

Opinnäytetyö AMK

Konetekniikan koulutus

Energia- ja polttomootoritekniikka

2024

Akseli Rauhala

# Palamisilma- ja pakokaasujärjestelmien suunnittelu

– Siirrettävä moottoritutkimuslaboratorio



Opinnäytetyö AMK | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Konetekniikka

2024 | 37 sivua

Akseli Rauhala

## Palamisilma- ja pakokaasujärjestelmien suunnittelu

- Siirrettävä moottoritutkimuslaboratorio

Opinnäytetyö esittelee tulevaisuuden polttoaineita ja moottoreita tutkivan siirrettävän moottorilaboratorion palamisilma- ja pakokaasujärjestelmät sekä niiden suunnitteluun vaikuttavat tekijät. Siirrettävä moottoritutkimuslaboratorio mahdollistaa hiilineutraalien vetyjohdannaisten polttoaineiden palamisen tutkimisen polttomoottorissa. Tässä opinnäytetyössä suunnitellut ja mitoitettut palamisilma- ja pakokaasujärjestelmät ovat siirrettävän moottoritutkimuslaboratorion tukijärjestelmiä, jotka ylläpitävät tutkimusolosuhteita ja mahdollistavat tiedonkeruun tutkimuksesta.

Siirtymä vetytalouteen perustuu vedyn tai vetyjohdannaisten polttoaineiden käyttöön. Näillä polttoaineilla toimivia polttomoottoreita on kuitenkin markkinoilla vasta muutamia, joten niiden tutkimukselle on tilausta. Opinnäytetyössä tutustutaan yleisesti moottoritutkimukseen sekä polttomoottorin mahdollisuuksiin ja rajoitteisiin vetytaloudessa.

Siirrettävän moottoritutkimuslaboratorion palamisilma- ja pakokaasujärjestelmien suunnittelussa on otettava huomioon polttoaineiden ominaisuudet, jotta tutkimusympäristö olisi toimiva ja turvallinen. Vetyjohdannaisten polttoaineet ovat ominaisuuksiltaan keskenään täysin erilaisia, joka johtaa suuriin eroihin myös tutkittavissa moottoreissa. Järjestelmien on siis oltava joustavia, sillä niille mahdotonta määrittää yhtä ainoaa toimintapistettä. Lopulta järjestelmät saatiin vastaamaan vaatimuksia ja ne voitiin mallintaa siirrettävän moottoritutkimuslaboratorion 3D-malliin.

Asiasanat:

Vetytalous, Polttomoottori, Pakokaasujärjestelmä, Palamisilmajärjestelmä

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical Engineering

2024 | 37 pages

Akseli Rauhala

## Designing of combustion air and exhaust systems

- Mobile engine research laboratory

This thesis presents the combustion air and exhaust systems, and the factors that affect their design, of a mobile engine research laboratory that studies future fuels and engines. The mobile engine research laboratory will enable the combustion of carbon-neutral hydrogen-based fuels to be studied in an internal combustion engine. The combustion air and exhaust systems designed and dimensioned in this thesis are the support systems of the mobile engine research laboratory and they maintain the research conditions as well as enable data collection from the research.

The transition to a hydrogen economy is based on the use of hydrogen or hydrogen-based fuels. However, only a few internal combustion engines using these fuels are on the market, so there is a need for research on these engines. The thesis introduces engine research in general as well as the internal combustion engines potential and limitations in the hydrogen economy.

The design of combustion air and exhaust systems in the mobile engine research laboratory must factor in the characteristics of the fuels to ensure a functional and safe research environment. Different hydrogen-based fuels have completely different properties, which leads to differences in the engines that are tested. Therefore, systems must be flexible, as it is impossible to define a single operating point. Eventually, the systems met the requirements and could be modelled on a 3D model of the mobile engine research laboratory.

Keywords:

Hydrogen economy, Combustion engine, Exhaust system, Combustion air system

# Sisältö

<b>1 Johdanto</b>	<b>6</b>
<b>2 Polttomoottoritutkimus</b>	<b>7</b>
2.1 Moottoritutkimus Turun ammattikorkeakoulussa	7
2.2 Yleiset moottorilaboratoriojärjestelyt	8
2.3 Hybridikontti – Synteettisten uusiutuvien moottoripolttoaineiden tutkimusalusta	10
<b>3 Vetytalous ja polttomoottorit</b>	<b>12</b>
3.1 Paineistettu vety	13
3.2 Ammoniakki	14
3.3 Metanoli	15
<b>4 Palamisilmajärjestelmän suunnittelu</b>	<b>16</b>
4.1 Siirrettävän moottoritutkimuslaboratorion palamisilmajärjestelmän vaatimukset ja käytetyt lähtötiedot	17
4.2 Palamisilmajärjestelmän toteutus	18
4.3 Kanavalämmittimien mitoitus ja toiminta	21
<b>5 Pakokaasujärjestelmän suunnittelu</b>	<b>24</b>
5.1 Siirrettävän moottoritutkimuslaboratorion pakokaasujärjestelmän vaatimukset	25
5.2 Pakokaasujärjestelmän toteutus	26
5.2.1 Pakoputken kondenssivesi	30
5.2.2 Pakoäänten hallinta	31
<b>6 Pohdinta</b>	<b>33</b>
<b>Lähteet</b>	<b>34</b>

## **Kuvat**

Kuva 1. Työkonedieselmoottori tutkimuspenkillä Turun AMK:n moottori- ja voimalinjalaboratoriossa (Komulainen 2022).	9
Kuva 2. Hybridikontti.	10
Kuva 3. Palamisilma- ja pakokaasujärjestelmät 3D-mallissa.	19
Kuva 4. Palamisilmajärjestelmä.	20
Kuva 5. Pakokaasujärjestelmä.	27
Kuva 6. Tyks:n varavoimakoneiden pakoputken läpivienti.	29
Kuva 7. Silen sistem SMD40 äänenvaimentimen vaimennuskyky eri taajuuksilla (Silen sistem n.d.).	32

## **Taulukot**

Taulukko 1. Veden määrä kilowattituntia kohden diesel- ja vetypolttoaineilla.	30
---	----

# 1 Johdanto

Ilmaston lämpeneminen on suurelta osin seurausta fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Maailman päättäjät ovat sitoutuneet rajoittamaan ilmaston lämpenemisen 1,5 asteeseen. Tavoitteeseen pääsemiseksi tarvitaan erilaisia keinoja talouden eri sektoreilla. Kaikki kivet on käännettävä ja yksi ajankohtainen kysymys on polttomoottorien sähköistyminen tai hiilineutraaleihin polttoaineisiin siirtyminen. Hiilineutraaleihin polttoaineisiin siirtyminen on ainoa vaihtoehto tietyillä sektoreilla. Tähän siirtymään investoidaan sekä yritysten että valtion tasolla.

Hiilineutraaleihin polttoaineisiin siirtyminen on tekninen haaste, joka vaatii tutkimusta. Opinnäytetyön tavoitteena esitellä tulevaisuuden polttoaineita ja moottoreita tutkivaan siirrettävään moottorilaboratorioon kuuluvat palamisilma- ja pakokaasujärjestelmät sekä niiden suunnitteluun vaikuttavat tekijät.

Palamisilma- ja pakokaasujärjestelmät ovat tutkittavan moottorin tukijärjestelmiä, jotka pitävät huolta turvallisuudesta sekä toimivista tutkimusolosuhteista. Tärkeimpänä lähteenä järjestelmien suunnittelulle on varavoimageneraattoreiden vakiintuneet suunnittelu- ja rakentamisohjeet. Siirrettävän tutkimuskontin polttoaineiden kirjo tuo kuitenkin järjestelmien suunnitteluun lisävaatimuksia, jotka täytyy huomioida.

Ensin tutustutaan yleisesti moottoritutkimukseen sekä polttomoottorin mahdollisuuksiin ja rajoitteisiin vetytaloudessa. Siirrettävän tutkimuskontin palamisilma- ja pakokaasujärjestelmien vaatimukset, suunnitelmat ja toiminta esitellään käyttäen apuna kokoonpanopiirustuksia. Järjestelmien osien ja komponenttien mitoitus ja valintaa avataan teknisesti. Opinnäytetyö toimii pohjana järjestelmien automatiikkasuunnitteluun sekä valmistukseen.

## 2 Polttomoottoritutkimus

Perinteisesti moottorivalmistajat ovat kehittäneet moottoreitaan vastaamaan ajan vaatimuksia. Niitä ovat pitkään olleet teho, käyttövarmuus ja halvat valmistuskustannukset. Öljykriisien ja ihmisen toiminnan aiheuttaman ilmastonlämpenemisen havaitsemisen jälkeen kehitystyö on keskittynyt erityisesti energiatehokkuuden eli hyötysuhteen parantamiseen. Myös ihmiselle haitalliset pakokaasupäästöt ovat saaneet päättäjät tiukentamaan päästömääräyksiä, ja polttomoottoritutkimus onkin viime vuosikymmeninä keskittynyt vahvasti päästöjen hallintaan ja pakokaasujen puhdistustekniikkaan. (Laurikko 2009.) Nämä kaikki vaatimukset tulevat ohjaamaan polttomoottorikehitystä myös jatkossa, uusien haasteiden lisäksi.

Tänä päivänä moottoritutkimus keskittyy erityisesti polttoainejoustavuuteen ja uusiin hiilineutraaleihin polttoaineisiin. Vaasan yliopiston energiatekniikan professorin Maciej Mikulskin mukaan ”polttomoottorien aikakausi ei ole päättymässä vaan pikemminkin saamassa uuden luvun”, jolla hän viittaa polttomoottorin olevan tehokas keino kemiallisen energian muuntamiseen liikkeeksi myös uusiutuvilla polttoaineilla. Haasteita kuitenkin hänen mukaansa vielä on: ”Uusien polttoaineiden polttaminen on monissa tapauksissa vaativampaa kuin perinteisten. Ne pakottavat alan muokkaamaan aiempia polttomoottoreihin liittyviä teknisiä ratkaisuja.” (STT 2023.) Polttomoottorin kehitystyötä ja tutkimusta siis tarvitaan myös tulevaisuudessa.

### 2.1 Moottoritutkimus Turun ammattikorkeakoulussa

Turun AMK on ollut mukana moottoritutkimuksessa jo vuodesta 1994 lähtien ja tekee yhteistyötä muiden korkeakoulujen kanssa. Pää tavoitteita tutkimustyössä ovat moottorien energiatalouden parantaminen ja pakokaasupäästöjen vähentäminen. Asiakkaina moottorilaboratoriossa on muun muassa alan suurimpia suomalaisia toimijoita, kuten AGCO Power, Wärtsilä ja Neste. Vaikka pääosa tutkimuksista on yritysten tilaamia, moottorilaboratoriossa toteutetaan

myös julkisrajoitteisia hankkeita. Moottori- ja voimalinjalaboratoriossa toimii oma laboratoriohenkilökunta, mutta projektit työllistävät myös paljon opiskelijoita. (Niemi ym. 2012, 328.)

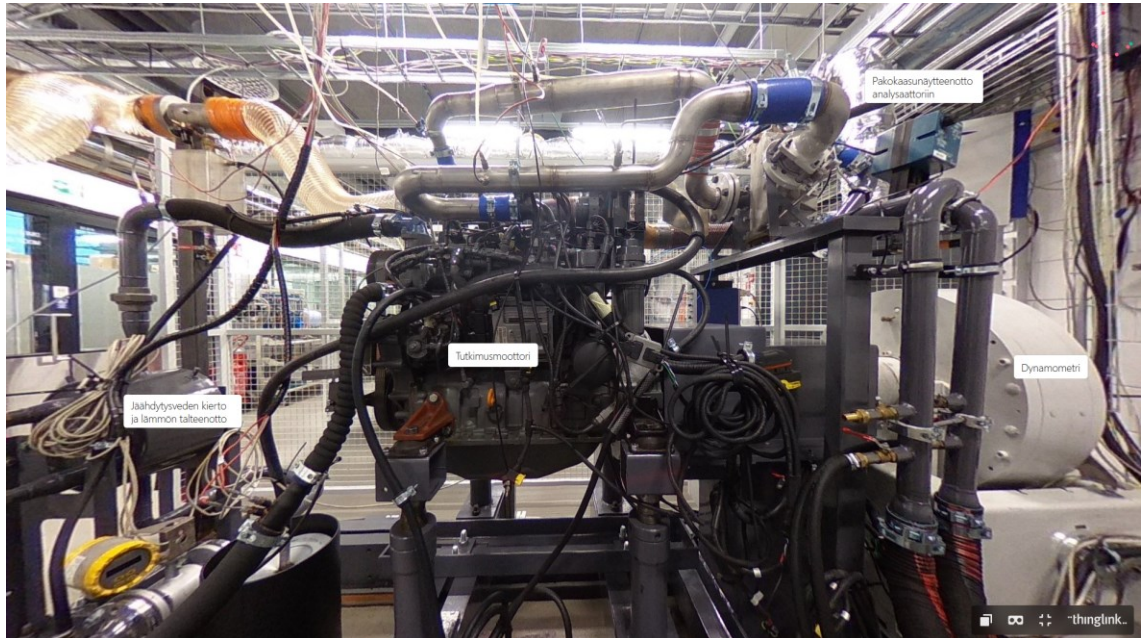
Turun Kupittaalla sijaitsevassa Turun ammattikorkeakoulun EduCity-rakennuksessa on uudet vuonna 2020 valmistuneet laboratoriotilat. Moottori- ja voimalinjalaboratoriossa on kolme pyörrevirtajarrulla ja yksi sähköisellä dynamometrillä varustettua tutkimuspaikkaa. Sähköinen dynamometri mahdollistaa polttomoottoritutkimuksen lisäksi myös hybridi- ja sähköisten voimalinjojen tutkimuksen. Laboratoriossa voidaan tutkia monipuolisesti voimalinjojen ominaisuuksia ja komponentteja, kuten energiankulutusta, polttoaineita, pakokaasupäästöjä tai kitkavastusta. (Turun AMK 2024a.) Laboratoriossa moottoreiden tuottama energia ei mene hukkaan, vaan sekä moottorin hukkalämpö että dynamometrin teho hyödynnetään kampusrakennuksen lämmitykseen (Komulainen 2022).

## 2.2 Yleiset moottorilaboratoriojärjestelyt

Moottorilaboratorio on yleensä jaettu kahteen osaan, moottorihuoneeseen ja valvomoon. Valvomo on erillinen huone, josta yleensä on näköyhteys moottorille tai ainakin tietokone, josta voi seurata moottorin toimintaa. Valvomossa on mahdollista työskennellä turvallisesti myös moottorin käydessä ja esimerkiksi säätää moottorin palotapahtuman tai kuormituksen parametreja. Moottorihuoneeseen sen sijaan mennään yleensä vain moottorin ollessa pysäytettynä, tekemään mekaanisia säätöjä tai korjauksia voimalinjaan. Polttomoottorin ominaisuuksia tutkiessa moottorin käyttäytymisestä eri tilanteissa on saatava tietoa. Moottorilaboratoriossa eniten tilaa vievätkin erilaiset mittaus- ja datankeruulaitteet. (Komulainen 2022.)

Moottorijarrulla jarrutetaan moottorin pyörimistä ja voidaan luoda moottorille todellista käyttöä vastaavia kuormitustilanteita. Simuloitavia kuormitustilanteita voivat olla erilaiset ajosykliä, joissa on kuormanmuutoksia ja kiihdytyksiä. Moottorien tutkiminen kuormitussimulaatioiden avulla on tärkeää, sillä moottorin

toiminta ja tuottamat ympäristölle haitalliset päästöt vaihtelevat suuresti eri tilanteissa. Moottorijarru voi olla sähköinen dynamometri eli generaattori tai pyörrevirtajarru, joka muuntaa jarrutustehon veden lämpöenergiaksi (kuva 1). (Komulainen 2022.)



Kuva 1. Työkonedieselmoottori tutkimuspenkillä Turun AMK:n moottori- ja voimalinjalaboratoriossa (Komulainen 2022).

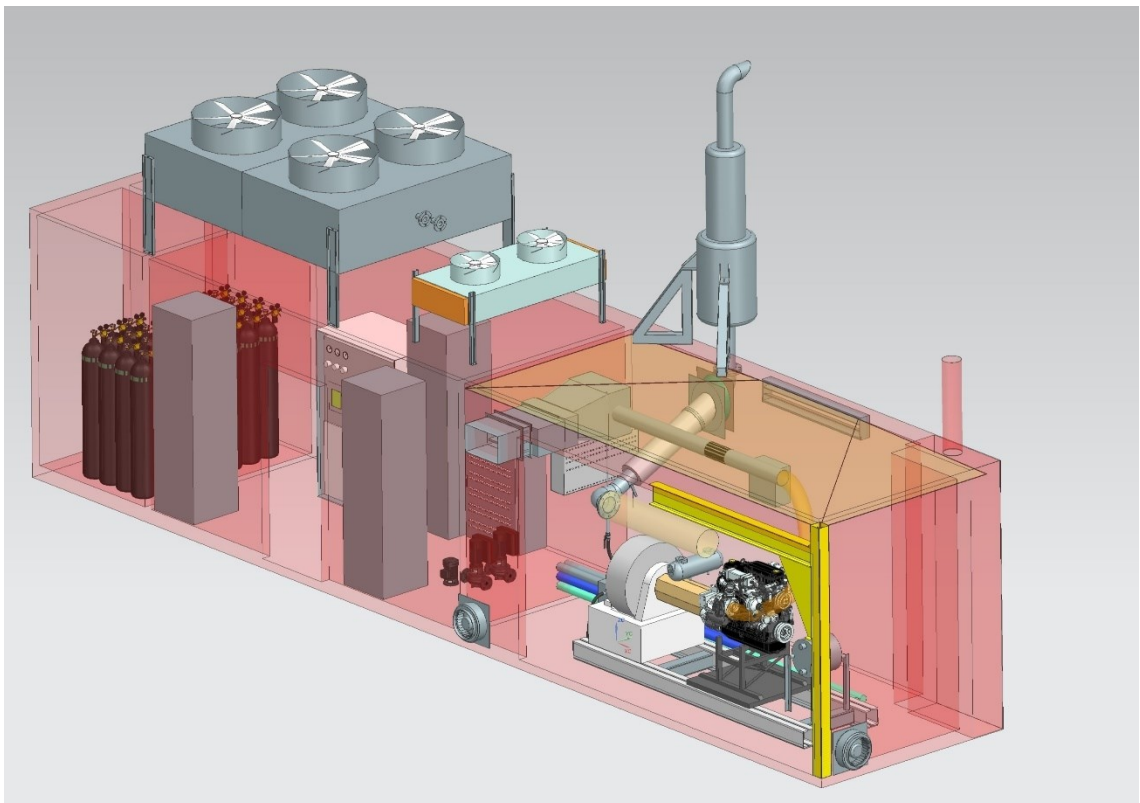
Tutkittavasta voimalinjasta mitataan tehon lisäksi monia muitakin parametrejä, jotka kertovat moottorin toiminnasta. Näitä ovat esimerkiksi polttoainevirtaus, öljynpaine sekä lämpötilamittaukset voimalinjan eri osissa, kuten jäähdyttimessä. Moottorin palamisilma otetaan yleensä moottorihuoneesta imemällä ilmansuodattimen läpi. Moottorin käyttämä palamisilma mitataan ilmamäärämittaria käyttämällä, josta se ohjataan joustavaa letkua pitkin moottorille.

Moottorin pakokaasupäästöjen määrittämiseen käytetään pakokaasuanalysaattoria. Moottorinpakoputkesta otettavasta pakokaasunäytteestä mitataan, kuinka suuri osuus mitäkin ainetta on. Eri päästökomenttien, kuten partikkelien tai typen oksidien, pitoisuudet mitataan erikseen, jotta voidaan muodostaa tarkka pakokaasun koostumus. Analysaattori tarvitsee antureiden kalibroimiseen erikoiskaasuja. Eri päästökomenttien

anturit käyttävät eri kalibrointikaasuja, joten analysaattorikaappiin on kytkettävä useita kaasulinjoja. (Komulainen 2022.)

### 2.3 Hybridikontti – Synteettisten uusiutuvien moottoripolttoaineiden tutkimusalusta

Siirrettävän moottoritutkimuslaboratorion eli hybridikontin kehitystyö lähti liikkeelle tarpeesta liikutettavalle moottoritutkimuslaboratoriolle. Laboratorion sijoittaminen pois kaupunkialueelta mahdollistaa uusien polttoaineiden turvallisen tutkimuksen. Hybridikonttiin suunnitellut polttoaineet ovat diesel, metanoli, ammoniakki ja vety. Polttoaineiden varastoinnissa, käsittelyssä ja jakelussa on turvallisuusriskejä, joiden huomioiminen on tärkeää kokeellisessa tutkimuksessa. (Turun AMK n.d.) Päästöttömiin polttoaineisiin siirtyminen vaatii moottoritutkimusta ja moottoritutkimukseen tarvitaan puitteet.



Kuva 2. Hybridikontti.

Siirrettävä moottorilaboratorio on suunniteltu 40 jalkaiseen merikonttiin, joka jaetaan kolmeen pääosaan (kuva 2). Moottorihuoneessa on dynamometri, tutkittava voimalinja sekä sen tukijärjestelmät, kuten palamisilma- ja pakokaasujärjestelmä. Keskimmäiseen tilaan on sijoitettu moottorinohjaus-, jäähdytys-, anturi-, pakokaasun analysointi- ja automaatiojärjestelmiä, joilla ohjataan koko laboratorion toimintaa. Kontin päässä on tilat pakokaasuanalysaattorin kalibrointi- sekä sammutuskaasuille ja katolla jäähdyttimet. Polttoainevarasto on kontista erillinen ja siitä vedetään polttoainelinja moottorihuoneeseen.

### 3 Vetytalous ja polttomoottorit

Vetytalous on tänä päivänä jatkuvasti otsikoissa ja siihen liittyviä investointeja puntaroidaan Suomessa. Vetytalous tarkoittaisi siirtymistä nykyisestä hiili- tai hiilivetytaloudesta, jossa energiaa muunnetaan, liikutetaan ja käytetään hiilivetyinä, vedyn käyttöön.

Hännisen ym. (2022, 354) mukaan tänä päivänä vetyä tuotetaan maailmassa 57 miljoonaa tonnia vuodessa. Sen suurimmat käyttökohteet ovat ammoniakkin valmistus ja öljynjalostus. Pääosa ammoniakista käytetään typpihapon ja typpeä sisältävien lannoitteiden valmistuksessa. Teollisessa mittakaavassa vetyä valmistetaan höyryreformaamalla fossiilisista polttoaineista. Myös vedestä voidaan valmistaa vetyä elektrolyysillä, jossa veden vety ja happi erotetaan sähkökemiallisesti toisistaan. Elektrolyysillä valmistettu vety on ympäristöystävällistä ja hiilineutraalia, kun valmistuksessa käytetään uusiutuvaa energiaa, kuten tuuli- tai aurinkosähköä. Elektrolyysillä valmistettu vety on kuitenkin ainakin vielä kalliimpaa kuin fossiilisista polttoaineista valmistettu. Uusiutuvien energiamuotojen tuotannossa on paljon vaihtelua, mikä johtuu sään tuulisuudesta ja pilvisyydestä. Kun esimerkiksi tuulisena päivänä sähköä tuotetaan yli kulutuksen ja sähkön hinta putoaa, voidaan sähköenergia varastoida kemialliseksi energiaksi veden elektrolyysillä eli valmistaa vetyä. Halvalla energialla tuotetun vedyn energia voidaan myöhemmin muuntaa sähköksi tai lämmöksi, kun sähkön hinta on korkealla. Elektrolyysillä tuotettua vetyä voidaan myös yhtä lailla käyttää teollisuuden raaka-aineena tai liikennepolttoaineena.

Vedyn varastointi on kuitenkin vaikeaa sen alhaisen tiheyden vuoksi. Vedyn jatkojalostaminen esimerkiksi ammoniakiksi tai vedyn paineistaminen helpottavat vedyn varastointia. Hiilineutraalista vedystä ja hiilidioksidista uusiutuvalla energialla erotetusta hiilestä voidaan valmistaa hiilineutraaleja hiilivetypolttoaineita, kuten metanolia. (Sivill ym. 2022, 20.) VTT (2023) kertoo onnistuneensa valmistamaan Suomessa täysin uusiutuvaa polttoainetta, joka vastaa ominaisuuksiltaan dieseliä. Talteen otetusta hiilidioksidista ja vedestä

korkean lämpötilan elektrolyysillä ja Fischer-Tropsch hiilivetysynteeseillä valmistettu polttoaine soveltuu mihin tahansa dieselmoottoriin. Polttoainetta voidaan käyttää hankalasti sähköistettäviin kohteisiin, kuten laivoihin tai raskasliikenteeseen.

Polttomoottori nähdään siis tulevaisuudessakin tärkeänä työkaluna kemialliseen muotoon säilötyn energian vapauttamiseen liikkeeksi. On kuitenkin huomattava, että mitä pidemmälle uusiutuvalla energialla tuotettua vetyä jalostetaan, sitä enemmän prosessissa on energiahäviötä (Sivill ym. 2022, 149). Uusiutuvan hiilivetypolttoaineen valmistaminen ja hyödyntäminen vaatii siis enemmän energiaa kuin se, että vety pystyttäisiin hyödyntämään suoraan. Uusiutuvat hiilivetypolttoaineet tai sähköpolttoaineet sisältävät myös edelleen hiiltä, josta poliittisesti halutaan luopua. Hybridikontin moottoritutkimukseen suunnitellut tulevaisuuden vetyjohdannaiset polttoaineet esiteltynä seuraavaksi.

### 3.1 Paineistettu vety

Vety on hajuton ja väritön kaasu, jota esiintyy luonnossa vain yhdisteinä muiden alkuaineiden kanssa. Vety on maailmankaikkeuden yleisin alkuaine ja muodostaa enemmän yhdisteitä kuin mikään muu alkuaine. Kun vety yhtyy happeen, syntyy kaikista tutuin vedyn yhdiste, vesi, ja samalla vapautuu runsaasti lämpöä. (Hänninen ym. 2022, 353.) Vedyn lämpöarvo massayksikköä kohden on noin kolminkertainen dieseliin verrattuna, mutta vedyn varastointi on vaikeaa sen alhaisen tiheyden vuoksi. Vety voidaan paineistaa tai sen lämpötila voidaan laskea  $-252,9\text{ °C}$ , jolloin se nesteytyy. (Seppänen ym. 2015, 85, 154.) Vedyn energiasisältö tilavuusyksikössä on kuitenkin nesteytettynäkin alhaisempi kuin dieselin. Puhtaan vedyn hankalan varastoinnin vuoksi onkin lähdetty etsimään varastointiin muita tapoja, kuten vetyjohdannaiset tai vedyn lataaminen materiaalien huokosiin. (Hänninen ym. 2022, 319–320.) Vedyn pieni atomikoko mahdollistaa vedyn varastoinnin materiaalien huokosiin, mutta aiheuttaa myös hitsaajille ja terästeollisuudelle tuttua vetyhaurautta. Vetyhauraus on tyypillinen ilmiö vetyhauraudelle alttiille teräkselle, jossa vedyn

imeytyminen heikentää terästä ja saattaa aiheuttaa vuotoja tai laiterikkoja, jos teräksen vedynkestävyys on huono (Partanen 2023).

Vetyautoja on jo liikenteessä, mutta vedyn jakeluverkoston keskeneräisyys rajoittaa niiden laajempaa käyttöä. Suurin osa vetyautojen voimalinjoista on sähköisiä, joissa vedyn energia muutetaan sähköksi polttokennolla. Viime vuosikymmeninä vetypolttomoottoriautojakin on esitelty, mutta ne eivät ole edenneet massatuotantoon. Vetypolttomoottori ei silti suinkaan ole uusi keksintö, sillä jo ensimmäinen polttomoottoriauto vuonna 1807 kävi vedyllä (Bellis 2019). Vetymootorin kehityksessä haasteena on vedyn turvallinen käsittely. Vedyn ja ilman seos syttyy erittäin helposti. Vain 0,02 millijoulen energia riittää sytyttämään seoksen. Tämä energia voi syntyä siitä, että paineistetun vedyn purkautuminen muodostaa staattista varausta. Vetyvuoto voi siis syttyä näennäisesti itsestään, kuumasta pinnasta tai kipinästä ja aiheuttaa räjähdysvaaran. (TTL 2022a.)

### 3.2 Ammoniakki

Ammoniakki eli kemialliselta kaavaltaan  $\text{NH}_3$  on huoneenlämmössä voimakkaasti ärsyttävä, pistävän hajuinen ja väritön kaasu. Ammoniakki kaasun hengittäminen on ihmiselle vaarallista ja voi pitoisuudesta riippuen johtaa jopa kuolemaan. Ammoniakki voi muodostaa räjähtäviä seoksia ja syövyttää metalleja, kuten kuparia, alumiinia, hopeaa ja sinkkiä. Ammoniakki nesteytyy huomattavasti vetyä korkeammassa lämpötilassa  $-33\text{ °C}$ . (TTL 2022b.)

Ammoniakki on terveysriskeistään huolimatta yleinen kemikaali, jolle löytyy kuljetus- ja varastointikäytännöt. Ammoniakki on palava kaasu ja sen lämpöarvo massayksikköä kohden on noin puolet dieseliin verrattuna (Seppänen ym. 2015, 85). Ammoniakki on helposti nesteytettävissä ja siksi vartenotettava polttoaine varsinkin laivoilla. Wärtsilä (2023) on lanseerannut ammoniakilla toimivan nelitahtimoottorin, joka vähentää kasvihuonepäästöjä 70 prosenttia ja uskoo vahvasti, että hiilineutraalit polttoaineet ovat alan tulevaisuus.

### 3.3 Metanoli

Metanoli on kemialliselta kaavaltaan  $\text{CH}_3\text{OH}$  ja esiintyy nesteenä alle  $65\text{ }^\circ\text{C}$ . Metanoli on herkästi syttyvä sekä kaasuuntuessaan räjähdysaltis. Metanoli vaarallista ihmiselle höyrynä ja roiskeina eikä se sovellu alumiini, kupari, titaani tai sinkki metalleille eikä osalle kumi- ja tiivistemateriaaleista. Metanoli palaa vaikeasti havaittavalla liekillä ja sen palamis- ja hajoamistuotteina syntyy vettä, hiilidioksidia, formaldehydia ja muurahaishappoa. (TTL 2022c.)

Metanolia voidaan tuottaa hiilineutraalisti vedystä ja talteen otetusta hiilidioksidista tai biomassasta. Metanolia voidaan huoneenlämmössä nestemäisenä polttoaineena varastoida ja kuljettaa olemassa olevalla infrastruktuurilla. Metanolilla on nestemäisistä polttoaineista pienin hiilen ja vedyn suhde  $\frac{1}{4}$ , eli se on vähähiilisin vaihtoehto nykyiseen jakelu- ja kuljetusverkkoon. Metanolia on mahdollista sekoittaa nykyisiin polttoaineisiin, kun moottoreiden polttoainejärjestelmä päivitetään. Metanolin noin puolta pienempi lämpöarvo dieseliin verrattuna tarkoittaa, että metanolia täytyy polttaa samassa ajassa kaksinkertainen määrä saman tehon saavuttamiseksi. Metanolin korkea oktaaniluku mahdollistaa kuitenkin metanolille optimoidussa moottorissa paremman hyötysuhteen, korkeamman puristussuhteen ja ahtopaineen noston takia. Metanolimoottori voisi siis käydä korkeammalla hyötysuhteella, jolloin moottorien koko pienenesi ja polttoainetta kuluisi vähemmän. (IEA-AMF 2020.)

Metanolimoottoreita on jo pitkään ollut käytössä rata- ja kiihdytysautoissa. Kiina on panostanut metanoliin ilmansaasteiden vähentämiseksi. Kiina on 1980-luvulta lähtien käyttänyt metanolia ja metanolipolttoainesekoituksia, joiden käyttöä arvioidaan myös länsimaissa. Kiinassa onkin jo noin 140 metanolitankkausasemaa ja 30 000 100 prosenttista metanolia käyttävää autoa. (Methanex 2023.)

## 4 Palamisilmajärjestelmän suunnittelu

Hybridikontin palamisilmajärjestelmän tehtävänä on toimittaa moottorille happea palamisreaktioon. Yleensä happi otetaan ulkoilmasta tai varavoima- ja laboratoriomootoreissa moottoria ympäröivästä huoneilmasta. Moottorin ilmantarve vaihtelee moottori tyyppin, tehon ja polttoaineen mukaan. Ilmassa voi leijaila epäpuhtauksia, joita ei haluta moottoriin ja nämä epäpuhtaudet on poistettava suodattimella.

Varavoiman apujärjestelmien suunnitteluohjeen (LVI 66-10346 2002, 2–3) mukaan ulkoa kanavoiva palamisilmajärjestelmä voidaan jakaa tavanomaisiin rakennuksiin, joissa palamisilma kanavoidaan tavallista *TalotekniikkaRYL 2002* luvun G33 mukaista ilmanvaihtokanavaa pitkin ja kriisiajan toimintatiloihin, joissa palamisilmakanava tehdään kaasutiiviistä teräsputkesta. Kriisiajan toimintatiloissa teräsputkien seinämän paksuus on vähintään kaksi millimetriä ja ne liitetään kaasutiiviisti hitsaamalla standardin *SFS-EN 25817* luokan C mukaan.

Palamisilmakanavassa virtaa sisäilmaa kylmempi ulkoilma, jonka vuoksi kanava on eristettävä kondenssia vastaan. Ohjekorteista *LVI 50-10344* ja *LVI 50-10345* löytyy vaatimukset kylmien ilmakehien eristämiseen, joissa määrääviä tekijöitä ovat virtausaineen ja ympäröivän ilman lämpötilat sekä putkikoko. (LVI 66-10346 2002, 3.)

Eryyisesti konttiympäristössä huomioon otettavia seikkoja ovat ilman lämmitys, uudet polttoaineet sekä rajallinen tila komponenteille. Hybridikontin palamisilmajärjestelmän vaatimukset, käytetyt lähtötiedot sekä ehdotettu toteutus esitellään seuraavaksi.

#### 4.1 Siirrettävän moottoritutkimuslaboratorion palamisilmajärjestelmän vaatimukset ja käytetyt lähtötiedot

Vaatimuksena hybridikontin palamisilmajärjestelmälle on, että sen kautta on mahdollista antaa erilaisille moottoreille riittävästi puhdasta ulkoilmaa oikeassa lämpötilassa. Toisin kuin EduCityn moottorilaboratoriossa, palamisilma hybridikontin moottorille otetaan laboratorion ulkopuolelta, kaasumaisten ja räjähdysherkkien polttoaineiden aiheuttamien turvallisuusriskien vuoksi. Palamisilmajärjestelmän tulee toimittaa moottorille vähintään 15 asteista ilmaa vaihtuvissa sääoloissa, aina 20 asteen pakkasiin asti, jotta olosuhteet voidaan vakioida moottoritutkimuksissa. Ilmasta on suodatettava epäpuhtaudet, kuten pöly, ja ilmansuodatinta on päästävä huoltamaan. Palamisilmajärjestelmän tulee myös olla joustava erilaisten moottorikonstruktioiden liittämiseksi järjestelmään.

Ilmamäärää on myös kyettävä mittaamaan. Laboratoriossa käytettävä ilmamassamittari ABB Sensyflow FMT700-P DN150 tarvitsee vähintään 1518 mm suoraa putkea ennen mittaria ja 759 mm mittarin jälkeen pyörrevirtausten vähentämiseksi ja tarkan mittaustuloksen saamiseksi. Mittarin toiminta perustuu kaasuvirtaan sijoitettuun vastukseen, jonka lämpötila pidetään vakiona sähköteholla. Lämmitysteho on suoraan verrannollinen vastusta viilentävään kaasuvirtaan, kun kaasu on tunnettu ja sen ominaisuudet pysyvät vakiona. Mittari antaa siis suoraan palamisilman massavirran, joka voidaan muuntaa tilavuusvirraksi tiheyden avulla. (ABB 2020.)

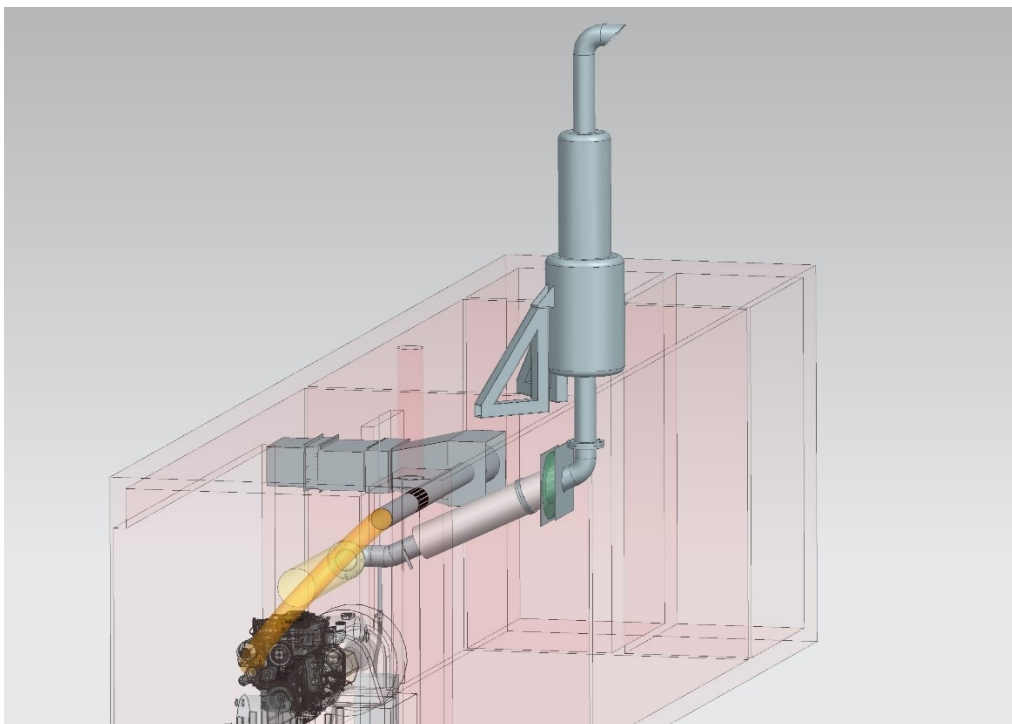
Moottorin palamisilman tarpeen arviointiin tuo haastetta se, että hybridikonttia käytetään hyvin erilaisten moottoreiden tutkimuksessa. Varavoimakoneen tukijärjestelmiä suunniteltaessa tiedetään tarkkaan moottorin tyyppi, teho ja polttoaine. Hybridikontissa sen sijaan näistä jokainen saattaa vaihtua tutkimusten välillä moottorin vaihtuessa. Suunniteltaessa on osattava arvioida turvallisuutta polttoaineiden ominaisuuksien kannalta sekä suurin mahdollinen moottorin ilman tarve.

Lähtötietoina palamisilmajärjestelmän suunnittelulle käytetään ensinnäkin moottorin kokoa. Moottorikoko konttiin on rajattu akseliteholtaan 300 kW moottorille. Tämä rajoite tulee valitusta moottorijarrusta. (Turun AMK 2024b.) Enimmäismoottoritehosta voidaan laskea polttoaineille, joilla on erilaiset lämpösisällöt ja palamisreaktiot, tarvittava hapen moolimäärä ja sitä kautta ilmamäärä kemialliseen palamisreaktioon perustuen.

Moottorin tyyppi vaikuttaa myös ilmamäärään. Ottosyklillä toimiva kipinäsytytteinen moottori käy perinteisesti stoikiometrisellä ilmakertoimella, joka esimerkiksi bensiinille on 14,7:1 eli 14,7 kiloa ilmaa polttoainekiloa kohti. Painesytytteinen dieselmoottori sen sijaan on laihaseosmoottori, jonka sylinterissä ilma-polttoaine-seoksessa vallitsee ilmaylimäärä. Diesel-moottorissa voi kuormitustilanteesta riippuen olla korkeimmillaan jopa 160:1 ilmakerroin. (Jääskeläinen & Khair 2020.) Näiden kahden muuttujan, moottorin tyyppin ja polttoaineen, avulla voidaan arvioida ilmantarvetta ja valita polttoaineiden ja niiden mahdollisten moottorikonstruktioiden väliltä suurin mahdollinen palamisilmantarve ja käyttää sitä mitoituksessa. Tyypillinen dieselmoottori tarvitsee palamisilmaa korkeintaan 8 kg/kWh (Mollenhauer & Tschoeke 2010, 403). 300 kW moottori tarvitsee siis ilmaa korkeintaan 2400 kg/h. Mitoituksessa käytettävä ilman tilavuusvirta voidaan laskea ilman massavirran ja tiheyden tulona. Seppäsen ym. (2015, 84) mukaan 15 asteisen ilman tiheys on 1,2 kg/m<sup>3</sup> ja täten tilavuusvirraksi saadaan 2000 m<sup>3</sup>/h.

#### 4.2 Palamisilmajärjestelmän toteutus

Hybridikontin palamisilmajärjestelmän komponenttien määrä kasvaa ja toiminta monimutkaistuu talotekniikan puuttuessa (kuva 3). Palamisilmakanavat ja palamisilman lämmitys on toteutettava erikseen muusta ilmanvaihdosta myös polttoaineisiin liittyvistä turvallisuussyistä. Palamisilmajärjestelmän tiiveydessä ei kuitenkaan tarvitse mennä kriisiajan toimintatilojen vaatimuksiin, jotka suojaavat ydinlaskeumilta, vaan tavallinen ilmanvaihtokanava on tarpeeksi tiivis.



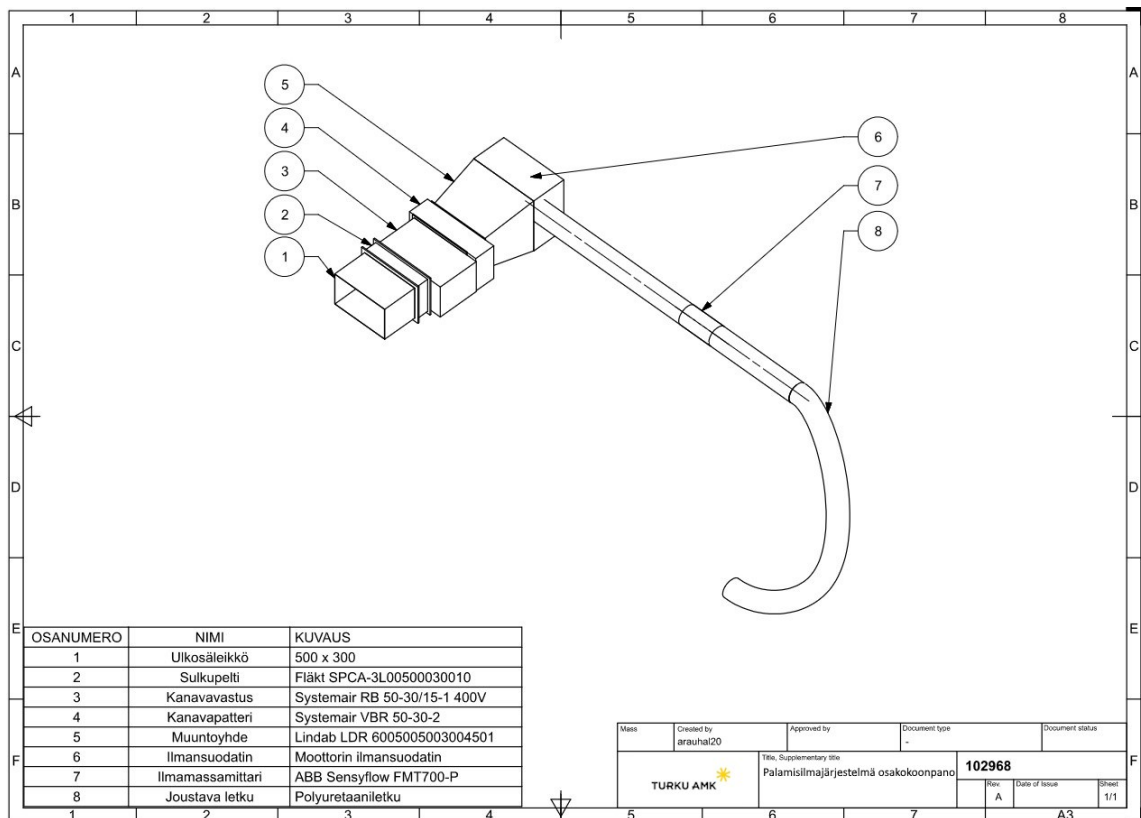
Kuva 3. Palamisilma- ja pakokaasujärjestelmät 3D-mallissa.

Ilma otetaan ulkoilmasta suorakaiteen muotoista 500 x 300 mm ilmanvaihtokanavaa pitkin. Ilman virtausnopeus kanavassa saadaan ilman tilavuusvirran ja kanavan poikkileikkauspinta-alan osamääränä. Virtausnopeus suorakaidekanavassa on täten 2,78 m/s. Painehäviö kanavassa on suoraan verrannollinen virtausnopeuteen, joten kasvattamalla kanavan kokoa painehäviö pienenee. Ilmanotto on sijoitettava niin, että moottori saa puhdasta palamisilmaa ja niin, ettei ilmanotto pääse tukkeutumaan esimerkiksi lumimassojen takia. Säleikkö suodattaa ilmasta suurimmat epäpuhtaudet.

Moottori ei tule käymään jatkuvasti vaan se on välillä pysähdyksissä ja tukijärjestelmiäkään ei tuolloin tarvita. Fläkt Groupin teknisestä esitteestä (n.d.) valittu säätö- ja sulkupelti SPCA-3LE0500030010 mahdollistaa palamisilmakanavan sulkemisen (kuva 4). Sulkupellin vaippa on lämpöeristetty kondenssiriskin takia ja sen lämpöeristetyt säleät estävät lämmön karkaamisen kontista talvisin. Sulkupellin asentoa voidaan säätää sähköisellä toimilaitteella, jolloin se on mahdollista kytkeä myös turvallisuusautomaatiikkaan.

Ilma virtaa seuraavaksi kanavavastuksen ja kanavapatterin läpi. Näiden komponenttien tehtävänä on lämmittää moottorin palamisilmaa ja niiden toiminta on kuvattu omassa kappaleessa.

Moottorin ilmansuodatinta varten kanavan kokoa on kasvatettava, jotta suodatin mahtuu kanavan sisälle ja jotta ilma pääsee kulkemaan tasaisesti ilmansuodattimen läpi. Kanavaa kasvatetaan 600 x 500 mm suorakaidekanavaksi supistuskartiolla (kuva 4). Esimerkiksi Lindab (2023) tarjoaa esitteessään LDR6005005003004501 muuntoyhdyttä, jolla kanavan kasvattaminen onnistuu. Ilmansuodatin voidaan siis koteloida 600 x 500 mm kanavaan, joka tulpataan toisesta päästään. Tulppa on mahdollista irrottaa, kun ilmansuodatinta on päästävä huoltamaan.



Kuva 4. Palamisilmajärjestelmä.

Ilmansuodattimen jälkeen ilma imetään ilmamassamittarin imuputkea pitkin mittarille. Myös ilmamassamittari on sijoitettu katonrajaan tilan säästämiseksi. Ilmamassamittarin kaapelit voidaan vetää katonrajassa kaapelihyllyllä

keskimmäisen huoneen datankeruulaitteisiin. Taipuisa polyuretaaniletku mahdollistaa joustavan liitoksen moottoriin (kuva 4).

LVI 50-10345 (2002, 6–8) mukaan ilmanvaihtokanavat on eristettävä kondenssiriskin takia. Eristyspaksuus järjestelmän suorakaidekanaville on 50 mm, kun arvioidaan  $\Delta t$ :n eli kanavassa virtaavan ilman ja sisäilman lämpötilaeron olevan 30 °C. Ilmamassamittarin putken eristystarvetta voidaan arvioida putkessa virtaavan palamisilman ja sisäilman lämpötilan erotuksena. Jos lämpötilaero on 10 °C tai enemmän, on putki eristettävä 20 mm eristeellä. Mineraalivillalla eristetyn ulkoilmakanavan eristeen tulee aina sisältää kondenssineriste.

#### 4.3 Kanavalämmittimien mitoitus ja toiminta

Palamisilmakanavan kanavalämmitin käyttää moottorin hukkalämpöä moottorin imuilman lämmittämiseen. Moottorijäähdytyspiirin vesi kiertää palamisilmakanavan lämmittimen kautta. Kanavalämmitin mitoitetaan ääritilanteeseen, jossa ulkolämpötila on -20 °C ja palamisilmantarve 2400 kg/h. Moottorin imuilman vähimmäislämpötila on 15 °C, jolloin suurin lämpötilan muutos on 35 K. Ilman ominaislämpökapasiteetti on 1,01 kJ/(kg\*K) (Seppänen ym. 2015, 78). Lämpömäärä massavirralla lasketaan MAOL-taulukoiden (Seppänen ym. 2015, 128) mukaan:

$$\frac{Q}{\Delta t} = c\dot{m}\Delta T, \quad (1)$$

jossa

$Q$  on lämpömäärä (kJ)

$\Delta t$  on aika (h)

$c$  on ilman ominaislämpökapasiteetti (kJ/(kg\*K))

$\dot{m}$  on ilman massavirta (kg/h)

$\Delta T$  on suurin ilman lämpötilan (K) muutos lämmittimen läpi

Kaavasta saadaan 84 840 kJ/h, joka vastaa 23,6 kW tehoa. Tehoa voidaan käyttää apuna kanavapatterin valinnassa, vaikka lämmönsiirtimien todelliset teholliset arvot riippuvatkin väliaineiden lämpötiloista ja virtausnopeuksista. Moottorijäähdytyspiirin veden lämpötilana voidaan pitää 75 °C ja palamisilmavirran maksimina 2000 m<sup>3</sup>/h.

Palamisilman lämmitykseen valitaan Systemair Oy:n VBR 50-30-2 vesilämmityspatteri suorakaidekanavaan. Aiemmin kuvatussa ääritilanteessa lämmönsiirrin toimii 26,85 kW teholla ja nesteen lämpötilan muutos lämmönsiirtimen läpi olisi 75 asteesta 68 asteeseen. Nestevirtaus ääritilanteessa olisi 0,94 l/s ja nesteen painehäviö 49,5 kPa. Haluttu ilman lämpötila valitaan ohjaimesta, joka säätelee nestevirtausta venttiilitoimilaitteiden avulla. Venttiilitoimilaitte ohjaa kolmitieventtiiliä, joka päästää tarvittavan määrän kuumaa vettä moottorijäähdytyspiirin kierrosta kanavapatteriin ja loput ohitusputkeen. Mikäli väliaineena käytetään vettä, on laitteeseen asennettava jäätymissuoja-anturi veden jäätyksen aiheuttaman laiterikon välttämiseksi. (Systemair Oy n.d.a.)

Lisäksi kanavassa on myös sähkövastus, jolla kompensoidaan kanavapatterin toiminta-alueen rajoituksia. Näitä rajoituksia ovat esimerkiksi moottorin jäähdytysveden riittämätön lämpötila. Sähkövastukseksi palamisilmakanavaan valitaan Systemair Oy:n RB 50-30/15-1 400V sähköinen kanavalämmitin, jonka teho on 15 kW ja se soveltuu 25 ampeerin sähköliittymään. Kanavavastus riittää nostamaan mitoituksessa käytetyn 2400 kg/h ilmavirran lämpötilaa noin 20 asteella. Ilmavirran puolittuessa kaksinkertaistuu ilmavirran lämpötilan nousu eli esimerkiksi 1200 kg/h ilmavirran lämpötilaa voidaan nostaa noin 40 astetta. Jos ilmavirta on huomattavasti pienempi tai ulkolämpötila poikkeaa vain vähän tavoitelämpötilasta, ei kanavavastusta tarvitse käyttää täydellä teholla vaan sen tehoa voidaan alentaa ohjausyksikön ja lämpötehonsäätimen avulla. (Systemair Oy n.d.b.)

Järjestelmä toimii niin, että käyttäjä valitsee halutun palamisilman lämpötilan ja järjestelmä säätelee jäähdytysveden virtausta moottorille sen mukaan. Jos moottorin jäähdytyspiirin lämpö ei riitä palamisilman lämmittämiseen, kytkeytyy

myös sähkövastus päälle. Näitä tilanteita voivat olla esimerkiksi käynnistykset viileällä säällä. Toinen mahdollinen sähkövastuksen kytkeytymissy on kova pakkanen. Kovassa pakkasessa kaikki moottorin jäähdytysvesi kiertää kanavapatterin läpi, mutta jos jäähdytysveden lämpö ei riitä, kytkeytyy myös kanavavastus päälle.

Mikäli moottorin kuormitusohjelmat aiheuttavat suuria palamisilmamäärän vaihteluja, saattaa ilman lämpötilan vakiominen olla vaikeaa lämmönsäätelyn viiveestä johtuen. Kanavalämmityspatterin venttiili kannattaakin voimakkaasti vaihtelevissa palamisilmavirtauksissa asettaa kiinteään esiasetukseen tai määrittää PID-säätimen avulla palamisilman lämpötilan aaltoilun estämiseksi.

Olosuhteiden tai testattavan moottorikomponentin vuoksi voi palamisilman ottaminen moottorin sisältä olla hyvä vaihtoehto palamisilman lämpötilan stabiloimiseksi. Palamisilma otetaan perinteisessä moottorilaboratoriossa suoraan moottorihuoneesta ja se on vaihtoehto myös hybridikontissa ainakin perinteisillä polttoaineilla ajettaessa. Palamisilmajärjestelmän muuttaminen tähän on helppoa kääntämällä vain kanavan sulkupellin kiinni ja avaamalla ilmansuodattimen huoltoluukun.

## 5 Pakokaasujärjestelmän suunnittelu

Pakokaasujärjestelmän tavoitteena on johtaa moottorin tuottama pakokaasu tehokkaasti ja turvallisesti ulkoilmaan. Pakojärjestelmän suunnittelussa on otettava huomioon savukaasujen korkeaan lämpötilaan, niiden ominaisuuksiin sekä meluun liittyviä näkökulmia.

Pakokaasujen noin 600 °C lämpötila aiheuttaa pakoputkessa metalleille ominaista lämpölaajenemista. Lämpölaajenemiskertoimet ovat hiiliteräkselle 0,012 mm/mK ja haponkestävälle teräkselle 0,017 mm/mK. Putkiston on päästävä laajenemaan ja varsinkin pitkissä putkistoissa laajeneminen usein kompensoidaan paljetasaimilla, jotka joustavat ja puristuvat kasaan. Korkea lämpötila aiheuttaa myös tarpeen putkiston eristämiseksi. Eristys tarvitaan suojaamaan kuumat pinnat, ja jotta savukaasujen lämpö siirtyisi ulos. (LVI 66-10346 2002, 4–6.)

Pakojärjestelmään saattaa päästä tai tiivistyä vettä, joka on poistettava vedenpoistoputkella. Pakoputki on rakennettava vedenpoistokohtaa päin kaltevaksi vähintään viiden promillen kaadolla. Vedenpoisto valmistetaan tavallisesti tiiviiksi ja automaattiseksi vesilukon avulla. Jottei pakokaasut pääsisi purkautumaan sisälle, on myös pakoputken oltava tiivis. Putket on liitettävä hitsausliitoksin kaasutiiviiksi standardin *SFS-EN 25817* luokan C mukaan. (LVI 66-10346 2002, 6.)

Pakojärjestelmä on suunniteltava niin, ettei painehäviö nouse liian korkeaksi. Painehäviötä aiheuttaa pieni putkikoko, mutkat ja järjestelmän komponentit, kuten äänenvaimennin. Suurin sallittu pakoputken vastapaine on moottorikohtainen ja saadaan moottorivalmistajalta. Pakoputken läpivienti on tiivistettävä huolellisesti ja se on usein helpompi tehdä läpi seinästä. (kW-set n.d.)

Pakokaasujen ulospuhalluspaikka määräytyy Suomen rakentamismääräyskokoelman osan *E3 Pienet savuhormit*-ohjeiden mukaan. Pakokaasujen ulospuhallusta ei saa sijoittaa lähelle ilmanvaihdon imuaukkoja

eikä pakokaasut saa jäädä leijumaan ympäristöönsä. Myös pakoputken voimakas meluhaitta on otettava huomioon ja pyrittävä tarvittaessa suuntaamaan tai vaimentamaan äänenvaimentimella melua. (LVI 66-10346 2002, 4–6.)

Moottoritutkimuskontin pakokaasujärjestelmä eroaa keskeisesti EduCityn kampusrakennuksen moottorilaboratoriosta. Vaikka moottorikontin pakokaasujärjestelmä on kooltaan paljon pienempi, ovat vaatimukset moottorikontin järjestelmälle, jotka esitellään seuraavaksi, yhtä kovat.

### 5.1 Siirrettävän moottoritutkimuslaboratorion pakokaasujärjestelmän vaatimukset

Pakokaasujärjestelmän vaatimuksena on siirtää palamiskaasut sekä niiden sisältämä lämpö laboriokontin ulkopuolelle. Palamiskaasujen koostumus vaihtelee käytettävän polttoaineen mukaan ja pakokaasujärjestelmän tulisi toimia kaikille suunnitelluille polttoaineille. Pakokaasujärjestelmän moottorikiinnikkeen tulee olla joustava tai moottorikohtainen, jotta pakokaasujärjestelmä on yhteensopiva erilaisille moottoreille. Testimoottorin pakoputkistosta tulevaa käyntiääntä on vaimennettava, jotta kontin ulkopuolella melutasot pysyvät siedettävänä. Lisäksi moottoritutkimuskonttia tulee olla mahdollista liikutella, joten pakokaasujärjestelmän kontin ulkopuolisten osien on oltava purettavissa kuljetusta varten.

Moottoritutkimuksen kannalta on tärkeää tietää palamiskaasun koostumus. Pakokaasujärjestelmään onkin siis sijoitettava erilaisia antureita pakokaasupitoisuuksien mittaamiseen. Antureille, niiden huollolle ja reitityksille, on varattava tilaa pakojärjestelmään. Moottori- tai tutkimuskohtaisesti voi olla tarvetta myös pakokaasun vastapaineen säädölle, jotta esimerkiksi voidaan arvioida erilaisten päästöjenhallintalaitteiden tuottaman vastapaineen vaikutusta moottorin toimintaan.

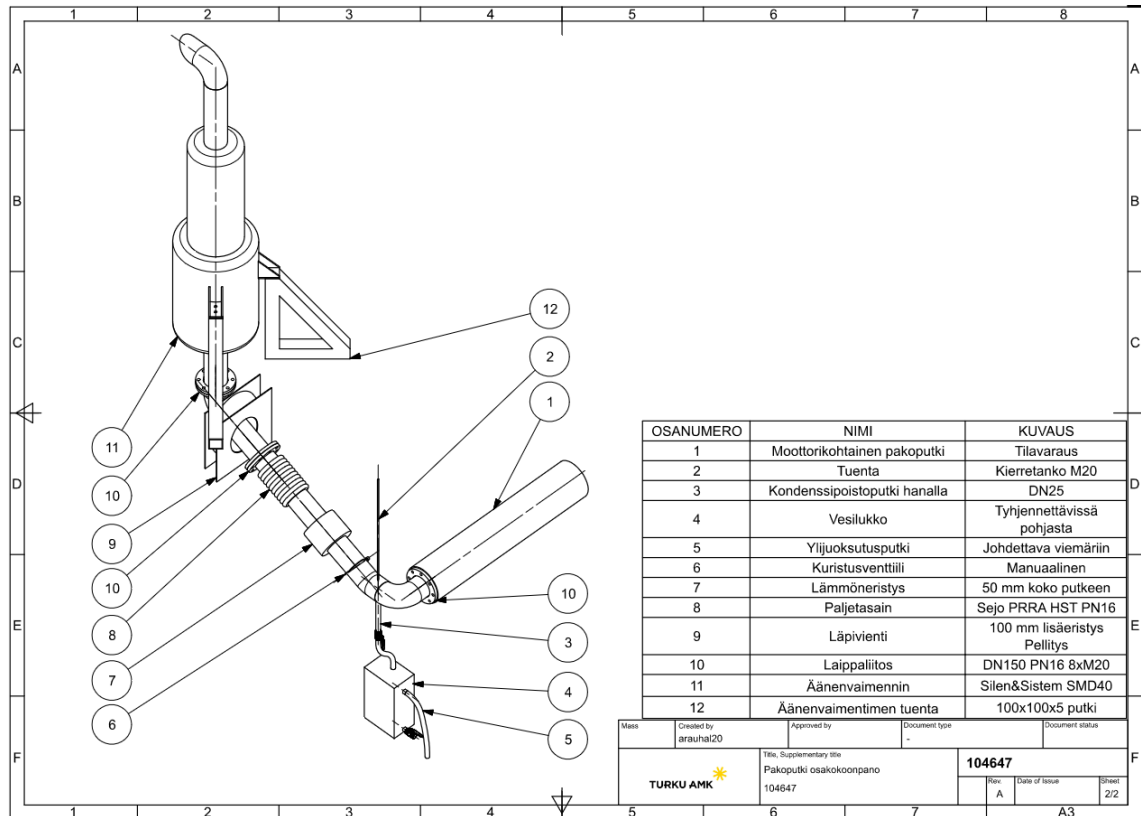
Vety aiheuttaa polttoaineena erityisvaatimuksia pakokaasujärjestelmälle. Vetyä saattaa vuotaa moottorin läpi pakoputkeen. Vety on kuitenkin paljon muita

kaasuja kevyempi ja pyrkii nopeasti ylöspäin. Pakojärjestelmässä on huolehdittava, että vuotanut vety pääsee purkautumaan pakoputken päästä. Pakoputkessa on siis oltava koko ajan pientä nousua eikä putken sisällä saa olla vain alaspäin aukeavia rakenteita, niin sanottuja vetytaskuja. Puhtaan vedyn poltto polttomoottorissa tuottaa palamiskaasuna suuria määriä vettä. Pakokaasussa vesi on höyrynä ja pakokaasu on erittäin kosteaa. Jotta vesi ei lauhtuisi nesteeksi pakokaasujärjestelmän sisällä, on tärkeää, että pakojärjestelmä on hyvin eristetty ja että pakokaasun lämpöenergia kulkeutuu pakoputken päästä ulos asti.

Pakokaasun tilavuusvirtaa voidaan arvioida jakamalla palamisilman massavirta ilman tiheydellä pakokaasun lämpötilassa. Pakokaasun lämpötilan on riippuvainen polttoaineesta ja moottorityypistä. Pakokaasun lämpötilana laskennassa voidaan pitää 600 °C ja ilman tiheys 600 asteessa on 0,58 kg/m<sup>3</sup>. (Jääskeläinen 2020.) Näin ollen voidaan arvioida, että pakokaasun tilavuusvirta on korkeintaan 4200 m<sup>3</sup>/h.

## 5.2 Pakokaasujärjestelmän toteutus

Pakokaasujärjestelmän korroosionkestävyyteen on kiinnitettävä erityisesti huomiota syövyttävien polttoaineiden mahdollisten jäämien, kuten epätäydellisesti palaneen ammoniakkin, moottorin läpi pakoputken kulkeutumisen vuoksi. Pakoputken ja sen kaikkien komponenttien materiaaliksi valitaan haponkestävä 1.4404, joka sietää polttoainejäämiä ja polttoaineiden palamistuotteita. Putkikooksi valitaan moottoritehon mukaan DN150 ja putken vahvuudeksi riittää 168,3 x 2 mm, sillä pakoputki on hyvin kannakoitu ja varsin lyhyt. Tilavuusvirrasta laskettu pakokaasun virtausnopeus pakoputkessa on korkeintaan 55 m/s. Koko pakoputki on eristetty 50 mm paksuisella palamattomalla putkieristeellä.



Kuva 5. Pakokaasujärjestelmä.

Moottorikohtainen pakoputki valmistetaan aina tutkittavaa moottoria varten. Moottorikohtainen pakoputki yhdistää, joko ahdetun moottorin ahtimen pakopesän tai ahtamattoman moottorin tapauksessa pakosarjan, kiinteään pakoputkeen. Moottorikohtaiseen pakoputkeen sijoitetaan useita pakokaasuantureita tai -keräimiä, joita analysointikaappi käyttää pakokaasun pitoisuuksien määrittämiseen. Osana moottorikohtaista pakoputkea voi myös olla erilaisia katalysaattoreita tai muita pakokaasun puhdistusjärjestelmän komponentteja. Moottorikohtainen pakoputki on siis aina erikoisvalmistettu moottorikohtaisesti ja siihen sisältyy useita komponentteja, jotka vaativat tilaa. Tutkimuskontin suunnitelmaan on jätetty  $\varnothing 300 \times 1500$  mm tilavaraus moottorikohtaista pakoputkea varten (kuva 5).

Kiinteään pakoputken ensimmäinen osa on kannakoitu kierretangolla katosta. Kannakointi on säädettävissä ja irrotettava. Tuenta kantaa myös moottorikohtaisen pakoputken kannakkeenpuoleisenpään painon. Pakoputken

purettavuus helpottaa moottorin asennus- ja huoltotoimenpiteitä. Purettavuuden mahdollistaa laippaliitokset, joita on kolme. Irrotettavissa oleva ensimmäinen osa mahdollistaa lisätilan saamisen moottorin ympärille asennusvaiheessa.

Pakoputkeen tiivistynyt kosteus poistetaan kondenssivesiputkea pitkin. Kondenssiveden määrästä, veden poistosta ja vesilukon toiminnasta omassa kappaleessa.

Manuaalinen kuristusventtiili, jolla säädetään pakoputken vastapainetta, sijaitsee heti kondenssiveden poistoputken jälkeen (kuva 5). Vastapaineen säätelylle voi olla tutkimuksellista tarvetta esimerkiksi, kun pakokaasun jälkikäsitteilylaitteiden aiheuttaman vastapaineen vaikutuksia moottorin toimintaan halutaan tutkia.

Ensimmäisessä osassa on paljetasain, joka poistaa pakoputken lämpölaajenemisesta johtuvat jännitykset ja vaimentaa moottorin tärinää. Paljetasain eristetään samalla tavalla kuin muu pakoputkisto sen korkean lämpötilan vuoksi. Eristyksessä on otettava huomioon, että paljetasaimen ympärille on asennettava pelti tai putki ennen eristeen asentamista. Pelti estää eristemateriaalin joutumisen palkeen poimujen väliin. (Sejo Oy 2023.)

Pakoputken läpivienti ulos tehdään seinästä. Läpiviennin kohdalla on oltava pakoputken pinnasta 150 mm palaviin materiaaleihin. Paloturvallisuuden varmistaminen onnistuu 100 mm lisäeristeellä läpiviennin kohdalla. Läpivienti peitetään ruostumattomasta teräksestä valmistetuilla ohutlevyillä sekä ulko- että sisäpuolelta (kuva 6).



Kuva 6. Tyks:n varavoimakoneiden pakoputken läpivienti.

Räjähdysluukku on moottoriin tai moottorikohtaiseen pakoputkeen kuuluva osa polttoaineilla, joissa on räjähdysriski pakosarjassa. Räjähdyksen paineaallon pitäisi siis purkautua jo ennen kontin pakokaasujärjestelmää. Kontin pakokaasujärjestelmään on mahdollista tehdä räjähdysluukku t-haaralla, jos siihen huomataan tarve tutkimuksessa kovien paineaaltojen takia äänenvaimentimen suojaamiseksi. Pääasiassa paineaallot purkautuvat pakoputken päästä ulkoilmaan, sillä pakoputki on lyhyt. Toisaalta pakoputken repeäminen moottorihuoneessa ei vaarantaisi turvallisuutta, sillä moottorihuoneeseen ei ole pääsyä moottorin käydessä, joten pakoputken repeäminen vain keskeyttäisi tutkimuksen.

Äänenvaimennin vaimentaa moottorin pakoääntä. Se asennetaan pystyasentoon vetytaskujen välttämiseksi. Viimeinen laippaliitos mahdollistaa äänenvaimentimen poistamisen katolta ja tutkimuskontin siirtämisen (kuva 5). Äänenvaimentimen toiminnasta lisää omassa kappaleessa.

### 5.2.1 Pakoputken kondenssivesi

Polttoaineen sisältämän vedyn palaessa syntyy vettä. Vetymoottorissa polttoaineena on hiilivetyjen sijasta puhdas vety, joten vesihöyryä voidaan ajatella syntyvän enemmän kuin perinteisillä polttoaineilla hiilen palamisen tuoman energian jäädessä pois. Dieselpolttoaineen vedyn massaosuus on 14 % ja hiilen 86 % (Neste Oil 2007, 21).

Polttoaine		Diesel	Vety
Lämpöarvo	kWh/kg	11,861	33,333
"Ominaiskulutus" $\eta=100$	g/kWh	84,309	30
Vedyn osuus	%	14	100
Poltetun vedyn määrä kilowattituntia kohden	g/kWh	11,803	30
Diesel- ja vetypolttoaineen täydellisen palamisen pakokaasun vesimassojen suhde, kun vety palaa vedeksi.			2,542

Taulukko 1. Veden määrä kilowattituntia kohden diesel- ja vetypolttoaineilla.

Kun verrataan vedyn ja dieselin täydellistä palamista, syntyy vedyn palamisessa eli kaiken polttoaineen sisältämän vedyn hapettuessa vedeksi, 2,5 kertaa enemmän vettä kilowattituntia kohden (taulukko 1). Kuuman pakokaasun sisältämä vesihöyry tiivistyy nesteeksi kylmille pinnoille. Vaikka pakoputki onkin lämpöeristetty, on todennäköistä, että varsinkin kontin ulkopuolisiin pakoputken osiin tiivistyy vettä. Tiivistyneen veden valuminen moottoriin ei ole toivottavaa ja tämän estämiseksi on suunniteltava, miten vesi poistetaan pakoputkesta.

Kondenssiveden poisto pakoputkesta toteutetaan rakennusten varavoimakoneissa yleensä vesilukolla. Vedenpoistoputki on pakoputken alimmassa kohdassa ja se on suljettavissa venttiilillä. Vesilukko perustuu siihen, että kondenssivedenpoistoletkun pää on vedenpinnan alla. Vedenpaine muodostaa vastapaineen ja pakokaasu ei purkaudu vedenpoistoputken kautta vaan purkautuu pakoputken päästä ulkoilmaan. Veden määrä tulee mitoittaa pakoputken paineen mukaan, jotta pakokaasu ei purkaudu sisälle. Vesilukon toiminta on yksinkertainen ja se vaatii vain vähän huoltotoimenpiteitä. Jotta

vesilukon vastapaine säilyy, on huolehdittava, että vedenpinnankorkeus on riittävä. Kondensoitunut vesi valuu ylijouksutusputkea pitkin viemäriin. (LVI 66-10346 2002, 6.)

Vesilukon soveltamisessa hybridikonttiin on kiinnitettävä huomiota mahdollisiin moottoritutkimukseen ja -kehitykseen liittyviin tilanteisiin sekä polttoaineen ominaisuuksiin. Tutkimusajossa moottoreita saatetaan testata ääritilanteissa tai epäsuotuisilla moottorinsäädöillä. Varsinkin tällöin vedyn vuotaminen moottorin läpi pakoputkistoon on mahdollista. Vety on herkästi syttyvä kaasu ja sen räjähtäminen pakoputkistossa aiheuttaa paineaallon. Paineaallon purkautuminen pakoputken päästä ulkoilmaan on toivottu tilanne. On kuitenkin otettava huomioon vesilukon vastapaineessa mahdolliset paineaallot, eli vesipatsaan riittävä korkeus ja poistoputken koko paineaaltojen vaikutusten vähentämiseksi. Putkikooksi vedenpoistoputkelle valitaan DN25.

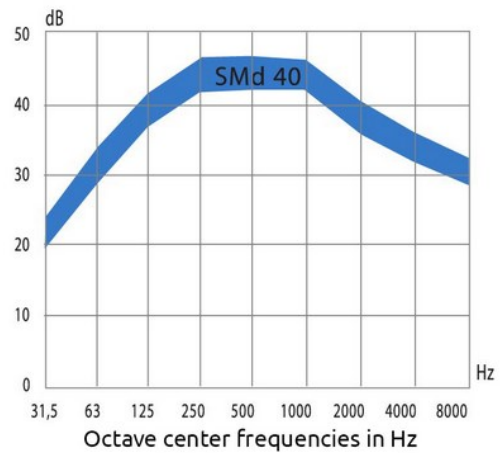
#### 5.2.2 Pakoäänten hallinta

Äänenvaimentimet tehdään usein tietyille moottorille ja optimoidaan toimimaan moottorin pakoäänen ominaistajuudella. Moottoritutkimuskontissa vaihtuvat moottorit tuottavat haasteita äänenvaimentimen valinnalle, sillä jokaisella moottorilla on ominainen pakoääni. Äänen paine on vielä uusien polttoaineiden ja moottorien kohdalla tuntematon. Vaimennuskykyyn kannattaakin siis jättää reserviä. Äänenvaimentimeksi valitaan SMd40 DN150 valmistajalta Silen sistem, joka tarjoaa sivuillaan mittausdataa äänenvaimennuskyvystä eri taajuuksalueella.

**AVERAGE SOUND DIMMING CURVE**

Measured under normal operating conditions and once the background noise has been eliminated. (Parasites)

According to ISO 6798 standard.



Kuva 7. Silen sistem SMD40 äänenvaimentimen vaimennuskyky eri taajuuksilla (Silen sistem n.d.).

Valittu äänenvaimennin vaimentaa hyvin laajalla taajuusalueella (kuva 7).

Laajan taajuusalueen vaimentavuus on tärkeä kriteeri hybridikontin pakokaasujärjestelmän äänenvaimentimelle, jossa vaihtuvilla moottoreilla on erilaiset pakoäänet. Pakokaasujärjestelmän suurin painehäviö syntyy äänenvaimentimesta. Hybridikontin pakokaasujärjestelmän painehäviö saa olla korkeintaan 100 mbar (Turun AMK 2024b). SMD40 äänenvaimentimen painehäviö on 300–2000 pascalia pakokaasuvirroilla 1000–4000 m<sup>3</sup>/h (Silen sistem n.d.). 2000 Pa vastaa 20 millibaaria. Pakokaasujärjestelmän muut komponentit mukaan lukien jää kokonaispainehäviö alle puoleen sallitusta.

Äänenvaimennin on noin kaksi metriä korkea ja painaa 110 kiloa (Silen sistem n.d.). Äänenvaimennin on tuettava hyvin hybridikontin katolta ja varmistuttava että se kestää tuulen aiheuttaman rasituksen. Tuet valmistetaan putkipalkista 100 x 100 x 5 mm ja ne sijoitetaan 90 asteen kulmaan toisiinsa nähden (kuva 5).

Pakokaasun ulospuhallus on yli neljän metrin korkeudessa hybridikontin katolla. Ulospuhalluksen korkea sijainti varmistaa, ettei pakokaasu jää leijumaan ympäristöön, kunhan hybridikontista on riittävät turvaetäisyydet korkeisiin rakennuksiin. Ulospuhallus on myös suunnattu hybridikontista pois päin 90 asteen kulmalla, joka samalla vähentää sadeveden pääsyä pakoputkeen.

## 6 Pohdinta

Siirrettävän moottoritutkimuslaboratorion tarjoamat puitteet mahdollistavat laajasti erilaisten moottorien tutkimisen. Vaihtuvista polttoaineista, moottorityypeistä ja -kokoluokista johtuen on palamisilma- ja pakokaasujärjestelmien optimointi haastavaa. On kuitenkin mahdollista huomioida eri variaatioille ominaiset haasteet ja rakentaa järjestelmät niin, että ne toimivat hyvin kaikkien suunniteltujen polttoaineiden ja moottorien kanssa. Järjestelmien vaatimusten mukainen toiminta on tärkeää tutkimusten onnistumiseksi ja uuden tiedon tuottamiseksi.

Opinnäytetyön tuloksena syntyi tarkat mallit palamisilma- ja pakokaasujärjestelmistä. Näitä malleja voidaan käyttää järjestelmien kilpailutus tai komponenttien tilausvaiheessa. Järjestelmien mallit on myös sijoitettu hybridikontin 3D-malliin, joka mahdollistaa tilan hahmottamisen sekä tulevien komponenttien todenmukaisen asettelun malliin.

Laitevalinnat, jotka järjestelmiin on tehty, on mahdollista korvata vastaavilla laiteilla. Esimerkiksi ilmanvaihtokanavien komponentteja valmistavat useat eri yritykset ja eri yritysten valmistamien komponenttien ominaisuuksissa ei ole suurta eroa. Korvattaessa opinnäytetyössä valittuja laitteita on kuitenkin syytä perehtyä laitevalintojen yksityiskohtiin ja mitoitukseen.

Palamisilma- ja pakokaasujärjestelmien suunnittelua on jatkettava vielä automaatiojärjestelmien osalta. Automaatiossa on otettava huomioon turvallisuusjärjestelmät sekä mahdolliset ongelmatilanteet. Tässä opinnäytetyössä esiteltyjä järjestelmien toimintakuvauksia voidaan käyttää automaatiosuunnittelun apuna.

## Lähteet

ABB 2020. Sensyflow FMT700-P Thermal Mass Flowmeter data sheet. Viitattu 5.4.2024.

<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=DS%2fFMT700-P&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.

Bellis, M. 2019. A History of the Automobile. ThoughtCo. Viitattu 14.2.2024.

<https://www.thoughtco.com/who-invented-the-car-4059932>.

Fläkt Group n.d. Säättö- ja sulkupelti SPBA ja SPCA. Tekninen esite. Viitattu 5.4.2024. <https://www.flaktgroup.com/api/v1/Documents/134652?analytics=0>.

Hänninen, H.; Karppinen, M.; Leskelä, M. & Pohjakallio, M. 2022. Tekniikan kemia. 16., uudistettu painos. Keuruu: Otava.

IEA-AMF 2020. Methanol. Fuel information. Kansainvälinen energijärjestö. Viitattu 15.4.2024. [https://www.iea-amf.org/content/fuel\\_information/methanol](https://www.iea-amf.org/content/fuel_information/methanol).

Jääskeläinen, H. 2020. Diesel Exhaust Gas. DieselNet.com-sivusto. Vaatii kirjautumisen palveluun. Viitattu 19.4.2024.

[https://dieselnet.com/tech/diesel\\_exh.php](https://dieselnet.com/tech/diesel_exh.php).

Jääskeläinen, H. & Khair, M. 2020. Combustion in Diesel Engines.

DieselNet.com-sivusto. Viitattu 21.2.2024.

[https://dieselnet.com/tech/diesel\\_combustion.php](https://dieselnet.com/tech/diesel_combustion.php).

Komulainen, M. 2022. Moottorilaboratoriossa tutkitaan työkoneiden päästöjä ja energiatehokkuutta. Turun AMK uutisarkisto. Viitattu 16.3.2024.

<https://www.turkuamk.fi/fi/ajankohtaista/2978/moottorilaboratoriossa-tutkitaan-tyokoneiden-paastoja-ja-energiatehokkuutta/>.

kW-set n.d. Varavoimakoneen pakokaasujärjestelmä. Viitattu 18.3.2024

<https://www.kwset.fi/fi/pakoputkisto/>.

Laaksonen, V. 2021. Turun AMK ja AGCO Power rakentavat kestäväää ja tehokasta tulevaisuutta moottorivalmistukselle. Talk-verkkolehti. Turku: Turun ammattikorkeakoulu. Viitattu 4.2.2024. <https://talk.turkuamk.fi/tekniikka/turun-amk-ja-agco-power-rakentavat-kestavaa-ja-tehokasta-tulevaisuutta-moottorivalmistukselle/>.

Laurikko, J. 2009. Ajoneuvot 2015 -strategia: Teknologinen kehitys – ajoneuvot ja polttoaineet: Taustamuistio A2. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisu. VTT. Viitattu 14.3.2024. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2016110428091>.

Lindab 2023. Lindab Suorakaidekanavat. Tekniset tiedot. Viitattu 5.4.2024. <https://itsolution.lindab.com/lindabwebproductsdoc/pdf/documentation/ads/fin/technical/11-rectangular-fi.pdf>.

LVI 50-10345 2002. Taloteknisten eristysten mitoitus ja käyttö. Ohjekortti. Rakennustietosäätiö RTS ja LVI-Keskusliitto.

LVI 66-10346 2002. Varavoiman apujärjestelmät. Ohjekortti. Rakennustietosäätiö RTS ja LVI-Keskusliitto.

Methanex 2023. Vehicle Fuel & Thermal Applications. Viitattu 15.4.2024. <https://www.methanex.com/about-methanol/vehicle-fuel-thermal-applications/>.

Mollenhauer, K. & Tschoeke, H. 2010. Handbook of diesel engines. New York: Springer.

Neste Oil 2007. Dieselpolttoaineopas. Tuoteopas. ISBN 978-952-5656-07-7

Niemi, S.; Nousiainen, P. & Laurén, M. 2012. Tutkimuksesta polttomoottorieksperttejä. Teoksessa Hietalahti, L. (toim.) Uuden sukupolven insinöörikoulutus. Insinöörikoulutuksen foorumi 2012. Tampere: Amk-Kustannus Oy & Tammertekniikka, 328–337.

Partanen, P. 2023. Vety-murtumat ovat vetytalouden jarru. TEK. Uutiset ja blogit. Viitattu 14.4.2024. <https://www.tek.fi/fi/uutiset-blogit/vety-murtumat-ovat-vetytalouden-jarru-0>.

Sejo Oy 2023. Sejo® -paljetasaimien suunnittelu, esimerkkilaskelmat ja asennus. Viitattu 21.2.2024. [https://masinogroup.kuvat.fi/MASINO+GROUP/Suunnittelijalle/Sejo\\_paljetasaimien\\_suunnittelu-\\_ja\\_asennusohje.pdf.pdf](https://masinogroup.kuvat.fi/MASINO+GROUP/Suunnittelijalle/Sejo_paljetasaimien_suunnittelu-_ja_asennusohje.pdf.pdf).

Seppänen, R.; Mannila, L.; Kervinen, M.; Konttinen, P.; Karkela, L.; Yli-Kokko, T.; Parkkila, I. & Kairinen, K. 2015. MAOL-taulukot: Matematiikka, fysiikka, kemia. 1.–5. painos. Helsinki: Otava.

Silen sistem n.d. Acoustic Silencer SMD40. Viitattu 24.3.2024.

<https://silensistem.com/en/acoustic-silencers/engine-exhaust-silencer/acoustic-silencer-smd40/>.

Sivill, L.; Bröckl, M.; Semkin, N.; Ruismäki, A.; Pilpola, H.; Laukkanen, O.; Lehtinen, H.; Takamäki, S.; Vasara, P. & Patronen, J. 2022. Vetytalous – mahdollisuudet ja rajoitteet. Valtioneuvoston kanslia. Viitattu 14.4.2024. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-413-2>.

STT 2023. Maciej Mikulski Vaasan yliopiston energiatekniikan professoriksi: "Hiilineutraalit synteettiset polttoaineet tuovat uusia mahdollisuuksia moottoritutkimukseen". Viitattu 14.3.2024.

<https://www.sttinfo.fi/tiedote/69972738/maciej-mikulski-vaasan-yliopiston-energiatekniikan-professoriksi-hiilineutraalit-synteettiset-polttoaineet-tuovat-uuksia-mahdollisuuksia-moottoritutkimukseen?publisherId=69819791>.

Systemair Oy n.d.a. VBR Vesilämmityspatteri suorakaidekanavaan. Viitattu 5.4.2024. <https://www.systemair.com/fi-fi/tuotteet/puhaltimet/lisatarvikkeet/mekaaniset-lisatarvikkeet/lammitys-ja-jaahdytyspatterit/vesipatterikanavalammittimet/vbr?sku=5465>.

Systemair Oy n.d.b. RB Sähköinen kanavalämmittimin suorakaidekanavaan. Viitattu 5.4.2024. <https://www.systemair.com/fi-fi/tuotteet/puhaltimet/lisatarvikkeet/mekaaniset-lisatarvikkeet/lammitys-ja-jaahdytyspatterit/sahkoiset-kanavalammittimet/rb?sku=9635>.

TTL 2022a. Vety. OVA-ohjeet. Työterveyslaitos. Viitattu 14.4.2024. <https://ova.ttl.fi/vety>.

TTL 2022b. Ammoniakki. OVA-ohjeet. Työterveyslaitos. Viitattu 14.4.2024. <https://ova.ttl.fi/ammoniakki>.

TTL 2022c. Metanoli. OVA-ohjeet. Työterveyslaitos. Viitattu 14.4.2024. <https://ova.ttl.fi/metanoli>.

Turun AMK 2024a. Moottori- ja voimalinjalaboratorio. Viitattu 4.2.2024. <https://www.turkuamk.fi/fi/tyoelamapalvelut/palvelut/moottori-ja-voimalinjalaboratorio/>.

Turun AMK 2024b. Vaatimuslista. Hybridikontti-hankkeen suunnittelu ja vaatimukset. Viitattu 21.2.2024. Yrityksen sisäinen dokumentti.

Turun AMK n.d. HybridiKontti. Projektit. Viitattu 16.3.2024  
<https://www.turkuamk.fi/fi/tutkimus-kehitys-ja-innovaatiot/hae-projekteja/hybridikontti/>.

VTT 2023. Electrofuel developed from green hydrogen and carbon dioxide to be tested in practice for the first time. Lehdistö tiedote. Viitattu 11.4.2024.  
<https://www.vttresearch.com/en/news-and-ideas/electrofuel-developed-green-hydrogen-and-carbon-dioxide-be-tested-practice-first>.

Wärtsilä 2023. Wärtsilä jatkaa merenkulun hiilidioksidipäästöjen vähentämistä esittelemällä maailman ensimmäisen ammoniakilla toimivan nelitahtimoottoriratkaisun. Lehdistö tiedote. Viitattu 14.4.2024.  
<https://www.wartsila.com/fi/media-fi/uutinen/15-11-2023-wartsila-jatkaa-merenkulun-hiilidioksidipaastojen-vahentamista-esittelemalla-maailman-ensimmaisen-ammoniakilla-toimivan-nelitahtimoottoriratkaisun-3357985>.