

PAKOÄÄNENVAIMENTIMEN KEHITYSPROSESSI

Jukka Tanttari¹, Heikki Isomoiso¹, Seppo Uosukainen¹, Antti Hynninen¹, Esa Nousiainen², Virpi Hankaniemi², Ville Veijanen²

¹ VTT
PL 1300, 33101 Tampere
etunimi.sukunimi@vtt.fi

² Wärtsilä Finland Oy Power Plants
PL 252, 65101 Vaasa
etunimi.sukunimi@wartsila.com

Tiivistelmä

Wärtsilä ja VTT ovat kehittäneet uusia, ominaisuuksiltaan ylivertaisia pakoäänenvaimentimia mäntämoottorivoimalaitoksiin. Kehitysprosessin vaiheita ovat tehtävän tarkentaminen, vaatimusmäärittely, konseptikehitys, jaostaminen mallinnusta ja simulointia hyödyntäen, pienoismalli- ja/tai täysmittakaavatestit, rationalisointi valmistusta varten sekä toiminnan todentaminen voimalassa. Prosessin menestyksellinen läpivienti edellyttää voimalaitostoimittajan, koneakustikon ja vaimenninvalmistajan yhteistyötä. Prosessille on ominaista iteratiivisuus ja osioiminnin välttäminen: vaimentimen akustinen suorituskyky on kyettävä ennakoimaan riittävän hyvin, mutta toisaalta päätöksiä tulee kyetä tekemään myös epävarman tiedon varassa.

1 JOHDANTO

Melupäästön suuruus ja melun häiritsemättömyys vaikuttavat mäntämoottorivoimalaitoksen kilpailukykyyn [1]. Pakoääni on eräs voimalaitoksen merkittävimmistä melukomponenteista ja sen hallintaan on viime vuosina panostettu huomattavan paljon. Kuvassa 1 on eräs mäntämoottorivoimalaitos pakokanavineen [2].

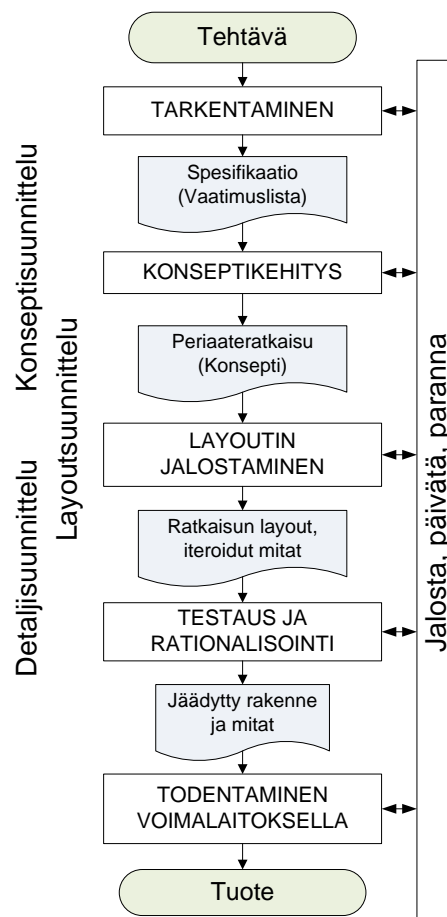


Kuva 1: Mäntämoottorivoimalaitos.

Pakoäänenvaimennin on tärkein yksittäinen voimalaitoksen melupäästön hallinnan komponentti. Massatuotteisiin voidaan löytää valmiita vaimenninratkaisuja. Voimalaitosten vaimentimet ovat räätälöitäviä piensarjatuotteita, eikä markkinoilta ole ollut hankittavissa riittävän kustannustehokkaita, moottorien pakomelun ominaisuuksiin sovitettuja malleja. Niinpä uudentyypisiä vaimentimia on kehitetty Wärtsilän ja VTT:n yhteistyönä. Jäljempänä kuvataan pakoäänenvaimentimen kehitysprosessia, käytettäviä työkaluja, ongelmia, akustisia ilmiöitä sekä saavutettuja tuloksia. Teknisiä ratkaisuja ei kilpailusyistä voida juurikaan käsitellä.

2 KEHITYSPROSESSI

Pakoäänenvaimentimen kehitysprosessilla tarkoitetaan vaatimusmäärittelyistä, rajoitteista ja toiveista käynnistyvää toimintaa, jonka tuloksena syntyy uusi vaimenninmalli. Prosessissa pyritään synnyttämään uusia, entistä parempia ratkaisuja. Samalla voidaan hyödyntää osia vanhoista ratkaisuista ja yhdistellä niitä uudella tavalla. Eräs menetelmällinen esikuva on Pahlin ja Beitzin [3] kehitysmetodiikka. Siinä on erityisen tärkeällä sijalla tehtävän pelkistäminen ja abstrahointi, joilla pyritään edistämään tarkoituksenmukaisimpien ratkaisujen löytymistä. Huomautettakoon kuitenkin, että valmiiden kaavioiden jäykkä noudattaminen ei yleensä ole hyväksi. Ratkaisujen luominen on hiljaista tietoa hyödyntävää luovaa toimintaa, jossa uudet ratkaisut hahmottuvat prosessin edetessä. Vastakohta tälle on ns. tuotantolaskenta, jossa mekaanisesti selvitetään annettujen ratkaisujen toimintaa. Pakoäänenvaimentimen kehitysprosessin päävaiheita on hahmoteltu kuvassa 2.



Kuva 2: Pakoäänenvaimentimen kehitysprosessi.

3 TEHTÄVÄN TARKENTAMINEN JA VAATIMUSMÄÄRITTELY

Tarkentamisvaiheessa vaimentimen akustiselle suorituskyyvälle asetetaan mitattavissa olevat numeeriset tavoitteet. Samalla identifioidaan muut vaatimukset ja rajoitteet sekä mahdolliset toiveet. Muita kuin akustisia vaatimuksia ovat mm. valmistuskustannukset ja vaimentimen mitat. Valmistuskustannuksia on vaikea määrittää tarkasti prosessin alkuvaiheessa. Ne riippuvat mm. teräksen ja muiden materiaalien hinnoista, osien lukumäärästä ja muodosta sekä hitsien määrästä. Valintatilanteissa rakennevaihtoehdoista valitaan valmistusystävällisin, joka yleensä on myös halvin. Kuljetustekniset syyt määräävät vaimentimen maksimikoon, joka on ehdoton rajoite. Paino sinänsä ei ole kovin kriittinen.

Voimalaitoksen melun tärkein taajuusalue on 10...100 Hz. Tällä alueella on tyypillisesti 3...5 vaimennettavaa äänestä. Moottorit käyvät vakiokierrosnopeudella, joten taajuudet ovat vakioita. Jos jotkin äänekset ovat muita voimakkaampia tai esimerkiksi häiritsevyyssyistä kriittisempiä, tulee vaimentimen suorituskyyvaatimukset asettaa vastaavasti.

Vaimentimen todellista hyötyä mittaava lisäysvaimennus (IL) on järjestelmäsuure, joka riippuu koko pakokanavan toiminnasta sekä lähdeimpedanssista. Pakokanavien layoutit ovat laitos- ja moottorikohtaisia, mistä seuraa se, että IL ei ole niissä sama. Tästä syystä vaimenninkehityksessä mitoitussuurena käytetään yleensä komponenttisuureta, vaimentimen läpäisyvaimennusta (TL). Lähtökohtana voidaan käyttää pakokanavasta mitattua äänenpaine- tai äänitehospektriä. Sen perusteella johdetaan tavoitearvot läpäisyvaimennukselle kullakin vaimennettavalla ääneksellä. Tavoitteena voi esimerkiksi olla tietty kokonaistason alenema alueella 10...100 Hz. Tällöin oletetaan, että vaimennin äärettömässä kanavassa, jolloin $IL \approx TL$. Vaatimuslistan pääkohdat voivat olla taulukon 1 mukaiset.

Taulukko 1: *Vaatimuslistan pääkohtia.*

TL [dB]	20 dB @ 12.5 Hz 15 dB @ 25 Hz 25 dB @ 60 Hz
Enimmäismitat [mm]	Pituus 10000 Ulkohalkaisija 2800
Enimmäishinta [euroa]	€€€€€

4 KONSEPTIKEHITYS

Kirjallisuudesta löytyy suuri määrä tietoa vaimenninakustiikasta ja -teknologiasta. Monet oleelliset asiat on selvitetty jo vuosikymmeniä sitten [4]. Valmiita ratkaisuja ei voimalaitossovelluksiin kuitenkaan ole.

Konseptivaiheessa voidaan ratkaisua lähteä kehittelemään siten, että vaimennin ajatellaan koostettavan joukosta yksittäisiä, toivottuja funktioita toteuttavia ”moduuleita”. Moduulien ominaisuudet skaalataan akustisiin tavoitteisiin, enimmäiskokoon, taajuusalueeseen ja pakokaasun ominaisuuksiin sopiviksi. Vaimentimeen pakatuilla moduuleilla on akustisia vuorovaikutuksia, joita voidaan hyödyntää kokonaiskonseptissa.

Pienillä taajuuksilla moduulien pääperiaatteeksi valitaan yleensä reaktiivinen toiminta. Moduulikohtaiset alustavat mitoituskalkelmat voidaan ja kannattaa yleensä tehdä analyyt-

tisillä menetelmillä. Esimerkiksi Helmholtz-resonaattorin viritystaajuuden ennakoinnissa näin päästään noin 10 % tarkkuuteen [5]. Geometrisesti monimutkaisten moduulien tarkastelussa voidaan jo alkuvaiheessa turvautua akustiseen elementtimenetelmään.

5 LAYOUTIN JALOSTAMINEN, MITOITUKSEN TARKENTAMINEN

Moduuleista pyritään muodostamaan mahdollisimman hyvin toimiva, yksinkertainen ja tiiviiksi pakattu kokonaisuus. Potentiaalista vaimenninvalmistajaa on hyvä konsultoida viimeistään tämän vaiheen aikana. Painehäviön yms. ennakoiminen voi myös vaatia omat erityisanalyyseinsä.

Akustinen mitoituskalkulaatio tehdään yleensä elementtimenetelmällä. Muitakin menetelmiä voidaan käyttää. Mallien pohjana on mieluiten parametrisoitu CAD-kokoonpano, jossa mittoja, moduulien järjestystä jne. voidaan helposti muuttaa. Mitoituskalkulaatio on iteratiivista, mutta hyödyntämällä tunnettuja skaalauslakeja voidaan esimerkiksi resonaattorien halutut viritystaajuudet saavuttaa 2...3 iteraatiokierroksella. Tiiviiksi pakatussa kokonaisuudessa vuorovaikutusilmiot (esim. kammio A häiritsee resonaattoria B) ovat voimakkaita, ja siksi kokoonpanojen muunteluun kannattaa käyttää aikaa. Joskus on palattava konseptivaiheeseen ja mietittävä asia uudelleen.

Alustavat vibroakustiset laskelmat tehdään tässä vaiheessa. Malleilla ratkaistaan akustiikan ja rakennevärähtelyn kytketty ongelma. Vaimentimen rakenteesta puuttuu vielä yksityiskohtia ja ainepaksuudet ovat arvioituja (ne riippuvat kunkin vaimenninvalmistajan ratkaisusta), mutta mallit voivat paljastaa potentiaalisia ongelmia, jotka yleensä on helppo korjata pienin konstruktivisina muutoksina. Tyypillisiä ovat viritystaajuuksiin vaikuttavat rakenteen resonanssit. Pakokaasujen lämpötilassa konstruktio materiaalien kimmokerroin on pienempi kuin huoneen lämpötilassa. Tämä voidaan huomioida, mikäli käytettävissä on riittävät tiedot materiaaleista ja rakenteiden lämpötiloista.

6 TESTAUS JA TUOTANTOVERSION RATIONALISOINTI

Vaimennintestauksessa määritetään vaimentimen TL. Yleensä mitataan siirtomatriisi jonka perusteella TL lasketaan [6]. Heräte tuotetaan kaiuttimilla.

Jos konsepti sisältää ratkaisuja, joista ei ole aiempaa kokemusta, voidaan vaimentimesta tehdä pienoismalli ennen täysmittakaavavaimenninta. Pienoismalli voi perustua esimerkiksi Ø200 mm kanavakokoon, jolloin Ø1100...1800 mm pakokanaviin tarkoitettujen vaimenninten kaikki sisämitat skaalataan pienemmiksi suhteessa 1:5.5...1:9. Pienoismallia tutkitaan huoneenlämpötilassa, jolloin myös äänennopeusero kuumaan pakokaasuun (äänen nopeus tyypillisesti noin 500 m/s) nähden on huomioitava. Tehtävä skaalaus on ns. Helmholtz-skaalaus eli periaatteena on äänen aallonpituuden säilyttäminen suhteessa vaimentimen fyysisiin mittoihin, kaava 1.

$$k_1 D_1 = k_2 D_2 \quad (1),$$

jossa k_i on akustinen aaltoluku [1/m] ja D_i on vaimentimen fyysinen mitta [m]. Indeksi 1 viittaa pienoismalliin ja indeksi 2 todelliseen käyttötilanteeseen. Pienoismallissa käytetään vakioitua kanavakokoa, mikä määrittelee kokoskaalauksen parametrin α eli $D_1 = \alpha D_2$, joten

$$\alpha = \frac{k_2}{k_1} = \frac{\omega_2 c_1}{\omega_1 c_2} \quad (2),$$

josta saadaan pienoismallin ja todellisen tilanteen kulmataajuusvastaavuus

$$\omega_1 = \beta \omega_2 = \frac{\omega_2 c_1}{\alpha c_2}. \quad (3).$$

Parametreilla $c_2 = 500$ m/s, $\alpha = 1:5.5$ ja $c_1 = 340$ m/s, saadaan $\beta = 3.74$ ja pienoismallissa taajuutta $f_2 = 30$ Hz vastaavaksi taajuudeksi $f_1 = 112$ Hz. Skaalauksessa akustiset impedanssisuhteet säilyvät, jolloin vaimennin toimii samalla tavalla vastaavilla taajuuksilla.

Jos vaimentimessa käytetään huokoista materiaalia, kuten villaa ja tai reikälevyä, tulee myös näiden akustiset ominaisuudet skaalata. Kyseinen tehtävä on vaativampi ja sitä varten on kehitetty erillinen menetelmä. Skaalaus voi johtaa käytännön kannalta hankaliin tai monikäsitteisiin materiaaliparametreihin. Tällöin pienoismallin materiaaleista haetaan paras kompromissi [7].

Pienoismalli tehdään yleensä teräksestä. Pakokanavan lämpötilassa pitkittäis- ja leikkausaaltojen etenemisnopeus teräksessä on pienempi kuin huoneen lämpötilassa. Näin ollen taajuusvastaavuus kaavan 3 nojalla poikkeaa olennaisesti akustisen fluidin käyttäytymiseen perustuvasta skaalauksesta. Taivutusaaltojen käyttäytyminen johtaa paljon monimutkaisempiin skaalausongelmiin. Näistä syistä ei rakenteen mekaanisten aaltojen skaalausta ole pyritty tekemään.

Täysmittakaavatestauksessa vaimentimen prototyyppiä tutkitaan tehdasoloissa huoneen lämpötilassa, joten $\alpha = 1$ ja $\beta = c_1/c_2$. Tämä voi johtaa varsin vaativiin mittauksiin taajuusskaalauksen mahdollisesti edellyttäessä huomattavan pienitaajuisia (jopa alle 10 Hz) herätteitä. Siirtomatriisi mitataan kahden lähdesijoituksen menetelmällä, kuten pienoismalleissakin. Täysmittakaavatestin etu on se, että rakenteen värähtelyilmiöt skaalautuvat luonnollisemmin kuin pienoismallissa. Kaiuttimien rajallisen suorituskyvyn ja rakenteiden ja ympäristön välityksellä tapahtuvien sivutiesiirtymien vuoksi ei yli 50...60 dB akustisia TL-arvoja kyetä mittaamaan luotettavasti.

Mainittakoon vielä, että vaimenninvalmistajan antama palaute ensimmäisen vaimenninyksilön valmistamisesta on erityisen arvokasta. Yleensä se johtaa yksinkertaistaviin muutoksiin vaimentimessa, hukkapalojen minimointiin ja suurempaan kustannustehokkuuteen. Rationalisointimuutosten jälkeen tehdään tarkistuslaskenta ja uudelleenviritys.

7 TODENTAMINEN VOIMALAITOKSESSA

Voimalaitoksessa on rajoitetut mahdollisuudet tehdä tarkkoja mittauksia. Tyypillisiä mittauksia ovat ”attenuaatiomittaus” eli äänenpaine-eron mittaus vaimentimen yli, emissiomittaus pakokanavan päästä sekä immissiomittaukset laitoksen ympäristöstä. Moottori ei tuota herätettä kaikille taajuuksille, joten kokonaiskuva vaimentimen toiminnasta voi jäädä vaillinaiseksi. Korkeat lämpötilat, virtausilmiöt, kanavien välinen vuorovaikutus, työturvallisuus jne. rajoittavat mittausten tekemistä ja tulosten tulkintaa. Toisaalta edeltävän prosessin tehtävä on karsia suuret virheet pois ennen voimalaitosvaihetta. Mittausmenetelmiä pyritään kehittämään edelleen kentältä saatavan tiedon syventämiseksi.



Kuva 3: Pienois- ja täysmittakaavatesteistä.

8 YHTEENVETO

Wärtsilän ja VTT:n yhteistyönä on suunniteltu ja toteutettu ominaisuuksiltaan ylivertainen pakoäänenvaimenninmallisto. Mallisto on otettu käyttöön ja vaimentimia toimitetaan kaikkiin myytäviin voimalaitoksiin. Kentältä saatu palaute on ollut hyvää. Kehitystyö on edellyttänyt uusien menetelmien ja ajatusten käyttöönottoa. Pitkäjänteisen työn myötä on hahmottunut kehitysprosessi, jota voidaan jatkossa edelleen jalostaa.

KIITOKSET

Työ on tehty Wärtsilä Finland Oy Power Plantsin **E-Power** -projektissa.

VIITTEET

- [1] Nousiainen, E. et al. Mäntämoottorivoimalaitoksen meluntorjunnan paras käytettävissä oleva tekniikka. Akustiikkapäivät 2011, 121-126.
- [2] <http://www.wartsila.com/Imagebank/>. 2013-04-08.
- [3] Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. & Grote, K.-H. Engineering Design. A Systematic Approach. Third Edition, Springer 2007.
- [4] Davis, D. D., Jr. et al. Theoretical and Experimental Investigation of Mufflers with Comments on Engine-Exhaust Muffler Design. National Advisory Committee for Aeronautics. Report 1192. Langley Aeronautical Laboratory, 1954.
- [5] Tanttari, J. et al. Helmholtz-resonaattorit äänenvaimentimina kanavasovelluksissa. Akustiikkapäivät 2011, 127-132.
- [6] Isoimoisio, H. et al. Siirtomatriisin ja ääneneristävyyden mittaaminen. Akustiikkapäivät 2009, 130-135.
- [7] Uosukainen, S. et al. Absorboivien materiaalien ja reikälevyjen skaalaus kanavaäänenvaimentimien pienoismalleihin. Akustiikkapäivät 2011, 133-138.