



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

FORMULA STUDENT AUTON PAKOÄÄNENVAIMENNUS

Niko Kurkinen

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Formula Student auton pakoäänenvaimennus

Niko Kurkinen

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2021, 38 s.

Työn ohjaajat yliopistolla: Miro-Tommi Tuutijärvi ja Perttu Niskanen

Kandidaatintyöni tavoitteena on etsiä tietoa polttomoottorin pakoäänenvaimentimen suunnittelua varten erityisesti Formula Student -kilpa-autoon. Työssä kuvataan ääni- ja paineaaltojen teoriaa, sekä erilaisten äänenvaimentimien toimintatapoja ja suunnitteluperiaatteita. Myös ajatuksia tallennetun äänisignaalin analysoinnista esitetään. Työssä pyritään selvittämään sopiva äänenvaimennintyyppi Formula Student Oulun autoon.

Työn lähteenä on käytetty polttomoottori- ja äänitekniikan kirjallisuutta, sekä äänenvaimentimien suunnittelusta tehtyjä raportteja. Osa työstä perustuu myös omakohtaisiin kokemuksiin.

Työn tuloksena saatiin yleiset suunnittelu- ja testausperusteet pakoäänenvaimentimelle. Työssä todetaan pakokaasupulssien voimakkuuden aiheuttamien epälineaaristen ilmiöiden vuoksi moottori- ja virtaussimuloinnin olevan hyvä lähtökohta äänenvaimentimen suunnittelulle. Tuloksia voidaan käyttää jatkossa äänenvaimentimen suunnittelun perusteena.

Asiasanat: melu, äänenvaimennin, pakoputki, polttomoottori, Formula Student

ABSTRACT

Exhaust silencing of a Formula Student car

Niko Kurkinen

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2021, 38 pp.

Supervisors at the university: Miro-Tommi Tuutijärvi and Perttu Niskanen

The aim of this bachelor's thesis is to search information regarding the designing of an internal combustion engine exhaust muffler, specially one to be fitted in a Formula Student race car. The thesis work describes the theory of sound- and pressure waves, the workings of different kinds of mufflers as well as design principles. Some thoughts are given to analysing of recorded sound signal. Goal of the work is to find a suitable type of muffler to be fitted to the race car of Formula Student Oulu.

The sources of the work have been internal combustion engine and sound technic literature, as well as reports of different muffler designs. Some of the work is also based on knowledge gained through personal experience.

The result of the work is general design and testing principles for automotive mufflers. Exhaust pressure waves are found to be strong enough to give rise to nonlinear phenomena in the exhaust flow and thus engine and exhaust flow simulation is a good starting point for the muffler design work. The results of this thesis may be used as the basis of a design work of a muffler.

Keywords: noise, muffler, exhaust pipe, internal combustion engine, Formula Student

ALKUSANAT

Olen ollut mukana Formula Student Oulun toiminnassa syksystä 2016 lähtien. Toimenkuvani ovat olleet moninaisia, runkotiimin jäsenen tehtävistä tiimin tekniseksi johtajaksi. Tiimissä minulle on annettu todella paljon erilaisia isompia ja pienempiä suunnittelutehtäviä oman mielenkiintoni mukaan. Formula Student -toiminta on tuonut minulle paljon käytännönläheistä oppia erilaisten osien ja kokoonpanojen suunnitteluun ja valmistukseen, sääntöjen ja resurssien huomioimiseen, ongelmien ratkaisuun ja tiiminä toimintaan. Parasta Formula Studentissa on kuitenkin ollut ”tehdään eikä meinata” - asenne, sekä mahtaavat ihmiset, joiden kanssa olen saanut ystäväystyä.

Innoitus tähän aiheeseen syntyi, koska ääni ja ylimääräisten äänten vaimennus ovat jo pitkään olleet kiinnostukseni kohteena. Kandintyöni on kirjoitettu lukuvuoden 2020-2021 aikana, ja sen tarkoitus on olla avuksi tulevien pakoäänenvaimennusratkaisujen suunnittelussa. Tiimissä on tapana, että vanhemmat jäsenet opettavat nuorempia, mutta tällaiset työt antavat hyvän mahdollisuuden myös kirjoittaa opittua tietoa ylös, jolloin se säilyy paremmin. Alkuperäinen ajatukseni oli myös suunnitella jonkinlainen vaimennin autoon, mutta luotettavan suunnittelun vaatiman simuloinnin vuoksi se jäi toiseen kertaan.

Työni ohjaajina toimivat Miro-Tommi Tuutijärvi ja Perttu Niskanen. Heidän lisäksi haluan kiittää kannustuksesta ja neuvoista myös Formula Student Oulun jäsenistöä, sekä perhettäni.

Oulu, 7.5.2021



Niko Kurkinen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 Johdanto	7
2 Ääni	8
2.1 Äänen nopeus	8
2.2 Taajuus	11
2.3 Desibeliasteikot	11
2.4 Äänilähteiden summaaminen	12
2.5 Äänen mittaaminen	13
2.6 Äänen lähteet moottoriajoneuvossa	14
2.7 Pakoäänen syntyminen	14
3 Äänen vaimentamisen perusteita	16
3.1 Vaimentimen tehokkuus	16
4 Pakoputkisto	17
4.1 Virtausvastus	17
4.2 Materiaalit	18
5 Äänenvaimennin	20
5.1 Reaktiivinen vaimennin	20
5.2 Absorptiovaimennin	21
5.3 Resonaattori	22
6 Formula student	25
6.1 Säännöt	25
6.2 Sarjan erityispiirteet	26
6.3 Formula Student Oulun auto	27
6.4 Pakoputkisto	28
6.5 Nykyinen äänenvaimennin	29
6.6 Hätäratkaisut	31
7 Formula Student Oulun auton pakoäänenvaimennus	32
7.1 Äänenvaimennuksen ongelma	32
7.2 Moottorin erityispiirteet	32

7.3 Valmisvaimennin	33
7.4 Vaimennintyyppin valinta.....	33
7.5 Vaimentimen suunnittelu	34
7.6 Simulointi.....	34
7.7 Testaus.....	35
8 Yhteenveto	36
LÄHDELUETTELO.....	37

MERKINNÄT JA LYHENTEET

A	poikkipinta-ala
a_0	äänen nopeus kaasussa
c	kaasun liikenopeus
c_p	männän keskinopeus
dB	desibeli
dBlin	suodattamaton, lineaarinen desibeliasteikko
f	taajuus
g	painovoimakiihtyvyys
h	korkeus
I	äänen intensiteetti
L	pituus
Lst	moottorin iskunpituus
V	tilavuus
L_w	ääniteho
n_e	moottorin kierrosnopeus
P	painesuhde
p	paine
R	aineen kaasuvakio
r	etäisyys pistemäisestä äänilähteestä
T	absoluuttinen lämpötila
TL	”transmission loss”, äänitehon vaimeneminen äänenvaimentimessa
v	nopeus
v_h	väliaineen hiukkasten paikallinen liikenopeus
x	mitattava kenttäsuure
x_0	mitattavan kenttäsuureen referenssiarvo
α	kaasupulssin todellinen nopeus
β	äänilähteen äänenpaine
γ	kaasun adiabaattivakio
λ	aallonpituus
ρ	tiheys

1 JOHDANTO

Työn aiheena on tutkia Formula Student Oulun auton pakoäänenvaimentamisen mahdollisia ratkaisuja. Tavoitteena on selvittää minkä tyyppiset äänenvaimentimet autossa voisivat toimia huomioiden auton moottorin ja Formula Student -sarjan sääntöjen erikoispiirteet. Työssä tutustutaan ääniaaltojen ja pakokaasupulssien teoriaan, pakoäänenvaimentamiseen ja sen ongelmiin, erilaisiin äänenvaimentimiin ja äänenvaimentimen suunnittelun teoriaan. Myös Formula Student -sarjaa avataan lyhyesti.

Formula Student Oulun auton pakoäänenvaimentamista lähdetään tarkastelemaan nykyisen äänenvaimentimen ja äänenvaimennuksen teorioiden pohjalta. Tarkoituksena on selvittää, miksi äänenpainetason madaltamisessa on aiemmin ollut ongelmia, ja millaiset vaimentimet voisivat olla hyviä tässä kyseisessä tapauksessa. Työssä pohditaan myös, kuinka tulevaisuudessa voitaisiin moottorin kaasunvaihdon ja pakoputkiston simuloinnilla mahdollisesti päästä vielä parempiin tuloksiin äänenvaimentimen suunnittelussa.

Formula Student Oulun auton kehitykseen liittyen on tehty useampi kandidaatintyö, joiden tuloksia on hyödynnetty auton kehittämisessä.

2 ÄÄNI

Ääni on väliaineen hiukkasten liikettä, ja se etenee äänilähteestä aaltomaisena liikkeenä ympäristöön. Äänen intensiteetti saadaan kaavasta (1) (Mäkelä 2005: 130):

$$I = \frac{p^2}{\rho v_h}, \quad (1)$$

missä I on äänen intensiteetti [W/m^2],
 p on tehollinen äänen paine [Pa],
 ρ on kaasumaisen väliaineen tiheys [kg/m^3] ja
 v_h on väliaineen hiukkasten paikallinen liikenopeus [m/s].

Vapaassa tilassa pistemäisestä äänilähteestä säteilevän äänen intensiteetti on käänteisessä neliösuhteessa äänilähteen etäisyyteen (2) (Mäkelä 2005: 130):

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}, \quad (2)$$

missä I_1 on äänen intensiteetti [W/m^2] etäisyydellä 1,
 I_2 on äänen intensiteetti [W/m^2] etäisyydellä 2,
 r_1 on ensimmäisen mittauspisteen etäisyys [m] pistemäisestä äänilähteestä
ja
 r_2 on toisen mittauspisteen etäisyys [m] pistemäisestä äänilähteestä.

Kaavoista (1) ja (2) havaitaan, että äänen paine on käänteisessä suhteessa äänilähteen etäisyyteen. Suljetussa, tai osittain suljetussa tilassa, kuten seinän läheisyydessä, äänenpaine pienenee tätä vähemmän etäisyyden kasvaessa, sillä osa ääniaalloista heijastuu ympäristöstä takaisin kohti tarkastelupistettä (Blair 1999: 159).

2.1 Äänen nopeus

Äänen nopeus vaihtelee kaasun koostumuksen, lämpötilan ja paineen mukaan. Nopeus on tärkeä tieto, sillä se vaikuttaa ääniaaltojen pituuteen ja siten äänenvaimentimen

toimintaan eri taajuuksilla. Aaltoliikkeen nopeudella, aallonpituudella ja taajuudella on seuraava riippuvuus (3) (Mäkelä 2005: 129):

$$v = f\lambda, \quad (3)$$

missä v on aaltoliikkeen nopeus [m/s],
 f on aaltoliikkeen taajuus [Hz] ja
 λ on aallonpituus [m].

Äänen nopeus kaasumaisessa väliaineessa saadaan kaavasta (4) (Blair 1999: 158):

$$a_0 = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho_0}} \quad (4)$$

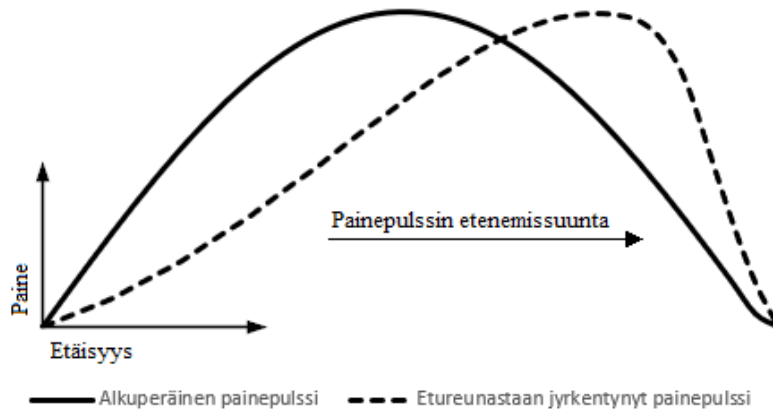
tai (5)

$$a_0 = \sqrt{\gamma RT_0}, \quad (5)$$

missä a_0 on äänen nopeus kaasussa [m/s],
 γ on kaasun adiabaattivakio,
 p_0 on kyseessä olevan kaasun paine [Pa],
 ρ_0 on kaasun tiheys [kg/m³],
 R on väliaineen kaasuvakio [J/(kg*K)] ja
 T on absoluuttinen lämpötila [K].

Yhtälöstä (4) voidaan havaita, että ääni- eli paineaallon nopeus on sitä suurempi, mitä suurempi on paine sen kohdalla. Paineaallon nopeus on siis epälineaarinen. Pakokaasupulssien paine on niin suuri, että niiden kulkunopeuteen vaikuttaa merkittävästi kaasun paineen muutos pulssin kohdalla. Ääniaallot sen sijaan ovat niin pienipaineisia, ettei tätä aallon nopeuden muutosta, eli epälineaarisuutta, tarvitse huomioida. Akustisten vaimentimien kaavat eivät yleensä huomioi paineenmuutoksesta johtuvaa aallon nopeuden muutosta eivätkä ne siksi toimi kovin hyvin pakoäänenvaimentimien mitoittamisessa. Pulssin paineen ja nopeuden suhteesta seuraa myös se, että painepulssin korkeapaineisin kohta ottaa pulssin etureunaa kiinni, ja pulssin muodosta tulee

etureunastaan jyrkkä, eli paineen nousu pulssin saapuessa tarkastelukohtaan on hyvin nopea. Kuva 1 esittää tätä ilmiötä graafisesti.



Kuva 1. Painepulssin etureunan jyrkentyminen sen kulkiessa putkessa.

Pakokaasupulsseja tarkasteltaessa vaikuttaa myös kaasun liike, jonka nopeus on (6) (Blair 1999: 159):

$$c = \frac{2}{\gamma-1} a_0 \left[\left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} - 1 \right], \quad (6)$$

missä c on kaasun liikenopeus [m/s],
 p on pulssin paine [Pa] ja
 p_0 on kaasun paine [Pa] pulssin ympäristössä.

Koska kaasupulssi liikkuu tässä liikkuvassa kaasussa, on sen nopeus (7) (Blair 1999: 161):

$$\alpha = a + c, \quad (7)$$

missä α on kaasupulssin todellinen nopeus [m/s],
 a on pulssin nopeus [m/s] väliaineessa paikallisesti vallitsevissa olosuhteissa
 c on kaasun paikallinen nopeus [m/s].

2.2 Taajuus

Äänen taajuus ilmoitetaan hertseinä (Hz), mikä ilmoittaa kuinka monta ääniaaltoja esiintyy yhden sekunnin aikana. Ääni sisältää yleensä useita eri taajuuksia ja sen rakennetta voidaan tutkia jakamalla se riittävän korkealla tarkkuudella taajuuksiinsa. Yleensä tähän käytetään FFT-muunnosta. (Van Bsshuysen & Schäfer 2004: 754) Myös tallennetun äänenvoimakkuuskäyrän tarkastelu sopivalla aikaskaalalla voi osoittautua hyödylliseksi äänen syntymiseen liittyvien ilmiöiden ymmärtämisessä.

2.3 Desibeliasteikot

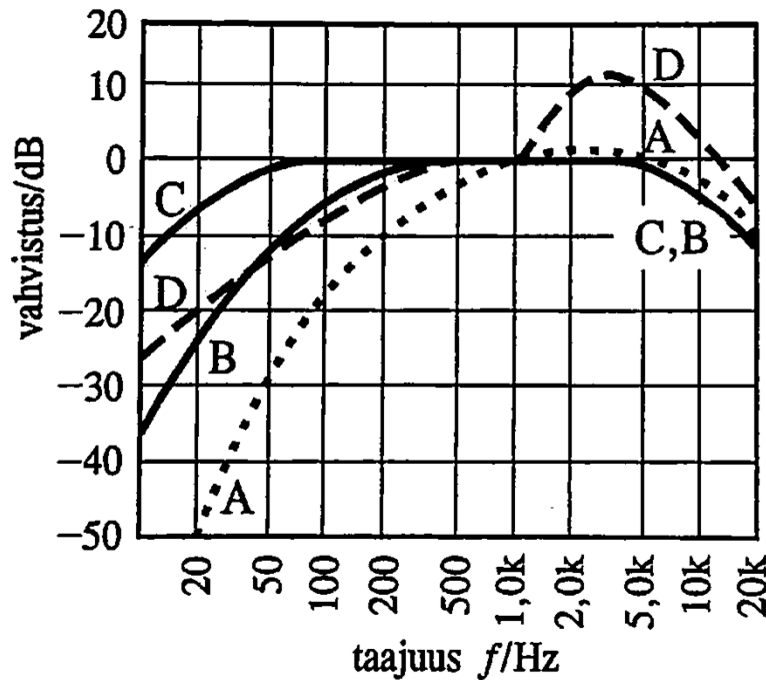
Ihmisen kuuleman äänen paineen vaihtelu on useita kymmenen potensseja. Siksi äänenpainetta mitataan yleensä logaritmisella desibeli, eli dB-asteikolla, jota kuvataan kaavalla (8) (Van Bsshuysen & Schäfer 2004: 754):

$$L_x = 10 \log_{10} \left(\frac{x^2}{x_0^2} \right) dB = 20 \log_{10} \left(\frac{x}{x_0} \right) dB, \quad (8)$$

missä x on mitattava kenttäsuure, tässä tapauksessa äänenpaine p [Pa], ja x_0 on mitattavan suureen referenssiarvo, joka äänenpainelle on yleensä $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

Koska ihmisen kuulon herkkyys eri taajuuksilla on erilainen, ja lisäksi riippuu äänen voimakkuudesta, käytetään usein painotuskäyriä havainnollistamaan kuinka voimakkaalta jokin ääni kuulostaa. Yleisimmin käytetyt käyrät ovat DIN IEC 651-standardin mukaiset dB(A) hiljaisille, dB(B) keskikoville ja dB(C) koville äänille. (Van Bsshuysen & Schäfer 2004: 754) Näistä A-painotuskäyrä vähentää matalien taajuuksien merkitystä, kun puolestaan C-käyrä on lähes tasainen korkeilta taajuuksilta matalille (Kuva 2). Esimerkiksi jos mitataan taajuudeltaan 50 Hz ääntä, jonka todellinen tehollinen äänenpaine on 100 dB, saadaan C-käyrästäöllä suodatetulla mittarilla tulokseksi 98 dB, mutta A-suodatuksella vain 70 dB. Tämän takia ääntä tutkittaessa täytyy mittaukset ja nauhoitukset aina tehdä mahdollisimman lineaarisella mikrofonilla ja äänenpainemittarin suodattamattomalla, taajuuden suhteen lineaarisella (dBlin), alueella.

dB(A)-asteikkoa käytetään yleisesti erilaisessa melua rajoittavissa standardeissa, vaikka se vääristääkin matalien taajuuksien merkitystä. Polttomoottorin pakoäänessä on mukana paljon matalataajuuksista melua, joten dB(A) -käyrästöä käyttävällä mittarilla mitatut tulokset eivät ole ollenkaan vertailukelpoisia dB(C) -käyrästöllä saatujen mittaustulosten kanssa.



Kuva 2. Äänimittauksen painotuskäyrät. (Mäkelä 2005: 131)

2.4 Äänilähteiden summaaminen

Äänilähteiden, joiden äänenpainetaso on ilmoitettu logaritmisella asteikolla, summaamiseen tarvitaan logaritmista laskentaa. Kahden äänilähteen yhteenlaskettu äänenpaine saadaan kaavalla (9) (Blair 1999: 700):

$$\beta_s = 10 \log_{10} \left\{ \text{antilog} \left(\frac{\beta_1}{10} \right) + \text{antilog} \left(\frac{\beta_2}{10} \right) \right\}, \quad (9)$$

missä β_s on äänilähteiden yhteenlaskettu äänenpaine,
 β_1 on äänilähteen 1 äänenpaine ja
 β_2 on äänilähteen 2 äänenpaine.

Summataan esimerkiksi kaksi 100 dB äänilähdettä (10),

$$\beta_s = 10 \log_{10} \left\{ \text{antilog} \left(\frac{100}{10} \right) + \text{antilog} \left(\frac{100}{10} \right) \right\} = 103,01 \text{ Db} \quad (10)$$

ja vertailun vuoksi 100 dB ja 90 dB äänenpaineet (11)

$$\beta_s = 10 \log_{10} \left\{ \text{antilog} \left(\frac{100}{10} \right) + \text{antilog} \left(\frac{90}{10} \right) \right\} = 100,41 \text{ dB.} \quad (11)$$

Näistä esimerkeistä huomataan logaritmisien asteikon ominaisuus, eli ettei heikompi äänilähde juurikaan lisää äänenpainetta logaritmisella asteikolla, ja kahden yhtä kovan äänen summaaminen, eli äänitehon kaksinkertaistaminen, tarkoittaa vain kolmen desibelin lisäystä. Samalla kaavalla voidaan laskea yhteen myös eri taajuusalueiden tuottamat teholliset äänenpaineet (Blair 1999: 707).

Äänenvaimentamisen kannalta nämä asiat tarkoittavat, että kovin ääni on niin hallitseva, että ellei sitä vaimenneta, ei muiden äänien vaimentamisella luultavasti saavuteta juurikaan pudotusta äänitasoon. Lisäksi ellei kovimman äänenpaineen taajuusalueita vaimenneta, ei muiden taajuusalueiden vaimentamisella luultavasti saavuteta juurikaan pudotusta äänitasoon. Tämä havainto on linjassa myös ihmisen kuuloaistimuksen kanssa.

2.5 Äänen mittaaminen

Ääntä mitataan äänimittarilla, joka koostuu käytännössä mikrofonista, joka mielellään on yhtä herkkä joka suunnasta tulevalle äänelle, ja vahvistimesta, joiden ulostulo on kalibroitu näyttämään äänitason desibeleinä. Mittari voi näyttää muokkaamatonta äänenpainetta dBlin tai jotakin käyrästöllä muokattua äänenpainetasoa, kuten dB(A). Eri mittausten vertaileminen on käytännössä mahdotonta, mikäli mittarit käyttävät eri käyrästä, tai mikäli mittausetäisyyttä ei tiedetä. Myös muut asiat, kuten mittauksen suunta äänilähteeseen nähden ja mittarin etäisyys maanpinnasta tai muusta ääntä heijastavasta kohteesta vaikuttavat mittaustuloksiin huomattavan paljon. Siksi onkin syytä perehtyä erilaisiin melunmittausstandardeihin jo tuotteen suunnitteluvaiheessa. (Blair 1999: 702)

Äänimittari voi olla kykenevä myös taajuusanalyysiin, ja tarpeeksi tarkka taajuuksiin jako onkin monesti hyödyllinen työkalu, etenkin äänen vaimennuksen suunnittelussa. On olemassa myös tietokonepohjaisia laitteistoja, jotka mittaavat äänenpaineen ja näyttävät

äänien taajuusjakauman reaaliajassa. Mikäli riittää, että tiedetään äänenpaine, ja voidaan erikseen tarkastella äänen muodostavia taajuuksia, voidaan käyttää erikseen äänenpainemittaria, ja nauhoittaa ääntä tarkoitukseen sopivalla mikrofonilla, jonka taajuusvaste on mielellään mahdollisimman tasainen. Nauhoitettua ääniraitaa voidaan sitten tarkastella ajan funktiona ja sille voidaan tehdä taajuusanalyysi tietokoneella jopa ilmaisilla ohjelmilla, kuten Audacity.

2.6 Äänen lähteet moottoriajoneuvossa

Moottoriajoneuvossa on monenlaisia äänilähteitä. Näitä ovat esimerkiksi moottorin ja muiden liikkuvien osien ja pintojen värinä, rengas- ja tuuliäänet, sekä imu- ja pakosarjan virtauksen tuottamat äänet. (Van Basshuysen & Schäfer 2004: 757) Formula Student -sarjan sääntöjen tapauksessa vain moottorin imu- ja pakoääni, sekä liikkuvien osien ja pintojen värinöiden tuottamat äänet ovat merkityksellisiä, sillä äänitaso mitataan ajoneuvon ollessa paikallaan. Koska äänenpaine riippuu äänilähteen etäisyydestä, ja äänimittaus toteutetaan läheltä pakoputken päätä, mittauksessa saatuun äänenpaineeseen vaikuttaa lähes ainoastaan pakoääni, pakoputken pinnan värähtely, mittauspisteen lähellä resonoivat auton osat, sekä ympäröivien pintojen kotelovaikutus, joka kohdistaa ääntä mittaria kohti.

Erilaiset pinnat tuottavat värähdellessään liikettä ja värähtelyitä, eli ääntä, myös niitä ympäröivään ilmaan. Mikäli tavoitteena on saada aikaan hiljainen laite, kannattaa siis suosia mahdollisimman jäykkiä pintoja, sillä jäykät rakenteet tuottavat vähemmän ääntä. Pinnan koko vaikuttaa suoraan sen siirtämän ilman määrään. Erityisesti suuret, ohuet ja tasaiset pinnat voivat toimia suurina äänilähteinä, mikäli niiden jäykkyys ei ole riittävä.

2.7 Pakoäänen syntyminen

Ääni- ja paineaaltojen suuruutta voidaan kuvata painesuhteella (12) (Blair 1999: 158):

$$P = \frac{p}{p_0}, \quad (12)$$

missä P on painesuhde,
 p on ääni- tai paineaallon paikallinen paine [Pa] ja
 p_0 on ympäröivän kaasun paine [Pa].

Voimakkaimpien ääniaaltojen ylipaine on suuruudeltaan 2000 Pa luokkaa ja painesuhde siten 1,02. Polttomoottorin tyypillisen pakokaasupulssin painesuhde sen sijaan on noin 1,5, mutta pakokaasupulssit voivat tosin olla jopa 1 MPa luokkaa (Blair & Spechko 1972: 1). Pakokaasupulssi myös kuljettaa huomattavan määrän väliainetta, pakokaasua, mukanaan toisin kuin ääniaallot.

Pakoäänien korkeilla taajuuksilla on pääasiassa kaksi lähdettä: pakokaasun painepulssien jyrkkä etureuna, sekä virtaukseen syntyvä turbulenssi esimerkiksi virtauksen kulkiessa terävien reunojen, kuten pakoputken resonaattorin reikien ohi. Korkeiden taajuuksien vaimentimen olisi hyvä olla pakoputken loppupäässä, jolloin sen jälkeen on vähemmän paikkoja, joissa korkeita taajuuksia syntyy. Korkeataajuuksista ääntä tuottaa myös pakokaasupulssin aiheuttama pyörrevirtaus sen poistuessa pakoputkesta. (Blair 1999: 722)

Matalataajuisien äänien syntyminen pakoputkistossa on hieman monimutkaisempaa. Pakokaasupulssin poistuminen pakoputkesta aiheuttaa putken päässä uuden paineaallon syntymisen. Tämä paineaalto kuullaan äänenä. Kaasun virtaus vetää mukaansa myös pakoputken päätä ympäröivää ilmaa, ja tämä ilman liike aiheuttaa toisen paine- eli ääniaallon. (Blair 1999: 153) Tämä pakokaasupulssin laajentuminen voi tapahtua myös pakoputken sisällä, diffuosoivassa vaimentimessa tai muussa muuta putkiston osaa laajemmassa rakenteessa. Käytettäessä pakoputkena suoraa putkea, jossa ei juuri synny korkeataajuisia ääniä, pakoäänien äänenpainetasoon vaikuttaa lähinnä pakokaasun suurin hetkellinen massavirta kaasun poistuessa pakoputkesta, sekä mittasupisteen suunta ja etäisyys (Blair 1999: 706). Siksi tehokas pakoäänien vaimennus tarkoittaa hetkellisten, suurien pakokaasupulssien tasoittamista tasaiseksi virtaukseksi. Myös pakokaasun jäädyttäminen auttaa, sillä se laskee kaasun painetta.

3 ÄÄNEN VAIMENTAMISEN PERUSTEITA

Blair (1999: 763) on kirjoittanut polttomoottorin äänen vaimentamisen perusajatuksista, jotka voidaan tiivistetysti jakaa tärkeysjärjestyksessä seuraaviin kolmeen pääkohtaan:

1. Paikanna voimakkaimman äänen lähde (mikäli kyse on äänitestin läpäisemisestä, mittarin sijaintiin nähden voimakkain äänilähde), ja keskity sen vaimentamiseen.
2. Tutki äänilähteen taajuusjakamaa ja keskity voimakkaimpina esiintyvien taajuuksien vaimentamiseen.
3. Äänilähteen paikantamiseen hyvä keino on mittarin siirtäminen, sillä ääni on voimakkaimmillaan sen lähteen läheisyydessä.

3.1 Vaimentimen tehokkuus

”Transmission loss” on termi, jota käytetään kuvamaan äänenvaimentimen vaimennustehoa. Se kertoo, kuinka paljon pienempi on ääniteho vaimentimen jälkeen, kuin ennen sitä ja saadaan kaavasta (13) (Munjal 1987: 58):

$$TL = L_{W1} - L_{W0}, \quad (13)$$

missä TL on äänitehon vaimeneminen,
 L_{W1} on ääniteho vaimentimen jälkeen [dB] ja
 L_{W0} on ääniteho ennen vaimenninta [dB].

Äänenvaimentimet vaimentavat eri taajuisia ääniä eri verran, ja vaimennusta kullakin taajuudella kutsutaan vaimentimen taajuusvasteeksi. Taajuusvaste esitetään yleensä kuvaajalla, jossa toisella akselilla on vaimentimen vaimennus desibeleinä, ja toisella akselilla äänen taajuus hertseinä.

4 PAKOPUTKISTO

Pakoputkiston tarkoitus on parantaa moottorin tehoa, vähentää pakoäänien tasoa ja kuljettaa pakokaasu sopivaan ulostulopaikkaan. Usein pakoputkisto myös sisältää eriäviä komponentteja, jotka alentavat säänneltyjen pakokaasuemissioiden pitoisuuksia lain vaatimalle tasolle. Pakoputkiston osat valmistetaan yleensä kuumuutta ja korroosiota kestävästä teräksistä. (Bosch & Dietsche 2011: 480) Pakoputkisto koostuu pakosarjasta, pakokaasun käsittelylaitteistoista, äänenvaimentimista ja putkistosta, joka yhdistää osat toisiinsa.

Pakosarja yhdistää sylinterien pakoaukot toisiinsa ja pakoputken loppuosaan. Sillä on myös merkittävä vaikutus moottorin tehoon sekä äänen laatuun, äänitasoon ja pakokaasun lämpötilaan. (Bosch & Dietsche 2011: 481) Pakokaasun käsittelylaitteet vähentävät pakokaasun saastepitoisuutta ja äänenvaimentimet hiljentävät pakoääntä. Pakokaasuvirtauksen energiaa voidaan myös käyttää moottorin hengityksen tehostamiseen turboahtimella.

4.1 Virtausvastus

Virtausvastusta tutkitaan mittaamalla paine-ero tutkittavan pakoputken osan yli. Se on suhteellisen hyvä indikaattori moottorin tehon vähenemiselle äänenvaimentimen takia, mutta ei korvaa moottorin 1D-simulointia tai tehonmittausta. Selvää on kuitenkin, että suuri virtausvastus aiheuttaa suurehkon moottoritehon pudotuksen. Mikäli moottorissa esiintyy venttiilien ajoituksen ja pakosarjan imuefektin vuoksi ylihuhutelu, voi sopiva, pieni, virtausvastus äänenvaimentimessa jopa lisätä tehoa. Tällaisessa tapauksessa erilaisella venttiilien ajoituksella ja hyvin virtaavalla äänenvaimentimella voitaisiin moottorin tehopotentiali hyödyntää paremmin. (Bell 2002: 172)

Virtauksen energian muuttumista muodosta toiseen kuvaa Bernoullin laki kokoonpuristumattomalle virtaukselle (14) (Mäkelä 2005: 100):

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{vakio}, \quad (14)$$

missä p on absoluuttinen paine [Pa],
 ρ on virtaavan aineen tiheys [kg/m^3],
 v on virtausnopeus [m/s],
 g on painovoimakiihtyvyys [m/s^2] ja
 h on korkeus vertailutasosta [m].

Tästä yhtälöstä havaitaan, että virtausnopeuden kasvaessa kapeammassa kohdassa putkea, täytyy paineen laskea. Paine on siis suurempi ennen kapeampaa kohtaa. Muut virtausta vastustava ilmiöt liittyvät pitkälti virtauksen pyörteilyyn ja nekin havaitaan paine-erona.

Äänenvaimentimessa virtausvastus on pakopulssien tasoittumisen kannalta toivottava ilmiö, sillä pakokaasun virtaus tasaantuu, kun sitä kuristetaan. Moottorin tehon kannalta kuitenkin kaikenlainen kuristaminen on haitallista ja pakokaasun virtauksen tasaaminen kannattaakin toteuttaa jotenkin muuten, esimerkiksi johtamalla virtaus riittävän suureen tilavuuteen, jossa on sopivan kokoinen ulostulo. Tällöin pulssimainen virtaus ei pääse aiheuttamaan yhtä suurta paineen nousua kuin pienessä tilavuudessa.

4.2 Materiaalit

Autojen tehdasvalmisteiset pakosarjat ovat aiemmin yleisesti olleet valurautaa tai -terästä. Nykyisin ne ovat yhä useammin ruostumattomasta teräspellistä prässättyjä tai putkesta hitsattuja. Moottoripyörien pakosarjat on yleisesti tehty joko mustasta tai ruostumattomasta teräsputkesta taivuttamalla ja hitsaamalla, mahdollisesti prässättyin liitososin.

Aiemmin pakoputkissa on käytetty usein alumiinipintaista terästä, koska se on hinnaltaan sarjatuotantoon sopiva materiaali. Tällainen putki kestäikin normaalissa maantieajossa useita vuosia. Pakokaasujen jälkikäsittelyn lisääntyessä ja moottoritehojen kasvaessa on pakokaasun lämpötila noussut (Inoue & Kikuchi 2003). Kun tähän yhdistetään tiesuolan lisääntynyt käyttö, saadaan aikaiseksi syövyttävät ja kuumat olosuhteet sekä pakoputken ulko-, että sisäpinnalle. Näissä olosuhteissa alumiinipintaisenkin mustan teräsputken kestoikä jää lyhyeksi. Itse pakoputkia ilman pakokaasun jälkikäsittelyä oleviin laitteisiin

sinkitystä tai alumiinipintaisesta teräsputkesta valmistaessa kestävyuden kannalta ongelmana ovat yleensä hitsisaumat, jotka ruostuvat muuta putkea nopeammin, koska pinnoitus palaa pois hitsatessa.

Ruostumaton teräs kestää hyvin pakoputken sisällä olevaa syövyttävää pakokaasua, sekä maantiesuolan roiskeita (Bosch & Dietsche 2011: 480). Se on sopiva materiaali autojen lisäksi etenkin moottoripyöriin, joissa kiillotettu ruostumaton teräsputki on merkittävä ulkonäkötekijä. Pakoputken eri osiin sopivat erilaiset teräslaadut, joista suurin osa on ferriittisiä, sillä se on halvempaa ja kestää kuumien olosuhteisen korroosiota paremmin kuin austeniittinen ruostumaton teräs. Austeniittiseen ruostumattomaan teräkseen muodostuva oksidikerros lohkeilee herkemmin pois kuumissa olosuhteissa austeniittisen teräksen ferriittistä terästä suuremman lämpölaajenemisen johdosta. (Inoue & Kikuchi 2003) Lisäksi austeniittinen ruostumaton teräs työstökarkenee ja siksi murtuu todennäköisemmin kuin ferriittinen teräs moottorin tärinän ja pakokaasupulssien vuoksi. Pahimpia paikkoja murtumiselle ovat epäjatkuvuuskohdat esimerkiksi hitsisaumojen läheisyydessä. Ruostumattoman teräksen hitsaaminen on hieman vaikeampaa kuin tavallisen teräksen. Hyvään lopputulokseen pääsemiseksi pitää vähintään käyttää kyseiselle ferriittiselle laadulle sopivaa lisäainetta. Jos käyttää austeniittista lisäainetta, tuloksena on työstökarkenemisiongelmia. Ei-ruostumattomalla lisäaineella hitsatut saumat puolestaan ruostuvat muuta putkea nopeammin. Parhaaseen mahdolliseen lopputulokseen pääsemiseksi kannattaa käyttää hitsatessa juurensuojakaasua putken sisäpuolella ja hitsaamisen jälkeen hioa ja passivoida saumat.

Hieman eksoottisempia pakoputkimateriaaleja ovat titaani, joka on jonkin verran kevyempää kuin teräs, sekä alumiini ja hiilikuitukomposiitti, joita voidaan käyttää pakoputken loppuosassa, sekä äänenvaimentimien ulkokuorissa, joissa lämpötila on matalampi ja paineenvaihtelut maltillisempia kuin pakoputken alkuosassa.

5 ÄÄNENVAIMENNIN

Äänenvaimentimien tarkoitus on vähentää pakokaasun virtauksen pulssimaisuutta, sekä hiljentää pakoääntä. Käytännössä äänenvaimentimia on kahdenlaisia: paineaaltojen hajoamiseen ja heijastukseen perustuvia eli reaktiivisia ja äänen imeytymiseen perustuvia eli absorboivia vaimentimia. Yleensä käytetään yhdistelmää kummankinlaisista vaimentimista. (Bosch & Dietsche 2011: 483) Pakoputkisto voi myös resonoida ja aiheuttaa resonanssiääniä ajoneuvon rakenteissa. Näitä ilmiöitä pyritään välttämään putkiston mitoituksella, komponenttien asettelulla ja äänenvaimentimien rakenteella, esimerkkinä eristetyt kaksinkertaiset seinämät äänenvaimentimissa ja joustavat kumikiinnikkeet.

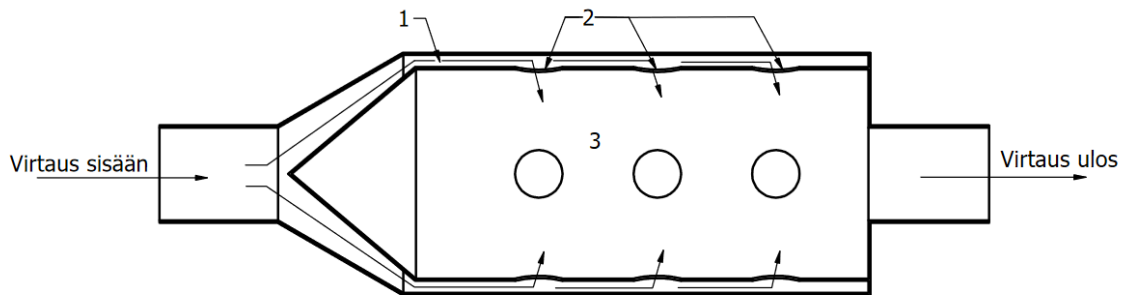
Pakokaasuahdinta ei perinteisesti ajatella äänenvaimentimena, mutta se vaimentaa tehokkaasti pakokaasun matalataajuisia pulsseja. Toisaalta sen siivet tuottavat pyöriessään korkeataajuisia ääntä. (Stone 1993: 272)

5.1 Reaktiivinen vaimennin

Reaktiivisten vaimentimien toiminta perustuu ääni- ja paineaaltojen hajaantumiseen sekä destruktiiviseen superpositioon. Tavoitteena on tasata pakokaasun virtaus mahdollisimman pulssittomaksi. Yksinkertaisin reaktiivinen vaimennin on diffuusiovaimennin, joka on tavanomaisesti tyhjä kammio, joka on selkeästi muita pakoputken osia laajempi poikkipinta-alaltaan. Diffuusiivisen vaimentimen vaimennusteho perustuu paineaallon laajenemiseen pakoputken sisällä, jolloin pakoputken ulostulossa virtaus on vähemmän pulssimaista (Blair 1999: 729).

Yleensä reaktiivinen vaimennin koostuu yhdestä tai useammasta, mahdollisesti erimittaisesta kammioista, jotka on kytketty toisiinsa yhdysputkien ja kammioiden välisten aukkojen välityksellä. Pakokaasu kulkee kammioiden läpi osittain eri reittejä, jolloin painepulssit osuvat alipainepulsseihin ja ääni vaimenee. Myös ääniaaltojen resonointi kammioissa vaimentaa niitä. Vaimennin on sitä tehokkaampi, mitä useampia kammioita siinä on. (Bosch & Dietsche 2011: 483) Reaktiivisten vaimentimien vaimennusteho on hyvä etenkin matalilla- ja keskitaajuuksilla.

Tavanomaisen reaktiivisen kammiovaimentimen huono puoli on sen suuri virtausvastus. Tämän ongelman ratkaisemiseksi on pyritty kehittämään pienemmän virtausvastuksen omaavia reaktiivisia vaimentimia, kuten ”split-stream rushing muffler” (kuva 3). Kyseisen vaimentimen toiminta perustuu kolmeen ilmiöön: kapeaan rakoon kahden putken välissä, jolloin virtaus tasaantuu seinämien suuren pinta-alan aiheuttaman lisääntyneen kitkan takia, säteittäisiin reikiin, joista kulkiessaan virtaus törmää itseensä kammion sisällä, sekä tilavuuteen, joka tasaa virtauksen hetkellistä nopeutta. (Zhang ym. 2018)



Kuva 3. Split stream rushing muffler. 1. kapea rako sisä- ja ulkoputken välissä 2. säteittäiset reiät 3. virtausta tasaava tilavuus.

5.2 Absorptiovaimennin

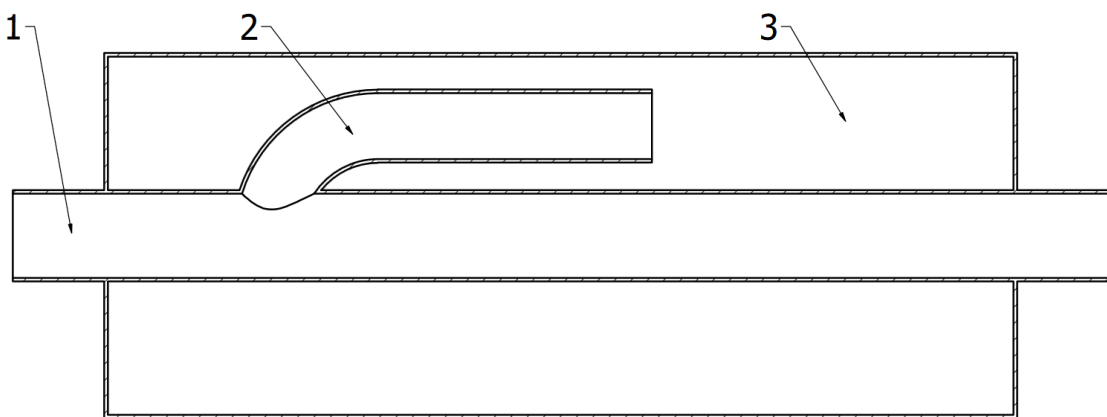
Absorptiovaimentimet perustuvat massaan, johon pakokaasun äänienergia imeytyy. Tämä massa on yleensä lasi- tai basalttikuitua, eli äänenvaimenninvillaa. Absorptiovaimentimien rakenne on käytännössä aina samanlainen: ne koostuvat kammion, joka ympäröi rei'itettyä putkea, jossa pakokaasu virtaa. Vaimentava materiaali on pakattu kammion sisään, reikäputken ympärille. Toisinaan reikäputken ympärillä on myös kerros teräsvillaa varsinaista vaimennusmateriaalia suojaamassa, sillä vaimenninvilla pyrkii kulkeutumaan pois vaimentimesta pakokaasun mukana reikäputkessa vallitsevasta ylipaineesta huolimatta. Absorptiovaimentimen vaimennusteho on tasainen koko vaimennetulla taajuusalueella, lukuun ottamatta matalia, alle 500 Hz taajuuksia, joita se vaimentaa huonosti. (Bosch & Dietsche 2011: 484) Absorptiovaimentimien virtausvastus on suhteellisen pieni johtuen rakenteesta, joka on kaasun virtauksen kannalta käytännössä suora putki. Blair on simulaatioissaan osoittanut, että on kuitenkin mahdollista, että absorptiovaimennin voi aiheuttaa yksittäiselle

kierroslukualueelle suhteellisen suuren virtausvastuksen ja moottorin tehon putoamisen. (Blair 1999: 737).

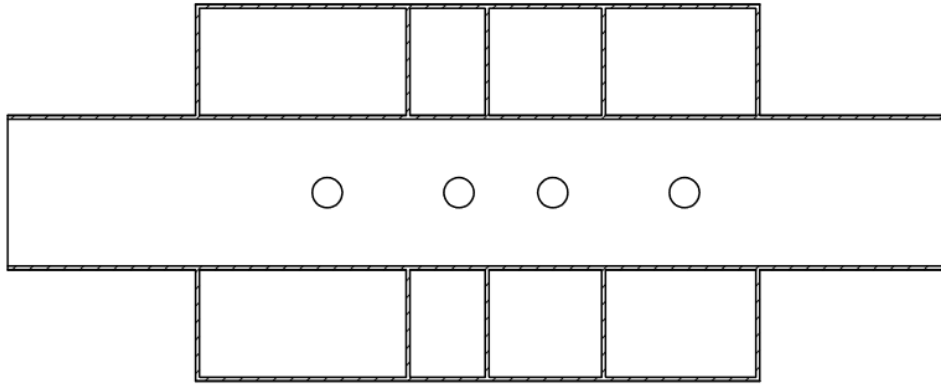
5.3 Resonaattori

Resonaattoreilla voidaan merkittävästi madaltaa äänenpainetta tietyltä, kapealta taajuusalueelta. Erilaisia pakoputkistoissa käytettäviä resonaattoreita ovat Helmholtz ja neljäsosa-aaltoresonaattori. Resonaattorien hyvä puoli on pieni virtausvastus, mutta ongelmaksi voi muodostua resonaattorin ulkopinnan värinän tuottama ääni. (Van Basshuysen & Schäfer 2004: 754)

Helmholtz-resonaattori koostuu pakoputkesta haarautuvasta resonaattoriputkesta, jonka perään on kytketty suljettu resonaattorikammio. Sen toiminta on jousi-massasysteemin kaltaista, resonaattorikammiossa olevan väliaineen toimiessa jousena ja resonaattoriputkessa olevan aineen toimiessa massana. Kuvassa 4 on esimerkki erään Helmholtz-resonaattorin rakenteesta. Resonaattori voi koostua myös kahdesta päällekkäisestä putkesta, joista sisemmän seinämään porattu reikä toimii resonaattorin väliputkena, ja putkien väliin jäävä tilavuus muodostaa resonaattorikammion. Vaimentimessa voi olla myös useita resonaattoreita, joista jokainen toimii omalla resonointitaajuudellaan (Kuva 5).



Kuva 4. Erään Helmholtz-resonaattorin rakenne. 1. pakoputki 2. resonaattoriputki 3. resonaattoritulavuus.



Kuva 5. Vaimennin, jossa useita Helmholtz-resonaattoreita.

Helmholtz-resonaattorin mitoitustaajuus saadaan kaavalla (15) (Bosch & Dietsche 2011: 486):

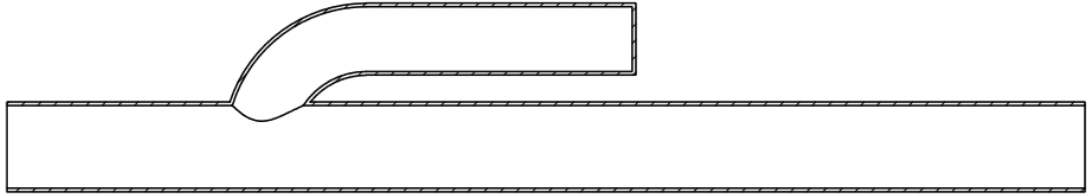
$$f = \frac{a_0}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{LV}} \quad (15)$$

missä f on resonaattorin resonointitaajuus [Hz],
 a_0 on äänennopeus [m/s] väliaineessa, tässä tapauksessa kuumassa pakokaasussa,
 A on resonaattorin putken poikkipinta-ala [m²],
 L on resonaattorin putken pituus [m] ja
 V on resonaattorin kammion tilavuus [m³].

Neljäsosa-aaltoresonaattori koostuu pakoputkesta haarautuvasta putkesta, joka on päästään tulpattu (kuva 6). Sen mitoitustaajuus saadaan kaavalla (16) (Bosch & Dietsche 2011: 486):

$$f = \frac{a_0}{4L}, \quad (16)$$

missä f on resonaattorin resonointitaajuus [Hz],
 a_0 on äänennopeus [m/s] väliaineessa, tässä tapauksessa kuumassa pakokaasussa, ja
 L on resonaattorin putken pituus [m].



Kuva 6. Neljäsosa-aaltoresonaattori.

Huomattavaa on, että vaikka kaavat (15) ja (16) pätevätkin ääniaalloille, on polttomoottorin pakoäänenvaimentimien taajuusmitoitus parhaimmillaankin vain suuntaa antavaa, sillä pakokaasupulssien paine on niin suuri, että niiden käyttäytyminen on epälineaarista. Lopullinen käsitys resonaattorin ja muidenkin vaimentimien toimivuudesta saadaan vasta kokeilemalla ja mittaamalla. Resonaattorit eivät myöskään pienennä äänenpainetta nollaan resonointialueellaan, vaan niiden vaimennusteho etenkin suuripaineisilla pulsseilla on jokseenkin rajoittunut. (Blair 1999: 747)

6 FORMULA STUDENT

Formula Student -sarja on korkeakouluopiskelijoille suunnattu insinööritaitojen kilpailu, jossa tiimien tavoitteena on suunnitella ja rakentaa pieni formulatyypinen kilpa-auto sarjan sääntöjen puitteissa. Auto voi olla sähkö- tai polttomoottorikäyttöinen. Kisoissa mitataan auton nopeuden, kestävyuden ja käsiteltävyyden lisäksi myös tiimin kykyä perustella tehdyt ratkaisut ja lisäksi valmistus- ja talousosaamista. Formula Student -sarjan kilpailuja järjestetään vuosittain useissa maissa, ja ne ovat luonteeltaan kansainvälisiä. Sarja on erityisen suosittu Keski-Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa. (Formula Student Germany 2021)

6.1 Säännöt

Formula Student -sarjan polttomoottoriluokan sääntöjen mukaan auton pakoputken ulostulon täytyy olla auton sivulla tai takana, niin ettei kuljettaja altistu pakokaasuille. Pakoputken pää ei saa olla yli 450 mm taka-akselin keskikohdan takana, eikä yli 600 mm maanpinnan yläpuolella. Turvakaaren etupuolella, rungon sivuilla olevat pakoputken osat täytyy suojata niin, että suojauksen ulkopinnan lämpötila on riittävän matala, ettei se aiheuta palovamman vaaraa. Pakoputkiston ympärillä ei saa käyttää mitään nesteitä imevää materiaalia, kuten pakoputkiteippiä. (Formula Student Germany 2020: 70)

Auton suurin sallittu äänitaso tyhjäkäynnillä on 103 dB(C). Keskimääräistä männännopeutta 15,25 m/s vastaavalla moottorin käyntinopeudella, pyöristettynä lähimpään 500 kierrokseen minuutissa, sekä sitä pienemmillä käyntinopeuksilla suurin sallittu äänitaso on 110 dB(C). Mittaus suoritetaan 0,5 m päästä pakoputken ulostulosta samalta korkeudelta, mutta horisontaalisesti 45 asteen kulmasta pakoputken ulostuloon nähden. Mittaus suoritetaan ennen kilpailua katsastuksessa, jossa auton sääntöjenmukaisuus ja turvallisuus tutkitaan huolellisesti. Vaikka mittaus tapahtuu katsastuksessa, täytyy auton olla sääntöjen mukainen koko kilpailun ajan. Mikäli pakoputkessa on säätyviä osia, täytyy putkiston täyttää äänisäännöt säätöosien kaikissa asennoissa. (Formula Student Germany 2020: 70, 104) Äänitaso tyhjäkäynnillä ei yleensä muodostu ongelmaksi, mikäli moottorin tyhjäkäyntikierrosluku ei ole tavallista merkittävästi korkeampi, joten äänen vaimentamiseen tyhjäkäynnillä ei tässä työssä keskitytä.

Männän keskinopeus lasketaan kaavalla (17) (Blair 1999: 79):

$$c_p = 2L_{st}n_e, \quad (17)$$

missä c_p on männän keskinopeus [m/s],
 L_{st} on moottorin iskunpituus [m] ja
 n_e on moottorin kierrosnopeus [1/s]

Tästä saadaan moottorin käyntinopeudeksi toivotulla männännopeudella (18)

$$n_e = \frac{c_p}{2L_{st}}. \quad (18)$$

Mihin sijoittamalla $c_p = 15,25$ m/s ja Formula Student Oulun auton Yamaha CP2-moottorin iskunpituus $L_{st} = 68,6$ mm = 0,0686 m saadaan (19)

$$n_e = \frac{15,25 \text{ m/s}}{2 \times 0,0686 \text{ m}} = 111,15 \frac{1}{s}, \quad (19)$$

eli 6669 kierrosta minuutissa. Sääntöjen mukaan äänimittaus tehdään lähimpään 500 kierrokseen minuutissa pyöristetyllä moottorin pyörimisnopeudella, mikä tässä tapauksessa on 6500 rpm.

6.2 Sarjan erityispiirteet

Formula Student -sarjan kisoissa autolla ajetaan muun muassa kiihdytys ja mutkikas Autocross -rata. Siksi käsiteltävyyden ja tehon lisäksi etenkin auton keveys korostuu. Jossain tapauksissa myös äänenvaimentimen koko voi tulla ongelmaksi, mutta Formula Student Oulun M03 -autossa vaimentimelle on kohtalaisen paljon tilaa auton oikealla kyljellä. Tilavuudeltaan isompi vaimennin on kuitenkin yleensä pienempää raskaampi, eikä vaimenninta siksi ole syytä suurentaa tarpeettomasti.

Formula Student -sarjan erityispiirteitä ovat melunmittaus auton ollessa paikallaan moottorin käydessä korotetulla nopeudella ilman kuormaa ja mittauksen suorittaminen hyvin läheltä pakoputkea. Siksi voimansiirron ja renkaiden aiheuttamaan meluun ei tarvitse juuri kiinnittää huomiota. Tämä poikkeaa sekä tieliikenteestä, että muista

moottoriurheilulajeista, joissa melua mitataan yleensä useiden metrien päästä liikkuvasta, yleensä täyskaasulla kiihdyttävästä ajoneuvosta ohiajomittauksena.

Sarjassa äänenpainetaso mitataan dBC-asteikolla yleisemmin käytetyn A-asteikon sijaan, ja se on huomattavan rajattu etenkin matalilla taajuuksilla useimpiin muihin moottoriurheilusarjoihin verrattuna. Tästä syystä pakoäänen lisäksi myös muut äänilähteet voivat olla yllättävän merkitseviä. Koska äänen voimakkuus laskee etäisyyden kasvaessa, kannattaa huomiota kiinnittää etenkin mittauspisteen lähellä sijaitseviin äänilähteisiin. Formula Student -autossa tällaisia ovat yleensä resonoivat pinnat kuten katteet sekä pakoputken ja äänenvaimentimen pinta. Myös pakoputken ulostulokohdalla on merkitystä. Ulostulon ollessa osittain suljetussa tilassa, esimerkiksi pohjalevyn ja maanpinnan tai takasiiven päätylevyjen välissä, ei ääni pääse hajaantumaan yhtä paljon kuin avoimessa tilassa. Silloin mitattu äänenpaine on korkeampi kuin se olisi avoimessa tilassa. Osittain suljettuun tilaan syntyy myös seisovia aaltoja, jotka osaltaan vahvistavat ääntä.

Nämä erikoisuudet ovat turvallisuutta painottavassa sarjassa useillakin tavoilla perusteltuja. Mittaus paikallaan antaa kisajärjestäjille samalla mahdollisuuden tutkia muita auton turvallisuuteen ja pakojärjestelmään liittyviä seikkoja. Mittaus on myös helposti toistettavissa autoa rakentavien opiskelijoiden toimesta. Toisaalta ajonopeuksien ollessa yleensä matalia, ei esimerkiksi tieliikenteessä korostuva rengasmelu ole Formula Studentissa suuri tekijä. dBC-mittaus huomioi matalataajuisen melun haitallisuutta, ja matalahko meluraja kuormituksen puutetta mittaustilanteessa. Myös äänitestissä huijaaminen vaikeutuu huomattavasti, sillä äänitasoa ei voi suoraan madaltaa moottoritehoa pienentämällä kuten ohiajokiihdytyksessä. Yhdessä nämä seikat muodostavat mielenkiintoisen suunnitteluhaasteen äänenvaimennuksen, painon ja moottoritehon tasapainottamiseksi.

6.3 Formula Student Oulun auto

Formula Student Oulun autossa on Yamahan valmistama bensiinikäyttöinen, kaksisylinterinen, epätasaisella sytytysvälillä oleva CP-2 moottori, jonka iskutilavuus on 0,69 l. Samaa moottoria käytetään Yamahan MT-07-moottoripyörässä. Moottorille ei ole tehty muita muutoksia, kuin uusi imu- ja pakosarja. Äänenvaimentimelle on suunniteltu tila auton oikealle kyljelle, ja pakoputken ulostulo viedään joko auton oikealle sivulle tai

auton takaosaan pohjalevyn alle tai päälle. Tämä tila ja aiemmin käytössä ollut äänenvaimennin näkyvät kuvassa 7.

Aiempiina vuosina äänenvaimentamisen kanssa on ollut ongelmia. Käytössä on ollut vaimennin, jossa on kaksi villalla ympäröityä reikäputkea, eli absorboivaa elementtiä peräkkäin. Omissa mittauksissa äänitaso on ollut hyvin lähellä sallittua, noin 109,9 dB(C). Kisoissa on kuitenkin jouduttu äänitestin läpäisemiseksi turvautumaan erilaisiin hätäratkaisuihin, kuten reikäputken asentamiseen pakoputken päähän tai vaimenninviljojen lisäämiseen. Kerran on jopa jouduttu rakentamaan koko äänenvaimentimen sisukset uudestaan kisapaikalla. Itse valmistettu kaksielementtinen absorptiovaimennin on kuitenkin havaittu selvästi hiljaisemmaksi, kuin aiemmin käytössä ollut yksielementtinen valmisvaimennin, vaikka kyseisessä vaimentimessa oli kuristimena muuta vaimenninta pienempi putki ulostulossa.



Kuva 7. Formula Student Oulun auton oikealle kyljelle varattu tila äänenvaimentimelle, jossa näkyvissä aiemmin käytetty absorptiovaimennin.

6.4 Pakoputkisto

Formula Student Oulun autossa on kaksi yhteen -tyyppinen, samanmittaisilla, sisähalkaisijaltaan 32 mm primääriputkilla varustettu pakosarja, joka on viritetty 6200 rpm pyörimisnopeudelle, jolla saadaan moottorin paras vääntö. Epätasaisen sytytysvälin vuoksi todellisuudessa kummallakin sylinterillä on oma paras vääntöalueensa, mikä tasoittaa moottorin vääntöhuippua. Primäärien yhdistymisen jälkeen pakoputki jatkuu

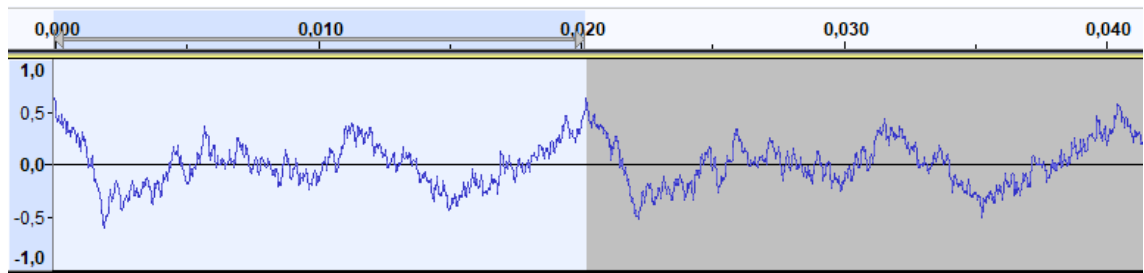
sisähalkaisijaltaan 39 mm putkella, johon on heti primääriputkien yhdistymisen jälkeiseen kohtaan asennettu lambda-anturi. Anturin jälkeen on liitos, johon pakoputken loppuosa äänenvaimentimiseen kiinnitetään.

6.5 Nykyinen äänenvaimennin

Äänenpainemittauksen lisäksi auton pakoääntä on tallennettu, ja sille on tehty taajuusanalyysi Audacity-ohjelmalla. Ääntä tallentaessa sattuneen virheen vuoksi moottorin pyörimisnopeus oli 6000 rpm, eikä sääntöjen määräämä 6500. Tätä kirjoittaessa auto ei ole käyntikunnossa, joten on hyödynnettävä jo tehtyä tallennusta, ja laskennallisesti muutettava ajat ja taajuudet oikeiksi.

Kuvassa 8 on moottorin pakoäänien nauhoitusta tarkasteltu ajan funktiona. Kuvasta nähdään selkeästi, että ääni toistuu samanlaisena 20 ms jaksoissa, eli 3000 kertaa minuutissa. Tämä vastaa nelitahtisen moottorin työkiertoa pyörimisnopeudella 6000 rpm. Kuvasta havaitaan myös, että ensimmäistä huippua seuraa toinen selkeä huippu 12,5 ms päästä, mutta seuraavien huippujen väli on vain 7,5 ms. Tämä käy yksiin moottorin epätasaisen sytytysvälin kanssa ja nämä äänipulssit syntyvät siis pakotahtien primääristen kaasupulssien aiheuttamana. 6 ms vaiheilla olevien pienempien huippujen syntymekanismi on epäselvä. Ne voivat johtua kaasupulssien heijastumisesta pakoputkistossa, tai jostain ääniaaltojen syntymekanismista äänenvaimentimessa, pakoputken ulostulolla, tai sen jälkeen.

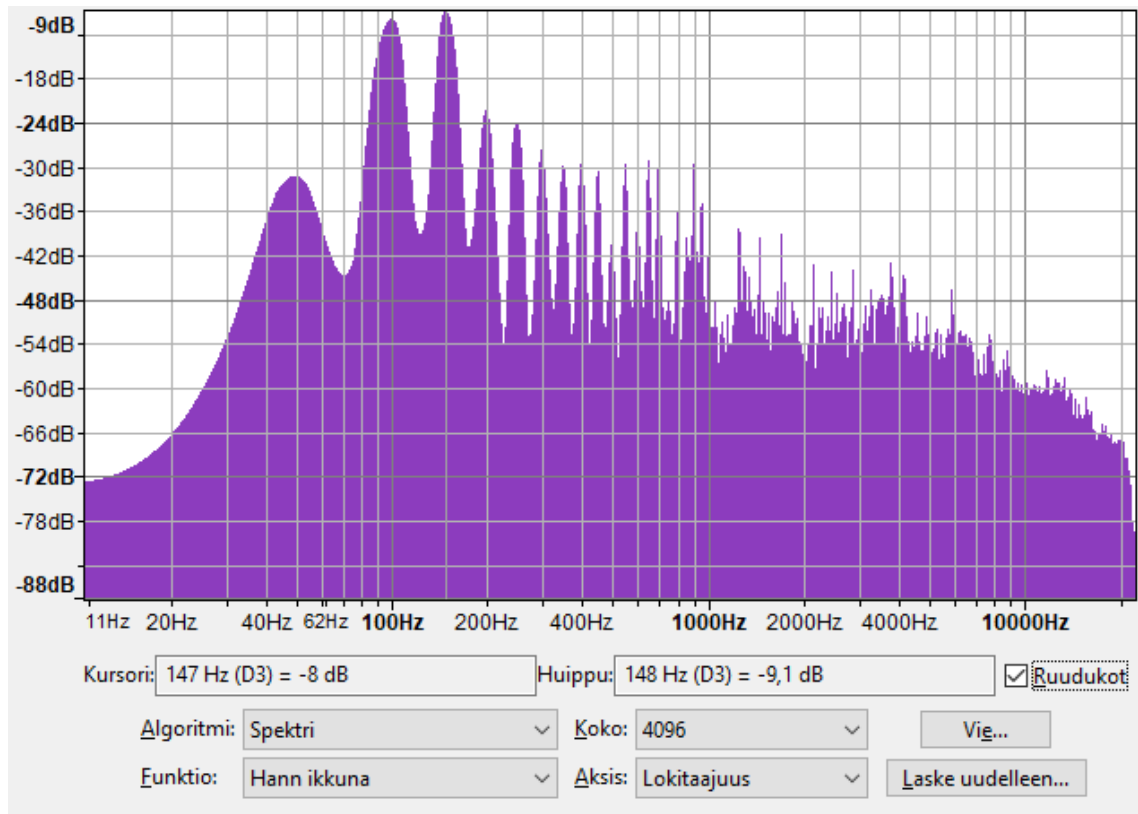
Kyseisen moottorin pakokaasun hetkellisestä massavirrasta, paineesta tai lämpötilasta äänenvaimentimessa ei ole tietoa, mutta Blairin esittämän arvion mukaan voidaan olettaa pakokaasupulssien nopeuden olevan noin 400 m/s (Blair 1999: 697). Tällä nopeudella paineaalto kulkee 0,4 m yhden millisekunnin aikana. Yhtenä ideana paineaaltojen tasaamiseksi oli jakaa pakokaasuvirta kahtia, ja johtaa nämä virtaukset taas yhteen erimittaisten putkien kautta siirtäen näin osa paineaallosta matalapaineiseen kohtaan. Äänitallenteen perusteella pienin järkevä vaihesiirto olisi 0,3 ms, mikä tarkoittaisi 1,2 m eroa putkien pituuksissa.



Kuva 8. Moottorin pakoäänien nauhoitusta pyörimisnopeudella 6000 rpm tarkasteltuna Audacity-ohjelmalla. Vaaka-akselilla aika sekunteina. Kuvassa korostettuna yksi moottorin työkierto, kestoaltaan 20 ms. Moottorin epätasainen sytytysväli on selvästi havaittavissa.

Autossa oli ääntä tallennettaessa paikallaan aiemmin mainittu kaksielementtinen absorptiovaimennin. Kuvan 9 taajuuskäyrästä havaitaan, että korkeilla, yli 1000 Hz taajuuksilla äänenpaine on huomattavasti matalampi kuin 40–400 Hz taajuuksilla. Voidaan siis olettaa, että nykyinen absorptiovaimennin vaimentaa riittävän hyvin korkeita taajuuksia.

Kuvassa näkyy matalilla taajuuksilla selkeitä piikkejä. Alin taajuus, 50 Hz vastaa moottorin työkierron kesto, 20 ms. Kovimmat äänenpainepiikit esiintyvät 100 ja 148 Hz taajuuksilla. Näiden taajuuksien esiintyminen on ilmeisesti seurausta moottorin tuottamien kahden eri vaiheessa olevan 50 Hz paineaallon summautumisesta. Nämä taajuudet vastaavat suurimmasta osasta moottorin pakoääntä nykyisellä vaimenninratkaisulla, ja ovat taajuuksia, joiden vaimentamiseen pitäisi keskittyä. Sääntöjen mukaisella moottorin pyörimisnopeudella 6500 rpm kyseiset piikit ilmenisivät taajuuksilla 108 ja 160 Hz. Seuraavat piikit 200 ja 300 Hz taajuuksilla ovat näiden kahden taajuuden monikertoja.



Kuva 9. Moottorin pakoäänien taajuusanalyysi moottorin pyörimisnopeudella 6000 rpm. Pystyakselin asteikko kuvaa eri taajuuksien äänenpaineen keskinäistä suuruutta, eikä kerro suoraan mitatusta äänenpainesta.

6.6 Häätäratkaisut

Äänitestin läpäisyssä voi ilmetä haasteita. Esimerkiksi jos auton moottorin äänitaso on lähellä maksimia, voivat muuttunut ilmanpaine tai ajossa vähentynyt vaimenninvilla johtaa sallitun äänitason ylittymiseen. Muita mittaustulokseen vaikuttavia asioita ovat mittaustäisyys ja -suunta sekä mittarin kalibroinnin heitto tai eri mittareiden erilainen herkkyys eri taajuuksille.

Mikäli kisapaikalla äänimittauksessa havaitaan, ettei auto menekään äänitestistä läpi, on vielä jotain tehtävissä. Yleisesti käytetty keino äänen vaimentamiseen on pakoputken ulostulon kuristaminen prikalla, tai jonkinlaisen pakopulssia hajottavan kappaleen, kuten reikäputken lisääminen ulostuloon. Myös pakoputken suuntaaminen alaspäin ääntä imevää asfalttia kohti voi toimia (Bell 2002: 172). Formula Studentin tapauksessa, kun mittauspiste sijaitsee lähellä pakoputken päätä ja siten lähellä auton katteita, on katteista ja maasta mittariin heijastuvan äänen vaikutus merkittävä. Tämän äänilähteen vaikutusta voidaan pienentää jatkamalla pakoputkea kauemmas auton katteista ja maanpinnasta.

7 FORMULA STUDENT OULUN AUTON PAKOÄÄNENVAIMENNUS

Formula Student Oulussa on huomattu, että auton pakoäänenvaimennus pitäisi saada sellaiselle tasolle, ettei kilpailuissa tarvitse pelätä äänitestin läpäisyä. Uutta vaimenninta suunniteltaessa on tarkoitus myös kerätä tietoa toimivista suunnittelutekniikoista ja vaimenninratkaisuista. Aluksi pyritään keskittymään yhdistämään hyvä moottoriteho ja riittävä vaimennus, myöhemmin keskitytään äänenvaimentimen painon optimointiin. Formula Student Oulussa on tavoite oppia asioita itse suunnittelemalla ja tekemällä, joten ensisijaisesti vaimennin valmistetaan itse. Myös sopivaa tehdasvalmisteista vaimenninta voidaan harkita, mikäli sellainen jostain löytyy.

7.1 Äänenvaimennuksen ongelma

Helppo tapa vaimentaa ääntä on tehdä pakoputkistoon kapeampia kohtia, jotka pienentävät hetkellistä virtausnopeutta. Tätä tapaa ei kuitenkaan pidä suosia, sillä sen aiheuttama vastapaineen kasvu pienentää moottorin tehoa. Pakoäänenvaimentaminen aiheuttaa aina moottorin tehon vähenemistä pakokaasun virtausvastuksen lisääntymisen takia. Tehohäviötä voidaan pyrkiä minimoimaan vaimentimen huolellisella suunnittelulla ja simuloinnilla, sekä moottorin oikealla säädöllä. Lopputulos on kuitenkin aina kompromissi halutun vaimennustehon ja parhaan mahdollisen moottoritehon välillä (Blair 1999: 697).

Äänenvaimentimen vastapaine on suhteellisen hyvä ilmaisin vaimentimen tehohäviölle, mutta vastapaine ja tehohäviö eivät silti aina täysin korreloi etenkin pienillä vastapaineen arvoilla, sillä moottori, pakosarja, pakoputki ja äänenvaimennin toimivat aina yhtenä kokonaisuutena. Simulointi on hyvä lähtökohta, mutta lopullinen varmuus valittujen ratkaisujen toimivuudesta saadaan vasta testaamalla moottoria apulaitteineen (Bell 2002: 172).

7.2 Moottorin erityispiirteet

Käytännössä on havaittu, että useampisylinteriselle moottorille äänenvaimentimen suunnitteleminen on helpompaa, kuin yksi- tai kaksisylinteriselle. Tämä johtuu siitä, että useampisylinterisen moottorin pakovirtaus on luonnostaan vähemmän pulssimaista kuin

vähemmällä sylintereillä varustetun moottorin. Koska kaksisynterisen moottorin pakopulssit ovat voimakkaita, tuottaa se paljon matalataajuisia ääntä. Tämä yhdistettynä dBC-mittauskäyrän käyttöön vaatii erityisen hyvää vaimennusta matalille taajuuksille.

Moottorin epätasainen sytytysväli aiheuttaa myös mielenkiintoisen ilmiön, jossa äänipiikkejä esiintyy useammilla taajuuksilla kuin tasaisella sytytysvälillä toimivalla moottorilla esiintyisi. Tämä aiheuttaa haasteita muun muassa resonaattorin suunnitteluun: riittääkö jonkin yksittäisen taajuuden vaimennus resonaattorilla, vai pitäisikö kaikille kovempina esiintyville taajuuksille olla omat resonaattorinsa?

7.3 Valmisvaimennin

Moottoriurheiluun tarkoitettuja, vapaasti virtaavia absorptiovaimentimia saa alan liikkeistä suhteellisen halvalla. Oulun formulatiimissä onkin kokeiltu hiilikuitukuorista valmisvaimenninta, mutta todettu sen vaimennustehon olevan riittämätön sarjan sääntöihin nähden. Myös paremmin vaimentavia absorptiovaimentimia ja reaktiivisia vaimentimia on saatavilla, mutta ne ovat teräskuortensa vuoksi painavia. Koska Formula Student -sarjassa auton kiihtyvyys ja käsiteltävyys ovat erityisen tärkeitä, täytyy auton olla mahdollisimman kevyt, eikä näiden valmisvaimentimien painoa voi siten hyväksyä. Suurin ongelma erinäisissä valmisvaimentimissa on kuitenkin se, ettei niiden vaimennustehoa tiimin autossa voi etukäteen todentaa.

7.4 Vaimennintyyppin valinta

Tässä työssä esitettyjen tietojen perusteella on selvää, ettei kohtuullisen kokoisella absorptiovaimentimella pystytä vaimentamaan pakoääntä luotettavasti sarjan sääntöjen vaatimalle tasolle. Tämä johtuu siitä, että moottori tuottaa kovia matalataajuisia pulsseja, ja absorptiovaimentimien vaimennusteho matalilla taajuuksilla on huono. Sen sijaan korkeiden äänitaajuuksien vaimentamiseen se sopii hyvin, ja siksi onkin luultavasti kannattavaa käyttää ainakin yhtä absorboivaa elementtiä äänen vaimentimessa.

Matalien taajuuksien vaimentamiseen jää ratkaisuksi erilaiset reaktiiviset vaimentimet. Äänen vaimennuksen kannalta suhteellisen varma ratkaisu olisi rakentaa suuritulavuuksinen useampikammioinen reaktiivinen vaimennin. Jokainen perättäinen kammio kuitenkin aiheuttaa virtausvastusta osaltaan, joten tätä ratkaisua ei varsinaisesti

voi suositella. Sen sijaan vaimentimen tilavuuden lisäämisellä voidaan kasvattaa vaimennustehoa moottoritehon kärsimättä (Blair 1999: 762). Ainoana varsinaisena haittapuolena suurella vaimentimella on sen mahdollinen paino.

Koska sarjassa mitataan ääntä tietyllä moottorin kierrosluvulla, voisi yhden tai useamman resonaattorin käyttäminen olla kokeilemisen arvoinen vaihtoehto. Resonaattorit vaimentavat hyvin vain viritystaajuuttaan, mutta toisaalta ne eivät aiheuta suurta virtausvastuksen kasvua.

7.5 Vaimentimen suunnittelu

Äänenvaimentimen suunnittelussa vain mielikuvitus on rajana. Muutamia hyviä ohjenuoria kuitenkin on, sillä suurempi tilavuus vaimentaa etenkin matalia taajuuksia tehokkaammin ja vaimenninelementtien järjestyksellä on merkitystä lopulliseen äänitasoon. Song et al. (2020) ovat osoittaneet simuloimalla, että matalia taajuuksia vaimentava suuri kammio, sekä resonaattorit kannattaa asentaa pakoputkeen ennen keski- ja korkeita taajuuksia vaimentavia pienempikammioisia vaimentimia parhaan vaimennustehon saavuttamiseksi. Suunnittelussa täytyy myös aina pitää mielessä käytössä olevat valmistusmenetelmät, ja pyrkiä tekemään vaimentimen rakentamisesta helppoa ja varautua mahdollisiin muutoksiin.

Olemassa olevaa tietoa pakoäänien tasosta vaimentamattomana ja helposti saatavilla olevilla äänenvaimentimilla kannattaa hyödyntää lähtökohtana suunnittelulle ja vaimennustavoitteille. Resonaattoreiden vaimennustehoa kuvaavia ”transmission loss” -yhtälöitä sekä resonaattoreiden vaimennustaajuuden yhtälöitä voi käyttää lähtökohtana resonaattoreiden mitoitukselle. Ainakin ensimmäisistä resonaattoriversioista kannattaa kuitenkin suunnitella säädettäviä, ja kokeilemalla selvittää millaisella säädöllä saavutetaan paras vaimennusteho, sekä tutkia taajuusanalyysin avulla, mitä taajuuksia kyseinen resonaattori lopulta vaimentaa ja kuinka paljon.

7.6 Simulointi

Pakokaasupulssien suuren paineen vuoksi akustisilla kaavoilla mitoitettut vaimentimet harvoin toimivat aiotulla tavalla (Blair 1999: 742). Sen sijaan moottorin 1D-simulointiohjelmilla, kuten GT-Suite tai AVL Boost, voidaan moottorin tuottamat

kaasupulssit mallintaa suhteellisen tarkasti. Näitä ohjelmia voidaan suoraan käyttää tutkittaessa kaasun virtauksen tasautumista äänenvaimentimessa, tai vaihtoehtoisesti niiden tuottamaa dataa voidaan hyödyntää jossain muussa virtaussimulointiohjelmassa.

Jonkinlaisia tuloksia kaasupulssien käyttäytymisestä äänenvaimentimessa voi toki saada myös arvioimalla pakoputkeen moottorilta saapuvat kaasupulssit, mikäli varsinaista moottorinsimulointiohjelmaa ei ole käytössä. Erilaisten äänenvaimentimien virtaavuutta ja siten niissä hukkuvaa moottoritehoa voi arvioida suhteellisen yksinkertaisestikin simuloimalla tai mittaamalla tasaiseen virtaukseen syntyvää paine-eroa äänenvaimentimen puolelta toiselle (Zhang ym. 2018).

7.7 Testaus

Äänenvaimennin täytyy testata, jotta varmistuttaisiin suunnittelun onnistumisesta. Yksinkertaisen virtaussimulaation tulokset voidaan todentaa virtauspenkissä, joka mittaa äänenvaimentimen vastapaineen virtauksen funktiona. Vastapainetta voidaan mitata myös ajon aikana paine-eroanturilla. Tällöin joudutaan saatua painetietoa jatkokäsittelyyn, sillä moottorin tuottaman virtauksen pulssimaisuus näkyy paineerotiedossa selkeästi.

Jotta voidaan luotettavasti testata äänenvaimentimen vaikutus pakoääneen ja moottorin tehoon, täytyy valmistaa toinen pakoputki ilman äänenvaimenninta. Tämä putki saisi mielellään olla mahdollisimman samankaltainen äänenvaimentimella varustetun pakoputken kanssa, eli sen poikkipinta-ala, mutkien määrä ja jyrkkyys, putken pituus ja ulostulon sijainti ei mielellään saisi poiketa äänenvaimentimellisestä pakoputkesta. Pakoääni voidaan sitten helposti mitata äänenpainemittarilla ja tehdä taajuusanalyysi kumpaakin pakoputkea käyttäen. Mittauksessa täytyy pitää huoli, että olosuhteet ja mittausetäisyys sekä -suunta pakoputken päästä säilyvät samoina.

Moottoritehon mittaukseen tarvitaan jonkinlainen tehonmittauslaite, vähimmillään renkaaseen asennettava anturi, joka laskee tehon täyskiihdytyksessä nopeuden muutoksesta, kun tiedetään auton paino. Varsinaisessa tehopenkissä saadaan kuitenkin tarkempia tuloksia. Taas on huomioitava, että olosuhteet kuten ilmanpaine, lämpötila ja kosteus säilyvät samanlaisina mittauskertojen välillä.

8 YHTEENVETO

Työssä käsiteltiin pakoäänien syntymisen ja pakoäänenvaimentimien teoriaa ja tutkittiin erilaisia vaimennintyypppejä sekä niiden sopivuutta Formula Student Oulun autoon. Työssä pohdittiin Formula Student Oulun aiempia ongelmia pakoäänenvaimennuksessa, sekä tiimin nykyisen auton tuottamaa ääntä etsien mahdollista ratkaisua äänen vaimentamiseksi Formula Studentin sääntöjen määräämälle tasolle.

Työ toimii tiiviinä tietopakettina ja tarjoaa lukijalleen ymmärrystä pakokaasun virtaukseen liittyvistä ilmiöistä, pakoäänien syntymisestä ja äänenpaineen mittaamisesta, sekä pakoäänenvaimentimien toiminnasta. Työ helpottaa äänenvaimentimen suunnitteluprosessiin ryhtymistä kertomalla suunnitteluperusteista ja materiaaleista ja toimii siten lähtökohtana Formula Student Oulun auton seuraavan äänenvaimentimen suunnittelulle.

Tavoitteena työssä oli löytää toimivat suunnittelutyökalut Formula Student -auton pakoäänien vaimentamiseen. Tämä tavoite saavutettiin, vaikka työssä selvisikin, että pakokaasupulssien voimakkuuden vuoksi äänenvaimentimessa esiintyvät ilmiöt ovat epälineaarisia, eikä mitään helppoa ratkaisua äänenvaimentimen suunnitteluun siksi ole, vaan paras konsti on turvautua virtaussimulointiin. Moottorin simulointi onkin aihe, johon tiimissä tullaan varmasti perehtymään lähitulevaisuudessa, sillä siitä olisi suurta hyötyä, ei pelkästään äänenvaimentimen suunnittelussa, vaan myös moottorin tehontuoton parantamisessa.

LÄHDELUETTELO

van Basshuysen, R. & Schäfer, F., 2004. Internal Combustion Engine Handbook. Yhdysvallat: SAE International, 811 s.

Bell, G.A., 2002. Four-Stroke Performance Tuning. 2. painos. Englanti: Haynes Publishing, 327 s.

Blair, G.P., 1999. Design and Simulation of Four-Stroke Engines. Yhdysvallat: Society of Automotive Engineers, Inc., 815 s.

Blair, G.P. & Spechko, J.A., 1972. Sound Pressure Levels Generated by Internal Combustion Engine Exhaust Systems. 1972 Automotive Engineering Congress and Exposition. Yhdysvallat: SAE International, 11 s.

Robert Bosch GmbH & Dietsche, K., 2011. Automotive Handbook. 8. painos. Saksa: Robert Bosch GmbH, 1265 s.

Formula Student Germany, 2021. About [verkkodokumentti]. Saksa: Formula Student Germany. Saatavissa: <https://www.formulastudent.de/about/concept/> [viitattu 26.4.2021].

Formula Student Germany, 2020. Formula Student Rules 2020 [verkkodokumentti]. Saksa: Formula Student Germany. Saatavissa: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2020/rules/FS-Rules_2020_V1.0.pdf [viitattu 13.1.2020], 133 s.

Inoue, Y. & Kikuchi, M., 2003. Present and Future Trends of Stainless Steel for Automotive Exhaust System. Nippon Steel Technical Report [verkkodokumentti], 88, 62-69. Japani: Nippon Steel. Saatavissa: <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/n8814.pdf> [viitattu 18.5.2021], 8 s.

Mäkelä, M., 2005. Tekniikan kaavasto: Matematiikan, fysiikan, kemian ja lujuusopin peruskaavoja sekä SI-järjestelmä. 5. uud. painos. Suomi: Amk-kustannus: Tammertekniikka. 205 s.

Munjal, M.L., 1987. Acoustics of ducts and mufflers with application to exhaust and ventilation system design. Yhdysvallat: Wiley. 328 s.

Song, C., Yu, G., Yang, S., Yang, R., Sun, Y. & Wang, D., 2020. Development of a New-Concept Supercharged Single-Cylinder Engine for Race Car. Energies [verkkodokumentti], 13(14):3694. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/14/3694>, 35 s.

Stone, R., 1993. Introduction to Internal Combustion Engines. 2. painos. Yhdysvallat: Society of Automotive Engineers, Inc., 574 s.

Zhang, Y., Wu, P., Ma, Y., Su, H. & Xue., J., 2018. Analysis on acoustic performance and flow field in the split-stream rushing muffler unit. Journal of Sound and Vibration [verkkodokumentti], 430, 185-195. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022460X18302505>, 11 s.