

## **PAINEEN MUODOSTUMINEN JA HALLINTA PAKOKAASUN POISTOPUTKISTOSSA**

Pakokaasun poistoputkiston suunnittelu työkoneiden testaustilaan paineen hallinnan näkökulmasta

Jori Karjalainen  
Opinnäytetyö AMK  
Kevät 2025  
Konetekniikan koulutusohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Konetekniikan koulutusohjelma  
Työkone- ja ajoneuvotekniikka

Tekijä(t): Jori Karjalainen

Opinnäytetyön otsikko: Paineen muodostuminen ja hallinta pakokaasun poistoputkistossa

Työn ohjaaja(t): Janne Ilomäki

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: esim. kevät 2025

Sivumäärä: esim. 31 + 15 liitettä

Traktorivalmistaja Valtra rakentaa testauslaboratorion, johon tuli suunnitella pakokaasun poistamista varten putkisto. Opinnäytetyötä varten perehdyttiin fluidin virtauksen teoriaan, virtauksen simulointiin sekä paineen muodostumiseen putkistoissa. Työtä varten tutkittiin oppikirjoja ja verkkolähteitä suomeksi ja englanniksi sekä keskusteltiin asiantuntijoiden kanssa kehitystehtävästä.

Opinnäytetyö oli toiminnallinen, ja kehitystehtävän tavoitteena oli tuottaa toimeksiantajalle laskennallisesti perustellut mallit pakokaasun poistoputkiston rakentamiseksi sekä osoittaa, kuinka paine putkistoon muodostuu, jotta sitä voidaan mitata ja hallita. Lisäksi tavoitteena oli ehdottaa ratkaisuja toimenpiteiksi paineen hallitsemiseksi. Pakokaasun lämpötila vaikuttaa muodostuvaan paineeseen, ja tämä rajattiinkin ainoaksi lämpötilan tarkkailun näkökulmaksi tutkimuskysymyksissä.

Työssä mallinnettiin teräksestä yli 15 m pitkä poistoputkisto, jolle laskettiin ja simuloitiin virtausta vastustava kokonaispaine putkiston mitoittamista varten. Opinnäytteessä todettiin tarve paineen hallinnalle ja suositeltiin keinoja siihen. Jatkossa järjestelmää voidaan kehittää testaamalla esitettyjä ratkaisuehdotuksia käytännössä. Myös malleja tulee tarkentaa rakennusvaiheessa tarpeen mukaisesti.

## **ABSTRACT**

Oulu University of Applied Sciences  
Degree Program in Mechanical Engineering  
Option of Vehicle Technology

Author(s): Jori Karjalainen

Title of thesis: Formation and management of pressure in industrial exhaust gas transfer piping

Supervisor(s): Janne Ilomäki

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2025

Number of pages: 31 + 15 appendices

The tractor manufacturer Valtra is building a test facility that requires a system for transferring exhaust gases out of the building. The goal of the thesis was to model a piping system for this cause. Defining measurements of this piping required calculating and simulating pressure conditions affecting the flow of exhaust gases. Managing this pressure is in key role for the piping to function properly.

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ .....	2
ABSTRACT .....	3
SISÄLLYS .....	4
SANASTO .....	5
1 JOHDANTO .....	7
2 TEORIA .....	9
2.1 Paine moottorin toiminnan näkökulmasta .....	10
2.2 Paineen teoriaa .....	10
2.3 Kokonaispainehäviö putkistossa .....	11
2.3.1 Kitkapainehäviö putkistossa .....	11
2.3.2 Putkiston muotojen kertavastuksien painehäviö .....	16
2.4 Virtauksen ja paineen simulointi .....	18
2.5 Pakokaasun lämpötilan vaikutus paineeseen .....	18
3 TULOKSET .....	19
3.1 Putkiston rakenne .....	19
3.2 Simuloitu paine .....	20
3.3 Painehäviöiden laskenta .....	20
3.4 Pakokaasun lämpötilan vaikutus paineeseen virtausnopeuden välityksellä .....	23
3.5 Paineen mittaus ja hallinta .....	23
4 YHTEENVETO JA POHDINTA .....	26
LÄHTEET .....	28
LIITTEET .....	31

## SANASTO

CFD	eng. Computational Fluid Dynamics, kaasujen ja nesteiden virtauksen simulointia (Sweco Finland Oy 2025)
DOC	eng. Diesel Oxidation Catalyst, erityisesti dieselmoottorille suunniteltu katalysaattori, joka vähentää pakokaasusta häkää ja pienhiukkasia (Nett Technologies Inc. 2020)
DPF	eng. Diesel Particulate Filter, suomeksi hiukkassuodatin, joka suodattaa pakokaasusta nokihiukkasia
EAT	eng. Emission Aftertreatment, pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmä kokonaisuudessaan, voi sisältää muun muassa DPF, DOC ja SCR -järjestelmiä
fluidi	yleisnimitys väliaineelle, jossa rakenneosaset voivat liikkua vapaasti toistensa suhteen, kuten nesteet ja kaasut, esimerkiksi ilma
ISA	eng. International Standard Atmosphere, Kansainvälinen standardi-ilmakehä on kansainvälisen siviili-ilmailujärjestön (ICAO) määrittelemä ilmakehämalli
NTP	eng. Normal Temperature and Pressure, normaali lämpötila ja paine, määritellyt olosuhteet
SCR	eng. Selective Catalytic Reduction, järjestelmä typpikaasujen pelkistämiseen selektiivisesti valikoivasti (Kiiskinen 2023)

VERT

eng. Verified Emission Reduction Technologies, on kansainvälisesti tunnustettu yhteisö, joka keskittyy pakokaasupäästöjen hallintaan parantaakseen ilman laatua ja ihmisen terveyttä (VERT-Association 2024)

# 1 JOHDANTO

Toimeksiantajalle suunnitellaan pakokaasun poistojärjestelmä työkoneiden testiympäristöön. Opinnäytetyössä perehdytään edellä mainitun järjestelmän suunnittelun yhteydessä tarkemmin virtauksen ja paineen muodostumiseen pakokaasun poistojärjestelmässä laskennan ja simuloinnin avulla, sekä selvitetään, miten polttomootorille voidaan luoda mahdollisimman neutraalit olosuhteet toiminnalle paineen näkökulmasta. Lämpöenergiaa ja lämpötiloja käsitellään vain siitä niistä näkökulmista, joilla ne vaikuttavat paineeseen ja virtaukseen. Painetta on tarve hallita testaustulosten luotettavuuden vuoksi, kun taas lämpötilan hallinta liittyy rakennustekniseen turvallisuuteen ja komponenttien käyttöikään.

Työssä suunnitellaan poikkeuksellista järjestelmää, jossa testattavan polttomootorin pakoputken päästä kokemaa vastapainetta pyritään säätämään yksittäisten millibaarien tarkkuudella. Työn tulosta hyödynnetään Valtra Oy Ab:n rakennushankkeessa. Tavoitteena on kerätä dataa paineen muodostumisesta, jonka pohjalta on mahdollista rakentaa säätöjärjestelmä paineen ohjaukseen. Opinnäytteestä rajataan pois puhaltimen toiminta paineen hallitsemiseksi. Puhaltimen toimintaa on mahdollista testata käytännössä vasta laitteiston asennuksen jälkeen, jolloin selvitetään miten paine, tilavuusvirta ja lämpötila korreloivat keskenään. Pääpaino opinnäytteessä on paineen muodostumisen laskennan ja simuloinnin analysointi, sivuosaan jää paineen hallitsemisen ratkaisukeinot.

Tutkimuskysymyksiä ovat:

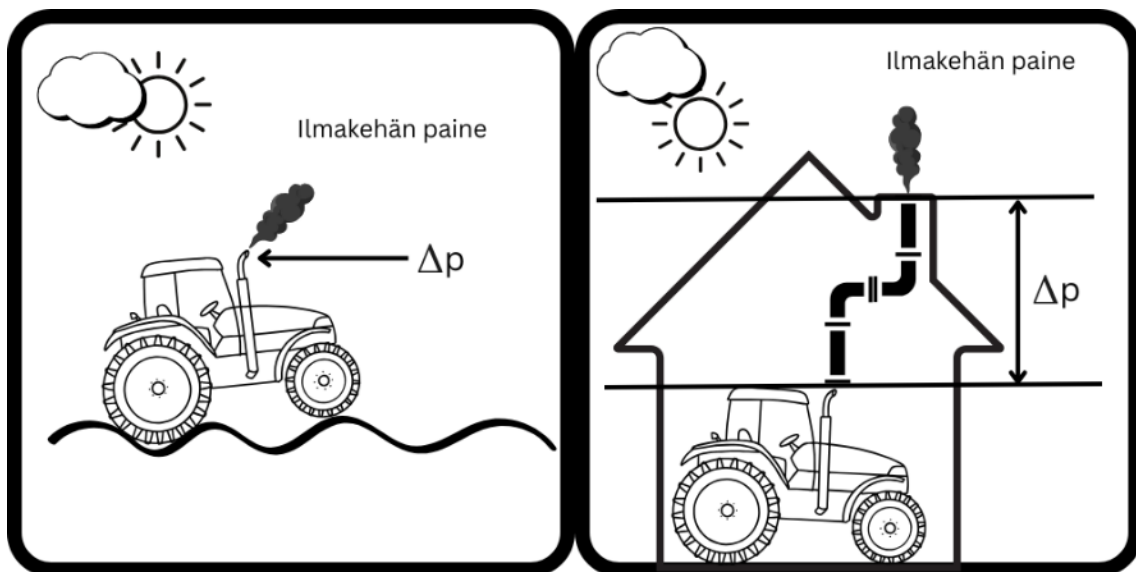
- Miten paine muodostuu pakokaasun poistolinjoihin teollisen ympäristön pakokaasun poistolaitteistossa?
- Millaisella jäähdytysilmavirtauksella pakokaasu saadaan jäähdytettyä tasolle, jolla se voidaan poistaa rakennuksesta? Kuinka suurina ovat tilavuus- ja massavirrat?

- Miten voidaan mahdollistaa mahdollisimman neutraalit paineolosuhteet polttomootorille samalle poistaen tilasta pakokaasu tiiviillä yhteydellä ottamatta jäähdytysilmaa huonetilasta?

Teoriaosuudessa käsitellään painetta ilmiönä sekä paineen muodostumista putkistossa. On myös olennaista huomata lämpötilan merkitys paineen muodostumisessa. Kolmannessa luvussa paineen muodostumista havainnollistetaan laskentojen, joita varten putkistoa on jaoteltu liitteisiin, ja simulaatioiden avulla. Paineen hallinnan keinoihin perehdytään luvun 3 lopussa. Lopuksi vedetään tulokset yhteen ja pohditaan jatkokehitysmahdollisuuksia. Liitteeseen 1 on koostettu peruseriaate putkiston toteutukseen. Putkiston rakenteen ymmärtäminen helpottaa teoriaosuuden merkityksen ymmärtämistä.

## 2 TEORIA

Tarkastellaan paineen muodostumisen teoriaa ja fluidien virtauksen teoriaa nimenomaan pyöreän putkiston näkökulmasta. Lämpöenergiaan ja sen siirtymiseen perehdytään pakokaasun jäädyttämisen yhteydessä. Putkistossa virtaavan fluidin tapauksessa kokonaispainehäviö muodostuu fluidin ja putkiston seinämän välisen kitkan tuottamista kitkاپainehäviöistä, putkiston muotojen luomista kertavastuspainehäviöistä sekä puhaltimen liitäntähäviöstä (Sandberg 2014, 88). Paine on oleellinen suure tässä tapauksessa, sillä poistoputkistoon kytkettävällä puhaltimella pyritään kumoamaan poistoputkiston luoma painehäviö, jotta moottorin kokema vastapaine, eli paine-ero pakoputken pään ja poistoputkiston ulkoilmaston puoleisen pään välillä, olisi mahdollisimman lähellä nollaa.



*KUVA 1. Havainnollistava kuva moottorin kokemasta paine-erosta*

Poistoputkistossa virtaavan pakokaasun oletetaan laskennan yksinkertaistamisen vuoksi olevan ilmaa. Laskennassa hyödynnetään ilman ominaisarvoja ISA-ilmakehämallin mukaisessa NTP-tilassa.

Tapausesimerkissä ei huomioida painovoimaista ilman liikettä, joka johtuu ulko- ja sisätilan lämpötilaeroista sekä tuulen vaikutuksesta (Seppänen 2008, 112). Suunniteltavassa järjestelmässä yhde ulkoilmaan on tiivis, jolloin vapaata painovoimasta johtuvaa virtausta ei tapahdu, sillä kaikki ilma ja pakokaasu virtaa polttomoottorin palamissyklin läpi.

## **2.1 Paine moottorin toiminnan näkökulmasta**

Neutraalien olosuhteiden mahdollistaminen polttomoottorille on oleellista, sillä merkittäväällä ylipaineella on huomattava vaikutus moottorin käyttäytymiseen ja ennen kaikkea testaustulosten ennakoitavuuteen. Moottorin kokemasta vastapaineesta puhuttaessa tarkoitetaan paine-eroa turboahtimen turbiinin puolen sekä pakoputken päästä avautuvan tilan välillä. Normaalissa ajoneuvon käyttötilanteessa tällä matkalla on moottorilta niin kutsuttu downpipe, pakokaasun puhdistusjärjestelmät sekä pakoputkisto, joka päättyy ulkoilmastoon. Tässä testaustilanteessa laboratorio-olosuhteissa pakoputken päähän kytketään tiiviisti pakokaasun poistoputkisto, joka siirtää pakokaasun testitilan sisäpuolelta testitilan ulkopuolelle ulkoilmastoon, jolloin pakokaasun virtaus ennen ulkoilmaan pääsyä vaikeutuu, ja täten moottori kokee enemmän vastapainetta. Tässä opinnäytetyössä pyritään minimoimaan testattavan moottorin kokema vastapaineen kasvu pakokaasun poistoputkistoa käytettäessä laboratorio-olosuhteissa.

VERT:n mukaan merkittävä rajapyykki on 200mbar eli 20kPa ylipainetta ts. vastapainetta moottorin pakopuolella (VERT-Association 2013, 8). Pakokaasun puhdistusjärjestelmät, kuten DOC ja DPF, aiheuttavat painehäviötä omalta osaltaan eli luovat vastapainetta.

## **2.2 Paineen teoriaa**

Paine on tietylle pinta-alalle kohdistuva voima. Paineen yksikkö SI-järjestelmässä on pascal, joka on yhtä suuri kuin yhden newtonin voima yhdelle neliömetrille.

Tässä tapauksessa fluidin ollessa kyseessä paine kertoo puristustilan voimakkuuden, eli voiman suuruuden per pinta-alayksikkö, jonka fluidi kohdistaa putkiston sisäpintaan (Standardisoimisliitto 2019, 31). Paine lasketaan kaavalla 1 (Tammertekniikka / Amk - Kustannus Oy 2010, 99).

$$p = \frac{F}{A}$$

KAAVA 1

$p$  = paine (Pa=N/m<sup>2</sup>)

$F$  = voima (N)

$A$  = pinta-ala (m<sup>2</sup>)

### 2.3 Kokonaispainehäviö putkistossa

Kokonaispainehäviön laskenta ja simulointi ovat olennaisessa osassa, sillä putkiston yhteyteen asennettavalla puhaltimella pyritään kumoamaan putkistossa tapahtuva painehäviö, jotta testattava moottori toimii optimaalisesti ja testitulokset pysyvät luotettavina. Kokonaispainehäviön avulla voidaan tehdä puhaltimen valinta sekä suunnitella anturointia automaattista ohjausta varten.

Yksinkertaistamisen vuoksi tapauksen laskennassa jätetään huomioimatta puhaltimen liitäntähäviöt. Kokonaispainehäviö koostuu puhaltimen liitäntähäviön lisäksi virtauksen kitkapainehäviöstä sekä muotojen, kuten mutkien ja haarojen, kertavastushäviöistä, kaavan 2 mukaisesti (Sandberg 2014, 88).

$$\Delta p_{\text{kokonais}} = \Sigma p_{\text{kitkat}} + \Sigma p_{\text{muodot}}$$

KAAVA 2

#### 2.3.1 Kitkapainehäviö putkistossa

Kitkapainehäviöihin vaikuttavat ilman nopeus, viskositeetti ja tiheys, putkiston koko sekä virtausta vasten olevan pinnan karheus, kuten seuraavista kaavoista nähdään. Jakamalla putkisto poikkipinta-alan mukaan osioihin voidaan laskea ilman virtausnopeus kyseisessä putkiston osassa. Sandbergin mukaan

kokonaiskitkapainehäviö on osioiden kitkapainehäviöiden summa ja kitkapainehäviö saadaan alla olevalla kaavalla 3 (Sandberg 2014, 88).

$$\Delta p_{\text{kitka}} = \Sigma \left( \frac{\lambda L}{d} \cdot 0,5 \cdot \rho v^2 \right) \quad \text{KAAVA 3}$$

$\lambda$  = putkiston sisäpinnan kitkakerroin (-)

$L$  = putkiston osuuden pituus (m)

$d$  = putkiston halkaisija (m)

$\rho$  = ilman tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$v$  = ilman nopeus (m/s)

Kaavassa 3 tekijä  $0,5\rho v^2$  (Pa) on virtauksen dynaaminen paine. Dynaaminen paine on ilman liikkeestä johtuva paine. Tieteen termipankkiin on määriteltä seuraavasti, tämä on selkein löytämäni selitys dynaamiselle paineelle (Tieteen termipankki 2025).

*Jos työntää kätensä ulos liikkuvan auton ikkunasta, huomaa helposti ilmavirrasta aiheutuvan paineen. Paine on sitä suurempi, mitä nopeammin auto liikkuu. Oleellista on virtauksen nopeus suhteessa painetta aistivaan kohteeseen. On yhtä vaikeaa pysyä 100 km/h liikkuvan auton lavalla kuin seisoa paikoillaan 100 km/h puhaltavassa myrskyssä. (Tieteen termipankki 2025.)*

Jotta voidaan kaavan 3 mukaisesti olettaa kitkapainehäviön olevan suoraan verrannollinen virtausnopeuden neliöön, tulee virtauksen olla turbulenttia ja kitkakertoimen vakio (Sandberg 2014, 88). Molempien ehtojen täyttyminen todistetaan laskennoissa liitteessä 13. Kitkapainehäviöiden laskemiseksi tulee selvittää kitkakerroin sekä virtaavan ilman tai pakokaasun nopeus kyseisessä putkiston osassa, muut tiedot ovat saatavilla ilman laskelmia.

### **Ilman tai pakokaasun virtausnopeus**

Ilman virtausnopeus putkistossa voidaan laskea alla olevalla kaavalla 4 joko tilavuus- tai massavirran avulla, kun tiedetään putkiston poikkipinta-ala sekä virtaavan ilman tiheys (Sandberg 2014, 88). Tilavuusvirta ilmaisee, kuinka monta

tilavuuden yksikköä virtaa ajan yksikössä läpi tietyistä putken poikkileikkauksesta, kun taas massavirta ilmaisee tilavuuden sijaan saman massana.

$$v = \frac{q_v}{A} = \frac{q_m}{\rho A} \quad \text{KAAVA 4}$$

$v$  = ilman nopeus (m/s)

$q_v$  = ilman tilavuusvirta (m<sup>3</sup>/s)

$q_m$  = ilman massavirta (kg/s)

$\rho$  = ilman tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$A$  = putkiston poikkipinta-ala (m<sup>2</sup>)

Virtauksen jatkuvuusyhtälön mukaan massavirta pysyy muuttumattomana kanavan poikkileikkauksesta riippumatta kaavan 5 mukaisesti (Seppänen 2008, 94). Tästä johtuen saman massavirran virtausnopeus kapeammassa putkessa on suurempi kuin laajemmassa putkessa.

$$q_m = \rho_1 \times A_1 \times v_1 = \rho_2 \times A_2 \times v_2 \quad \text{KAAVA 5}$$

$q_m$  = massavirta (kg/s)

$A_1$  ja  $A_2$  = virtauksen poikkileikkaus (m<sup>2</sup>)

$v_1$  ja  $v_2$  = virtausnopeus (m/s)

$\rho_1$  ja  $\rho_2$  = tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

### **Virtauksen turbulenttius**

Virtaus on turbulenttia, jos Reynoldsin luku on suurempi kuin 3000. Laminaaria virtaus on Seppäsen mukaan, jos Reynoldsin luku on pienempi kuin 2320. (Seppänen 2008, 95). Tekniikan kaavaston mukaisesti taas virtaus on laminaari, jos Reynoldsin luku on pienempi kuin 2000 (Tammertekniikka / Amk - Kustannus Oy 2010, 101). Reynoldsin luvun laskentatavan suhteen ei ole nähtävissä poikkeavia mielipiteitä lähteiden välillä, se lasketaan kaavan 6 mukaisesti (Sandberg 2014, 89).

$$Re = \frac{dv}{\nu}$$

KAAVA 6

$Re$  = Reynoldsin luku (-)

$d$  = hydraulinen sisähalkaisija (m)

$\nu$  = virtaavan aineen kinemaattinen viskositeetti (m<sup>2</sup>/s)

$v$  = virtausnopeus (m/s)

Reynoldsin luvun laskennassa tarvittava kinemaattinen viskositeetti saadaan laskettua dynaamisen viskositeetin ja tiheyden suhteena, kaavan 7 mukaisesti (The Engineering Toolbox 2025a). Dynaaminen viskositeetti on määritelty ilmalle, ja se vaihtelee lämpötilan mukaisesti.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

KAAVA 7

$\nu$  = virtaavan aineen kinemaattinen viskositeetti (m<sup>2</sup>/s)

$\mu$  = virtaavan aineen dynaaminen viskositeetti (kg/ms)

$\rho$  = virtaavan aineen tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

### Kitkakertoimen laskeminen tai arvioiminen

Turbulentissa virtauksessa kitkakerroin saadaan laskettua kaavalla 8 (Seppänen 2008, 96).

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,14 - 2,0 * \lg \frac{k}{d}$$

KAAVA 8

$\lambda$  = putkiston sisäpinnan kitkakerroin (-)

$k$  = kanavamateriaalin pinnankarheus (mm)

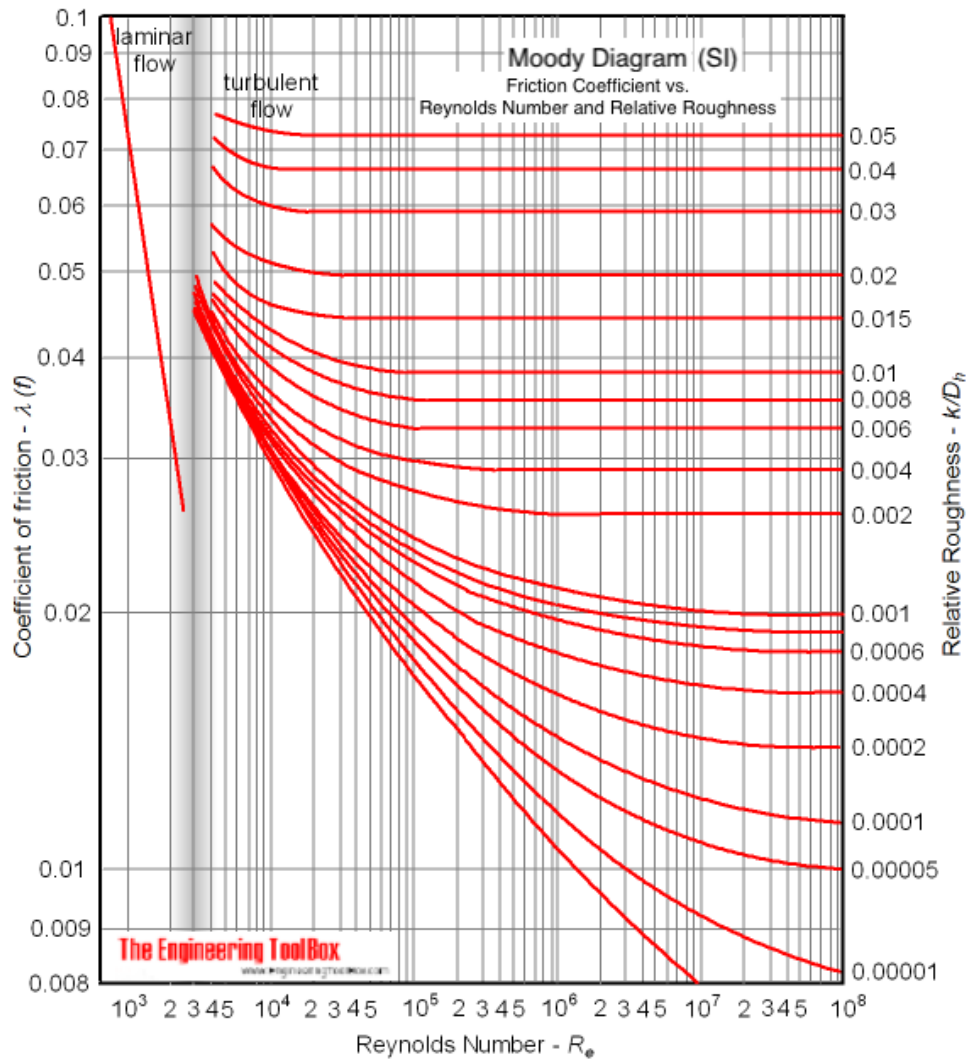
$d$  = putkiston halkaisija (m)

Kitkakertoimen voi myös arvioida Moodyn diagrammista, kuva 3 (The Engineering ToolBox 2025). Kitkakertoimen laskemiseen sekä Moodyn diagrammin tulkitsemiseen tarvitaan suhdeluku  $k/D$ , jossa  $k$  on materiaalin

pinnankarheus ja D putken halkaisija. Aiemmin kaavalla 6 laskettu Reynoldsin luku on myös tarpeen kitkakertoimen arvioimiseksi Moodyn diagrammista. Kanavamateriaalin pinnankarheus saadaan kuvasta 2 (Seppänen 2008, 96).

Putki- tai pintamateriaali	karheus k, mm
Vedettyä putkea lasista, kuparista tai alumiinista	0—0,0015
Muoviputki	0,0015—0,007
Teräsputki, valssattu	0,01—0,05
Teräsputki, sinkitty	0,1—0,16
Teräsputki, vähän ruost.	0,15—0,4
Teräsputki, hyvin ruost.	2—4
Asbestisementtikanava	0,03—0,1
Peltikanava, kierresaumattu	0,15
Valurautaputki	0,2—0,6
Valurautaputki, bitumoitu	0,1—0,13
Betoniputki, teräsbetoni	0,1—0,15
Betoniputki, slammattu	0,3—0,8
Betoniputki, keskikarkea	1—2
Betoniputki, karkea	2—3
Saviputki, poltettu	0,7
Tiilimuuraus, tasoitettu	2—3
Tiilimuuraus, raaka	5—8

KUVA 2. Pinnankarheus eri materiaaleilla (Seppänen 2008, 98)



KUVA 3. Moodyn diagrammi (The Engineering ToolBox 2025)

### 2.3.2 Putkiston muotojen kertavastuksien painehäviö

Vastaavasti kuin kokonaiskitkapainehäviö, on kertavastuksien kokonaispainehäviö osioiden kertavastuksien summa kaavan 9 mukaisesti. Muotovastus johtuu pääasiassa muodon aiheuttamasta pyönteilystä. (Seppänen 2008, 99). Painehäviön minimoimiseksi suunnittelussa tulisikin välttää suoria 90 asteen kulmia sekä putken halkaisijan radikaaleja muutoksia (Engineering Specialist 29.5.2024).

$$\Delta p_{muoto} = \Sigma(\zeta \cdot 0,5 \cdot \rho v^2)$$

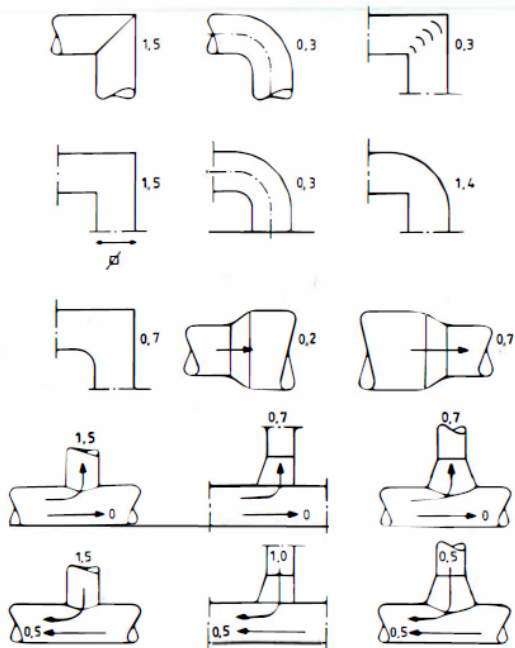
KAAVA 9

$\zeta$  = kanavaosan kertavastuskerroin

$\rho$  = ilman tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$v$  = ilman nopeus (m/s)

Kanavan muotojen kertavastuskertoimia on alla olevassa kuvassa 4.



Kuva 4:17. Tavallisten kanavaosien likimääräisiä kertavastuskertoimia.

**KUVA 4. Kanavaosien kertavastuskertoimia (Seppänen 2008, 100)**

Sekä Seppänen että Sandberg teoksissaan toteavat peräkkäisten muodonmuutosten vaikuttavan kerrannaisesti, ei ainoastaan kertavastuksien summana. Seppänen toteaa ensimmäisen muodonmuutoksen aiheuttavan virtaukseen häviön, joka edelleen vaikuttaa jälkimmäisessä mutkassa tapahtuviin painehäviöihin (Seppänen 2008, 100). Sandberg toteaa saman ja esittää arvion kahden 90 asteen mutkan yhteisvaikutuksesta hän toteaa kokonaisvaikutuksen olevan noin 1,5-kertainen erillisinä huomioitujen mutkien kertavastuksien summaan verrattuna (Sandberg 2014, 95). Liittimissä, joissa putken poikkipinta-ala muuttuu, kertavastuskerroin määritetään suuremman virtausnopeuden mukaan (Seppänen 2008, 99).

## 2.4 Virtauksen ja paineen simulointi

Fluidin virtausta sekä paineen alueellista muodostumista putkistossa voidaan mallintaa CFD:n eli numeerisen virtauslaskennan avulla. Yksi numeerisen virtauslaskennan ohjelmistovalmistajista, Ansys Incorporated, määrittelee CFD:n olevan tiedettä, jossa ennustetaan nesteiden ja kaasujen virtauksia tietokoneiden avulla lainalaisuuksien, kuten massan, liike-energian ja energian säilyvyyden, ollessa voimassa (ANSYS Inc. 2025).

Ehdoton hyöty numeerisesta virtauslaskennasta on tehtyjen 3D -mallien testaus jo suunnitteluvaiheessa (Sweco Finland Oy 2025). Tämä on resurssitaloudellisesti kustannustehokas toimintatapa. Seuraavassa pääluvussa esitetään simulaatioita paineen, lämpötilan ja virtausnopeuden muodostumisesta putkistossa.

## 2.5 Pakokaasun lämpötilan vaikutus paineeseen

Pakokaasun lämpötila voi vaihdella jopa satoja celsiusasteita (liite 2). Kuumempi pakokaasu on ohuempaa, ja täten tilavuusvirta on suurempi kaavan 10 mukaisesti (Tammertekniikka / Amk - Kustannus Oy 2010, 99). Kyseisen putkiosion poikkileikkauksen pinta-ala määrittelee pakokaasun virtausnopeuden kaavan 4 mukaisesti. Tämä on merkittävää, sillä kitkapainehäviö on suoraan verrannollinen pakokaasun virtausnopeuden neliöön, kuten kaavasta 3 nähdään. Luvussa 3 lasketaan virtausnopeuden todellinen vaikutus kokonaiskitkapainehäviöön.

$$q_v = \frac{q_m}{\rho}$$

KAAVA 10

$q_v$  = tilavuusvirta (m<sup>3</sup>/h)

$q_m$  = massavirta (kg/h)

$\rho$  = tiheys (m<sup>3</sup>/kg)

### 3 TULOKSET

Tässä luvussa tarkastellaan mallinnetun putkiston rakennetta, vertaillaan laskelmien ja simulaatioiden tuloksia paineen muodostumisesta sekä pohditaan vaihtoehtoja reaaliaikaisen datan avulla tehdyn ohjauksen toteuttamiseksi. Kuvat, laskelmat ja piirustukset, joihin tulevissa alaluvuissa viitataan, löytyvät liitteistä 4-14. Kuten aiemmin työssä mainitaan, laskennassa yksinkertaistamisen vuoksi pakokaasua, sekä pakokaasun ja jäähdytysilman sekoitusta, käsitellään ilman sen fysikaalisten ominaisuuksien osalta. Putkistorakenteeseen liittyen kiinnitykset, kannakoinnit ja eristykset on jätetty opinnäytetyön ulkopuolelle. Opinnäytteen kannalta olennaisia ovat putket, muodot sekä pakokaasun ja ilman virtaussuunnat.

#### 3.1 Putkiston rakenne

Pakokaasun poistoputkiston mallinnukset tehtiin Creo Parametric -ohjelmistolla. Putkiston perusrakenteen suunnittelua ohjasivat lähtötietojen lisäksi toimeksiantajan toiveet jäähdytysilman kulun toteutuksesta, itse rakennuksen mitat sekä laboratorio-olosuhteissa testattavan koneen mitat. Mallinnusta ohjaavat alkuarvot olivat liitteen 2 mukaiset.

Toukokuussa 2024 palaverissa Valtran Engineering Specialist antoi vinkkejä suunnittelun tueksi. Hän suositteli välttämään 90 asteen mutkia ja tekemään mutkat loivina. Lisäksi hän suositteli tekemään putkiston mahdollisimman lyhyeksi vastapaineen minimoimiseksi. Hän kertoi myös väljän putkiston olevan paras mahdollinen virtausvastuksen kannalta ja että minun tulisi laskennoilla varmistaa, ettei pakokaasu missään kohtaakaan virtaa yli 0,8 kertaa äänennopeudella. (Engineering Specialist 29.5.2024). 20°C lämpötilassa äänen nopeus ilmassa on 343,3m/s, jolloin suunnittelua ohjaava maksiminopeus pakokaasulle oli 274,64m/s (The Engineering Toolbox 2025b). Putkiston rakenne selviää liitteestä 1.

### 3.2 Simuloitu paine

Valtran Engineering Specialist teki simulaatiot Siemensin Simcenter STAR-CCM+ -sovelluksella. Simulaatioissa käytetyt viitearvot olivat liitteiden 2 ja 3 mukaiset, lukuun ottamatta pakokaasun maksimilämpötilaa, johon lisättiin 100 °C varmuusvaraa. Pakokaasun tilavuusvirtana simulaatioissa käytettiin liitteen 3 mukaista  $q_{vmax}$  arvoa. Jäähdytysilman tilavuusvirrat lukevat liitteiden simulaatioiden yhteydessä.

Simulaatioihin on merkitty kyseisessä simulaatiossa käytetyt lähtöarvot. Simulaatioita on ajettu pitkälle aikavälille, eli tilaan, jossa järjestelmä saavuttaa tasapainotilan annetuilla lähtöarvoilla lämpötilan sekä paineen osalta. Virtausta käsitelty turbulenttina ja virtaavaa fluidia ilmaa. Simulaatiot löytyvät liitteistä 4-8.

Liitteen 4 simulaatio osoittaa virtausnopeuden suurimmillaan olevan pienempi kuin suunnittelua ohjaava rajanopeus 0,8 kertaa Mach eli 274,64m/s. Kuten liitteestä 13 nähdään, on suurin virtausnopeus juuri pienimmin halkaisijan putkisto-osuudessa. Liitteessä 5 on simuloitu putken vaipan lämpötilaa. Kuten kuvasta nähdään, jäähdytysilman ansiosta putken lämpötila pysyy alle 50 °C koko ajan rakennuksen sisäpuolella ja vasta putken katolla olevassa osiossa lämpötila nousee noin 130 celsiusasteeseen.

Liitteessä 6 tarkastellaan virtaavan pakokaasun lämpötilaa. Kuten simulaation väriskaalasta huomataan, pakokaasu lämpötila laskee huomattavasti jäähdytysilman ansiosta. Liitteessä 7 havainnollistetaan poikkileikkausta, jolla liitteen 8 simulaatio on rajattu. Liitteessä 8 havainnollistetaan putkiston sisälle syntyvää painetta.

### 3.3 Painehäviöiden laskenta

Putkiston tarkoituksenmukaisen toiminnan varmistamiseksi tulee suunnittelun ja laskennan pohjana olla muuttujien äärimmäiset arvot, jotta varmistutaan toiminnasta myös äärimmäisissä olosuhteissa. Putkisto on kitkapainehäviön ja

muotojen kertavastusten painehäviöiden laskemiseksi jaettu osiin, katso liitteistä 9-12 kuvat ja liitteestä 13 laskennan sisältävä laskentataulukko. Seuraavaksi alla on avattuna laskentaprosessi. Merkityksellistä on huomata, että kitkaosioiden 1 ja 2 jälkeen tilavuusvirta kasvaa huomattavasti jäähdytysilman sekoittuessa pakokaasuun.

Kaikki laskelmat tehdään eri putken osioille erikseen, riveillä ovat putkiston osiot numeroituna ja sarakkeilla ovat kyseiselle putkiston osalle määritellyt ja lasketut arvot sekä kaavat laskentajärjestyksessä. Ensiksi lasketaan putken osion poikkileikkauksen pinta-ala halkaisijan avulla. Putkiosiossa virtaavan ilman lämpötilan perusteella on haettu ilmalle tiheyden arvo The Engineering Toolboxin laskurin avulla (The Engineering Toolbox 2025c).

Seuraavaksi massavirran, tiheyden ja poikkileikkauksen pinta-alan avulla voidaan laskea osiossa virtaavan ilman nopeus – on tärkeää, että nopeus ei ylitä 274,64m/s arvoa (Engineering Specialist 29.5.2024). Ilmalle annettu dynaamisen viskositeetin ja tiheyden avulla lasketaan ilman kinemaattinen viskositeetti, joka tarvitaan Reynoldsin luvun laskemiseen. Dynaaminen viskositeetti voidaan laskea Sutherlandin kaavalla, kaavalla 11. Sutherlandin vakio ilmalle on  $C = 120K$  ja ilman tunnettu viskositeetti on  $18^{\circ}C$  (White 2011, 27-28).

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{\left( \frac{3}{2} \right)} \frac{T_0 + C}{T + C} \quad \text{KAAVA 11}$$

$\mu$  = viskositeetti halutussa lämpötilassa  $T$  (Pa·s)

$\mu_0$  = tunnettu viskositeetti lämpötilassa  $T_0$  (Pa·s)

$T$  = lämpötila Kelvineinä (K)

$T_0$  = viitelämpötila kelvineinä (K)

$C = 120K$  = Sutherlandin vakio (K)

Seuraavassa on arvoja ilman dynaamiselle viskositeetille (taulukko 1), näistä tarvittavat on poimittu painehäviöiden laskentataulukkoon liitteeseen 13.

Lämpötila (°C)	Lämpötila (K)	Viskositeetti (μPa·s)
0	273,15	17,1
100	373,15	23,8
200	473,15	26,2
300	573,15	31,0
400	673,15	34,9
500	773,15	37,4
600	873,15	39,3

*TAULUKKO 1. Ilman dynaaminen viskositeetti eri lämpötiloissa*

Reynoldsin luvun ollessa yli 3000 voidaan todeta virtauksen olevan turbulenttia (Seppänen 2008, 95). Tällöin putkiston sisäpinnan kitkakerroin voidaan laskea sarakkeen M mukaisesti. Jos kitkakerroin arvioidaan Moodyn diagrammin avulla, Reynoldsin lukua tarvitaan. Putkiston sisäpuolen pinnankarheus saadaan määritetyn materiaalin mukaisesti kuvasta 2, tämä tieto löytyy sarakkeesta L. Putkiston osion pituuden ja aiemmin jo mainittujen arvojen avulla saadaan laskettua putkiston osiolla kitkapainehäviö.

Muotojen kertavastushäviöt saadaan laskettua kuvan 4 mukaisesti määritettyjen kertavastuskertoimien sekä aiemmin putkiston osalle annettujen ja laskettujen arvojen avulla (liitteet 2 ja 3). Kitkapainehäviöt ja muotojen kertavastuspainehäviöt summattuna muodostavat pakokaasun poistoputkiston kokonaispainehäviön. Laskennoissa on jätetty huomioimatta päätelaitteen eli puhaltimen muodostama painehäviö. Muotojen 1 ja 2 laskennassa on huomioitu luvussa 2.3.2 mainittu peräkkäisten muotojen kerrannaisvaikutus. Lisäksi liittimissä, joissa putken poikkipinta-ala muuttuu, kertavastuserroin määritetään suuremman virtausnopeuden mukaan (Seppänen 2008, 99).

### **3.4 Pakokaasun lämpötilan vaikutus paineeseen virtausnopeuden välityksellä**

Merkityksellistä on huomata, että mitoituksen perustana oleva massavirta tuottaa tilavuusvirran, joka vaihtelee riippuen virtaavan ilman tiheydestä, joka taas riippuu lämpötilasta. Virtausnopeuteen vaikuttaa tilavuusvirran lisäksi putkiston osion poikkileikkauksen pinta-ala. Kokonaispainehäviö on suoraan verrannollinen nopeuden neliöön kaavojen 2, 3 ja 9 mukaisesti. Pakokaasun lämpötilan vaikutus paineeseen on laskettu liitteissä 3 ja 14. Lämpötilan vaikutus on sisällytetty painehäviölaskelmiin liitteessä 13.

### **3.5 Paineen mittaus ja hallinta**

Tehdyt simulaatiot ja laskennallinen paine tuottavat saman mittaluokan lopputuloksen. Putkistossa muodostuu pakokaasun virtausta vaikeuttavaa vastapainetta. Jotta moottori ei kokisi tätä vastapainetta, tulee pyrkiä minimoimaan paine-ero traktorin pakoputken pään ja poistoputkiston lopun välillä, ks. liite 15. Paine-eron minimointi voidaan toteuttaa poistoputkistoon liitettävällä puhaltimella. Puhaltimen sijoittamisen vaihtoehdot ja huomiot niistä avattu liitteessä 15.

Taajuusmuuntajalla ohjattavan puhaltimen tilavuusvirtaa voidaan säädellä reaaliajassa kiinnittämällä se moottorin kierroslukutietoon. Voi ajatella, että moottori on kuin suuri ilmapumppu, jonka jokaisesta sylinterin täyttösyklistä tulee sama massavirta myös ulos. Yksinkertaistamisen vuoksi jätetään huomioimatta palamisreaktion aiheuttamat muutokset. Tällöin moottorin kierrosluku korreloi suoraan pakokaasun poistoputkistoon tulevan pakokaasun määrän kanssa.

#### **Vaatimuksia puhaltimelle:**

- korkea tilavuusvirta, jopa 12 000 m<sup>3</sup>/h
- korkea lämmönkesto, jopa 200°C, jos puhallin on pakokaasun poistopuolella

- korkean lämmönkeston aksiaalipuhallin
- koteloitu radiaalipuhallin
- paineenkorotus 0-200mbar, 0-20kPa
- taajuusmuuttajakäyttö tulee olla mahdollista, eli VFD-puhallin (Variable Frequency Drive)

Moottorin kokemaa vastapainetta tulee mitata pakokaasun poistoputkistosta, jotta voidaan ohjata puhallinta tiedon avulla. Paine-eron havainnointiin tarvitaan vähintään kaksi mittauspistettä eli kaksi anturia. Anturien sijoittelu selviää liitteestä 15. Paine-anturin 1 ja 2 välinen paine-ero on se, johon puhaltimella tuotetulla jäähdytysilman paineella ja tilavuusvirralla voidaan vaikuttaa. Ohjauksen kannalta optimaalisinta olisi sijoittaa ensimmäinen paineanturi mahdollisimman lähelle testattavan työkoneen oman pakoputken päätä, sillä paikallinen paine kyseisessä kohdassa on moottorin kokema vastapaine. Paineanturi tulee kuitenkin kiinnittää kiinteällä asennuksella painetta siirtävällä liitosputkella, joten paras kohta on pakokaasun ja jäähdytysilman sekoittumisen jälkeen. Putkiston alkupään tuottaman vastapaineen voi arvioida moottorilla tuotetun tilavuusvirran ja pakokaasun lämpötilan mukaan, ja ottaa huomioon puhaltimen ohjauslogiikassa.

Toiminnan kannalta olennaisia vaatimuksia paineanturille ovat mitattava painealue 0-200mbar tai 0-20kPa sekä korkea lämpötilan kesto. Johdot ovat pitkät, joten jänniteviestillä toimiva anturi ei ole varteenotettava vaihtoehto, sillä johdon oma vastus eli resistanssi pudottaa jännitettä (National Instruments 2025). Lisäksi standardissa SFS-IEC 381-1 määritellään tasavirtasignaali 4-20mA viralliseksi käytännöksi. Signaali 4-20mA välillä kertoo normaalista signaalista, 0mA ongelmasta, kuten katkenneesta johdosta. (SESKO ry 1988, 1) Paineen mittaamiseen pakokaasun poistoputkistossa sopisi erinomaisesti esimerkiksi Keller PR-21Y paineanturi (KELLER Pressure 2025).

### **Keller PR-21Y**

- Mittausalueet: 0...2,5 bar – 0...1000 bar
- Ulostulo: 4–20 mA

- Rakenne: ruostumaton teräs AISI 316L
- Maksimi anturin oma lämpötila: 125 °C
- Suojaluokka: IP65 (mPm-liittimellä)
- Hinta-arvio: noin 250–300 €

125 celsiusasteen lämmönkeston tulisi olla riittävä, kun anturia sijoiteta suoraan pakokaasuvirtaan, vaan siirretään paine kauemmas siirtoputkella. Tämä pätee molempiin anturien sijainteihin.

## 4 YHTEENVETO JA POHDINTA

Työn tarkoituksena oli perehtyä paineen muodostumiseen teollisessa pakokaasun poistolaitteistossa lämpötilan vaikutus huomioiden pakokaasun jäähtymisen toteutuksessa. Lisäksi paineen mittaukseen ja hallintaan tuli selvittää ratkaisuja laskentojen ja simulaatioiden tuloksien pohjalta.

Teoriassa todettiin paineen muodostuvan kitkapainehäviöistä ja muotojen kertavastuksista. Merkityksellisiä tekijöitä laskennassa ovat putkiston osion pituus, putken sisäpinnan kitkakerroin, putken sisähalkaisija, lämpötila ja tiheys sekä kaikista merkityksellisimpänä pakokaasun virtausnopeus. Neutraalit paineolosuhteet moottorille voidaan mahdollistaa puhaltimen oikean sijoittelun ja sopivan anturoinnin avulla. Antureilla seurattavia parametreja ovat paine-ero ja lämpötila. Simulaatioissa ja laskennoissa käytetyn mallin joustavan elementin halkaisijan riittävyttä tulee pohtia. Kaksinkertaistamalla halkaisija, voidaan kokonaispainehäviötä laskea 587 %. Joustavan elementin halkaisija oli materiaalitehokas ja virtausnopeuden puolesta hyväksyttävä, mutta paineenkorotuksen puolesta liian pieni.

Paineen lisäksi lämpötila on oleellista toteutuksessa. Simulaatiot ja laskelmat osoittavat kuinka paljon ja millä parametreilla pakokaasua tulee jäähdyttää, jotta päästään asetettuun tavoitelämpötilaan sekä pakokaasun että putkiston osalta. Poikkeavuudet simulaatioiden ja laskelmien tuloksissa johtunevat eriävistä lähtötiedoista tätä tulee selvittää tarkemmin ennen tulosten hyödyntämistä. Jatkossa tulee myös pohtia puhaltimen lokaatiota poistoputkistossa, rakentaa ohjauslogiikka anturoinnin pohjalta sekä testata asennetun puhaltimen tuottaman tilavuusvirran korrelaatioita moottorin kokeman paine-eron minimoinnissa.

Suunnitellun pakokaasun poistoputkiston kaltaiseen projektiin liittyy opinnäytetyön rajatun aiheen lisäksi paljon osa-alueita, kuten rakennustekniset vaatimukset, materiaalitekniikka ja lujuuslaskenta, työturvallisuus. Tehty raja-  
joka sisälsi putkiston rakenteen, virtausvastuksien laskennan ja simuloinnin,

lämpötilan laskennan ja simuloinnin sekä keinot paineen hallintaan, oli mielestäni liian laaja. Lämpötilan vaikutus paineeseen tuli laskennoissa huomioitua tiheyden ja virtausnopeuden kautta, joten lämpötilan erillinen laskenta ja simulointi oli mielestäni tarpeetonta tässä opinnäytetyössä. Tämän sijaan olisi enemmän voinut keskittyä paineen hallinnan keinoihin ja ohjauslogiikkaan.

Projekti oli mielenkiintoinen ja aiheena hyvin ajankohtainen. Aiheeseen perehtyminen kehitti tiedonhaun taitojani ja hankittu osaaminen kasvatti asiantuntijuuttani. Aiemmat opinnot tukivat opinnäytteen tekemistä, sillä opinnoissa on pyritty johdonmukaiseen ja analyyttiseen käsittelyyn. Resursointi opinnäytetyöhön on ollut vaihtelevaa ja täysin oman jaksamisen puitteissa. Vaikka mieli olisi tehnyt enemmän perehtyä paineen reaaliaikaiseen seurantaan poistoputkistossa ja paineen hallinnan ohjauslogiikkaan, olen tyytyväinen lopputulokseen.

## LÄHTEET

ANSYS Inc. 2025. What is Computational Fluid Dynamics (CFD)? Luettavissa: <https://www.ansys.com/simulation-topics/what-is-computational-fluid-dynamics>.

Luettu: 16.1.2025.

Engineering Specialist 29.5.2024. Palaveri CFD. Suolahti.

KELLER Pressure 2025. Series 21Y. Luettavissa: <https://keller-pressure.com/en/products/pressure-transmitters/standard-pressure-transmitters/series-21y>. Luettu: 30.4.2025.

Kiiskinen, J. 2023. SCR-tekniikasta dieselin pelastus. Luettavissa: <https://satl.fi/2023/02/15/scr-tekniikasta-dieselin-pelastus/>. Luettu: 21.4.2025.

National Instruments 2025. 4-20 mA Current Loop Fundamentals, System Design, and Setup. Luettavissa: <https://www.ni.com/en/shop/data-acquisition/fundamentals--system-design--and-setup-for-the-4-to-20-ma-curren.html>. Luettu: 27.4.2025.

Nett Technologies Inc. 2020. What Is a Diesel Oxidation Catalyst? Luettavissa: <https://www.nettinc.com/information/emissions-faq/what-is-a-diesel-oxidation-catalyst>. Luettu: 16.1.2025.

Sandberg, E. 2014. Ilmastointilaitoksen mitoitus - Ilmastointitekniikka osa 2. Talotekniikka-Julkaisut Oy. Tampere.

Seppänen, O. 2008. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. SOLVER palvelut Oy. Anjalankoski.

SESKO ry 1988. SFS-IEC 381-1 Prosessin säädön ja ohjauksen analogiasignaalit. Tasavirtasignaalit.

Standardisoimisliitto 2019. SI-opas.

Sweco Finland Oy 2025. Virtauslaskenta. Luettavissa: [https://www.sweco.fi/palvelumme/rakennukset-ja-kaupunkikehitys/rakennesuunnittelu/simuloinnit-ja-analyysit/virtauslaskenta/#:~:text=Virtauslaskenta%20\(CFD\),virtuaalisen%20prototyypin%20jo%20suunnittelun%20alkuvaiheessa](https://www.sweco.fi/palvelumme/rakennukset-ja-kaupunkikehitys/rakennesuunnittelu/simuloinnit-ja-analyysit/virtauslaskenta/#:~:text=Virtauslaskenta%20(CFD),virtuaalisen%20prototyypin%20jo%20suunnittelun%20alkuvaiheessa). Luettu: 17.1.2025.

Tammertekniikka / Amk - Kustannus Oy 2010. Tekniikan kaavasto. Tammertekniikka / Amk - Kustannus Oy. Tampere.

The Engineering Toolbox 2025a. Dynamic, Absolute, and Kinematic Viscosity – Definitions & Conversions. Luettavissa: [https://www.engineeringtoolbox.com/dynamic-absolute-kinematic-viscosity-d\\_412.html](https://www.engineeringtoolbox.com/dynamic-absolute-kinematic-viscosity-d_412.html). Luettu: 17.1.2025.

The Engineering ToolBox 2025. Moody diagram. Luettavissa: [https://www.engineeringtoolbox.com/moody-diagram-d\\_618.html](https://www.engineeringtoolbox.com/moody-diagram-d_618.html). Luettu: 16.1.2025.

The Engineering Toolbox 2025b. Air - Speed of Sound vs. Temperature. Luettavissa: [https://www.engineeringtoolbox.com/air-speed-sound-d\\_603.html](https://www.engineeringtoolbox.com/air-speed-sound-d_603.html). Luettu: 16.1.2025.

The Engineering Toolbox 2025c. Air - Density, Specific Weight and Thermal Expansion Coefficient vs. Temperature and Pressure. Luettavissa: [https://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d\\_600.html](https://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d_600.html). Luettu: 24.1.2025.

Tieteen termipankki 2025. Ilmanpaine. Luettavissa: <https://tieteentermipankki.fi/wiki/T%C3%A4htitiede:ilmanpaine>. Luettu: 27.4.2025.

VERT-Association 2024. Best Available Technology in Emission Reduction. Luettavissa: <https://www.vert-dpf.eu/>. Luettu: 16.1.2025.

VERT-Association 2013. VERT Standards and Procedures for Retrofit to reduce Diesel Engine Emissions. Niederweningen. Luettavissa:

<https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-05/documents/vert-standards.pdf>.

Luettu: 21.1.2025.

White, F.M. 2011. Fluid Mechanics. McGraw Hill.

## **LIITTEET**

Liite 1 Putkiston toiminnan periaate

Liite 2 Lähtötiedot

Liite 3 Jäähdytysilman määrän laskenta

Liite 4 Simulaatio - Virtausnopeus

Liite 5 Simulaatio – Lämpötila

Liite 6 Simulaatio – Virtaavan fluidin lämpötila

Liite 7 Simulaatio – Paine

Liite 8 Simulaatio – Paine

Liite 9 Kitkapainehäviö osio 1

Liite 10 Kitkapainehäviö osio 2, 3 ja 4

Liite 11 Kitkapainehäviö osio 5

Liite 12 Muotojen kertavastus osiot 1-5

Liite 13 Painehäviöt - laskentataulukko

Liite 14 Virtausnopeuden laskenta

Liite 15 Paineen mittaus ja hallinta





























