium-6082/>>. Luettu 25.3.2022.
- 24 O-renkaan uranmitoitus. Verkkoaineisto. tiivistekeskus. <<https://eshop.Tiivistekeskus.fi/fi/tuotteet/35/o-renkaan-uranmitoitus#tab-otherimages>>. Luettu 26.3.2022.
- 25 Skoda Octavia Wrc 1994. Verkkoaineisto. Skoda-storyboard.  
<[https://www.skoda-storyboard.com/en/211125\\_skoda-octavia-wrc-1999-4/](https://www.skoda-storyboard.com/en/211125_skoda-octavia-wrc-1999-4/)>. Luettu 26.3.2022.

- 26 Dyno Testing Fasts New Adjustable Intake Runner System. Verkkoaineisto. Motortrend. <<https://www.motortrend.com/how-to/1607-dyno-testing-fasts-new-adjustable-intake-runner-system/>>. Luettu 28.3.2022.
- 27 Superflow SF-1020 Manual. Verkkoaineisto. Superflow. <[https://superflow.com/wp-content/themes/SuperFlow2020/downloads/SF-1020\\_manual.pdf](https://superflow.com/wp-content/themes/SuperFlow2020/downloads/SF-1020_manual.pdf)>. Luettu 3.4.2022.
- 28 Airflow Testing. Verkkoaineisto. Performancetrends. <<http://performancetrends.com/PDFs/Smokey%20Yunick%20Airflow%20Testing.pdf>>. Luettu 4.4.2022.
- 29 Optimizing Induction Air. Verkkoaineisto. Kitplanes. <<https://www.kitplanes.com/optimizing-induction-air/>>. Luettu 6.4.2022.
- 30 What is additive manufacturing. Verkkoaineisto. 3dsourced. <<https://www.3dsourced.com/guides/what-is-3d-printing-additive-manufacturing/>>. Luettu 5.4.2022
- 31 Fused deposition modeling fdm 3d printing simply explained. Verkkoaineisto. All3dp. <<https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>>. Luettu 6.4.2022.
- 32 Akulon K224-HG6. Verkkoaineisto. Plasticfinder. <<https://plasticsfinder.com/api/document/tech/Akulon%C2%AE%20HRHG6/jMulu9Z7v/en/AkulonHRHG6enSI.pdf>>. Luettu 8.4.2022.
- 33 Property Data akulon K224-LPG6U. Verkkoaineisto. Plasticsfinder <<https://plasticsfinder.com/api/document/tech/Akulon%C2%AE%20HRHG6/jMulu9Z7v/en/AkulonHRHG6enSI.pdf>>. Luettu 8.4.2022.
- 34 Technical Data Sheet Ultrafuse PAHT CF15. Verkkoaineisto. Ultrafusefff. <[https://www.ultrafusefff.com/wp-content/uploads/2019/02/Ultrafuse\\_PAHT\\_CF15\\_TDS\\_EN\\_v3.5-1.pdf](https://www.ultrafusefff.com/wp-content/uploads/2019/02/Ultrafuse_PAHT_CF15_TDS_EN_v3.5-1.pdf)>. Luettu 10.4.2022.
- 35 Ultrafuse PP GF30. Verkkoaineisto. Ultrafusefff. <[https://www.ultrafusefff.com/wp-content/uploads/2019/06/BASF\\_PP-GF30\\_Product\\_Onepager\\_13-11-19\\_RZ.pdf](https://www.ultrafusefff.com/wp-content/uploads/2019/06/BASF_PP-GF30_Product_Onepager_13-11-19_RZ.pdf)>. Luettu 10.4.2022.
- 36 Ultrafuse PAHT CF15. Verkkoaineisto. Ultrafusefff. <[https://www.ultrafusefff.com/wp-content/uploads/2019/06/BASF\\_PAHT-CF15\\_Product\\_Onepager\\_13-11-19\\_RZ.pdf](https://www.ultrafusefff.com/wp-content/uploads/2019/06/BASF_PAHT-CF15_Product_Onepager_13-11-19_RZ.pdf)>. Luettu 10.4.2022.
- 37 Ultrafuse PP GF30. Verkkoaineisto. Ultrafusefff. <[https://www.ultrafusefff.com/wp-content/uploads/2021/12/Ultrafuse\\_PA6\\_GF30\\_TDS\\_EN\\_v1.1.pdf](https://www.ultrafusefff.com/wp-content/uploads/2021/12/Ultrafuse_PA6_GF30_TDS_EN_v1.1.pdf)>. Luettu 10.4.2022.

- 38 ISO 527 – muovien vetokokeet. Verkkoaineisto. Laboratuuri. <<https://www.laboratuuri.com/fi/testler/mekanik-testleri/iso-527-plastiklerin-cekme-testleri/>>. Luettu 12.4.2022.
- 39 Mekaaniset ominaisuudet. Verkkoaineisto. Aalto. <[https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1116571/mod\\_resource/content/2/3%20Mekaaniset%20ominaisuudet%20v2.pdf](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1116571/mod_resource/content/2/3%20Mekaaniset%20ominaisuudet%20v2.pdf)>. Luettu 12.4.2022.
- 40 ISO 178 Plastics – Determination of Flexural Properties. Verkkoaineisto. Eurolab. <<https://www.eurolab.net/fi/testler/malzeme-testleri/en-iso-178-plastikler-egilme-ozelliklerin-tayini/>>. Luettu 15.4.2022.
- 41 Saarela, Olli; Airasmaa, Ilkka; Kokko, Juha; Skrifvars, Mikael & Komppa, Veikko. 2007. Komposiittirakenteet. Muoviyhdistys Ry. Suomi.
- 42 Galvanic Corrosion of Metals Connected to Carbon Fiber Reinforced Polymers. Verkkoaineisto. Corrosionpedia. <<https://www.corrosionpedia.com/galvanic-corrosion-of-metals-connected-to-carbon-fiber-reinforced-polymers/2/1556>>. Luettu 16.4.2022.
- 43 Doctor Blades. Verkkoaineisto. Valmet. <[https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/process-improvements-and-parts/wpp\\_doctorblades.pdf](https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/process-improvements-and-parts/wpp_doctorblades.pdf)>. Luettu 17.4.2022.
- 44 Hiilikuitu. Verkkoaineisto. Kevra. <<https://kevra.fi/tuotteet/lujitteet/hiilikuitu/>>. Luettu 20.4.2022.
- 45 SR 1720 / SD 7840. Verkkoaineisto. Sicomin. <<http://sicomin.com/datasheets/product-pdf99.pdf>>. Luettu 22.4.2022.

