

Opinnäytetyö (AMK)

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

2023

Mikke Grönroos

Imusarjan suunnittelu ja mallinnus

– BMW M30B35



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

Toukokuu 2023 | 29 sivua, 4 liitesivua

Mikke Grönroos

Imusarjan suunnittelu ja mallinnus

- BMW M30B35

Tässä opinnäytetyössä perehdytään henkilöauton bensiinimoottorin imusarjan suunnitteluun liittyvään teoriaan ja mallinnettiin teorian pohjalta imusarja jälkikäteen turboahdettuun BMW:n M30B35-moottoriin. Työssä laskettiin olennaisia mittoja imusarjan osille ja tehtiin teorian pohjalta arviointeja imusarjan ominaisuuksiin liittyen.

Työn alkuosassa käydään läpi nelitahtimoottorin toimintaperiaatetta, ilman virtausominaisuuksia, ilman tiheyden vaikutusta moottorin toimintaan sekä imuputkiahtamisen perusideaa. Lisäksi perehdytään imusarjan eri komponenttien suunnittelumenetelmiin. Imusarjan imuputkille laskettiin optimaaliset mitat halutulle kierrosnopeudelle, jolla imuputkiston paineaallot saadaan hyödynnettyä imuputkiahtamisen muodossa.

Imusarjan mallinnuksessa pyrittiin teorian avulla antamaan moottorille mahdollisimman hyvät mahdollisuudet tasaiseen sylinteritäyttöön. Työn mallinnuksessa tehtiin teorian avulla valintoja, joilla imusarjan virtaavuutta parannetaan, ja tilankäyttö optimoidaan.

Asiasanat:

suutin, suunnittelu, moottori

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Automotive and Transportation Engineering

May 2023 | 29 pages, 4 pages in appendices

Mikke Grönroos

Design and Modeling of an Intake Manifold

- BMW M30B35

This thesis investigates the theory of designing an intake manifold for a combustion engine of a passenger vehicle. The theory was used to model an intake manifold for a BMW M30B35 engine converted from a naturally aspirated engine to a turbocharged one. Based on the theory, calculations were conducted for the necessary parts of the intake to set and evaluate its functional properties.

The first part covers the basic working principle of a four-stroke engine, the flow characteristics for air, the effects of air density for engine operation and the basic idea of wave action tuning an inlet pipe. In addition, this work covers different design methods for the different parts of the intake manifold. For example, calculations were conducted to optimize the length for the intake primary pipes to fully utilize the effects of the wave action method on the engine performance at the desired engine speed.

The design elements gathered from the research were incorporated into the modelling of the intake manifold assembly. The main goal was to ensure an even air flow into each individual cylinder and at the same time to optimize the use of space within the engine compartment.

Keywords:

injector, design, engine

Sisältö

1 Johdanto	7
2 Teoria	8
2.1 Nelitahti-ottomoottorin työkierto	8
2.2 Ilman tiheys	8
2.3 Ilman virtauksen käyttäytyminen putkessa	10
2.4 Imuputkiahtaminen	12
3 Imusarjan suunnittelu	13
3.1 Imusarja	13
3.1.1 Kaasuläppäkotelo	14
3.1.2 Kokoojakammio	15
3.1.3 Imuputken pään muoto	16
3.1.4 Imuputki	17
3.1.5 Polttoainesuuttimen sijoitus	19
3.2 Imusarjan mitoitus	20
3.2.1 Imuputken mitoitus	20
3.2.2 Imuputkenpään mitoitus	21
3.2.3 Kokoojakammion tilavuus	21
4 Imusarjan mallinnus	22
4.1 Rajoitteet mallinnukselle	22
4.2 Imusarjan laippa	23
4.3 Imuputkien mallinnus	23
4.4 Imuputken pään mallinnus	24
4.5 Kokoojakammion mallinnus	25
4.6 Kokoonpano	25
5 Lopuksi	27
Lähteet	28

Kaavat

Kaava 1. Tiheyden kaava (Aerodynamiikka n. d.).	9
Kaava 2. Kaasun yleinen tilavuuden yhtälö (Peda.net n. d.).	9
Kaava 3. Kaasun yleinen tilavuuden yhtälö.	9
Kaava 4. Kaasun yleinen tilavuuden yhtälö johdettuna paineen ratkaisuun.	9
Kaava 5. Helmholtzin resonaattori (Winterbone & Pearson 1999, 161).	18
Kaava 6. Helmholtzin resonaattori kierrosluvun ratkaisuun (Winterbone & Pearson 1999, 15).	20
Kaava 7. Imukanavan pituuden ratkaisu.	20
Kaava 8. Imukanavan pituuden ratkaisu.	20
Kaava 9. Imuputken pituuden ratkaisu.	21
Kaava 10. Imuputken sisääntulon halkaisija.	21

Kuvat

Kuva 1. Laminaarinen ja turbulenttinen virtaus (Metropolia n. d.).	11
Kuva 2. BMW E30:n moottoritila (Hawk Classics n. d.).	13
Kuva 3. Ferrari F430 Spider imusarja (Maranello Classic Parts n. d.).	14
Kuva 4. M30B35-kaasuläppäkotelot.	14
Kuva 5. M30B35-imusarja.	16
Kuva 6. Imuputken pään vaikutus massavirtaan (Performance by Integrated Engineering n. d.).	17
Kuva 7. Suuttimien asemointi imuputkiin (MotorTrend 2007).	19
Kuva 8. BMW E32:n moottoritila (The Autopian 2023).	22
Kuva 9. M30B35-sylinterikansi (Athousakis n. d.).	23
Kuva 10. Imusarjan laippa mallinnettuna.	23
Kuva 11. Imuputket mallinnettuina.	24
Kuva 12. Imuputken päät mallinnettuina kokoojakammion pohjaan.	25
Kuva 13. Kokoojakammio mallinnettuna.	25
Kuva 14. Imusarjan valmis kokoonpanokuva.	26

Liitteet

Liite 1. Imusarjan laippa	30
Liite 2. Imuputket	31
Liite 3. Imusuppilot	32
Liite 4. Kokoojakammio	33

1 Johdanto

Tämän insinööriyön tarkoituksen on suunnitella ja mallintaa imusarja, jolla parannetaan henkilöauton bensiinimoottorin imuilman saantia, sekä tasataan sylintereille ohjautuvaa ilmavirtaa. Imusarjan suunnittelulla pyritään myös tehostamaan moottorin tilankäyttöä, kun moottori muutetaan vapaastihengittävästä tyypistä ahdetuksi. Imusarja mitoitetaan sopimaan BMW:n E30-korimallin moottoritilaan.

Imusarja mallinnettiin BMW:n M30B35-moottoriin. Moottori on kuusisylinterinen 12-venttiilinen rivimoottori, joka on jälkikäteen turboahdettu. Moottoria ohjataan sähköisellä ohjainlaitteella ja polttoaine suihkutetaan imusarjaan ennen imuventtiiliä. Imusarjan mallinnus toteutettiin Rhino 7 3D -mallinnusohjelmalla ja mitoitukseen käytettiin eri lähteistä saatuja kaavoja sekä moottorin asettamia tilarajoitteita. Imusarja oli tarkoitus simuloida CFD-tietokoneohjelmalla, jonka aikarajoitteet lopulta estivät, joten imusarjan muotoilu perustuu teoriaa käsittelevistä lähteistä saatuun tietoon.

2 Teoria

2.1 Nelitahti-ottomoottorin työkierto

Nimitys ottomoottori viittaa mäntämoottoriin, jossa sylinteriin tuotu polttoaineilmaseos poltetaan ulkoisen sytytysjärjestelmän avulla, ja palotapahtumasta saatu lämpöenergia muutetaan mekaaniseksi energiaksi. Tämä puolestaan muutetaan kampikoneiston avulla pyöriväksi liikkeeksi, käytännössä kampiakselin vääntömomentiksi. Nelitahtimoottorin yksi työkierto sisältää kaksi kokonaista kampiakselin kierrosta (720°). Työkierto jaetaan moottorin nimen mukaisesti neljään tahtiin, jotka ovat: imutahti, puristustahti, työtahti ja poistotahti. (Bell 2007a, 10.)

Imutahdin aikana mäntä liikkuu sylinterissä alaspäin, ja männän liikkeestä syntyvällä alipaineella imetään imuventtiilin kautta polttoaineilmaseosta sylinteriin. Männän saavutettua alakuolokohtansa, alkaa puristustahti, jonka aikana imu- ja pakuventtiilit ovat kiinni, ja mäntä liikkuu sylinteriä ylöspäin puristaen polttoaine-ilma-seoksen. Puristettu polttoaine-ilma-seos sytytetään hieman ennen männän yläkuolokohtaa, jolloin palamisesta johtuva ilmaseoksen voimakas laajeneminen pakottaa alkaa pakottaa mäntää takaisin alaspäin. Tästä alkaa työtahti, jonka aikana palotapahtumasta syntynyt lämpöenergia muutetaan mekaaniseksi. Männän saavuttaessa taas alakuolokohtansa, alkaa työkierron viimeinen vaihe eli poistotahti. Poistotahdin aikana pakuventtiili on auki, ja ylöspäin liikkuvalla männällä pumpataan sylinteristä pakokaasu pakokanavaan, jonka jälkeen työkierto alkaa taas alusta. (Bell 2007a, 10.)

2.2 Ilman tiheys

Moottori on käytännössä suuri ilmapumppu, jonka toiminnan tehokkuuteen moottorin sisään vedetyn ilman tiheys vaikuttaa. Ulkoilman tiheydellä on suuri vaikutus moottorin tuottamaan maksimitiehen. Tiheyteen vaikuttavia tekijöitä

ovat ilman lämpötila, korkeus merenpinnasta ja ilman kosteus. (Aerodynamiikka n. d.)

Ilman tiheys ρ tarkoittaa sen massan m ja tilavuuden V suhdetta, jolloin:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Kaava 1. Tiheyden kaava (Aerodynamiikka n. d.).

Tiheyden ymmärtämiseksi on myös hyvä tietää kaasujen yleinen tilavuuden yhtälö:

$$pV = nRT$$

Kaava 2. Kaasun yleinen tilavuuden yhtälö (Peda.net n. d.).

Kaavoissa 1 ja 2 p on paine, n ainemäärä, R moolinen kaasuvakio ja T lämpötila Kelvineinä. Koska tiedetään ilman moolimassan olevan noin $28,966 \frac{g}{mol}$, voidaan kaavaan merkityn moolisen kaasuvakio $R = 8,314510 \frac{J}{mol K}$ muuttaa muotoon $R = 287 \frac{J}{kg K}$.

Kaasujen yleinen tilavuuden yhtälö voidaan ilmoittaa muodossa:

$$pV = mRT$$

Kaava 3. Kaasun yleinen tilavuuden yhtälö.

Kaavaa muuttamalla saadaan muodostettua yhteys tiheyden ρ , paineen p ja lämpötilan T välille, kun kaava muutetaan muotoon:

$$p = \rho RT$$

Kaava 4. Kaasun yleinen tilavuuden yhtälö johdettuna paineen ratkaisuun.

Kaavasta helppo todeta, että ilman paineen laskiessa tai lämpötilan noustessa, ilman tiheys laskee.

Merkittävänä tekijänä ilman tiheyteen vaikuttaa korkeus merenpinnasta. Noustessa korkeammalle merenpinnan tasosta, ilma niin sanotusti ohenee, eli ilman paine laskee. Moottorin toiminnan kannalta on siis hyvä ymmärtää korkeuserojen vaikutus ilmanpaineeseen, sillä se korreloituu suoraan moottorin tuottamaan maksimitehoon. Imusarjaa suunniteltaessa korkeudesta johtuvaan ilmanpaineen putoamiseen on mahdotonta vaikuttaa, mutta esimerkiksi pakokaasuahtimen avulla voidaan moottorin hapen saantia parantaa. (Bell 2007a, 1–2.)

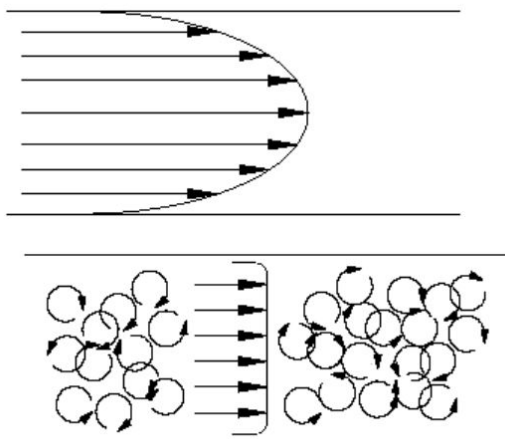
Toisena yhtä tärkeänä seikkana on huomata imuilman lämpötilan vaikutus moottorin toimintaan. Jos moottorille syötettävä ilma on kuumaa, menetetään huomattava määrä happea kasvaneen tilavuuden takia. Imuilman lämpötilan hallintaa voidaankin pitää yhtenä suunnittelu kriteerinä uutta imusarjaa suunniteltaessa. (Bell 2007a, 2–3.)

Ilman kosteuden kasvaessa, kasvaa myös ilmanpaine. Paineen nousu selittyy ilmaan sekoittuneesta vesihöyrystä, joka puolestaan vähentää hapen määrää ilmassa, ja laskee siis ilman tiheyttä. Tosin ilman kosteuden vaikutus moottorin tuottamaan maksimitehoon on huomattavasti vähäisempi, kuin korkeuden ja lämpötilan vaikutus. Imuilman kosteutta ei huomioida imusarjan suunnittelussa. On kuitenkin hyvä ymmärtää, että moottorin kannalta mahdollisimman happirikas, viileä ja kuiva imuilma on paras vaihtoehto. (Bell 2007a, 3.)

2.3 Ilman virtauksen käyttäytyminen putkessa

Ilman virtaus putkessa on putken keskellä nopeampaa kuin putken reunoilla, joten virtausta voidaan tutkia virtauksen keskimääräisen nopeuden avulla. Ilman virtaukseen vaikuttavia seikkoja ovat putken pinnan karheus, mutkat putkistossa, supistukset ja virtauksien haarautumiset ja yhtymiset.

Virtaus voi olla joko laminaarista tai turbulenttista (Kuva 1).



Kuva 1. Laminaarinen ja turbulентtinen virtaus (Metropolia n. d.).

Kuvassa 1 ylempänä on havainnollistettuna laminaarisen virtauksen virtausjakauma. Laminaarisessa virtauksessa ilma virtaa putkessa virtaviivaisesti putken pituussuuntaan ja sen maksiminopeus on noin kaksi kertaa keskimääräinen nopeus. Putken seinämän karheus ei vaikuta laminaariseen virtaukseen vaan laminaarisen virtaukseen vaikuttaa lähinnä virtausnopeus. Nopeuden kasvaessa liikaa, muuttuu virtaus kuitenkin pyörteileväksi eli turbulenttiseksi.

Turbulenttisessa virtauksessa ilman osaset liikehtivät epämääräisesti, mutta virtausnopeus pysyy keskimääräisenä virtaavaan suuntaan. Turbulenttisen virtauksen yksittäisten eri virtausnopeuksien jakauma on laakeampi kuin laminaarisessa virtauksessa, ja maksiminopeuskin on noin 1,2 kertaa keskimääräinen nopeus.

Laminaarisen ja turbulenttisen virtauksen välissä on siirtymäalue, jolloin virtaus on epästabili ja voi jonkin ulkoisen tekijän toimesta muuttua laminaarisesta turbulenttiseksi ja päinvastoin, vaikka virtausnopeus ei kasvaisikaan.

Virtausnopeuksista onkin hyvä olla perillä ahdetun moottorin imukanavistoa mitoittaessa, sillä väärin mitoitettussa putkistossa virtaus saattaa muuttua turbulenttiseksi. Turbulenttinen virtaus taas puolestaan rajoittaa ahtimelta tulevaa ilmamäärää. (Metropolia n. d., 1; Aerodynamiikka n. d.)

2.4 Imuputkiahtaminen

Polttomoottori tarvitsee toimiakseen polttoainetta ja ilmaa. Polttoaineen määrää rajoittaa käytettävissä oleva ilma ja sylinterin imemällä saama ilmanpaine. Ilman tiheys ei lähtökohtaisesti kuitenkaan voi ylittää ulkopuolella vallitsevaa ilmanpainetta tai tiheyttä. Ahtamalla voidaan lisätä moottorin täytösastetta ja myös suorituskykyä.

Varsinkin vapaasti hengittävien moottoreiden imusarjojen suunnittelussa sovelletaan paljon niin sanottua imuputkiahtamista, mutta samaa menetelmää voidaan soveltaa myös pakokaasu- tai mekaanisella ahtimella varustetun moottorin imusarjan suunnitteluun. Menetelmällä voidaan esimerkiksi parantaa moottorin toimintaa alemmilla kierroksilla tai tehostaa moottorin kaasun vaihtoa ahtimen kokoa kasvattamatta.

Imuputkiahtaminen perustuu imuventtiin avautumisesta ja sulkeutumisesta syntyvien paineaaltojen hyödyntämiseen. Menetelmässä yksittäisen sylinterin primääriputki voi päättyä joko ulkoilmaan tai yhteiseen kokoojakammioon. Primääriputken ja mahdollisen kokoojakammion ajatellaan olevan eräänlainen resonaattori, jolla on kokoonpanon mittaan sidottu ominaistaajuus. Imuilman paineaallot taas kulkevat imuputkistossa omalla taajuudellaan, joka puolestaan määrittyy moottorin kierrosluvun mukaan. Kun imusarjan ominaistaajuus ja imusarjan paineaaltojen taajuus on sama, joutuu järjestelmä resonanssiin, jolloin sylinterin täytös tehostuu ja sylinteriin saadaan luotua normaali ilmanpainetta suurempi paine. Moottorin luonnollisen kaasunvaihdon optimoimiseksi paras ratkaisu onkin muuttuvapituuksinen imusarja, jolloin paineaaltojen paine-energia pystytään hyödyntämään laajalla kierrosalueella. (Winterbone & Pearson 1999, 3–5; Mauno 2002, 148–149; Bell 2007b, 15–16; Baechtel 2015, 174–180.)

3 Imusarjan suunnittelu

Imusarja suunnitellaan BMW:n valmistamaan M30B35-moottoriin, jonka iskutilavuus on 3430 cm³. Moottorin on alun perin 735 E32 BMW:stä ja tehtaalta tullessaan moottori on vapaasti hengittävä. Moottori muutetaan turboahdetuksi ja asennetaan pienempikokoiseen BMW:n E30-koriin. Tämän takia imusarjalle käytettävissä oleva tila on rajoitetumpi kuin isommassa autossa. Tästä huolimatta E30 moottorin tilan vasemmassa etunurkassa (Kuva 2) on paljon vapaata tilaa kaasuläppäkotelon uudelleen asemointia varten. Samalla pystytään paineputkiston reititystä parantamaan.

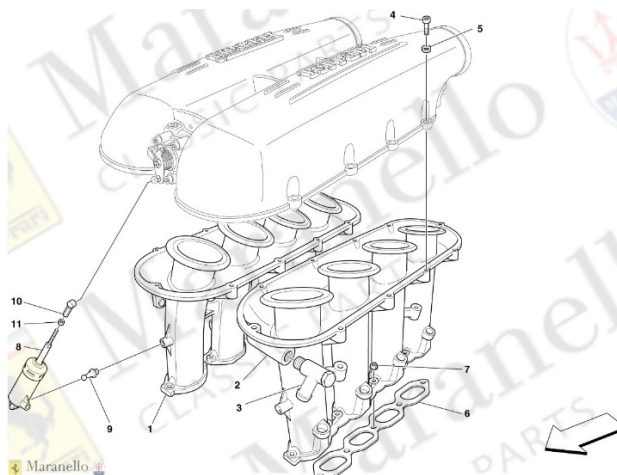


Kuva 2. BMW E30:n moottoritila (Hawk Classics n. d.).

3.1 Imusarja

Imusarjan tehtävänä on toimittaa moottorille tarvittava ilmamassa ja jakaa se sylintereiden kesken. Moottorin optimaalisen toiminnan kannalta ilmamassa tulisi jakaa mahdollisimman tasaisesti jokaiselle sylinterille. Imusarjan suunnittelussa joudutaan kuitenkin usein tekemään kompromisseja, jotta saadaan huomioitua esimerkiksi tilarajoitteet, päästöjenhallintalaitteet, äänitasot ja valmistuskustannukset.

Kuvassa 3 on esitetty imusarjan pääosat, jotka ovat primääriputket ja kokoojakammio.

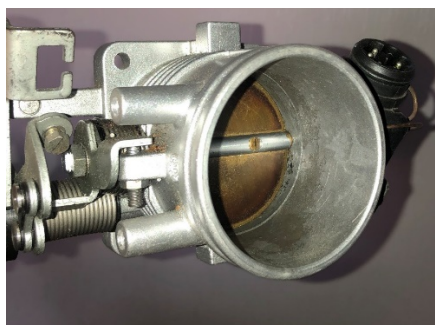


Kuva 3. Ferrari F430 Spider imusarja (Maranello Classic Parts n. d.).

Imusarjan yhteyteen mielletään usein siihen liitettäviä osia esimerkiksi suuttimet ja kaasuläppäkotelo. Joissain tapauksissa imusarja voi myös koostua pelkästään primääriputkista, jolloin jokaisen sylinterin primääriputki päättyy suoraan ulkoilmaan. Tämän tyyppistä konstruktiota käytetään pääasiassa vain kilpamoottoreissa, koska silloin moottoria käytetään paljolti vain korkeilla kierrosalueilla. (Winterbone & Pearson 1999, 1–5; Baechtel 2015, 180.)

3.1.1 Kaasuläppäkotelo

Kaasuläppäkotelossa on tiettyyn halkaisijaan porattu sen läpikulkeva kanava, jonka virtausta ohjataan kanavan halki kulkevan akselin avulla kääntyvällä kaasuläpällä. Kuvassa 4 on esitettynä M30B35-moottorin alkuperäinen kaasuläppäkotelo, jota tullaan hyödyntämään lopullisessa kokoonpanossa.



Kuva 4. M30B35-kaasuläppäkotelo.

Ottomoottorissa kaasuläpän avulla määritetään moottorin kuormituksen tila. Toisin sanoen kaasuläpällä rajoitetaan moottorille syötettävän ilman määrää ajotilanteen mukaisesti. Kaasuläppäkotelon kanavan poikkipinta-alalla on suuri vaikutus myös moottorin käytettävyydelle. Kaasuläppiä voi olla kokoonpanon mukaan yksi tai useampia.

Koska kaasuläppä toimii imuilman rajoittimena, voi syntyä käsitys, että moottoria viritettäessä tulisi imusarjaan asentaa mahdollisimman suurella poikkipinta-alalla oleva kaasuläppä. Tällä kuitenkin on kääntöpuolensa, eli kasvatettaessa kaasuläpän halkaisijaa tietyn pisteen ylitse, heikennetään moottorin käytettävyyttä sekä säädettävyyttä moottorin alemmilla kierroksilla. Olennaisempaan olisikin vähentää kaasuläpän aiheuttamaa häiriötä imuilman virtaukseen. Esimerkiksi mikäli kaasuläpän akseli on kohtuuttoman paksu, tai akselin läpän kiinnitysruuvit ulkonevat akselista paljon, voidaan näitä hiomalla ohentaa ja näin ollen vähentää kaasuläpän aiheuttamaa virtaushäviötä läpän ollessa täysin auki. (Bell 2007b, 11–14.)

3.1.2 Kokoojakammio

Nimensä mukaisesti kokoojakammion tarkoituksena kerätä imuilma eräänlaiseen säiliöön ja jakaa ilma sylinterille. Tärkein ominaisuus kokoojakammion onkin imuilman tasainen jako jokaiselle sylinterille. Tasaisen sylinteritäytön kannalta kaasuläppäkotelon kannattaisinkin sijoittaa keskelle kokoojakammiota, kuten on BMW:n alkuperäisessä imusarjassakin tehty (Kuva 5), mutta usein tilanpuute ja muut rajoitteet pakottavat sijoittamaan kaasuläpän toiseen päähän kokoojakammiota.



Kuva 5. M30B35-imusarja.

Vaikkakin kyseinen konstruktio ei sylinteritäytöksen kannalta kuulosta toimivalta ratkaisulta, on tämän tyyppinen imusarja varsin toimiva ratkaisu. Toinen olennainen asia kokoojakammion tilavuus. Tilavuuteen liittyy paljon tulkintaa ja arvailua. Lähteen alkuperän mukaan vaihdellen kokoojakammion koon suositellaan olevan suunnilleen 0,5–3 kertaa moottorin iskutilavuus. Ahdetuissa moottoreissa suuremmalla kokoojakammion tilavuudella on saavutettu korkeampi maksimiteho, mutta tilavuuden kasvaessa tehdään kompromissi moottorin käytettävyyden kanssa, kuten todettiin suuren kaasuläpänkin tapauksessa. (Bell 2007b, 14–15; MW Steel n. d.)

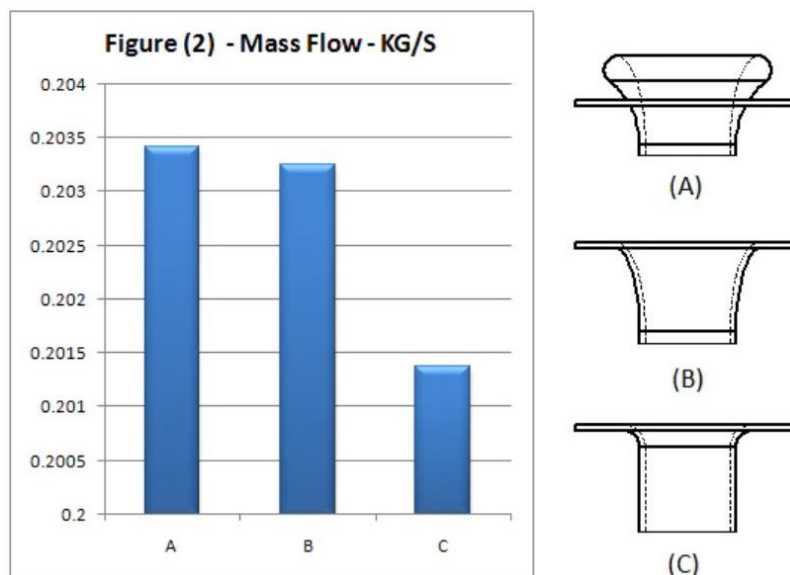
3.1.3 Imuputken pään muoto

Ilmamassan siirryessä kokoojakammion imuputkiin, kasvaa ilman virtausnopeus tilavuuden pienetessä. Virtausnopeuden kasvaessa imuputken pään kohdalla virtaus haluaa seurata putken pintaa, mutta jos siirtymä imuputkeen on terävä tai hyvin pienellä reunapyörityksellä, irtoaa ilmavirta putken pinnalta rajoittaen imuputken tehollista halkaisijaa. Putken tehollista halkaisijaa voidaankin olennaisesti parantaa sen geometrisella muodolla. Aiheesta löytyy paljon eri kannanottoja ja eriäviä mielipiteitä. Tutkimukset kuitenkin tukevat selkeimmin hyvin mitoitettua elliptistä muotoa.

Tutkimuksissaan Gordon P. Blair ja W. Melvin Cahoon (n.d. 34–37) osoittivat, että parhaat mitat elliptiselle imusuppilolle saadaan, kun imuputkenpään halkaisija ja imusuppilon korkeus ovat samansuuruiset ja suppilon sisääntulohalkaisija on 2,13 kertaa imuputkenpään halkaisija.

Tutkimusmateriaalit myös näyttäisivät, että kohottamalla imuputken pää kokoojakammioista imusuppilon avulla saavutetaan paras massavirta imuputkeen. Hyvänä kohotetun suppilon ulkoreunan pyöristysten kulmasäteenä pidettiin suppilon sisääntulohalkaisijaa kerrottuna 0,08:lla.

Kohotetun ja pinnan tasoisen imusuppilotyypin ero on kuitenkin hyvin marginaalinen verrattuna muihin suppilon muotoon liittyviin seikkoihin kuten voidaan hyvin todeta kuvasta 3. (Performance Integrated Engineering n. d.)



Kuva 6. Imuputken pään vaikutus massavirtaan (Performance by Integrated Engineering n. d.).

3.1.4 Imuputki

Imuputkea voidaan pitää sylinterikannen imukanavan jatkeena. Muihin imusarjan osiin nähden imuputkilla on suurin vaikutus moottorin ominaisuuksien kannalta. Varsinkin vapaasti hengittämissä moottoreissa imuputkien optimoimisella voidaan huomattavasti parantaa moottorin hyötysuhdetta.

Tämän takia muuttuvapituuksinen imusarja onkin hyvin yleinen varuste modernissa henkilöauton moottorissa. Imuputkien mitoitus määrää mille kierrosalueelle moottorin tehontuotto asettuu. Hyvänä nyrkkisääntönä voidaan ajatella, että mitä ohuemmat ja pidemmät imuputket ovat, sitä alemmille kierroksille tehoalue sijoittuu. Vastaavasti paksummilla ja lyhyemmällä saadaan paras tehon tuotto korkeilta kierroksilta. Kiinteällä imusarjan rakenteella joudutaankin usein tekemään kompromissi moottorin käyttöalueen suhteen.

Imuputkien mitoitukseen on olemassa useita poikkeavia kaavoja, joilla imuputken todellista vaikutusta moottorin kaasun vaihtoon pyritään arvioimaan. (Winterbone & Pearson 1999, 5, 158–163; Huhtamaa ym. 2007, 14–16.) Näistä ehkä tunnetuin on Helmholtzin resonaattorin kaava:

$$f = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{F}{lV}}$$

Kaava 5. Helmholtzin resonaattori (Winterbone & Pearson 1999, 161).

Kaavassa 5 putken taajuus f [Hz] määritetään äänennopeuden a [m/s], putken pienimmän poikkipinta-alan F [m²], putken pituuden l [m] ja sylinterintilavuuden V [m³] avulla. Helmholtzin menetelmä on varsin yksinkertainen ja antaa ratkaisun vain yhdelle kierrosluvulle. Kaava toimii myös pohjana monelle muulle laskentamenetelmälle, joissa pyritään huomioimaan useampia muuttujia kaasunvaihdon aikana. (Winterbone & Pearson 199, 161.)

Kiinteällä imusarjan rakenteella joudutaankin tekemään kompromissi moottorin käyttöalueen suhteen. Turboahdetuissa moottorissa pärjätään yksinkertaisemminkin suunnittelumenetelmillä, sillä turboahdinten pumppaama ilma on huomattavasti lineaarisempaa kuin normaalissa imemällä tuotetussa ilmavirrassa. Kevyesti tieliikennekäyttöön ahdetussa moottorissa pidetäänkin hyvänä ratkaisuna pitkällä imuputkillä varustettua imusarjaa. Pitkät imuputket parantavat moottorin tehoaluetta alemmilla kierroksilla, kun turboahdistimesta ei vielä saada hyötyä ja kierrosten kasvaessa ahdin puolestaan tehostaa

moottorin tehontuottoa, jolloin tehoaluetta saadaan tasattua. (Winterbone & Pearson 1999, 5; Bell 2007b, 16; Baechtel 2015, 180.)

3.1.5 Polttoainesuuttimen sijoitus

Polttoainesuuttimen sijoittamiseen imusarjasuihkutteisessa moottorissa ei ole olemassa yhtä oikeaa ratkaisua. Suuttimen asentoa mietittäessä tavoitteena on saada suuttimen polttoainesuihku mahdollisimman tehokkaasti sekoittumaan imuilmaan. Suutin tulisi asentaa mahdollisimman virtaviivaisesti imuilman virtauksen suuntaisesti korkeintaan 45 ° kulmaan imukanavaan nähden ja mahdollisimman lähelle imuventtiileitä kuten kuvassa 7 oikealla.



Kuva 7. Suuttimien asemointi imuputkiin (MotorTrend 2007).

Toisaalta kun suutin asennetaan kauemmas imuputkeen, kuten kuvassa 7 vasemmalla tai kohtisuoraan imuputkenpäähän, voidaan polttoainesuihkulla jäähdyttää imuputkea ja imuilmaa tehokkaammin pidemmältä matkalta. Tosin kauemmas asennettu polttoainesuutin usein johtaa huonompaan tyhjäkäyntiin, kun imuputkiston ilmavirran virtausnopeus ei riitä sekoittamaan polttoaineilmaseosta täydellisesti. Joissain tapauksissa myös useamman suuttimen käyttö voi olla viisasta, jolloin esimerkiksi toinen pienempi suutin, jolla moottoria käytetään matalalla moottorin kuormituksella, voidaan asentaa lähelle sylinterikantta ja suurempi suutin kauemmas imuputkeen. (MotorTrend 2007.)

3.2 Imusarjan mitoitus

Imusarja mitoitetaan aiemmin käsiteltyjen menetelmien mukaisesti ja moottorin tarpeellisiin lähtöarvoihin perustuen. Moottori, johon imusarja suunnitellaan, on muutettu turboahdetuksi ja sijoitetaan pienemmän auton koriin, kuten osion alussa mainittiin. Pienemmän moottorin seurauksena imusarjan tilavaatimukset lisääntyvät. Kaasuläppäkotelon suuntaaminen korin etuosaan aiheuttaa osaltaan myös tilarajoitteita.

3.2.1 Imuputken mitoitus

Imuputken mitoitukseen käytetään aiemmin mainittua Helmholtzin kaavaa. Kaavasta käytetään muotoa, jossa taajuuden sijasta ratkaistaan pyörimisnopeus n [1/min].

$$n = \frac{15a}{\pi} \sqrt{\left(\frac{F_p}{l_p V_c}\right)}$$

Kaava 6. Helmholtzin resonaattori kierrosluvun ratkaisuun (Winterbone & Pearson 1999, 15).

Kaavasta saadaan haluttu imuputken pituus l_p

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

Kaava 7. Imukanavan pituuden ratkaisu.

jolloin,

$$l_p = \frac{15^2 * \left(343 \frac{m}{s}\right)^2 * (13,425 * 10^{-4}) m^2}{\left(5500 \frac{1}{min}\right)^2 * \pi^2 * (5,712 * 10^{-4}) m^2} \approx 0,208 m$$

Kaava 8. Imukanavan pituuden ratkaisu.

Kaavasta saatu tulos kertoo optimaalisen koko imukanavan mitan halutulla kierrosluvulla. Tuloksesta voidaan vähentää sylinterikannen imukanavan mitta, joka on noin 0,065 m. Näin ollen imuputken mitaksi saadaan:

$$0,208 \text{ m} - 0,065 \text{ m} = 0,143 \text{ m}$$

Kaava 9. Imuputken pituuden ratkaisu.

3.2.2 Imuputkenpään mitoitus

Imuputkenpää muotoillaan Blairin ja Cahoonin (n. d., 37) esittämän mitoitusmenetelmän avulla. Imuputken halkaisija tulee olemaan 45 mm, joten kaavan mukaisesti elliptisen profiilin pituudeksi valitaan myös 45 mm. Elliptisen profiilin sisääntulo halkaisija taas saadaan kertomalla valittu putken halkaisija 2,13 kertaiseksi.

$$45 \text{ mm} * 2,13 = 95,85 \text{ mm}$$

Kaava 10. Imuputken sisääntulon halkaisija.

Ulkoreunan pyöritys jätetään imuputkenpäästä toteuttamatta, sillä imusarjanlaippa, imuputket ja kokoojakammion pohja tullaan koneistamaan yhtenäiseksi kappaleeksi. Integroimalla imuputket kokoojakammion pohjan tasoon helpottuu osan valmistus. Jättämällä putken päät kokoojakammion pinnan tasoon parannetaan myös suuttimien asemointia.

3.2.3 Kokoojakammion tilavuus

Kokoojakammion tilavuudelle ei oikeastaan aseteta tiukkoja rajoja. Tarkoituksena on vain välttää kohtuuttoman suurta kokoojakammiota, mutta jo moottoritilan asettamat tilavaatimukset käytännössä estävät tämän. Tilavuus pyritään saamaan vähintään noin 1,15 kertaiseksi moottorin iskuutilavuuteen nähden. Todellinen tilavuus selviää vasta mallinnuksen valmistuttua, kun kaikki tilavaatimukset on täytetty.

4 Imusarjan mallinnus

Imusarjan mallinnus toteutettiin Rhino 7 3D -mallinnusohjelmalla. Mallinnusohjelma on hyvin monipuolinen varsinkin pintamallinnusominaisuuksiltaan. Ohjelman valintaa tuki myös sen kohtuullisen sujuva käyttö myös kevyemmällä kannettavalla tietokoneella, sekä ohjelman monipuolisiin ominaisuuksiin ja kyvykkyyksiin nähden lisenssin hyvin edullinen hankintahinta.

4.1 Rajoitteet mallinnukselle

Keskeisimmät rajoitteet moottoritilassa ovat jarrutehostin, konepelti ja moottorin öljynsuodatin. Moottorin kohtuullisen loiva 30 ° kallistuskulma lisää huomattavasti käytettävissä olevaa tilaa moottorin imupuolella. Alkuperäinen imusarja on tyypiltään hyvin korkea, sillä kaasuläppä on ohjattu alun perin oikealle sylinterikannen päälle. Kaasuläppäkotelon sijaintia muutettaessa öljynsuodatin muodostuu suurimmaksi esteeksi (Kuva 8). Kuvasta 8 poiketen kohdemoottori on varustettu erilaisella termostaattikotelolla eikä ylävesiletku aiheuta tilarajoitteita. Imusarjan vaatimaa tilaa laskemalla saadaan tässä BMW:n tapauksessa lisättyä etäisyyttä konepeltiin.



Kuva 8. BMW E32:n moottoritila (The Autopian 2023).

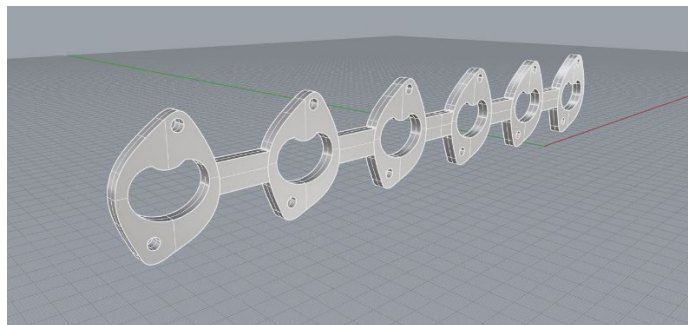
4.2 Imusarjan laippa

Imusarjan laipan mallintamiseen käytettiin avuksi ohutta paperia, jolle kuvassa 9. näkyvä imukanavan muoto sekä kiinnityspulttien reiät jäljennettiin.



Kuva 9. M30B35-sylinterikansi (Athousakis n. d.).

Paperinen jäljennös skannattiin kuvatiedostoksi, joka siirrettiin mallinnusohjelmaan apukuvaksi. Kun kanavan mitat olivat mitattuna, saatiin oikea muoto sekä asemointi kohdilleen. Imusarjan laippa on esitetty mallinnettuna kuvassa 10 sekä liitteessä 1.

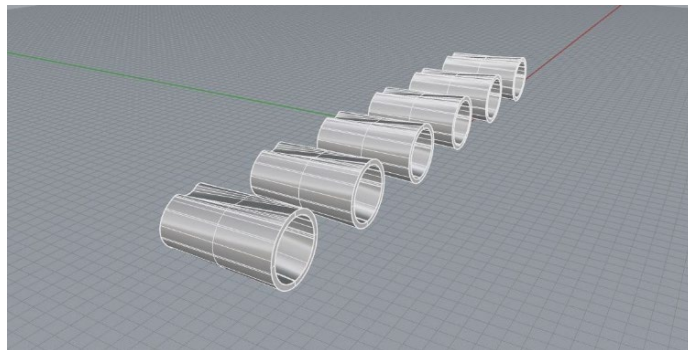


Kuva 10. Imusarjan laippa mallinnettuna.

4.3 Imuputkien mallinnus

Imuputkien kokonaismitaksi saatiin mitoitus osiossa 143 mm, mutta mallinnettavasta osasta vähennetään imusarjanlaipan ja imuputken pään mitat, jolloin mallinnettava kappale on 88 mm pitkä. Imuputket päädyttiin mallintamaan suorina, mikä taas tarkoittaa, että imusarja ja kokoojakammio suuntautuvat

yläviistoon 30 ° kulmassa. Käyttämällä suoria imuputkia saatiin etäisyyttä öljynsuodattimeen kasvatettua, kun taas suhteellisen lyhyiksi mitoitettut imuputket takaavat, ettei imusarjan korkeus nouse kohtuuttomaksi. Ilmavirran kannalta suora imuputki on myös optimaalisin ratkaisu. Mallinnetussa imusarjassa imuputket toimivat eräänlaisena geometrisena siirtymänä, jonka avulla imuputken pään ympyrä muoto muutetaan loivasti sylinterikannen imukanavan muotoon. Imuputket mallinnettuina on esitetty kuvassa 11 ja liitteessä 2.

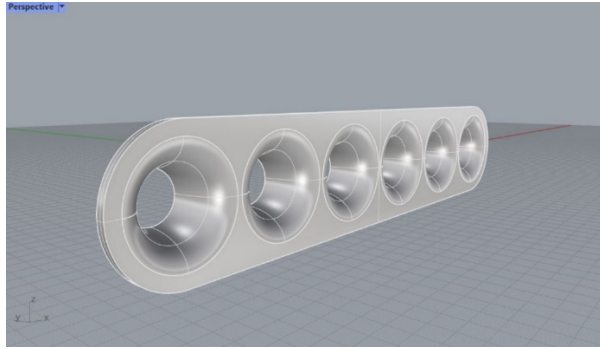


Kuva 11. Imuputket mallinnettuina.

4.4 Imuputken pään mallinnus

Imuputken päät mallinnettiin osaksi kokoojakammion pohjaa, sillä putkien päät haluttiin pohjan tasolle eikä koholle. Imusarjan laippa, imuputket ja kokoojakammion pohja on tarkoituksena koneistaa yhdestä kappaleesta. Tästä syystä imuputken päät on helpompi toteuttaa kammiopohjan tasoon. Toinen hyötypuoli on suuttimen asemoimisessa. Lyhyiden imuputkien takia suuttimilla ja varsinkin suutintukille ei jää valtavasti tilaa, joten kokoojakammion pohjaa nostaessa imuputken pään tasoon, saadaan suuttimille lisää tilaa. Toinen vaihtoehto olisi ollut imuputkien pidentäminen, mutta tällöin moottorin tehoalue sijoittuisi haluttua alemmille kierroksille, mitä tässä tapauksessa ei haluttu.

Imuputken päät ja kokoojakammion pohja ovat mallinnettuina kuvassa 12 ja liitteessä 3.



Kuva 12. Imuputken päät mallinnettuina kokoojakammion pohjaan.

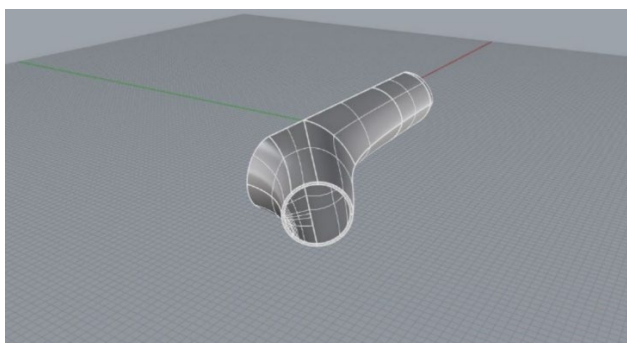
4.5 Kokoojakammion mallinnus

Kokoojakammio on tarkoitettu muotoilla alumiinilevystä, jolloin kammioon saadaan sulavampi muotoilu. Osasyynä on myös imusarjan ulkonäkö.

Kokoojakammio myös mallinnettiin ohjelman SubD -työkaluja hyödyntäen.

Tämän avulla saatiin kammio muotoiltua huomattavasti vapaampaan muotoon kuin pelkästään niin sanottuja solid-työkaluja käyttäen. Vaikka tilarajoitteet hankaloittivatkin kokoojakammion mitoitus paljon, saatiin kuitenkin kammion kooksi noin 4300 cm^3 , joka on noin 1,25 kertaa moottorin iskutilavuus.

Kokoojakammio on mallinnettuna kuvassa 13. ja liitteessä 4.

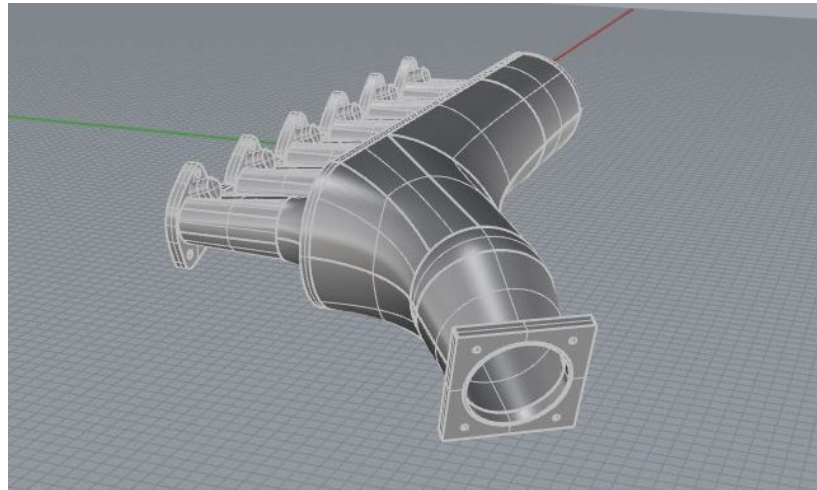


Kuva 13. Kokoojakammio mallinnettuna.

4.6 Kokoonpano

Kokoonpanomallinnukseen lisättiin vielä kaasuläppäkotelon laippa ja suutinpaikat imuputkien päähän, jotka näkyvät kuvassa 14. Suuttimien paikat

suunnattiin 20° kulmaan imuputkeen nähden. Kaasuläppäkotelon laippa on mallinnettu moottorin alkuperäisen kaasuläppäkotelon mukaan, sillä alkuperäinen kaasuläppä on halkaisijaltaan 72 mm, joka koettiin riittävän suureksi. Kaasuläppäkotelon laippa suunnattiin myös moottoritilan vasenta etukulmaa kohden, joka on otollisin reitti välijäähdyttimeltä tulevalle paineputkelle.



Kuva 14. Imusarjan valmis kokoonpanokuva.

5 Lopuksi

Imusarjan suunnittelu opinnäytetyönä oli hyvin haastava, mutta samalla myös hyvin opettavainen. Varsinkin hyödyllisten ja luotettavien lähteiden löytäminen oli varsin työlästä. Imusarjan suunnittelun ympärillä tuntuu olevan paljon perustelematonta tietoa ja eriäviä mielipiteitä. Sen sijaan faktapohjaista tietoa oli todella hankala löytää niin verkosta kuin kirjoinakaan. Vasta De Winterbone ja RJ Pearson:n kirjan löydyttyä, saatiin imusarjan mallinnus oikeasti järkevään suuntaan. Opinnäytetyö opetti siis paljon lähdekriittisyyttä.

Opinnäytetyönä imusarjan suunnittelu on myös todella laaja ja huomioon otettavia seikkoja jouduttiin rajaamaan paljon. Tämä ei tosin tietyllä tapaa ole huono asia, sillä työssä käytetty BMW:n moottori itsessäänkin on vasta kasausvaiheessa ja kokemusperäisesti voidaan todeta, että imusarjan mitoitus ja muotoiluun vaikuttavat tekijät ja komponentit, kuten ahdin tai kaasuläppäkotelo saattavat muuttua vielä moottoria kasatessa. Tästä huolimatta mallinnuksena saatu imusarja on hyvin tärkeä komponentti kokonaisuuden luomisessa.

Aikarajoitteiden ja resurssien takia imusarjalle ei päästy toteuttamaan minkään tyyppistä virtauksen simulointia. Imusarja tullaan kuitenkin simuloimaan ja todennäköisesti muokkaamaan simulointien perusteella ennen, kuin fyysistä imusarjaa aletaan valmistamaan. Myös kaasuläpän kiinnityslaipan sijaintia ja suuttimien määrää ja sijoittelua saatetaan muuttaa lopullisen moottorin tehotavoitteen ja komponenttien sijoittelun myötä.

Lähteet

Aerodynamiikka n. d. 1.5 Ilman tiheys. Viitattu 12.11.2022.

<https://www.aerodynamiikka.fi/index.php/lentajan-lupakirja/ilman-ominaisuudet/10-ilman-tiheys>

Athousakis n. d. Cylinder Head 1708843, M30B35 for BMW. Viitattu 22.5.2023.

<https://www.athousakis.gr/en/kapaki/cylinder-head-m30b35-1708843-for-bmw-1.html>

Autopian 2023. BMW Used To Sell Its Mighty E32 7 Series Flagship Sedan With A Manual Transmission, But Good Luck Finding One: Holy Grails. Viitattu 18.5.2023.

<https://www.theautopian.com/bmw-used-to-sell-its-mighty-e32-7-series-flagship-sedan-with-a-manual-transmission-but-good-luck-finding-one-holy-grails/>

Baechtel, J. 2015. Practical Engine Airflow. Englanti: Cartech inc.

Blair, G. P.; Cahoon W. M. n. d. Special Investigation: Desing of an engine bellmouth. Viitattu 8.2.2023.

http://www.profblairandassociates.com/pdfs/RET_Bellmouth_Sept.pdf

Bell, A. G. 2007a. Nelitahtimoottorin virittäminen. Kappale 1. Suom. E. Mauno. Helsinki: Alfamer Oy.

Bell, A. G. 2007b. Nelitahtimoottorin virittäminen. Kappale 2. Suom. E. Mauno. Helsinki: Alfamer Oy.

Hawk Classics n. d. 1989 BMW 325i E30. Viitattu 18.5.2023.

<https://hawkclassics.co.uk/1989-bmw-325i-e30/>

Huhtamaa, P.; Lehtinen, A.; Rantala, J.; Setälä, R. 2007. Auto- ja kuljetusalan erikoisoppi 2. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Otava.

Maranello Classic Parts n. d. Ferrari / F430 Spider / 013 - Intake Manifold. Viitattu 22.5.2023.

<https://www.ferrariparts.co.uk/diagram/ferrari/f430-spider/013-intake-manifold>

Mauno, E. 1990. Virittäjän käsikirja 1., 4. painos. Helsinki: Alfamer Oy.

Metropolia 2009. Putkivirtaus. Viitattu 30.12.2022.

file:///C:/Users/Omistaja/Downloads/koneautomaatio-4.Putkivirtaus-030523-1813-40068.pdf

MotorTrend 2007. EFI Nozzle Location. Viitattu 25.3.2023.

<https://www.motortrend.com/how-to/hrdp-0704-pitstop-fuel-injector-location/>

MW Steel n. d. Virittäminen. Viitattu 28.10.2022.

<https://www.mwsteel.eu/tietoa/tekniset-artikkelit/virittaminen/>

Peda.net n. d. Ideaalikaasun tilanyhtälö. Viitattu 30.12.2022.

<https://peda.net/p/Jarkko%20Helin/fysiikka/fy1-maks/km/kko/kyt:file/download/d6be8cccde74bb9d8a6a06568eaf90c32a506280/Kaasujen%20yleinen%20tilanyht%C3%A4l%C3%B6.pdf>

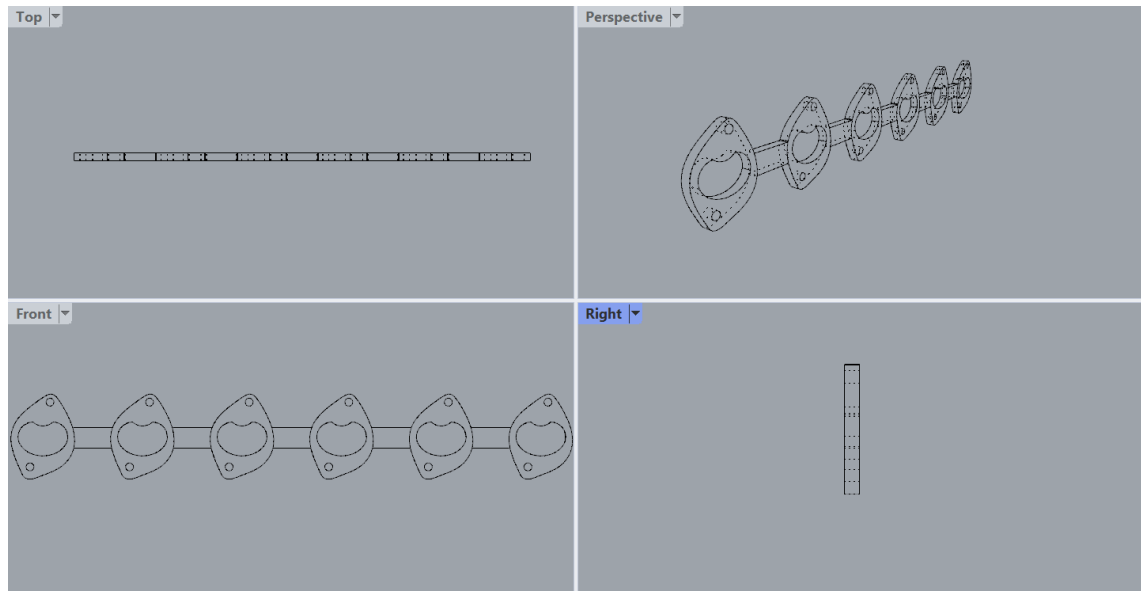
Performance by Integrated Engineering. n. d. The Right Bellmouth. Viitattu 8.2.2023.

<https://performancebyie.com/blogs/ie-auto-blog/the-right-bellmouth>

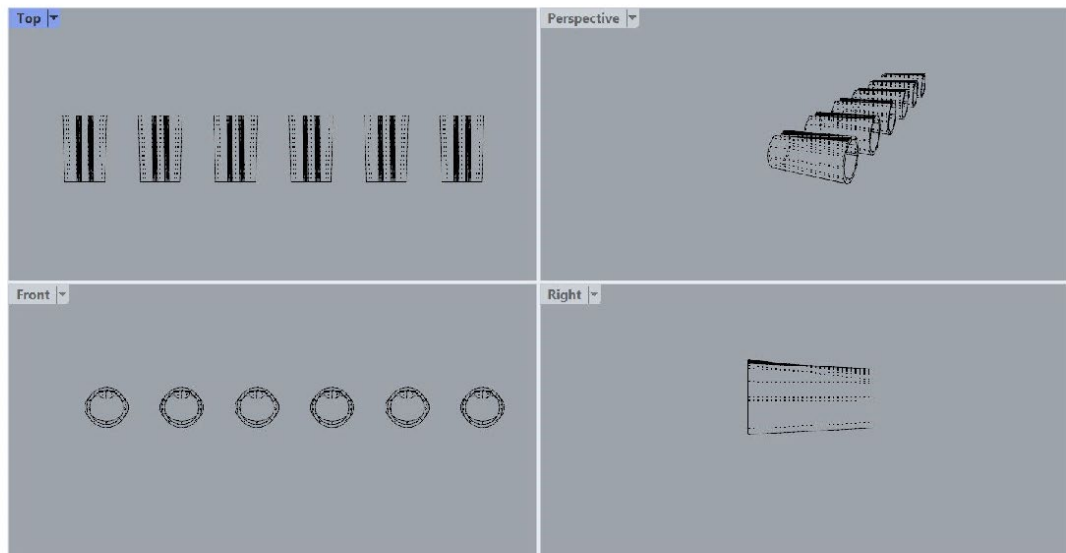
Winterbone, D. E.; Pearson, R. J. 1999. Design Techniques for Engine Manifolds. Englanti: Professional Engineering Publishing Limited.

Liitteet

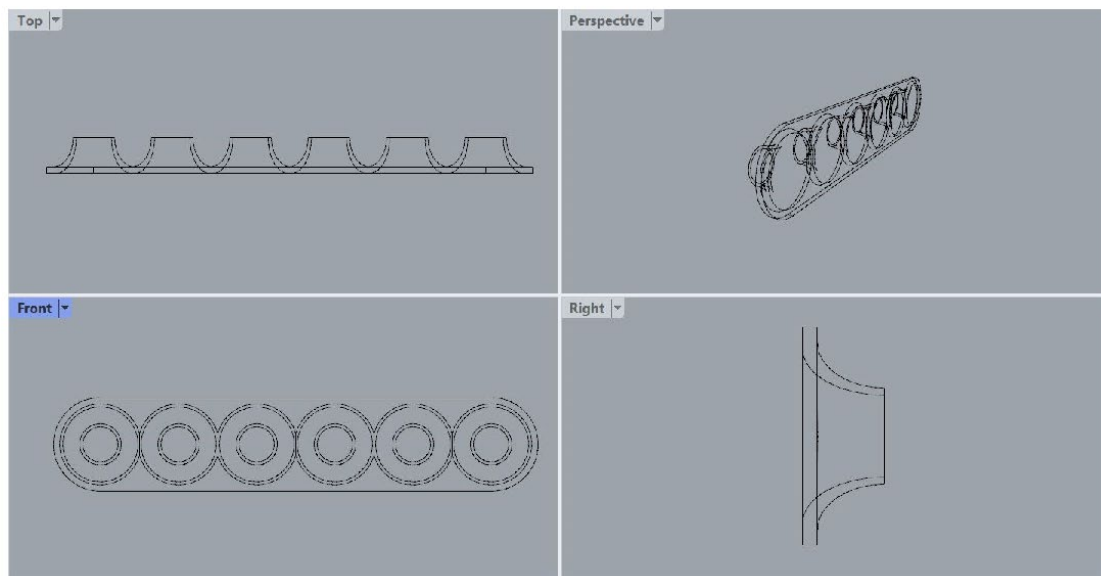
Liite 1. Imusarjan laippa



Liite 2. Imuputket



Liite 3. Imusuppilot



Liite 4. Kokoojakammio

