

KANAVAJÄRJESTELMÄN KOKEELLINEN TUTKIMUS MONIKANAVAISELLA IN-DUCT MITTAUKSELLE JA AKUSTINEN SYSTEEMIMALLINNUS ELEMENTTIMENETELMÄLLÄ

Mikko Matalamäki¹, Sakari Tervo¹, Esa Nousiainen¹, Zengxin Gao², Jouni Kivi²

¹ A-Insinöörit Suunnittelu Oy
Vaasanpuistikko 13
65100 Vaasa
etunimi.sukunimi@ains.fi

² Wärtsilä Finland Oy
Teollisuuskatu 1
65170 Vaasa
etunimi.sukunimi@wartsila.com

Tiivistelmä

Kanavien akustisissa ilmiöissä on usein hyödyllistä käyttää sekä mittausta että mallinnusta ilmiöiden selvittämiseksi. Tässä tutkimuskohteena ovat rinnakkaiset suuren kokoluokan kanavat, jotka sisältävät keskenään identtisiä kaasunkäsittelylaitteita ja identtiset äänilähteet, mutta joiden putkiosat eroavat geometrialtaan jonkin verran toisistaan. Kanaviin syötetään sovellutuksessaan verraten voimakasta ja pienitaajuista ääntä.

Toisessa kanavista on havaittu vibroakustisia ilmiöitä, joita toisessa kanavassa ei havaita. Asiaa selvitettiin värähtelymittauksilla ja kaksikanavaisilla äänenpainemittauksilla kanavien sisältä, useasta eri pisteestä, kanaviston ollessa normaalissa käytössään. Mittausten perusteella kanavistojen välillä on useassa pisteessä keskimäärin 6 dB äänenpainetasoero dominoivalla taajuudella. Tälle korottuneelle äänenpainetasolle haluttiin löytää selitys mallintamalla ja mittausdataa analysoimalla.

Kanavistot mallinnettiin mittatarkasti akustista analyysiä varten, ja rakennettiin akustinen kolmiulotteinen malli. Elementtimenetelmällä analysoitiin kanavistoista mm. akustisia moodeja ja siirtohäviötä, sekä verrattiin mallissa äänenpainetasojen vaihtelua mittauspisteisiin.

Elementtimenetelmällä ei löydetty selkeää moodia tai muuta ilmeistä, joka selittäisi äänenpainetasoeron. Laskentamalli selittää vain osittain kanavistoista saadut mittaustulokset. Kaksikanavamittausten analyysin perusteella suuremman äänenpaineen kanavistossa takaisinpäin (kohti äänilähdettä) palaava ääniaalto on huomattavasti voimakkaampi kuin toisessa kanavistossa.

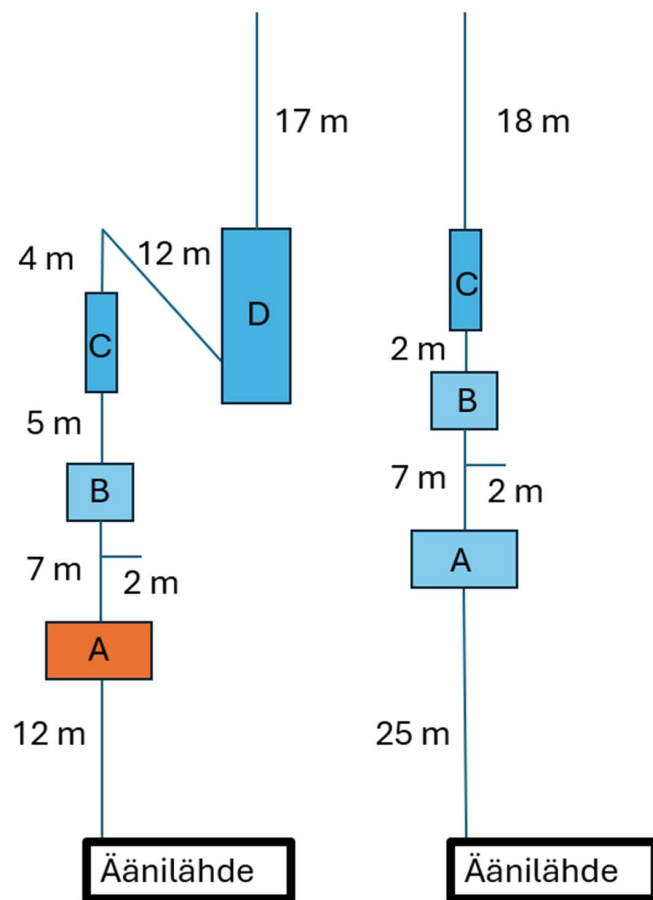


© 2025 Mikko Matalamäki, Sakari Tervo, Esa Nousiainen, Zengxin Gao ja Jouni Kivi. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen -lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

Lopullista selitystä ilmiöön ei vielä onnistuttu löytämään. Jatkotutkimusaiheina ovat ainakin kanaviston eri laitteiden tarkempi kuvaaminen mallissa sekä kanavistomallin laajentaminen kattamaan mm. äänilähde sekä kanavistojen yhteisen laitteen kautta yhteydessä oleva toinen putkisto.

1 JOHDANTO

Eräessä järjestelmässä on rinnakkaiset suuren kokoluokan kaasua sisältävät kanavat, joista toisessa on havaittu haitallisia vibroakustisia ilmiöitä. Kanavat sisältävät keskenään identtisiä kaasunkäsittelylaitteita ja identtiset äänilähteet, mutta kanavien putkiosat eroavat pituudeltaan toisistaan. Kanaviin syötetään sovellutuksessaan verraten voimakasta ja pieni-taajuista ääntä.



Kuva 1. Kanavistojen periaatekuva, jossa on havainnollistettu mittaerot kanavien kesken. Laitte, jossa on havaittu haitallisia vibroakustisia ilmiöitä, on merkitty kuvaan oranssilla.

Haluttiin selvittää, miksi toisessa kanavista ilmiöitä havaitaan. Mitattiin värähtelynopeus ja äänenpaine kanavien sisältä, useasta eri pisteestä, kanaviston ollessa normaalissa käytössään. Mittausten jälkeen ilmiö koetettiin simuloida, mallintaen ja mittausdataa analysoiden.

2 ILMIÖT KANAVISSA

Tutkimuskohteessa on rinnakkaisia, halkaisijaltaan 1300...1800 mm ja poikkileikkaukseltaan pyöreitä kanavia, joiden niin sanottujen putkiosien geometrioissa on eroja keskenään. Kanavat sisältävät keskenään samanlaisia kaasunkäsittelylaitteita, jotka pienten taajuuksien näkökulmasta toimivat (ainakin) laajennuskammioina ja ovat riittävän suuria suhteessa putken kokoon toimiakseen akustisina epäjatkuvuuskohtina. Kanavien pituus on noin 80 metriä per kanava, kaasun lämpötila kanavassa on n. 350 °C.

Yhdessä kanavista on havaittu kaasunkäsittelylaitteistossa haitallisia vibroakustisia ilmiöitä, joita ei havaita vierekkäisessä, geometrialtaan hieman erilaisessa kanavassa. Ilmiöiden haitallisuuden takia oli tärkeää selvittää, mikä on ilmiöiden juurisyy ja mitä sille voi tehdä. Työvälineiksi valikoituivat ensi vaiheessa mittaukset, ja myöhemmin elementtime-netelmä-laskenta sekä mittausdatan hienostuneempi analyysi.

3 MITTAUKSET

Ensimmäisissä mittauksissa suoritettiin kanavan sisäisiä värähtely- ja äänenpainemittauksia eri kohdista kanavaa, kuitenkin läheltä kohtaa, jossa haitallisten ilmiöiden oli havaittu tapahtuvan. Mittausten aikana kanava oli normaalissa käytössään, joka tarkoitti haastavia mittausolosuhteita, mm. satojen asteiden kaasun lämpötila, suuri äänenpainetaso ja likainen kaasu.

Mittaustuloksista selvisi, että suurimmat värähtely- ja äänenpainetasot ilmenevät yhdellä pienitaajuisella ääneksellä. Muilla taajuuksilla äänienergiaa oli verrattain vähän.

Laitteessa, jossa haitallista ilmiötä ei havaittu, mittauksissa näkyi sama dominoiva äänes, mutta äänenpainetaso ääneksellä oli keskimäärin 6 dB alhaisempi. Tämä herätti ajatuksen, onko toinen kanava mitoiltaan sellainen, että syntyy epätoivottu resonanssi, joka vahvistaa kyseistä äänestä.

Järjestettiin uudet mittaukset, joissa mitattiin äänenpainetta kanavistossa pituussuunnassa eri kohdista, tällä kertaa synkronoituina kaksikanavamittauksina. Näiden mittausten perusteella saatiin äänenpaine eri kohdissa kanavistoa, ja ennen kaikkea mahdollisuus erotella etenevä ja palaavan ääniaalto ja niiden voimakkuudet.

4 LASKENTA

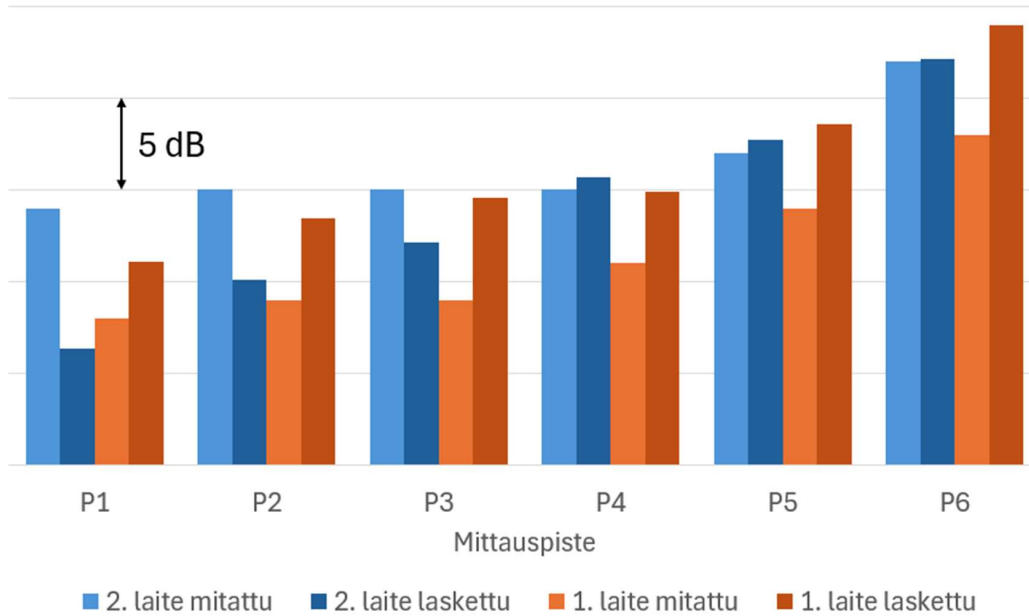
Ongelmaa lähestyttiin kahdesta eri laskentateknisestä suunnasta: ensimmäisessä molemmat kanavat mallinnettiin kolmiulotteisesti ja elementtimenetelmällä analysoitiin äänenpaineen vaihteluita, siirtohäviötä ja moodeja. Toisessa menetelmässä kaksikanavamittausten datan perusteella laskettiin etenevän ja palaavan aallon voimakkuuksia kanavistoissa.

4.1 Elementtimenetelmä-laskenta

Kanavistojen geometria mallinnettiin kokonaisuudessaan elementtimenetelmä-laskentaa varten. Elementtimenetelmä-laskennassa keskityttiin etsimään havaitun äänen taajuuden ympäristöstä moodia, joka selittäisi kohonneet äänenpainetasot. Laskentaa suoritettiin sekä osalle putkistoa paloittain, että koko putkistolle kerralla. Laskentaan sisällytettiin putkiston sisällä oleva kaasu, mutta ei putkiston rakenteellisia osia. Koska mittausten perusteella

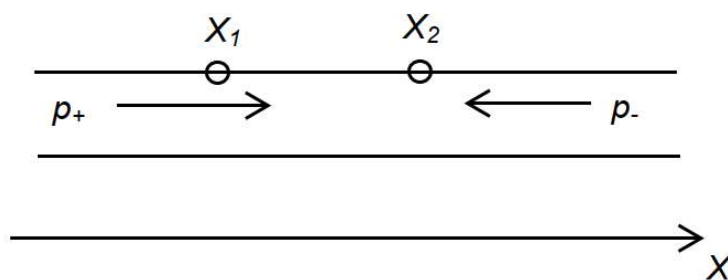
tiedettiin ongelmallinen taajuus tarkalleen, voitiin keskittyä etsimään moodia kyseisen taajuuden ympäristöstä.

Laskettiin lisäksi äänenpaineen eroja kanavistosta samoissa paikoissa missä mittauksetkin oli suoritettu, sekä mallinnettiin putkiston siirtohäviötä paloissa ja kokonaisuutena, tarkkaillen näkykö siirtohäviössä äänen taajuudella minimi.



Kuva 2. Mittauspisteiden välinen äänenpaine-ero pistetaajuudella, mitattujen ja laskettujen äänenpaineiden ero.

4.2 Mikrofoniparimittaus ja analyysi



Kuva 3. Mikrofoniparimittauksen parametrit.

Kahden mikrofonin yhtäaikainen mittaus, tai mikrofoniparimittaus, analysoitiin kuten on esitetty viitteessä [1]. Analyysin parametrit on esitetty kuvassa 3. Analyysi on validi 1-D aalloille, jos 1-D aallon taajuus on [1]

$$f < \frac{1.84c}{\pi D} \quad (1)$$

Havaittu 1-D aalto, joka toteuttaa yllä olevan ehdon, on summa positiivisen x-akselin suuntaan etenevästä aallosta p_+ ja negatiivisen x-akselin suuntaan etenevästä, heijastuneesta aallosta p_- . Aikatasossa esitettynä, kahden aallon summa pisteessä x_1 on [1]

$$p_1(t) = p_+ \left(t - \frac{x_1}{c} \right) + p_- \left(t + \frac{x_1}{c} \right). \quad (2)$$

Positiivinen aalto on viivästynyt matkan x_1 verran ja heijastunut aalto on viivästynyt saman verran mutta vastakkaiseen suuntaan. Taajuustasossa, tarkastelupisteille x_1 ja x_2 , voidaan havaitut aallot esittää täten muodossa:

$$p_i(\omega) = p_+(\omega) \exp\left(-\frac{j\omega x_i}{c}\right) + p_-(\omega) \exp\left(\frac{j\omega x_i}{c}\right), \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

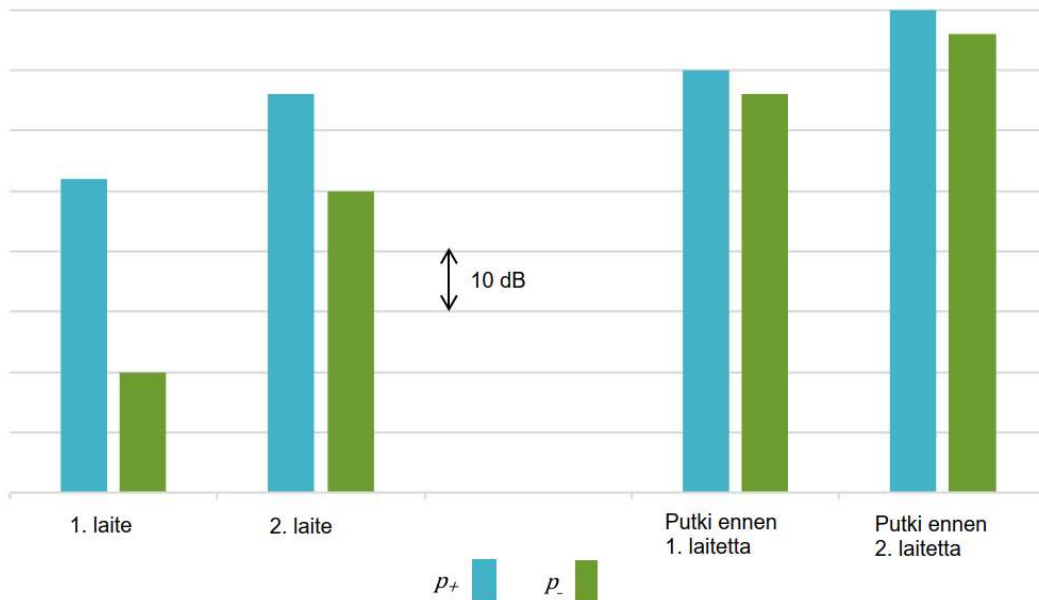
missä ω on kulmataajuus ja i havaintopisteen, eli mikrofonin, indeksi.

Kahdelle havaintopisteelle paikoissa x_1 and x_2 voidaan ratkaista etenevä p_+ ja heijastunut p_- aalto suoraviivaisesti [1]

$$p_+(\omega) = \left(\frac{j(p_1 \exp(j\omega x_2/c) - p_2 \exp(j\omega x_1/c))}{2\sin(\omega/c(x_1-x_2))} \right) \text{ ja} \quad (4)$$

$$p_-(\omega) = \left(\frac{j(p_2 \exp(-j\omega x_1/c) - p_1 \exp(-j\omega x_2/c))}{2\sin(\omega/c(x_1-x_2))} \right). \quad (5)$$

Mittausparimittausten tuloksia on esitetty kuvassa 4. Tulosten perusteella toisessa laitteessa etenevä p_+ -aalto on noin 7 dB voimakkaampi kuin ensimmäisessä ja heijastunut p_- -aalto on 15 dB voimakkaampi toisessa putkessa kuin ensimmäisessä. Ennen laitetta, molemmat aallot ovat noin 5 dB voimakkaampia toisessa putkessa kuin ensimmäisessä.



Kuva 4: Mikrofoniparimittausten tuloksia.

4.3 Johtopäätökset laskennasta

Elementtilaskennalla ei onnistuttu löytämään selkeää moodia, siirtohäviön minimiä tai muuta ilmeistä, joka selittäisi äänenpainetasoeron. Laskentamalli selittää kanavistoissa tehdyt mittaustulokset osin, mm. äänenpaineen vaihtelu mittauspisteiden välillä vastaa melko hyvin laskennalla selvitettyjä äänenpaineen vaihteluita.

Kaksikanavamittausten signaalianalyysin perusteella voidaan todeta, että suuremman äänenpaineen kanavistossa takaisinpäin (kohti äänilähdettä) etenevä ääniaalto on huomattavasti voimakkaampi kuin toisessa putkistossa kanavistossa. Tämän voidaan ajatella viittaavan resonanssiin.

4 YHTEENVETO

Tutkittiin haitallisten vibroakustisten ilmiöiden ilmaantumista ison kokoluokan kanavistoissa mittauksin ja laskennan keinoin. Mittausten perusteella pääteltiin, että kanaviston putkiosien geometria vaikuttaa oleellisesti haitallisen äänneksen voimakkuuteen. Mittausten ja mallinnuksen sekä signaalianalyysin keinoin yritettiin päästä ilmiöön kiinni, ja edelleen kehittämään toteutuskelpoinen ratkaisu haitallisen ilmiön lieventämiseen.

Lopullista selitystä ilmiöön ei vielä onnistuttu löytämään. Mielenkiintoisina jatkotutkimusaiheina ovat ainakin kanaviston eri kaasunkäsittelylaitteiden tarkempi kuvaaminen laskentamallissa, kanavistogeometrian laajentaminen kattamaan mm. äänilähde, sekä kanavistojen yhteisen laitteen kautta yhteydessä oleva toinen putkisto. Asiakkaan on lisäksi määrä suorittaa lisämittauksia toisessa kohteessa, jossa on identtiset kanavat. Lisämittausten perusteella voidaan saada lisätietoa ilmiöstä, sekä se, onko nyt esiintynyt ilmiö yksittäistapaus.

VIITTEET

- [1] Andersen, K.S., (2008) Analyzing Muffler Performance Using the Transfer Matrix Method, COMSOL conference 2008, Hannover.
- [2] Hynninen, A., (2015) Acoustic in-duct characterization of fluid machines with applications to medium speed IC-engines, KTH Royal Institute of Technology, 2008, Stockholm.
- [3] Gao, Z., Saine, K., (2023) Exhaust pipeline influence on large engine exhaust noise measurement and the countermeasure, Akustiikkapäivät 2023, Tampere.