

# Dieselmoottorin pakokaasun jäähdytysjärjestelmän suunnittelu

Sipi Jutila

Opinnäytetyö  
Huhtikuu 2015

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma  
Tekniikan ja liikenteen ala



JYVÄSKYLÄN AMMATTIKORKEAKOULU  
JAMK UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Tekijä(t) Jutila, Sipi	Julkaisun laji Opinnäytetyö	Päivämäärä 7.4.2015
	Sivumäärä 51	Julkaisun kieli Suomi
		Verkkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi <b>Dieselmoottorin pakokaasun jäähdytysjärjestelmän suunnittelu</b>		
Koulutusohjelma Kone - ja tuotantotekniikan koulutusohjelma		
Työn ohjaaja(t) Matti Kurki		
Toimeksiantaja(t) Tana Oy		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyö tehtiin Tana Oy:lle osana uuden, vähäpäästöisen TIER 4/Euro 4 -moottorimoduulin suunnittelua. Työssä suunniteltiin järjestelmä, jolla varmistetaan, että uuden dieselmoottorin kuuma pakokaasu ei aiheuta syttymisriskiä pölyisillä tehdasalueilla.</p> <p>Työssä selvitettiin, mikä on suurin pakokaasun lämpötila, joka ei vielä aiheuta syttymisvaaraa pölyisissä olosuhteissa. Selvityksen perusteella pakokaasun lämpötila saa olla enintään kaksi kolmasosaa pölyn syttymislämpötilasta. Työssä käytettiin lähtökohtana puupölyä, jonka syttymislämpötila on n. 500 °C. Pakokaasun lämpötila ei siis saa olla korkeampi kuin 330 °C, jotta puupölyn syttymisriskiä ei synny.</p> <p>Opinnäytetyössä vertailtiin eri jäähdytysmenetelmiä ja päädyttiin suunnittelemaan laitteisto, jonka toiminta perustuu veden suihkuttamiseen pakokaasuvirtaan. Veden tarkoitettiin höyrystyvän pakoputkessa aiheuttaen pakokaasun jäähtymisen. Laskelmien perusteella päädyttiin suihkuttamaan vettä 1,4 l/min 600 celsiusasteiseen pakokaasuvirtaukseen, jonka massavirta on 180 g/s. Suunniteltu rakenne koostuu pääpiirteittäin vesisäiliöstä, sähköpumpusta ja suuttimesta.</p> <p>Laitteistoa testattiin osana moottorimoduulin prototyypin testejä. Testien perusteella todettiin, että laitteisto ei täyttänyt täysin sille asetettuja vaatimuksia, eikä jäähdytystehoa voitu varmistaa. Pohdinnan perusteella veteen ei siirtynyt tarpeeksi lämpöä, jotta kaikki vesi höyrystyisi. Osa vedestä suihkusi pakokaasun mukana nestemäisenä.</p> <p>Jäähdytyslaitteiston jatkokehittelyn avulla olisi mahdollista saada laitteisto toimivaksi. Jatkokehittelyssä suositellaan tutkimaan tarkemmin ilman sekoittamiseen liittyviä mahdollisuuksia.</p>		
Avainsanat (asiasanat)  Vesijäähdytys, pakokaasu, dieselmoottori, Tana Oy, TIER 4, EURO 4, repijä		
Muut tiedot		



Author(s) Jutila, Sipi	Type of publication Bachelor's thesis	Date 7.4.2015
		Language of publication: Finnish
	Number of pages 51	Permission for web publication: x
Title of publication <b>Designing a Diesel Engine Exhaust Cooling System</b>		
Degree programme Degree Programme in Mechanical and Production Engineering		
Tutor(s) Kurki, Matti		
Assigned by Tana Oy		
Abstract <p>The bachelor's thesis was assigned by Tana Inc. as a part of developing TIER 4/Euro 4 emission class diesel engine module. The aim of this bachelor thesis was to ensure that the increased exhaust temperature will not cause fire or explosion hazard in at dusty industrial sites.</p> <p>The research on safe exhaust temperature found that safe exhaust gas temperature is two thirds of the specific ignition temperature of the exposed material. Wood dust ignites at 500 degrees Celsius and therefore the safe temperature was defined 330 degrees Celsius.</p> <p>The comparison of cooling methods showed that the best solution was to mix water in the exhaust stream. The water was to evaporate in the exhaust gas and therefore develop a cooling effect. The exhaust gas was flowing at the rate of 180 grams per second and at temperature of 600 degrees Celsius. The calculations indicated that the required water flow was 1.4 liters per minute in order to meet the requirements. The basic components in the cooling system were a nozzle, pump and tank. The pump was operated with electricity.</p> <p>The cooling system was tested as a part of testing of the diesel engine module prototype. The tests of the cooling system indicated that the system didn't function fully as expected. Some parts of the cooling water did not evaporate because heat transformation was not sufficient. Part of the water spurted through the exhaust system as liquid. The cooling power of the system could not be verified in this thesis.</p> <p>The cooling system needs to be developed further to be effective. Based on this thesis it is recommended that further development is focused on the methods that utilize ambient air mixing.</p>		
Keywords/tags ( <a href="#">subjects</a> )  Water cooling, exhaust, diesel engine, Tana oy, TIER 4, EURO 4, shredder		
Miscellaneous		

## SISÄLTÖ

<b>1</b>	<b>JOHDANTO .....</b>	<b>5</b>
1.1	Opinnäytetyön taustat .....	5
1.2	Työn tavoitteet ja toteutus .....	7
1.3	Tana Oy.....	7
1.4	TanaShark .....	8
<b>2</b>	<b>TERMODYNAMIIKAN TEORIAA.....</b>	<b>9</b>
2.1	Termodynaaminen systeemi.....	9
2.2	Lämpöenergian siirtyminen .....	9
2.3	Lämpöenergia .....	11
<b>3</b>	<b>DIESELMOOTTORITEKNIIKAN TEORIAA .....</b>	<b>13</b>
3.1	Dieselmoottori .....	13
3.2	Dieselmoottori ilmapumppuna .....	14
3.3	Moottorin päästöt.....	15
3.3.1	Päästöjen syntyminen .....	15
3.3.2	Pakokaasun jälkikäsittely.....	15
3.3.3	Hiukkassuodattimen regenerointi.....	18
<b>4</b>	<b>PAKOKAASUN JÄLKIKÄSITTELY.....</b>	<b>19</b>
4.1	Laitteiston rakenne ja asennusympäristö.....	19

4.2	Laitteiston toiminta-arvot.....	20
4.3	Turvallinen pakokaasun lämpötila .....	21
5	LÄMMÖNHALLINNAN PERIAATTEET.....	23
5.1	Jälkikäsitteilylaitteiston lämpötila .....	23
5.2	Pakokaasun jäähdytys .....	23
5.2.1	Jäähdytystehon määrittely.....	23
5.2.2	Jäähdytysperiaatteet.....	23
5.2.3	Lämmönvaihdin – konsepti .....	25
5.2.4	Sekoitus – konseptit .....	25
5.2.5	Konseptien vertailu ja valinta.....	27
6	JÄÄHDYTYSLAITTEISTO .....	27
6.1	Vedensuihkutusjärjestelmän suunnittelu.....	27
6.2	Vesipumppu .....	28
6.3	Vesisuutin .....	29
6.4	Vedenlähde ja vesilinjasto .....	30
6.5	Ohjaus.....	31
6.6	Laitteiston rakenne ja asennus .....	32
6.7	Kustannukset .....	33
7	LAITTEISTON MITTAUS.....	34
7.1	Mittausten kulku .....	34
7.2	Suihkutusjärjestelmän testaus.....	34

7.3	Jäähdytystehon mittaus .....	36
7.4	Mittauksen tulokset .....	37
8	POHDINTA.....	38
8.1	Johtopäätökset .....	38
8.2	Jatkokehittely.....	40
	LÄHTEET .....	42
	LIITTEET .....	44
	Liite 1. Pakokaasun massavirran ja jäähdytystehon laskenta .....	44
	Liite 2. Vesisuihkutusmäärän laskenta .....	45
	Liite 3. Ilmansekoittimen laskenta .....	46
	Liite 4. Jäähdytyslaitteiston kokoonpanokuva.....	47
	Liite 5. Komponenttien kustannuslaskelma.....	48
	Liite 6. Konseptien vertailu .....	49
	Liite 7. Jäähdytyslaitteiston vaatimuslista .....	50

## KUVIOT

Kuvio 1. Työkone-moottoreiden päästöluokkien kehittyminen, muokattu (Cummins. 2012).....	5
Kuvio 2. TanaShark jätteenrepijä(Tana Oy, muokattu).....	8
Kuvio 3. Jälkikäsittelylaitteiston osat. (Catalyst Handbook for non-road vehicles. 2007, muokattu).....	16

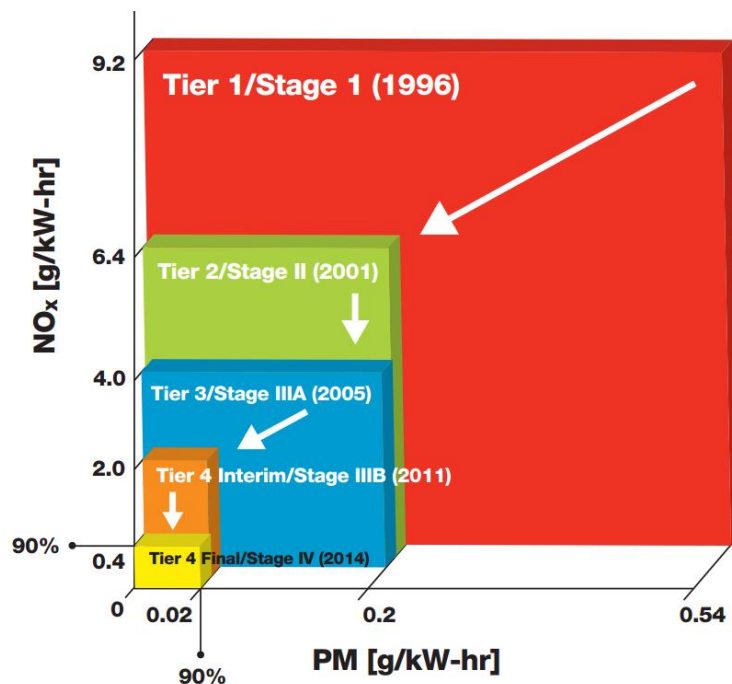
Kuvio 4. Keraaminen hiukkassuodatin (Dietsche ym. Dieselmoottorin ohjausjärjestelmät. 2007. s.126) .....	17
Kuvio 5. Jälkikäsittelylaitteiston osat. (Cummins. muokattu).....	20
Kuvio 6. Lämmönvaihtimen toimintaperiaate. ....	24
Kuvio 7. Ilmansekoittimen hahmotelma .....	26
Kuvio 8. Pakoputkiston rakenne. ....	32
Kuvio 9. Suuttimen asennus.....	33
Kuvio 10. Jäähdytyslaitteisto kasattuna alustalla. ....	35
Kuvio 11. Pakoputki mittauskunnossa .....	37

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Opinnäytetyön taustat

Maailmassa on vallinnut pitkään suuntaus, joka pyrkii pienentämään ilmansaasteita. Ilmansaasteiden vähentämiseksi mm. Euroopassa on käytössä EURO-päästöluokat sekä Yhdysvalloissa TIER-päästöluokat. Päästöluokat määrittävät kuinka paljon polttomoottorista tai ajoneuvosta saa syntyä päästöjä. (Emission Standards: Europe: NonroadEngines. 2014.)

Työkoneiden moottoreista puhuttaessa, käytetään usein termiä non-road engine, eli moottori, jota ei käytetä tieliikenteessä. Säännöksen piiriin kuuluu lähes kaikki tien ulkopuolella liikkuvat koneet pois lukien laivat ja rautatiekalusto. Työkoneiden päästöjä verrataan moottorin tuottamaan energiaan, kun taas tieliikenteessä päästöjä verrataan ajoneuvon ajamiin kilometreihin. (Emission Standards: Europe: NonroadEngines. 2014.)



Kuvio 1. Työkone-moottoreiden päästöluokkien kehittyminen, muokattu (Cummins. 2012)



Työkonemoottoreiden päästöjä on alettu rajoittaa päästöluokilla 1996, jolloin Yhdysvalloissa astui voimaan EPA TIER 1 päästöluokka. Euroopassa EURO STAGE I-luokitus tuli asteittain voimaan vuonna 1999. Kuvion 1. perusteella voidaan päätellä, että päästötasot ovat laskeneet selkeästi päästöluokkien myötä verrattuna ensimmäisen vaiheen EURO Stage 1 ja EPA Tier 1 nähden. Kuvion akseleilla on kuvattu päästötyyppejä, joita ovat NO<sub>x</sub> eli typenoksidipäästöt ja PM-päästöt eli pienhiukkaspäästöt. Uusimmat päästötasot Euro IV ja EPA Tier 4 ovat vähentäneet päästöjä 90% verrattuna ensimmäiseen 1996 tasoon verrattuna. (Emission Standards: Europe: Nonroad Engines. 2014.)

Jotkin maat, kuten Australia ja Kiina eivät ole kuitenkaan ottaneet käyttöön Euroopan verrattavia päästömääräyksiä. Ympäristön kannalta olisi parasta käyttää vähän saastuttavia moottoreita, mutta Euroopan ja Yhdysvaltojen ulkopuolelle myytävät koneet käyttävät paikallisten määräysten mukaisia saastuttavampia moottoreita. Ympäristöystävällisten moottoreiden käyttämistä haittaa paikallinen polttoaineen laatu. Tiukempiin päästötasoihin pääseminen vaatii moottorin päästöjä vähennyskeinojen lisäksi myös laadukasta polttoainetta, jonka puhdas palaminen vähentää päästöjen syntymistä. Laadukas polttoaine on usein myös kalliimpaa kuin heikompi laatuinen ja näin se saattaa aiheuttaa ylimääräisiä kuluja koneen käyttäjälle.

Opinnäytetyön aihe syntyi voimaan astuneiden uusien päästömääräysten johdosta, jotka velvoittavat käyttämään EURO 4(TIER 4) päästötason moottoreita Euroopassa ja Yhdysvalloissa. Määräysten voimaan tuleminen johti uuden moottorin käyttöönottoon ja sen myötä, myös jälkikäsitteilylaitteiden käyttämiseen. Pakokaasun tehokas jälkikäsitteily tarvitsee ja tuottaa huomattavasti enemmän lämpöä verrattuna matalamman päästöluokituksen TIER 3 moottoreihin, joten lämmön vaikutus turvallisuuden tulee huomioida osana uuden moottorin asennuksen suunnittelua.

## 1.2 Työn tavoitteet ja toteutus

Tälle työlle asetettu päätavoite oli varmistaa, että kohonnut pakokaasun lämpötila ei aiheuta paloriskiä pölyisissä olosuhteissa. Työssä katsotaan koneen pääasiallisen käyttöympäristön olevan tehdas-alue ja kaatopaikan asettamien riskien tutkiminen ei ole osa tätä työtä.

Päätavoite jakautui kahteen osioon, joista ensimmäinen on selvittää pakokaasun lämpötila, joka on turvallinen koneen käyttöympäristössä. Toinen tavoite oli suunnitella menetelmä, jolla päästään turvalliseen lämpötilaan. Suunniteltua laitteistoa tul-taisiin myös testaamaan käytännössä jätteenrepijässä johon on asennettu TIER 4 päästötason moottori. Suunnitelmaa tehtäessä tulee huomioida käytettävyyteen, huollettavuuteen ja kustannuksiin liittyvät seikat. Laitteiston rakenteen täytyy olla myös sellainen, joka täyttää moottorin valmistajan asennusehdot ja asennustarkas-tuksen.

## 1.3 Tana Oy

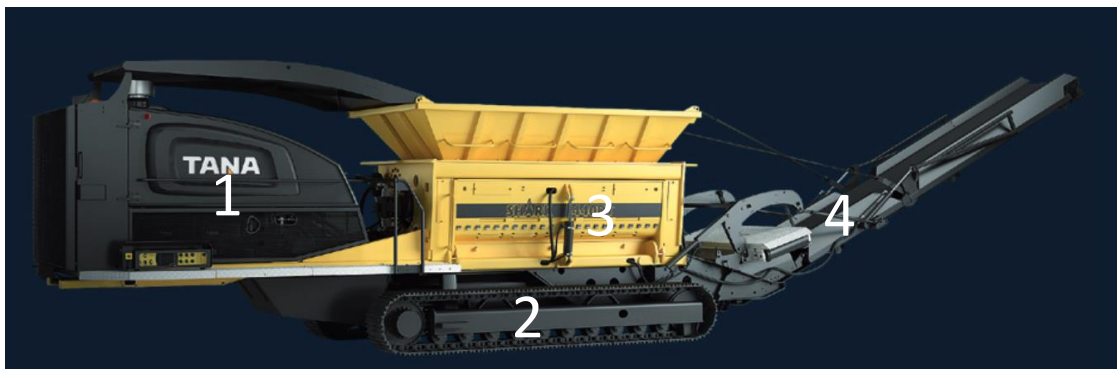
Tana Oy on kiinteän jätteen käsittelyyn tarkoitettujen koneiden ja ratkaisuiden tuot-tamiseen, kehittämiseen ja myymiseen keskittyvä yritys. Yritys työllisti vuonna 2014 25 henkilö, joista suurin osa on keskittynyt Vaajakoskelle Jyväskylään. Tanan laitteita käytetään ympäri maailmaa, siellä missä jätteitä käsitellään. Yrityksen liikevaihto vaihto vuonna 2014 oli 12,2 M€ ja sen liiketoiminta oli voitollista talouden yleisestä suvannosta huolimatta.

Yrityksen historia kaatopaikkajyrien osalta alkaa 1970-luvun alusta, jolloin ensimmäi-nen traktoriin perustuva kaatopaikkajyrä valmistui. 1990-luvun puolivälissä tehtiin päätös, että yritys suuntasi toiminnan pelkästään kaatopaikkajyriin ja luopuisi muista tuotteista. 2006 Tana vastasi markkinoiden kysyntään ja alkoi valmistaa hidaskäynti-siä jätteenrepijöitä. Tällä hetkellä valikoimista löytyy myös liikuteltavia hakkureita, joita käytetään bioenergia-alalla. Viimeisimmät innovaatiot liittyvät koneiden ja kaa-topaikan hallintaa helpottaviin tietojärjestelmiin ja ohjelmistoihin.

Tana valmistaa kaikki koneensa räätälöitynä, jolla varmistetaan, että asiakas saa juuri ne ominaisuudet joita hän tarvitsee. Yrityksen toimintamalli koneiden valmistuksessa on hyvin edistysellinen. Tanalla ei ole ollenkaan omaa valmistusta, vaan kaikki valmistus tehdään yhteistyöverkoston avulla. Verkostojen avulla pyritään kevyeen organisaation ja pystytään keskittymään ydinsaamiseen, eli jätteenkäsittelyn ratkaisuiden toimittamiseen. Tana on panostanut vahvasti tuotetukeen, jolla pyritään varmistamaan koneen moitteeton toiminta ympäri maailmaa. Käytännön esimerkkinä, koneille voidaan suorittaa etävalvontaa, jonka avulla jokaisen koneen toimintaa voidaan seurata sen sijainnista riippumatta.

#### 1.4 TanaShark

Shark on tuoteperhe joka sisältää jätteenrepijät. Tuoteperhe koostuu kahdesta kokoluokasta, joiden erona on repijäroottorin halkaisija sekä vääntömomentti. Koneita on saatavilla usealla erilaisella alustaratkaisulla, kuten kauko-ohjatulla tela-alustalla, puoliperävaunualustalla tai kiinteällä alustalla. Repijän voimansiirto on hydraulinen, jolla saavutetaan hyvä koneen hallinta ja sekä kuormitusta kestävä rakenne. Käyttövoimana käytetään useimmiten dieselmoottoria, pois lukien kiinteät koneet, joissa on sähkömoottorit.



Kuvio 2. TanaShark jätteenrepijä(Tana Oy, muokattu)

Kuviossa 2. nähdään repijän rakenne, joka koostuu pääasiassa neljästä pääkohdasta. Rakenteeseen liittyy moottorimoduuli eli powerpack (1), alusta(2), repijäyksikkö(3)

sekä kuljetin(4). Tärkeänä osana ovat myös koneen hydraulikkajärjestelmä sekä koneen ohjausjärjestelmä TCS – Tana Control System.

Repijää käytetään kuormaamalla jätettä repijän suppiloon jonka pohjalla pyörii roottori. Roottorissa olevat terät repivät materiaalia vastateriä vasten. Revitty putoaa repijäyksikön alla kulkevalle kuljettimelle, jolla se voidaan kuormata lavalle tai kasaksi.

## 2 TERMODYNAMIIKAN TEORIAA

### 2.1 Termodynaaminen systeemi

Termodynaaminen *systeemi* on tarkastelun kohteena oleva laite, kone, tai osa niistä. *Systeemi* erottuu sen ulkopuolella olevasta ympäristöstä kiinteällä tai liikkuvalla rajalla, eli *kontrollipinnalla* joka voi olla todellinen tai kuviteltu. Kontrollipintojen sisään jäävää tilavuutta kutsutaan kontrollitilavuudeksi. Systeemejä on kahden tyyppisiä, suljettuja ja avoimia. Suljetussa systeemissä kontrollipinnan läpi ei siirry ainetta, toisin kuin avoimessa. Systeemiä, jonka vuorovaikutus ympäristön välillä on estetty, kutsutaan eristetyksi systeemiksi. (Fagerholm 2008 s.15)

### 2.2 Lämpöenergian siirtyminen

Lämpöenergia voi siirtyä kolmella eri mekanismilla; johtumalla, konvektiolla tai lämpösäteilyinä. Usein siirtyminen tapahtuu kaikkien näiden kolmen tavan sekoituksena.

#### Johtuminen

Lämpö siirtyy johtumalla kiinteässä väliaineessa korkeammasta lämpötilasta matalampaan tasoittoa lämpötila-eron. Lämpötilan johtumiseen vaikuttavat väliaineen lämmönjohtavuus, kappaleen poikkipinta-ala, kappaleen pituus ja lämpötilaero. Lämmön johtumisen kaava voidaan kirjoittaa seuraavaan muotoon. (Nave, C.R. 2014a.)

$$\Phi = \lambda A \frac{\Delta T}{l}, \quad (1)$$

jossa

$\Phi$	on lämpövirta, ( $J/s = W$ )
$\lambda$	on lämmönjohtavuus, ( $\frac{W}{m \times K}$ )
$l$	on eristekerroksen paksuus, ( )
$\Delta T$	on lämpötilaero pintojen välillä, ( $K$ )
$A$	on kappaleen poikkipinta-ala, ( $m^2$ ).

### Konvektio

Konvektiossa lämpö siirtyy pinnasta liikkuvaan väliaineeseen, virraten toisaalle, jossa se luovuttaa lämpöä viileämpään pintaan. Konvektiossa tapahtuu myös lämmön johtumista, mutta väliaineen mukana siirtyvä lämpö hallitsee lämmönsiirtoa. Konvektio voi olla pakotettua tai vapaata. Pakotetussa konvektiossa väliaineen virtaus aiheutuu ulkoisesta syystä, kuten pumpusta tai puhaltimesta. Vapaassa konvektiossa väliaine alkaa virrata tiheuserojen johdosta, kuten veden kiehuessa. Konvektion matemaattinen käsittely on haastavaan, joten sen mallintamiseen käytetään usein tietokoneilla tehtävää laskennallista virtausdynamiikkaa. Konvektion avulla siirtyvän lämpöenergian määrän vaikuttavat kuitenkin mm. väliaineen tyyppi, virtauksen nopeus ja turbulenssi, sekä rajapintojen koko ja muoto. (Nave, C.R. 2014a.)

### Säteily

Lämmön siirtyminen säteilyn avulla johtuu siitä, että jokainen kappale, mikä lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella, säteilee lämpöä sähkömagneettisessa muodossa. Säteilyn kohdatessa kappaleen, se voi joko heijastua tai absorboitua aineeseen. Absorboitunut säteily lämmittää toista kappaletta ja säteilevä kappale jäähtyy. Kappaleen kykyä absorboida lämpösäteilyä kuvataan absorptiokertoimella. Se on suhde tulevan ja absorboidun säteilyn välillä, se on aina jokin arvo nollan ja yhden välillä. Kappaleen kykyä säteilyn lähettämiseen kuvataan emissiivisyyskertoimella. Kappaleen lähettämän lämpösäteilyn tehoa voidaan mallintaa seuraavalla kaavalla, (Nave, C.R. 2014a.)

$$\Phi = \varepsilon \sigma A (T^4 - T_0^4), \quad (2)$$

jossa

$\Phi$	on pinnan emittoima säteilyteho, ( $W$ )
$\varepsilon$	on pinnan emissiivisyyskertoimella, ( <i>ei yksikköä</i> )
$A$	on pinnan pinta-ala, ( $m^2$ )
$T$	on kappaleen lämpötila, ( $K$ )
$T_0$	on ympäristön lämpötila, ( ).

## 2.3 Lämpöenergia

### Nesteen ja kiinteän kappaleen lämpökapasiteetti

Lämpökapasiteetti on suure, joka kuvaa systeemiin tuodun energian ja systeemin lämpötilan suhdetta. Nesteellä ja kiinteällä aineella on ominaislämpökapasiteetti, joka on riippuvainen sen materiaalista. Tunnettaessa aineen massa, tiedetään myös sen lämpökapasiteetti. Lämpökapasiteettia voidaan mallintaa seuraavalla kaavalla: (Nave C.R. 2014b.)

$$Q = cm\Delta T, \quad (3)$$

jossa

$Q$	on vastaanotettu energia, ( )
$c$	on aineen ominaislämpökapasiteetti, ( $\frac{J}{kg \times K}$ )
$m$	on kappaleen tai nesteen massa, ( $kg$ )
$\Delta T$	on lämpötila muutos, ( $K$ ).

### Kaasun ominaislämpökapasiteetti

Kaasujen lämmittämiseen tarvittavan energian määrä on riippuvainen lämmitystavasta. Kaasuille on määrätty erikseen ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa ja vakiotilavuudessa. Vakioaineessa lämmitettävän kaasun lämpökapasiteetti on aina suurempi kuin, vakioaineessa tapahtuvassa lämmityksessä. Lämpökapasiteettien välistä suhdetta kuvataan adibaattivakiolla, jonka kaava voidaan kirjoittaa muotoon: (Valtanen 2009, 228)

$$\gamma = c_p/c_v, \quad (4)$$

jossa

$\gamma$	on adibaattivakio, ( yksikköä )
$c_p$	on kaasun lämpökapasiteetti vakiopaineessa, $(\frac{kJ}{kg \times K})$
$c_v$	on kaasun lämpökapasiteetti vakiotilavuudessa, $(\frac{kJ}{kg \times K})$ .

Kaasun lämmittämiseen tarvittavaa energia voidaan määrittää käyttämällä sopivaa vakiopaineen, tai vakiotilavuuden lämpökapasiteettien kaavaa: (Valtanen 2009, 228)

$$c_v = \frac{Q}{m\Delta T}, \quad (5)$$

$$c_p = \frac{Q}{m\Delta T}, \quad (6)$$

joissa

$Q$	on vastaanotettu energia, ( )
$c_p$	on kaasun lämpökapasiteetti vakiopaineessa, $(\frac{kJ}{kg \times K})$
$c_v$	on kaasun lämpökapasiteetti vakiotilavuudessa, $(\frac{kJ}{kg \times K})$
$m$	on kappaleen tai nesteen massa, ( kg )
$\Delta T$	on lämpötila muutos, ( K ).

## Höyrystyminen

Lähes jokaisella aineella on kolme olomuotoa, kiinteä, neste ja kaasu. Aineen olomuoto muuttuu jos ympäristön olosuhteet, kuten paine tai lämpötila muuttuvat tarpeeksi. Nesteen muuttumista kaasuksi kutsutaan höyrystymiseksi, usein saatetaan puhua myös kiehumisesta. Höyrystyminen on reaktio, joka tarvitsee energiaa tapahtuakseen, kun taas kaasun muuttumisessa nesteeksi eli tiivistymisessä sitä luovutetaan pois. Höyrystymiseen tarvittavaa energiaa voidaan mallintaa höyrystymislämmön kaavalla:(Nave, C.R. 2014c.)

$$Q = mr, \quad (7)$$

jossa

$Q$	on höyrystämiseen tarvittava lämpöenergia, ( J )
-----	--

$r$  on ominaishöyrystymislämpö,  $\left(\frac{J}{kg}\right)$   
 $m$  on nesteen massa,  $(kg)$ .

## 3 DIESELMOOTTORITEKNIIKAN TEORIAA

### 3.1 Dieselmoottori

Dieselmoottori on yksi polttomoottoreiden tyypeistä, tarkemmin määriteltynä se on puristussytytteinen moottori, joka tarkoittaa sitä että polttoaine-ilma seos syttyy korkean lämpötilan sekä paineen johdosta. Dieselmoottorin merkittävin ero ottomoottoriin on polttoaineen syttymislähde, mikä ottomoottorissa on useimmiten sytytystulppa. (Sanders. 2007. s.10)

Dieselmoottoreita voi olla kaksi- tai nelitahtisia, mutta toiminnan peruseriaate on sama. Sylinterissä oleva ilma puristetaan männällä korkeaan paineeseen, jolloin ilman lämpötila nousee 700-900 celsiusasteeseen. Männän saavuttaessa yläkuolokohdan, eli kohdan jossa männän isku on täydessä mitassa, sylinteriin suihkutetaan suuttimella korkeapaineista polttoainetta, joka syttyy paineen ja lämmön johdosta. Syttynyt seos kuumenee nopeasti aiheuttaen paineen nousun sylinterissä, mikä johtaa männän painumiseen. Mäntään kohdistunut voima muutetaan kiertokangen ja kampiaskelin avulla vääntömomentiksi ja tehoksi. (Sanders. 2007. s.13)

Dieselmoottorin tärkeimmät ohjausparametrit ovat polttoaineen suihkutusmäärä sekä suihkutusajankohta. Vanhoissa moottoreissa polttoaineen määrää annosteltiin mekaanisesti ja suoraan verrannollisesti kierroslukuun nähden. Nykyaikaisissa moottoreissa ohjaaminen on toteutettu sähköisesti käyttämällä moottorinohjausyksikköä, joka anturoinnin avulla seuraa moottorin toimintaa ja säättää polttoaineensyöttöä sen mukaan. (Sanders. 2007. s.14)



### 3.2 Dieselmoottori ilmapumppuna

Moottorin palamistapahtumassa vallitsevaa polttoaineen ja ilman suhdetta kuvataan ilmakertoimella  $\lambda$ . Ilmakertoimen ollessa yksi, imetyn ilman massa vastaa teoreettisesti polttoaineen palamiseen vaadittavaa ilmamassaa, eli seos on stoikiometrinen. Dieselmoottori toimii ilmaylimäärällä, eli ilmakertoimella yli yhden. Ilmaylimäärä on tarpeen, jotta palamisessa olisi mahdollisimman vähän rikkaan seoksen alueita, joissa  $\lambda$  - arvo on alle yhden. Rikkaan seoksen palaminen johtaa kasvaneisiin nokipäästöihin. Nokipäästöjen johdosta dieselmoottorin imuilman virtausta ei haluta rajoittaa keinotekoisesti, jolloin se on vakio suhteessa pyörimisnopeuteen. (Dietsche, Klingebiel, Papandreou, Schumacher & Boström. Dieselmoottorin ohjausjärjestelmät. 2007. s.48-49)

Moottori imee teoriassa joka kierros yhtä paljon ilmaa, mutta käytännössä se vaihtelee. Nelitahtinen moottori vaatii kaksi täyttä kierrosta jotta ilmaa on imetty täyden iskutilavuuden verran. Teoreettisen ja todellisen ilmamäärän suhdetta kutsutaan täytösasteeksi. Ahdetun dieselmoottorin täytösaste voi vaihdella 0,85 ja 3,0 välillä. Korkeat täytösasteet saavutetaan ahtamalla ilmaa moottoriin ylipaineella jolloin, ilman tiheys kasvaa ja joka tarkoittaa kasvanutta ilman massavirtaa. Ilman ahtamista täytösaste on aina alle yhden. (Dietsche ym. Dieselmoottorin ohjausjärjestelmät. 2007. s.35)

Moottorin täytösaste voidaan laskea seuraavan kaavan mukaisesti: (Heywood 1988, s.209)

$$\eta_v = \frac{2q_m}{\rho_{a,0}V_dN}, \quad (8)$$

jossa

$\eta_v$	on moottorin täytösaste (ei yksikköä)
$\rho_{a,0}$	on ilman tiheys vallitsevassa tilanteessa ( $\frac{kg}{m^3}$ )
$q_m$	on moottorin imemä massavirta ( $\frac{kg}{s}$ )

$V_d$  on moottorin kierrostilavuus ( $m^3$ )  
 $N$  on moottorin kierrosnopeus ( $\frac{1}{s}$ ).

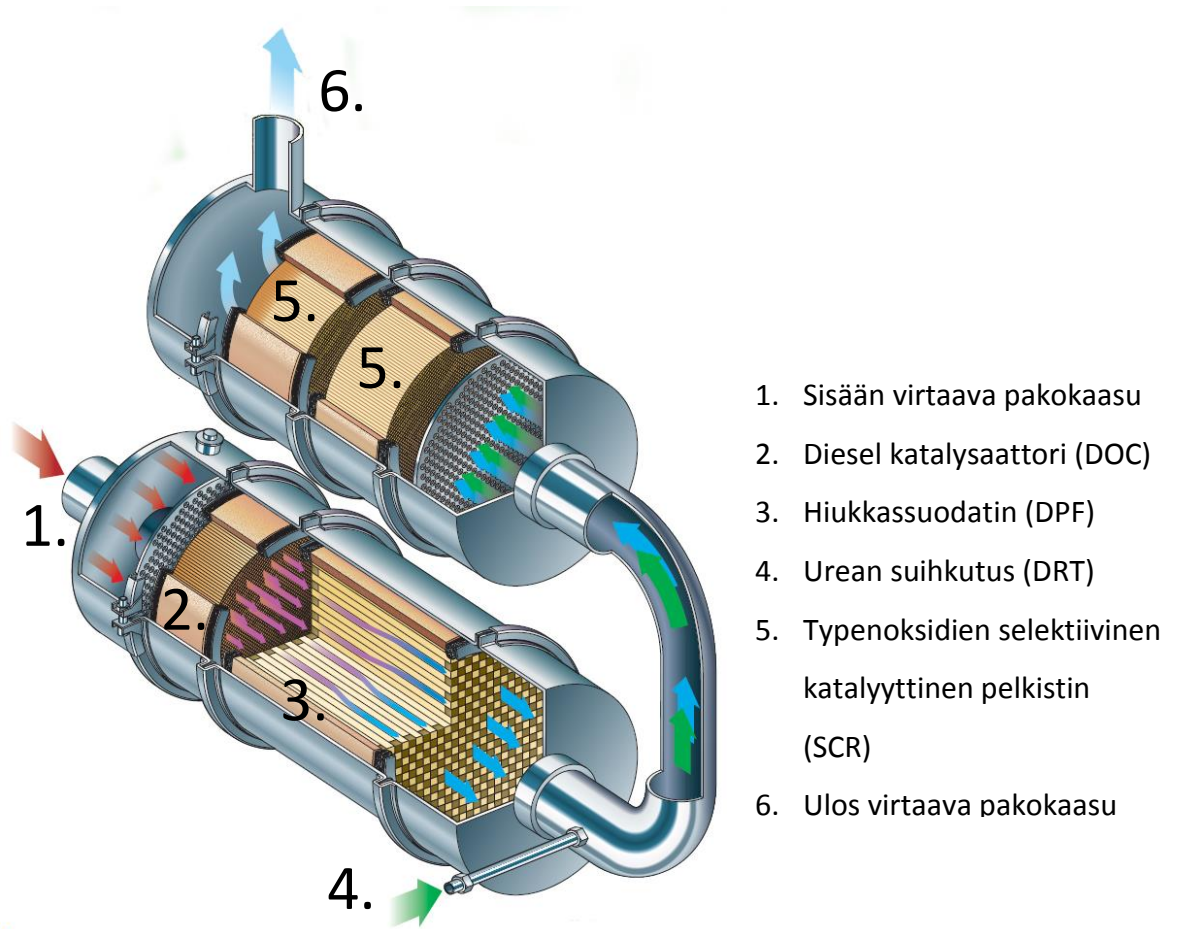
### 3.3 Moottorin päästöt

#### 3.3.1 Päästöjen syntyminen

Polttoaineen palamisessa syntyy aina päästöjä, koska polttoaine ei koskaan pala täysin optimaalisesti. Päästöjä voidaan vähentää moottorin sisäisin tai ulkoisin keinoin. Yksi merkittävä sisäisten päästöjen vähentämiskeino on ruiskutushetken säätö. Aikainen ruiskutusennakko lisää typenoksidien( $NO_x$ ) muodostumista, mutta toisaalta laskee hiilivetyjen(HC) muodostumista. Myöhäisempi ruiskutusennakko taas toisaalta vähentää HC-päästöjä mutta lisää hiilimonoksidin muodostumista(CO). Ruiskutusajankohdan valinnassa joudutaan tekemään aina kompromissi, jolloin päästöjä joudutaan pienentämään muillakin menetelmillä, kuin ruiskutusajankohdan säätämällä. Päästöihin voidaan vaikuttaa myös suutintekniikalla, jolla saadaan sylinterissä olevasta seoksesta mahdollisimman heterogeeninen. Heterogeeninen seos tarkoittaa käytännössä suurta määrää pieniä pisaroita, joiden jokaisen reunalle syntyy palamisen aikana paikallinen laiha seoksen alue. Laiha seoksen palaminen auttaa vähentämään nokipartikkeleiden syntymistä. (Dietsche ym. Dieselmoottorin ohjausjärjestelmät. 2007. s.48-51)

#### 3.3.2 Pakokaasun jälkikäsittely

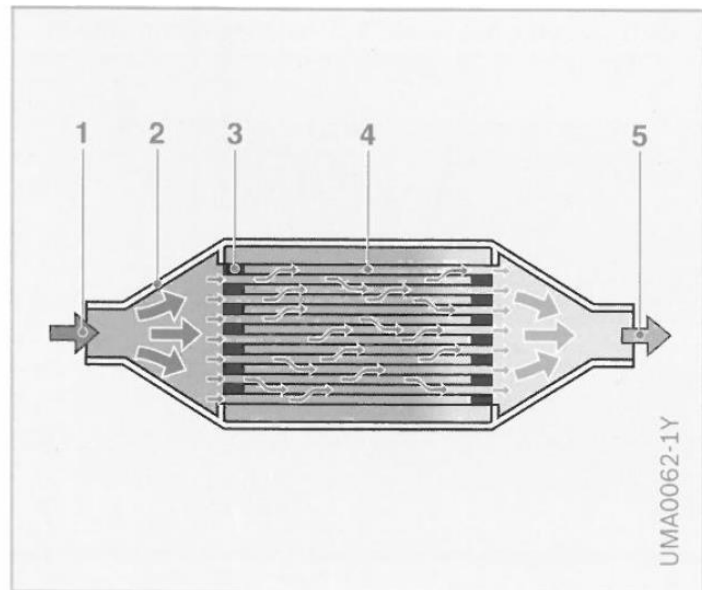
Kiristyneiden päästömääräysten johdosta moottorin sisäiset päästöjenhallintamenetelmät eivät enää riitä, jolloin moottorin päästöjä joudutaan vähentämään ulkoisilla keinoilla. Moottorin ulkopuolella päästöjä vähentäviä laitteita kutsutaan jälkikäsittelylaitteiksi. Jälkikäsittelylaitteisto koostuu komponenteista, josta jokaisella on tarkoitus vähentää tietyn tyyppisiä päästöjä. (Dietsche ym. Dieselmoottorin ohjausjärjestelmät. 2007. s.120)



Kuvio 3. Jälkikäsittelylaitteiston osat. (Catalyst Handbook for non-road vehicles. 2007, muokattu)

HC- ja CO- päästöjä vähennetään ensisijaisesti *dieselhapetuskatalysaattorilla(DOC)*. Katalysaattorissa hiilimonoksidi ja hiilivedyt hapettuvat hiilidioksidiksi sekä vesihöyryksi. Hapettuminen on eksoterminen reaktio eli se tuottaa lämpöä. Reaktiota voidaan hyödyntää myös katalyyttisenä polttimena, jolla voidaan hetkellisesti nostaa pakokaasun lämpötilaa. Katalysaattorilla hapetetaan myös typpioksidi(NO) typpidioksidiksi(NO<sub>2</sub>), jota tarvitaan laitteiston muissa osissa. (Dietsche ym. Dieselmoottorin ohjausjärjestelmät. 2007. s.130-131)

- 1 sisään virtaava pakokaasu
- 2 kotelo
- 3 keraaminen tulppa
- 4 keraaminen kenno
- 5 ulos virtaava pakokaasu



Kuvio 4. Keraaminen hiukkassuodatin (Dietsche ym. Dieselmoottorin ohjausjärjestelmät. 2007. s.126)

Kuviossa 4. esiteltävä *hiukkassuodatin* poistaa pakokaasusta noen, eli pienhiukkaset. Hiukkassuodatin perustuu keraamiseen kennorakenteeseen, joka kerää hiukkaset mutta päästää pakokaasun lävitse. Suodattimessa pakokaasu läpäisee huokoisen keraamisen seinämän suodattaen nokipartikkelit. Suodatin täyttyy ajan myötä ja se puhdistaa ajoittain polttamalle kennoihin kerääntynyt noki. (Dietsche ym. Dieselmoottorin ohjausjärjestelmät. 2007. s.126)

*SCR -laitteiston* tarkoituksena on poistaa pakokaasusta haitalliset typen oksidit. Typenoksidien selektiivinen katalyyttinen pelkistys tapahtuu lisäämällä pakokaasuun pelkistysainetta(DEF). DEF, kaupanimeltään AdBlue on käytännössä urean ja veden sekoitusta, jota hyödynnetään typenoksidien( $\text{NO}_x$ ) pelkistämisessä vedeksi ja typeksi. Laitteisto koostuu annostelumoduulista (DRT) sekä itse katalysaattorista(SCR). (Dietsche ym. Dieselmoottorin ohjausjärjestelmät. 2007. s.123-125)

### 3.3.3 Hiukkassuodattimen regenerointi

Hiukkassuodatin on tyhjennettävä säännöllisin väliajoin kertyneestä noesta. Noen poistamista kutsutaan *regeneroinniksi*, jossa noki palaa pois suodattimesta ja ylimääräinen virtausvastus poistuu. Hyötyajoneuvoissa käytetään lähinnä kahta menetelmää regeneroinnissa, joista toista kutsutaan aktiiviseksi ja toista passiiviseksi.

Hyötykäytössä olevien laitteiden voidaan katsoa toimivan useimmiten parhaimman vääntömomentin alueella, mikä tarkoittaa korkeaa pakokaasun lämpötilaa ja suhteellisen korkeita typenoksidien päästöjä. Normaaleissa oloissa hiukkassuodattimen lämpötila on nostettava yli 600 celsiusasteeseen, jotta noki palaa tehokkaasti pois. Passiivisessa regeneroinnissa noen palaminen tapahtuu jatkuvasti, jos moottorin kuormitus on riittävän suuri. Noen palamislämpötila laskee parhaimmillaan jopa 300 celsiusasteeseen, koska dieselkatalysaattorin tuottama typpidioksidi reagoi noen kanssa.

Dieselmoottorin toimiessa vaihtelevalla kuormituksella, olosuhteet eivät usein ole oikeat passiiviselle regeneroinnille, vaan se täytyy tehdä aktiivisella menetelmällä. Aktiivisen menetelmän laukaisee usein hiukkassuodattimen yli vallitsevan paine-eron kasvaminen yli ohje-arvon. Regeneroinnissa hyödynnetään dieselkatalysaattorissa olevaa katalyyttistä poltinta. Dieselkatalysaattorin ja pakokaasun lämpötilaa nostetaan lisäämällä keinotekoisesti pakokaasun hiilivetyjen(HC)- ja hiilidioksidi(CO)-pitoisuuksia. Käytännössä pakokaasun joukkoon suihkutetaan pieni määrä polttoainetta. Kohonneet pitoisuudet kiihdyttävät dieselkatalysaattorin reaktiota, jolloin pakokaasun lämpötila kohoaa tarpeeksi korkeaksi, jotta hiukkassuodatin puhdistuu. (Dietsche ym. Dieselmoottorin ohjausjärjestelmät. 2007. s.127-129)

## 4 PAKOKAASUN JÄLKIKÄSITTELY

### 4.1 Laitteiston rakenne ja asennusympäristö

Ennen uuden moottorimoduulin suunnittelun aloittamista, yrityksessä kartoitettiin mitä vaihtoehtoja olisi, jotka täyttävät Tier 4 vaatimuksen. Tanan koneissa on käytetty Cumminsin moottoreita aikaisemmin, joten oli luontevaa suosia saman valmistajan moottoreita myös uudessa TIER 4- mallissa. Moottoritoimittajan vaihtamisen katsottiin olevan suuri prosessi, koska vanhoja TIER 3 moottoreitakin tullaan vielä käyttämään koneissa jotka, myydään Euroopan ja Yhdysvaltojen ulkopuolelle. Olisi taloudellisesti kannattamatonta suunnitella vanhatkin mallit uudestaan, jotka tulevat poistumaan jollain aikavälillä. Tilanne, jossa käytettäisiin kahden eri valmistajan moottoreita, olisi myös epäedullinen, koska jokaisen moottoritoimittajan omat vaatimukset ja toimintatavat täytyisi omaksua erikseen.

Tulevaan moottorimoduuliin asennetaan Cummins:in valmistama dieselmoottori ja pakokaasun jälkikäsitteilylaitteet. Moottorin optimaalisen toiminnan takaamiseksi moottorin toimittaja vaatii moottorin asennukselle asennushyväksynnän. Hyväksynnällä varmistetaan, että moottori on asennettu valmistajan ohjeiden ja määräysten mukaisesti. Asennuksen toimivuus varmistetaan vielä erilaisin mittauksin, joissa mitataan lähinnä lämpötiloja ja tärinää. Osa tälle työlle osoitetuista vaatimuksista tulee suoraan moottorinvalmistajan vaatimuksista. Vaatimukset tulee läpäistä, jotta moottorimoduulia voidaan alkaa valmistaa sarja-tuotannossa.

Kuviossa 5. nähtävä Cumminsin jälkikäsitteilylaitteisto noudattelee vahvasti aiemmin läpi käytyä rakennetta. Laitteisto koostuu moottorista alkaen esiteltyinä polttoainesuuttimesta, dieselkatalysaattorista(1), hiukkassuodattimesta(2), DEF-annostelijasta(3) ja SCR-katalysaattorista(4).



Kuvio 5. Jälkikäsittelylaitteiston osat. (Cummins. muokattu)

Työtä tehdessä laitteiston layout oli jo päätetty, joten siihen ei voitu enää vaikuttaa suuresti, joten on tyydyttävä vain suunnittelemaan tarvittavat osat nykyiseen asennuspaikkaan. Aiempien suunnitelmien perusteella nähtiin, että moottorimoduulista tulisi ahdas ja tilan ahtaus tuottaisi haasteita huollettavuudelle ja lämpöeristykselle.

## 4.2 Laitteiston toiminta-arvot

Valmistaja määrittelee pakokaasun poistuvan jälkikäsittelylaitteistosta 650°C:asteisena aktiivisen regeneroinnin aikana. Regeneroinnin toiminta-alueeksi Cummins määrittelee 900 - 1050 r/min. Moottoriin tyhjäkäyntikierto-alueeksi on asetettu 900 r/min, joten pakokaasun virtaus lasketaan tälle kierrosnopeudelle.

Moottori tuottaa tyhjäkäynnillä vain pienen tehon, jotta haluttu pyörimisnopeus säilyy. Pieni teho saavutetaan vähäisellä polttoainemäärällä, josta johtuen ei synny paljon pakokaasuja pyörittämään ahdinta. Moottorin tyhjäkäyntikulutus on tunnettu yrityksen aikaisempien mittaus avulla. Tyhjäkäynnillä moottorin imusarjassa voidaan

sanoa vallitsevan ympäristön ilmanpaine ja lämpötila. Heywoodin (1988, 54) mukaan ahtamaton moottori pääsee 80-90% täytösasteeseen.

Moottorin imemä ilmamassa voidaan määrittää käyttämällä kaavaa (1), kun tunnetaan moottorin parametrit. Liitteessä 1.laskettiin, että tyhjäkäynnillä tarvittava ilmamäärä on noin 110 l/s. Virtauksen perusteella voitiin myös määrittää imu-ilman massavirta vakioaineessa ja lämpötilassa. Imuilman massavirraksi saatiin noin 140 g/s. Koska aineen massa ei muutu kulkiessa moottorin läpi, voidaan sanoa, että moottorin pakokaasujen massavirta on vähintään 140 g/s. Siihen tulee lisätä vielä poltetusta polttoaineesta syntyneen palokaasun ja regeneroinnissa poltetun polttoaineen massa. Moottori kuluttaa polttoainetta tyhjäkäynnillä noin 3g/s, mutta regeneroinnissa käytettävän polttoaineen määrää ei tunneta. Koska arvot ovat teoreettisia, haluttiin laskettuun ilmamäärään lisätä varmuuskerroin, jonka avulla päästäisiin tuloksissa ns. varmalle puolelle. Ilmamassaan lisätään 25%, jolloin ollaan turvallisella puolella ja vältytään alimitoitukselta. Arvojen perusteella päästään tulokseen, jossa pakokaasun massavirta on 180 g/s.

Laskelmissa oletetaan pakokaasun olevan pelkkää ilmaa laskennan helpottamiseksi. Yksinkertaistuksella on vain noin 2 % ero lopputuloksissa ja todellisen pakokaasun koostumus vaihtelee paljon riippuen moottorin kuormituksesta ja ilmakertoimesta. (Jääskeläinen 2011.)

### **4.3 Turvallinen pakokaasun lämpötila**

Jätteen repijöitä käytetään usein hyvin kuivissa ja pölyisissä ympäristöissä. Ilmassa leijuva pöly voi olla materiaalia, joka voi oikeiden olosuhteiden vallitessa syttyä palamaan, tai jopa räjähtää. Näin ollen suunnittelulähtökohtien määrittämisessä on hyödynnetty räjähdysalttiisiin tiloihin sijoitettavien laitteiden lainsäädäntöä, vaikka kokonaisuudessa konetta ei ole suunniteltu räjähdysvaarallisiin tiloihin. Koneiden käyttöpaikan voidaan katsoa tässä tapauksessa kuuluvan räjähdysvaarallisten tilojen tilaluokkaan 22. EY Direktiiviin määritelmä tilaluokasta 22:



”Tila, jossa ilman ja palavan pölyn muodostaman räjähdyskelpoisen ilmaseoksen esiintyminen normaalitoiminnassa on epätodennäköistä ja se kestää esiintyessään vain lyhyen ajan.”

Direktiivi määrää myös, että tilaluokassa 2 tai 22 on käytettävä laiteluokan 1-3 laitteita, ellei räjähdysuojasasiakirjassa todeta muuta.(99/92/EY, 1999, liite 1-2.)

Laiteluokaksi valittiin laiteluokka 3, joka on matalin laiteluokka, jota voi käyttää tilassa, joka on luokiteltu tilaluokkaan 22. SFS-EN 1127-1-standardi(2011, 40) räjähdysvaarallisten tilojen räjähdysten estosta ja suojaamisesta määrittelee, että laiteluokkaan 3 kuuluvien laitteiden mikään pinta ei saa normaalitilassa ylittää 2/3-osaa pölypilven pienimmästä syttymislämpötilasta.

Mikään lähde ei ota suoraan kantaa siihen, että vastaako kuumen pinnan sytyttämiskyky kuumaa kaasua. Koska laitetta ei ole virallisesti tarkoitettu räjähdysvaarallisiin tiloihin, tehdään arvio, että lämpötilat ovat likimain samat.

Repijöillä revittävien materiaalien kirjo on äärimmäisen laaja, joten pölyn syttymislämpötilan selvittäminen vaatisi sovelluskohtaisia mittauksia. Työssä päätettiin, että suunnittelulähtökohtana käytetään puupölyä, josta on olemassa mittausdataa.

Laaksonen(2005, 22) määrittelee puupölyn syttymislämpötilan 400°C:seen. Toisaalta Beckin, Glienken ja Möhlmannin (1997, 44-51) kokoamista lämpötiloista lasketun keskiarvon mukaan se on korkeampi, noin 500°C. Samaan arvoon on päästy myös Työterveyslaitoksen jakamassa dokumentissa, jossa viitataan SFS-Käsikirja:60:neen. Suunnittelun lähtökohdaksi valitaan siis 500°C asteen syttymislämpötila, johon sovelletaan SFS-EN 1127-1-standardin(2011, 40) vaatimusta sallitusta 2/3-osan lämpötilasta. Turvallisen pakokaasun lämpötilan voidaan katsoa siis olevan noin 330°C:astetta.

Kuumien kaasujen ohella syttymisvaaran voi aiheuttaa pakokaasun mukana kulkevat kipinät, koska niiden sytyttämiskyky on poikkeuksetta suurempi kuin kaasuilla. Ko-

neen turvallisen käyttämisen kannalta pitää huomioida myös kipinöiden pysäyttäminen. Suunnitellun ratkaisun pitää myös huolehtia että kipinät sammuvat ennenkuin poistuvat pakoputkistosta.

## **5 LÄMMÖNHALLINNAN PERIAATTEET**

### **5.1 Jälkikäsitteilylaitteiston lämpötila**

Jälkikäsitteilylaitteiston pintalämpötilat nousevat korkeiksi regeneroinnin yhteydessä, joten kuumat pinnatkin voivat aiheuttaa kohonneen syttymisriskin. Kuumat pinnat voivat olla vielä vaarallisempia, kuin kuuma kaasu, koska ne voivat luovuttaa enemmän energiaa kuin kuuma kaasu. Energianluovutuskyky on huomion arvoista, koska palaminen tarvitsee kuuman lämpötilan alkuenergiaa palamisen käynnistämiseksi, energiaa kutsutaan syttymisenergiaksi.

### **5.2 Pakokaasun jäähdytys**

#### **5.2.1 Jäähdystehon määrittely**

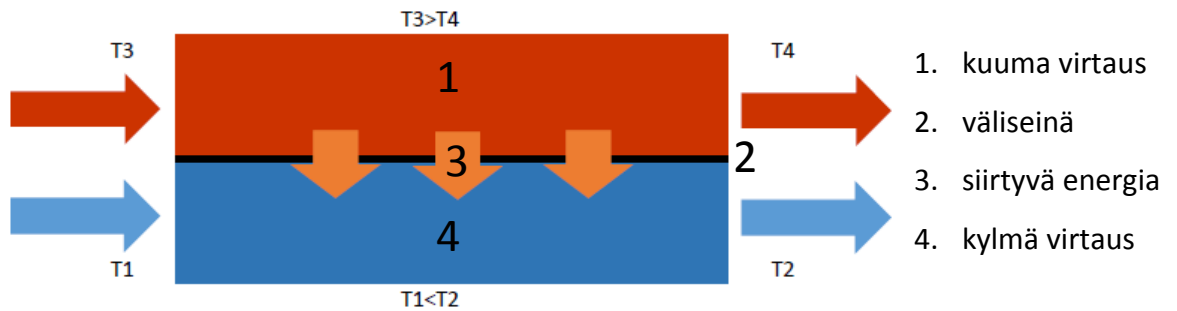
Liitteessä 1. laskettiin Mathcad-ohjelmistolla pakokaasun massavirtaus regeneroinnin aikana sekä jäähdysteho. Laskelmassa hyödynnettiin moottorin ilmamäärän (5) ja kaasun lämpökapasiteetin (3) kaavoja. Laskelmassa selvitettiin teho, jolla massavirrasta on poistettava energiaa, jotta haluttu lämpötilan muutos saavutetaan. Tehoksi saatiin noin 58 kW.

#### **5.2.2 Jäähdytysperiaatteet**

Jäähdytystä lähdettiin ideoimaan siitä, että pakokaasun energiaa täytyy siirtää johonkin toiseen aineeseen. Pohdinnan tuloksena päästiin kahteen erilaiseen jäähdytysperiaatteeseen. Ensimmäisten konseptin pohjana oli siirtää pakokaasun lämpöä toiseen

aineeseen. Siirtoaineiksi harkittiin vettä tai ilmaa. Toisena ideana oli sekoittaa viileämpää ainetta pakokaasuvirran mukaan, jolloin lämpötila erot tasoittuisivat ja pakokaasu jäähtyisi. Sekoitukseen harkittiin käytettäväksi ilmaa tai vettä.

### Lämmönvaihdin



Kuvio 6. Lämmönvaihtimen toimintaperiaate.

Lämmönvaihdin on laite, joka siirtää lämpöenergiaa kahden fluidin eli virtaavan aineen välillä. Yksinkertaisimmillaan lämmönvaihdin voi olla laite, joka sekoittaa kuumaa ja kylmää virtauksen, mutta yleensä välissä on virrat erottava seinämä. Kuviossa 6. nähtävän lämmönvaihtimen toiminta perustuu lämmön johtumiseen ja konvektioon. Kuuma virtaus luovuttaa lämpöä lämmönvaihtimen väliseinän läpi kylmään virtaan. Virtaava neste tai kaasu siirtää lämpöä konvektion avulla, eli se vastaanottaa lämpöä ja luovuttaa sen toisessa paikassa. Johtuminen tapahtuu väliseinässä, joka toimii lämmön välittäjänä virtausten välillä. Väliseinä on usein metallia, koska metallit ovat hyviä lämmönjohteita. Prosessi toimii vain yksisuuntaisesti siirtäen lämpöä kuumasta kylmään. (Theodore 2011. 257)

### Sekoitin

Sekoittimessa yhdistetään kaksi virtausta johtamalla ne samaan tilaan. Kuumaa pakokaasun ja viileän ilman sekoittimessa yhdistyisi kaksi samassa olomuodossa olevaa virtausta, jolloin sekoittimen toiminta perustuisi lämpötilaerojen sekoittumiseen. Sekoittimen toimintaan vaikuttavat lähinnä massavirrat ja lämpötilat, koska aineiden voidaan katsoa olevan ilmaa. (kts. kohta 4.3)

Pakokaasun ja veden sekoittamisessa hyödynnetään lämpötilaerojen tasoittumista ja olomuodon muutosta. Sekoittimen toiminta perustuu siihen, että pakokaasun lämpöä siirtyy johtumalla veteen lämmittäen sen lähelle kiehumispistettä. Veden saavuttaessa kiehumispisteen, pakokaasusta johtuva lämpö saa aikaan veden höyrystymisen.

### **5.2.3 Lämmönvaihdin – konsepti**

Konseptissa pakokaasun lämpöenergiaa siirrettäisiin kiertävään veteen tai ilmaan. Lämmönvaihtimen tehon tulisi olla ainakin määritelty 58 kW. Ensin tarkasteltiin ilmasta-ilmaan lämmönvaihdinta. Tässä tapauksessa energia siirretään ilmavirtaan, joka voitaisiin ottaa ulkoilmasta ja puhaltaa takaisin sinne. Toinen idea oli käyttää ilma-vesi lämmönvaihdinta. Tässä tilanteessa energiaa siirretään vesikiertoon, ja jolloin tarvittaisiin vielä toinen jäähdytin, jolla jäähdytetään kiertävää vettä. Vesikierto olisi hyvä ratkaisu jos siihen kerättyä energiaa voitaisiin käyttää hyödyksi. Tässä tapauksessa se vain siirtää lämmön toiseen paikkaan jossa joudutaan käyttämään ylimääräistä tilaa ja energiaa sen poistamiseen.

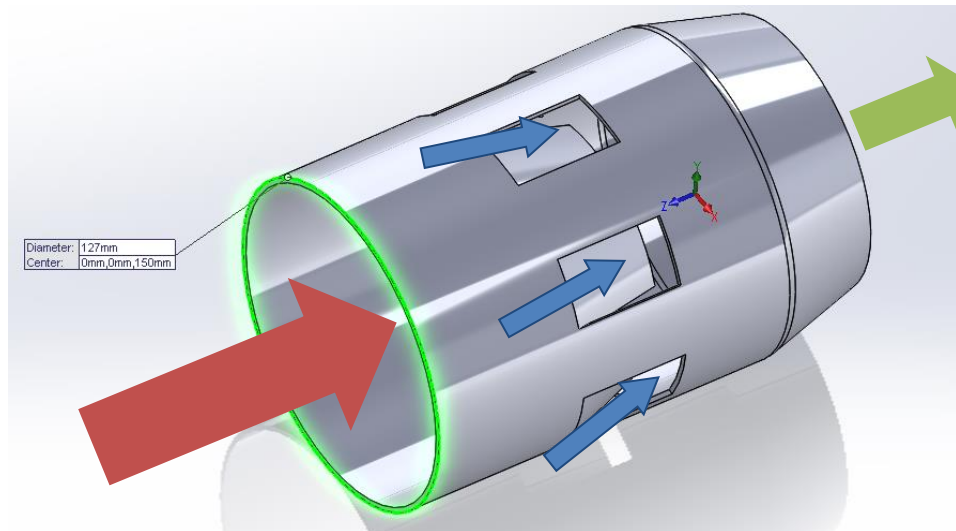
### **5.2.4 Sekoitus – konseptit**

Toinen vaihtoehto oli sekoittaa kaksi virtausta, kuuma ja kylmä. Tässäkin konseptissa ajateltiin hyödyntää vettä tai ilmaa.

#### **Ilmansekoitin**

Ilman sekoittaminen pakokaasuun tapahtuisi pakoputken muotoilulla, jossa pakokaasun virtaus synnyttäisi alipaineen ja imisi mukaan ympäröivää ilmaa. Lopputuloksena olisi jäähtynyt pakokaasuvirtaus. Ilmaa voitaisiin myös puhaltaa pakoputkeen hyödyntämällä konetilassa vallitsevaa jäähdytyspuhaltimen aiheuttamaa ylipainetta. Konseptia tarkasteltiin laskemalla kuinka paljon pakokaasuun tulisi sekoittaa ympäröivää ilmaa, jonka ajateltiin olevan 50 °C asteen lämpöistä. Liitteen 3. laskelmassa kaksi massavirtaa sekoittuu toisiinsa, jolloin lopputuloksena on 330°C lämpöinen virtaus. Sekoittumisen ajateltiin tapahtuvan vakiopaineessa. Laskennan perusteella nähtiin, että jäähdytysilman massavirran on oltava hieman enemmän kuin pakokaasuun,

mutta koska jäähdytysilma on paljon tiheämpää kuin kuuma pakokaasu, tilavuusvirta ei ole kuin 40 % pakokaasun virtauksesta. Virtaus on silti melko paljon, joten sen saavuttaminen pelkällä pakoputken muotoilulla voisi olla haasteellista. Toisaalta ympäröivän ilman sekoittamisessa on riski, että ilman mukana tulee helposti syttyvää materiaalia, jolloin syttymisvaara on olemassa.



Kuvio 7. Ilmansekoittimen hahmotelma

Kuviossa 7. nähdään sekoittimen toimintaperiaate, siinä punaisella nuolella osoitettu kuuma pakokaasu virtaa pakoputken osuuteen, jossa siihen sekoittuu ympäröivää ilmaa. Sinisillä nuolilla kuvatun ympäröivän ilman on ajateltu imeytyvän pakoputkeen virtauksen luoman alipaineen ja moottorin jäähdytyspuhaltimen luoman ylipaineen avulla. Lopputuloksena syntyy vihreän nuolen osoittama virtaus, jossa on pakokaasua ja ympäristön ilmaa sekoittuneena tavoitelämpötilaa.

### Vedensekoitin

Veden sekoitus pakokaasuvirtaan vaikutti mielenkiintoiselle. Nesteen suihkuttamista puoltaa veden suuri höyrystyslämpö, eli vaadittava energia massaan nähden, jolla vesi muuttaa olomuotonsa kaasuksi eli höyrystyy. Pääajatuksena oli pumpata pakoputkeen vettä suuttimen läpi silloin kuin regenerointi on käynnissä. Veden tarve laskeettiin veden höyrystyslämmön ja veden lämmittämiseen tarvittavan energian

avulla. Laskelmassa laskettiin kuinka paljon vettä tulee lämmittää ja höyrystää sekunnissa, jotta saavutettu jäädytysteho saavutetaan. Liitteen 2. askelmissa päädyttiin tulokseen jossa vettä tulee höyrystää noin 20 g/s, mikä tarkoittaa noin 1,4 l/min virtausta.

### 5.2.5 Konseptien vertailu ja valinta

Jäähdytystavan valintaa ohjasivat seikat kuten, hinta, monimutkaisuus ja huoltotarve. Vertailu tehtiin mukaillemalla Jokisen(1998 s.79) esittelemää painoarvotaulukkoa käyttäen. Liitteen 6. vertailutaulukossa on määritelty ominaisuudet ja niille painoarvo. Jokaiselle ratkaisulle annetaan pisteet ominaisuutta kohden ja niistä muodostetaan painotettu pistemäärä. Lopuksi määriteltiin parhaimmaksi se ratkaisu jonka yhteenlasketut pisteet olivat suurimmat.

Vertailutaulukon perusteella kaksi parasta konseptia ovat ilman- ja vedensekoitin. Lämmönvaihtimeen perustuvat konseptit vaikuttivat pisteiden valossa selkeästi huomommille kuin sekoitukseen perustuvat. Pisteiden valossa parhaalta vaihtoehdolta vaikutti konsepti, jossa pakokaasuvirtaan sekoitetaan ilmaa.

Taulukon osoittama paras konsepti jouduttiin kuitenkin hylkäämään, koska siinä muodostuu riski palavan materiaalin joutumisesta pakoputkeen. Moottoritilaan imettävä jäähdytysilma on samaa ilmaa, kuin se mihin pakokaasu puhalletaan. Toinen ilmeinen haaste on myös saada sekoittimen muotoilu sellaiseksi, että se tuottaa tarpeellisen alipaineen ilman imemiseksi. Jäähdytyksen periaatteeksi valittiin konsepti, jossa pakokaasuun sekoitetaan vettä, joka höyrystyessään jäähdyttää pakokaasuun.

## 6 JÄÄHDYTYSLAITTEISTO

### 6.1 Vedensuihutusjärjestelmän suunnittelu

Laitteistosta tehtiin vaatimuslista, jolla määritellään, millaiset vaatimukset laitteiston tulee täyttää. Liitteen 7. vaatimuslistaan on kasattu keskeiset ehdot ja vaatimukset

jotka tulee täyttää, jotta lopputulos on halutun kaltainen. Suunnittelu aloitettiin komponenttien valinnalla, koska niiden toimitusajat voivat olla pitkiä. Valmistettavat osat suunnitellaan sen jälkeen, koska osien valmistamiseen ei arvioitu menevän montaa viikkoa.

Laitteiston pääkomponenteiksi hahmoteltiin sähkökäyttöinen vesipumppu, suutin, sekä paineensäätölaitteisto. Veden lähteeksi valittiin säiliö, jolloin laite ei ole riippuvainen vesijohtoverkosta. Komponenttien valinta aloitettiin pumpun ja suuttimen selvittämisellä.

Valintoja määräävä tekijä oli saavuttaa mahdollisimman hieno vesisuihku. Vesisuihkun pisarakoko vaikuttaa siihen, että kuinka nopeasti vesi haihtuu. Hienommat pisarat haihtuvat nopeammin ja jäähdysteho on suurempi kuin suurilla vesipisaroilla. Yleisenä säätonä voidaan pitää sitä, että suuremmalla paineella pisarakoko pienenee. (Butz, J. R. Carey, R.2011. s.2.)

Pakokaasunjäähdytysjärjestelmän suunnittelu toteutetaan Vertex G4 3d-cad ohjelmistolla. Laitteistosta tehdään myös samalla tuoterakenne yrityksen PDM-järjestelmään. Järjestelmään talletetaan myös kaikki laitteistoon liittyvä tieto kuten komponenttien datalehdet.

## **6.2 Vesipumppu**

Komponenttien valinta aloitettiin etsimällä sopivaa vesipumppua käyttötarkoitukseen. Pumpun käyttövoimaksi valittiin sähkö, mahdollisia vaihtoehtoja olivat myös mekaaninen yhteys dieselmoottoriin tai käyttö hydraulikalla. Sähkön käyttöä puolsivat sähköpumpun edullinen hinta, helppo ohjattavuus, ja asennuksen vapaus. Muut vaihtoehdot olisivat sisältäneet paljon oheiskomponentteja sekä ylimääräistä sovitustyötä. Sähköpumpulle riittää pelkkä ohjausrele koneenohjauskeskuksessa, mikä löytyi jo ennalta.

Pumpun tärkeimmiksi ominaisuuksiksi määriteltiin 24 VDC käyttöjännite, sekä vähin-

tään 1,4 l/min tuotto. Suutinten valintaa tehdessä tiedettiin että, paineen korottaminen pienentää pisarakokoa. Pumpun tulisi siis kehittää myös mahdollisimman suuri paine. Toiveena oli myös sään ja värinän kesto, koska pumpun todennäköinen asennuspaikka tulisi olemaan koneen rungossa, missä se on alttiina ympäristön vaikutuksille. Pumppuja kartoittaessa törmättiin ongelmaan että, haluttuja pumppuja ei ole helposti saatavilla ja ainoastaan yksi toimittaja kykeni toimittamaan vaatimukset täyttävää pumppua.

Pumpuksi valikoitui Flojetin triplex-sarjan pumppu, joka kykenee tuottamaan halulla virtauksella 10 bar paineen. Pumpun ominaisuudet sallivat myös virtauksen kasvattamisen noin 2,6 l/min ilman että paineesta joudutaan tinkimään. Pumppu on tyypiltään kalvopumppu, se muistuttaa hieman mäntäpumppua, mutta siinä mäntä on korvattu liikkuvalla kalvolla. Pumpun jalustassa on myös kumiset holkit jolla pumppuun kohdistuva värinä vähenee.

Pumpun yhteyteen valittiin toimittajan suosituksesta paineenrajoitusventtiili, joka kytkettäisiin pumpun painepuolelle siten, että sen läpi päästettäisiin ylimääräinen virtaus pumpun imupuolelle. Venttiin avulla painetasoa voidaan säätää, siten myös suuttimen virtaus on säätävä.

### **6.3 Vesisuutin**

Lähtöoletus suuttimen valinnassa oli, että käytettäisiin vain yhtä suutinta. Useaa suutinta käyttämällä saataisiin aikaan vielä parempi veden ja pakokaasun sekoittuminen mutta, arvioitiin että se ei ole tarpeen. Suuttimet ovat myös kalliita suhteessa kokonaiskustannuksiin, joka myös puolsi vain yhden suuttimen käyttöä. Vesisuuttimen valintaa määräsi pääasiassa haluttu virtaus. Toissijaisena vaatimuksena oli mahdollisimman pieni pisarakoko, matala painevaatimus suhteessa pisarakokoon ja helppo asennettavuus.

Suutintarjontaa kartoitettaessa huomattiin, että suutinten toiminta perustuu nesteen virtauksen synnyttämään hydrauliseen paineeseen tai vaihtoehtoisesti paineilemaan. Paineilmalla toimivat suuttimet eivät tarvitse hydraulista painetta, vaan neste



hajotetaan pisaroiksi paineilman avulla. Hydrauliset suuttimet hajottavat nesteen pisaroiksi suutinkartion muotoilun ja nesteen hydraulisen paineen avulla.

Vaativuutuksena täyttävä suutin löytyi Spraying Systemsin LND-suutinsarjasta. LND-sarjan suutin hajottaa veden pisaroiksi veden hydraulisen paineen avulla ja sen pystyy kiinnittämään kierteen ansiosta pakoputkiston ulkopuolelta, joka osaltaan helpottaa mahdollisia huoltotöitä. Suuttimen kooksi valittiin 14, joka tarkoittaa että se tuottaa 1,4 l/min virtauksen 7 bar paineella. Sumun viuhkakulmaksi valmistaja määrittää 6 bar paineella 88°. Suuttimen virtaustaulukoista laskemalla saatiin 5-10 bar säätöalueelle 1,18 – 1,65 l/min virtaus. Paineita voidaan laskea vieläkin matalammaksi, mutta silloin suuttimen pisarakoko nousee melko suureksi.

Suutinta oli saatavissa useana eri materiaalivaihtoehtoa kuten messinki, sekä haponkestävä- ja ruostumatonteräs. Materiaaliksi valittiin ruostumattomasta teräksestä valmistettu suutin, koska pakokaasu voi aiheuttaa korroosiota.

## 6.4 Vedenlähde ja vesilinjasto

Suunnitteluarvojen perusteella laitteiston kokonaisvedentarpeeksi yhdelle regeneroinnille saatiin noin 56l. Vedenlähteeksi löydettiin kaksi vaihtoehtoa, vesisäiliö tai liityntä vesijohtoverkkoon. Vesisäiliö olisi hyvä vaihtoehto koska se olisi aina mukana eikä se vaadi erillisiä liitostöitä koneen siirron yhteydessä. Säiliön huonona puolelta pidettiin lähinnä sitä, että se vie lisää tilaa koneesta ja sitä että se vaikuttaa osaltaan laitteiden luotettavuuteen olemalla mahdollinen vikaantuva kohde. Vesijohtoliitännän hyvänä puolelta pidettiin sen yksinkertaisuutta, mutta ongelmana oli, että se pitää aina liittää vesipisteeseen. Vesipisteen saatavuus ei ole varmaa jokaisessa repijän käyttökohteessa.

Vedenlähteeksi valittiin kuitenkin vesisäiliö, jonka avulla laitteiston käyttäminen onnistuu sijainnista huolimatta. Oman säiliön suunnittelua harkittiin, mutta teräksinen säiliö aiheuttaisi haasteen sen pintakäsittelystä ja metallin lujuudesta ei ole hyötyä tässä tarkoituksessa. Säiliöksi päätettiin etsiä valmis vesisäiliö. Valmiita vesisäiliöitä

haettaessa löydettiin sopivia säiliöitä Cipaxilta. Säiliöksi valittiin malli, jonka koko 60l ja se on valmistettu valkoisesta PE-muovista. Valkoinen muovi on läpikuultavaa jolloin pinnan seuranta on helppoa.

Vesilinjasto toteutettiin 8mm ja 12mm paksuisilla letkuilla, koska sellaisia oli helposti saatavilla, sekä ne ovat hinnaltaan edullista. Letkut ovat reilusti ylimitoitettut virtauksiin nähden.

## 6.5 Ohjaus

Jäähdytyslaitteiston ohjaukseen tarvitaan vähintään vain yksi ON-OFF sähkönsyöttö vesipumppua varten. Pumpun ohjausta voidaan yksinkertaisimmillaan ohjata sen mukaan, milloin regenerointi on käynnissä. Tilatieto saadaan moottorinohjausmoduulilta työkoneen ohjausmoduulille, mikä taas ohjaa pumpun relettä. Ohjaus on hyvin yksinkertainen ja se pystytään toteuttamaan pienillä muutoksilla koneen ohjausjärjestelmän ohjelmistoon. Suurin ohjauksen heikkous on siinä, että oletetaan suoraan, että jos pumpulle syötetään virtaa, niin pakokaasu jäähtyy.

Ohjaukseen voitaisiin lisätä myös tulosiinaaleja, kuten pakokaasunlämpötieto ja säiliön pinnankorkeusanturi. Lämpöanturi voitaisiin sijoittaa lähelle pakoputken loppupäätä, jolloin anturin tieto kertoisi heti, että toimiiko laitteisto oikein. Laitteiston toiminnan häiriintyessä käyttäjälle voidaan tehdä hälytys ja tarpeen vaatiessa katkaista regenerointi vaaran välttämiseksi. Pinnankorkeusanturin avulla voitaisiin myös olla varmoja että säiliössä on vettä. Pinnankorkeusanturin signaalin avulla voitaisiin laskea myös vesimäärä, ja laskea sen perusteella kuinka pitkäksi aikaa se riittää.

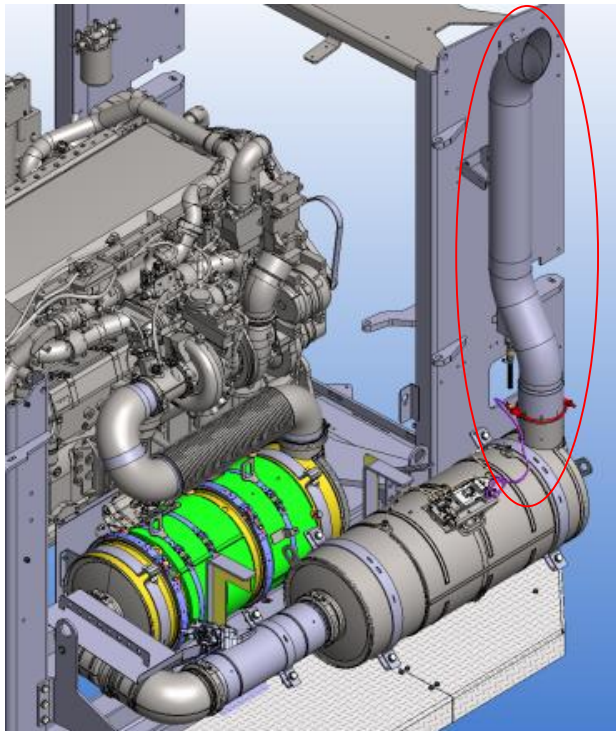
Ohjaus voitaisiin toteuttaa vielä tarkemmin takaisinkytkennän avulla. Takaisinkytkennän avulla ohjaus vaihtuisi säädöksi jolloin se reagoi tilanmuutoksiin, pyrkien säilyttämään asetetun lämpötilan. Sääto perustuisi lämpötilan mittaukseen ja pumpun tehon säätöön. Pumpun tehoa nostetaan tai lasketaan, mikäli pakokaasun lämpötila on liian korkea tai matala. Säädön suurin etu on siinä, että pakokaasu jäähtyy aina haluttuun lämpötilaan ja laitteisto toimii aina tarpeellisella teholla. Epäsuoria hyötyjä ovat

pumpun matalampi kuormitus, koska silloin paineen rajoitus tapahtuisi virtausta vähentämällä. Virtauksen säätämällä olisi myös positiivinen vaikutus vedenkulutukseen, koska silloin vettä ei suihkuteta turhaan. Ohjauksen haasteeksi voidaan mainita säädön toteuttamiseen tarvittavan elektroniikan ja koodin hinta suhteessa saavutettuun hyötyyn.

## 6.6 Laitteiston rakenne ja asennus

### Asennuspaikka

Moottorin valmistajan määräysten johdosta ainoa sallittu paikka suuttimelle on pakoputkiston viimeinen osuus. Kuviossa 8. nähtävä punaisella ympäröity viimeinen osuus on taivuteltu putki, joka ohjaa pakokaasut turvalliseen kohtaan, josta ne puhalletaan ympäröivään ilmaan. Pakoputkiston materiaali on tavanomaista rakenneterästä, joten pakoputkeen tehtävät muutoksetkin tehtiin samasta materiaalista. Suuttimen materiaali on hyvä olla korroosiota kestävä, jotta sumun muodostava muotoilu ei muuttuisi materiaalin syöpymisen johdosta.

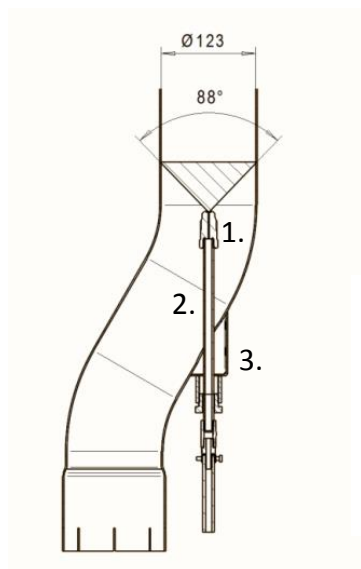


Kuvio 8. Pakoputkiston rakenne.

### Suuttimen asemointi

Suutin haluttiin asemoida mahdollisimman keskelle pakoputkea, jotta vesisumu jakautuisi mahdollisimman tasaisesti pakokaasuvirtaukseen. Suutin tulisi myös olla helposti irrotettavissa ja poistettavissa tarpeen vaatiessa. Asennus tulisi olla myös mahdollista toteuttaa mahdollisimman pienillä muutoksilla olemassa oleviin komponentteihin.

Kuviossa 9. nähtävää asennusta varten pakoputken mutkaan tehtiin reikä, josta suutin voitaisiin asettaa pakoputken sisälle. Reiän ympärille suunniteltiin kotelo, jolla saatiin tasainen pinta pakoputken nähden. Suuttimmelle suunniteltiin suutinputki, joka vie suuttimen keskelle pakoputkea.



1. Suutin
2. Suutinputki
3. Suutinputken kiinnitysosa

Kuvio 9. Suuttimen asennus.

## 6.7 Kustannukset

Laitteiston suurin kustannus oli veden pumppaamiseen tarvittu vesipumppu. Komponentteja valittaessa pyrittiin käyttämään mahdollisimman paljon yrityksen tuotteista löytyviä osia, jotta uusi nimikkeitä ei syntyisi. Liitteessä 5. nähtävän laskelman

perusteella komponenttien kustannukseksi tuli noin 415€ pois lukien uudenmallinen pakoputki. Kustannusten määrää suhteessa saavutettavaan hyötyyn on hankala arvioida, koska kyseessä oli vasta prototyyppi, jolla testataan toimintaa.

## **7 LAITTEISTON MITTAUS**

### **7.1 Mittausten kulku**

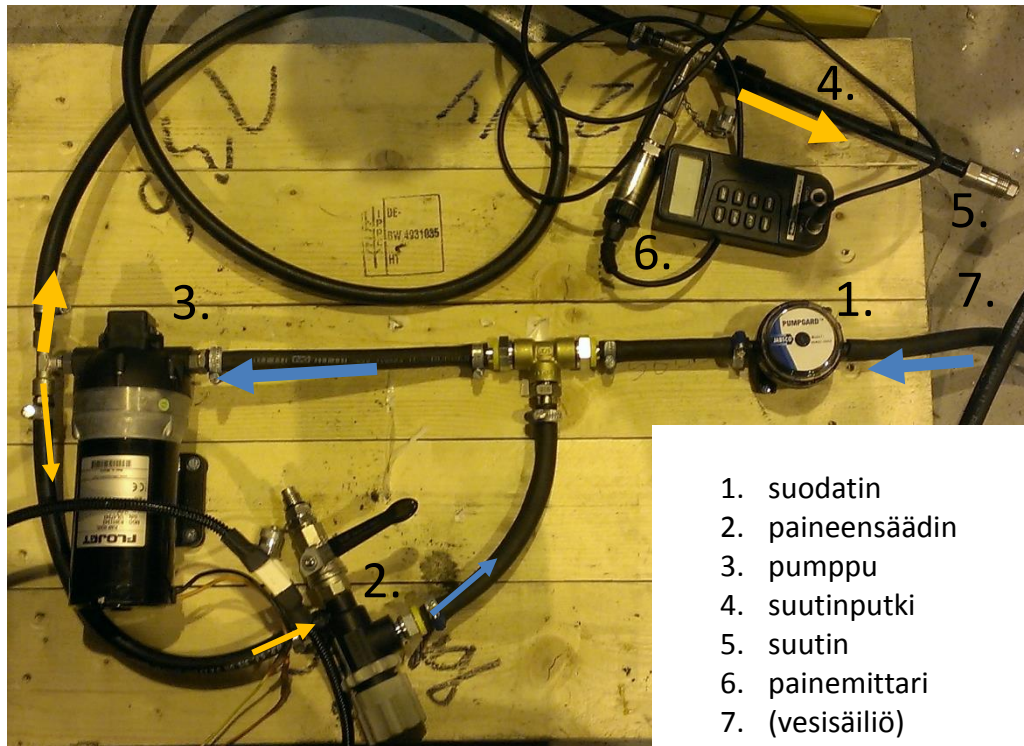
Mittausten tarkoitus oli todistaa konseptin toimivuus käytännössä ja toisena se antaa viitteitä siitä kuinka hyvin se soveltuu käyttöön jätteenrepijässä.

Laitteistoa päädyttiin mittaamaan kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa valmistellaan ja kasataan laitteisto, jotta varmistutaan, että laitteisto toimii halutulla tavalla. Tässä vaiheessa laitteisto kasattiin ensimmäistä kertaa fyysisesti ja kokeiltiin veden suihkutusta irrallaan. Työvaiheella varmistettiin että tuleva toinen mittausvaihe sujuu ongelmitta ja viiveettä. Toinen vaihe sisältäisi varsinaiset jäähdytystehon mitaukset. Siinä moottori saatetaan regenerointi-tilaan ja pakokaasua jäähdytetään vedellä. Pakokaasun lämpötilat mitataan ennen vesisuutinta ja sen jälkeen.

### **7.2 Suihkutusjärjestelmän testaus**

Ensimmäiseksi pumppauslaitteisto kasattiin levyalustalle, jossa sitä olisi helppo liikutella ja kaikki osat olisivat järjestyksessä. Suutinputki kasattiin ja sen sopivuus pakoputkistoon kokeiltiin. Kasatessa huomattiin, että pakoputkeen suunniteltu reikä ei ollut tarpeeksi iso, joten sitä jouduttiin avartamaan. Paine-testit aloitettiin tiiveyskokeella, jossa linjaston paine nostettaisiin suurimpaan mahdolliseen ja laitteisto tarkastettiin vuotojen varalta. Vuodot saatiin tiivistettyä liitoksia kiristämällä.

Kun tiiveydestä varmistuttiin, aloitettiin tuoton mittaus. Mittauksessa vettä suihkuttettiin usealla eri paine-tasolla yhden minuutin ajan astiaan, jonka jälkeen vesimäärä mitattiin punnitsemalla astia. Mittaukset suoritetaan mittaus-suunnitelman mukaisesti viidellä eri painetasolla.

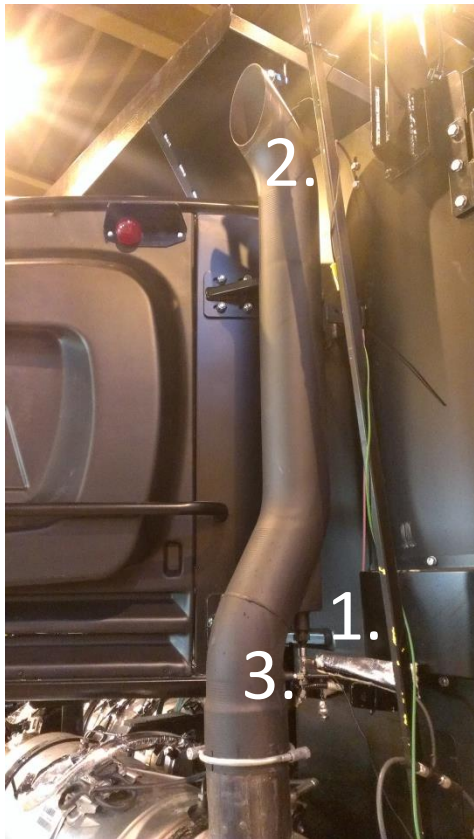


Kuvio 10. Jäähdytyslaitteisto kasattuna alustalla.

Kuviossa 10. jäähdytyslaitteisto on kasattuna ja siihen on liitetty digitaalinen painemittari. Sinisten nuolien osoittama veden virtaus lähtee säiliöstä ja kulkee suodattimen kautta pumpulle. Pumpun painepuolella ovat painesäädin, joka päästää ylimääräistä vettä takaisin pumpun imupuolelle säilyttäen halutun linjaston paineen. Paine-linjan toinen haara johtaa suutinputkelle, jonka päässä on vesisuutin. Suutinputkessa on myös mittausyhte paineen tarkkailua varten.

### 7.3 Jäähdytystehon mittaus

Jäähdytystehon mittaaminen suoritettiin TanaShark 440DTeco jätteenrepijällä, eli koneella, jossa on tier 4 päästötason moottori. Aika jolloin mittauksia oli mahdollista tehdä, oli hyvin rajallinen. Viimehetkellä saatiin tieto että vesisuuttimen läheisyydessä jälkikäsitteilylaitteessa oli anturi, joka on erittäin herkkä vedelle. Mittaus toteutettiin noin 0 °C lämpötilassa pienessä lumisateessa ulkoilmassa. Mittauksessa anturit olivat sijoitettu pakoputkeen ennen ja jälkeen vesisuuttimen. Ennen mittausten alkua koneen annettiin käydä tyhjäkäyntiä, jolloin lämmöt ehtivät tasautua. Koneelle annettiin regenerointi-lupa, jolloin kone aloitti regeneroinnin. Regeneroinnissa pakokaasun lämpötilan annettiin kohota kunnes se tasoittuisi. Lämpötilat alkoivat tasoittumaan noin 20 minuutin kuluttua regeneroinnin aloittamisesta noin 400 celsiusasteeseen. Siinä lämpötilassa kokeiltiin veden sumutusta pakokaasun sekaan. Veden paine oli asetettu painesäädön keskiasentoon eli 4,5 baariin, mikä tarkoittaa noin 0,9 l/min virtausta. Vesi alkoi virrata ja pakokaasun mukana tuli selkeästi vesihöyryä, mutta melko pian vesihöyry muuttui pelkäksi vedeksi, joka sylkeytyi pakokaasun mukana. Poistuvan pakokaasun lämpöanturin lämpötila putosi noin 150 celsiusasteeseen. Veden suihkuttamista ei uskallettu jatkaa kovin pitkään, sillä vesi alkoi virrata pitkin pakoputken ulkopintaa alas. Veden huomattiin valuvan myös suuttimen alapuolisen pakoputken liitoksen välistä ulos. Veden sumutusta kokeiltiin kolme kertaa ja joka kerralla tulos oli hyvin samankaltainen. Testejä ei haluttu kuitenkaan tehdä enempää, jottei anturi rikkoutuisi.



1. suutin
2. lämpöanturi 1.
3. lämpöanturi 2.

Kuvio 11. Pakoputki mittauskunnossa

Kuviossa 11. repijään on asennettu testauspakoputki, jossa on paikat lämpö-antureille ja suuttimelle.

## 7.4 Mittauksen tulokset

Laitteiston toiminta osoittautui kohtalaiseksi. Pakokaasun lämpötila tippui alle sille määritellyn lämpötilan ainakin tämän työn aikana tehtyjen mittausten valossa. Pakokaasun lämpötila ei kuitenkaan noussut niin korkealle kun oli alussa oletettu, joka osaltaan helpotti vaatimukseen pääsemistä.

Veden valuminen pitkin pakoputkea kertoo siitä, että kaikki suihkutettu vesi ei höyrysty. Havainnon perusteella on syytä olettaa, että jäähdytysvaikutuskin on paljon pienempi, kuin silloin kun kaikki vesi höyrystyisi. Osa vedestä höyrystyi koska silmämääräisesti huomattiin että pakokaasun mukana purkautui vesihöyryä. Mittausten aikana havaittiin, että vettä tarttui lämpöanturin pintaan. Veden kertymisen anturiin



uskottiin vaikuttavan mittaustuloksen koska lämpötila laski aluksi hitaasti, mutta joidenkin sekunnin kulutta sen romahti nopeasti ja pysyvästi. Veden valuminen pitkin pakoputkea ei myöskään anna kovin hyvää vaikutelmaa koneesta.

## 8 POHDINTA

### 8.1 Johtopäätökset

Työn päätavoitteena oli selvittää pakokaasun turvallinen poistumislämpötila ja suunnitella laitteiston prototyyppi, mikä kykenee saavuttamaan vaaditun lämpötilan. Laitteiston tuli olla kustannuksiltaan kohtuullinen ja rakenteeltaan yksinkertainen. Laitteiston suunnitelman tuli olla dokumentoitu 3d-mallein ja PDM-tuoterakentein.

Pakokaasun turvallinen lämpötila selvitettiin käyttäen hyväksi Euroopan laajuisia standardeja joiden oikeellisuutta on turha epäillä. Normeja hyödynnettiin onnistuneesti työssä, vaikka kyse ei ollut suoraan niiden vaikutusalueesta.

Suunnitelma toteutettiin mallintamalla se Vertex G4 ohjelmistolla ja tallentamalla se PDM-järjestelmään. 3d-malli ja tuoterakenne olivat tärkeä työkalu suunnittelussa. Laitteistosta valmistettiin prototyyppi mallien perustella ja sitä testattiin, mutta laitteisto vain täytti osittain sille asetetut vaatimukset.

Työn loppua kohden kuitenkin ilmeni, että suunnitelmat eivät aivan kohdanneet käytäntöä. Alkupuolella työtä lasketut arvot vaikuttivat olevan relevantteja, mutta käytännön kokeissa huomattiin asian olevan toisin. Mittauksissa esiintyneet epävarmuudet ja ennalta odottamaton toiminta, tulivat yllätyksenä. Testauksessa havaittiin, että teoreettiset ilmiöt eivät toimineet täysin käytännössä.

Ongelmaksi epäiltiin sitä että pakokaasun lämpöenergiaa ei siirtynyt tarpeeksi nopeasti veteen ja siten vain osa vedestä höyrystyi. Lämmön ajateltiin siirtyvän johtamalla, joten lämmönsiirtymiseen vaikuttaa rajapinnan koko. Pakoputken seinämään

tarttuneet ja vesimassaksi muuttuneet pisarat, menettivät suuren pinta-alansa, jolloin lämmönsiirron kaasusta nesteeseen uskottiin heikentyneen.

Kyseessä oli kuitenkin prototyyppi, jolla kokeillaan idean toimivuutta käytännössä ja sen perusteella tehdään tarvittavia muutoksia mahdollista jatkokehitystä varten. Huomattiin, että laitteen kehittäminen ei ollut niin suoraviivaista kun alkuvaiheessa oletettiin. Jälkikäteen ajateltuna olisi ollut viisasta testata ideaa jo aikaisemmin, jotta jäähdytysjärjestelmän kehittämisen suuntaa olisi voitu korjata. Laitteiston saattaminen paremmin toimivaksi olisi vaatinut lisää kokeiluja ja muutoksia laitteistoon, mutta sitä ei enää keritty tehdä tämän työn puitteissa.

Työn tuloksien perusteella voidaan sanoa, että veden suihkuttaminen pakokaasun sekaan ei ole kaikkein ongelmattomin jäähdytystapa. Pakokaasun jäähdytyksen tarpeellisuutta kannattaisi vielä tarkastella kriittisesti ja selvittää tarkemmin, että millainen ympäristö vaatii erillistä jäähdytystä. Esille nousi myös ajatus siitä, että regenrointi estetään käyttäjän toimesta ja kone siirretään turvalliseen tilaan regenroinnin ajaksi.

Mikäli pakokaasunjäähdytys katsotaan edelleen tarpeelliseksi, työn perusteella tulaa johtopäätökseen, että voisi olla järkevää tutkia muita vaihtoehtoja, jossa pakokaasun sekoitettaisiin ympäröivää ilmaa. Vaihtoehdon toteutus helpottuu, koska pakokaasun lämpötila on huomattavasti matalampi kuin tämän työn lähtötiedoissa se on määritelty.

Lopullinen johtopäätös on, että laitteistosta saisi todennäköisesti toimivan, mutta olisi epävarmaa kuinka paljon lisää työtä se vaatisi. Kokonaisuutena takaiskuista huolimatta työ oli opettavainen. Työtä tehdessä on joutunut aivan uudelle alueelle ammatillisesti kuin myös henkilökohtaisessa työskentelyssä.

Työn tekemisen aikataulu asetti haasteita, työn alussa vaikutti, että oli kiire saada valmistuskuvat nopeasti valmiiksi ja osat valmistukseen. Osat saatiin tilaukseen ja valmistukseen alkuperäisen suunnitelman mukaan, jolloin ne olisivat olleet valmiina ajallaan, mutta muista syistä testaaminen siirtyi. Työn venyminen pitkälle aikavälillä aiheutti välillä haasteita.

Tämän opinnäytetyön perimmäinen alullepannut voima, kansainvälinen päästölainsäädäntö tuottaa haasteita ja työkuormaa yrityksille, mutta on samalla myös eteenpäin vievä voima. Yritysmaailmassa haetaan usein parasta tuottoa pääomalle ja sijoituksille, silloin ympäristön suojeleminen voidaan nähdä pelkkänä rasitteena liiketoiminnalle. Suuntaus ympäristöystävällisempään teknologiaan on positiivista kehitystä, mutta se ei synny itsestään ja vaatii työtä lain säätäjiltä ja tahoilta keihin laki vaikuttaa.

## 8.2 Jatkokehittely

Laitteiston mahdollisessa jatkokehittelyssä kannattaa kohdistaa huomio seuraaviin kohtiin:

- pakokaasuvirtaus koko putken alueelle
- pakokaasun virtaus-ajan pidentäminen
- suutintekniikka
- vedenlähde

Pakoputkessa olevat mutkat muuttavat virtauskenttää siten, että mutkan ulko- ja sisäreunassa ei virtaa tasaisesti pakokaasua. Virtauserot huomattiin käytännössä, kun koetettiin pakokaasun lämpöä putken päässä; sisäkurvissa pakokaasua ei virtaa juuri lainkaan. Havainnon johdosta voisi tulla kysymykseen kokeilla pakokaasuvirtaan asennettavaa hunajakennorakennetta, joka jakaisi virtausta tasaisemmin.

Toinen merkittävä kehityskohde olisi saada vedelle lisää aikaa höyrystyä eli aikaa ottaa vastaan energiaa pakokaasusta. Aikaa voisi ajatella pidennettävän joko hidastamalla pakokaasun virtausnopeutta kasvattamalla pakoputken halkaisijaa tai pituutta.

Huomion voisi kiinnittää myös suutintekniikan parantamiseen. Työn suunnitelmassa käytettiin suutinta, jolla on melko laaja sumutuskulma. Suutinkulmaa voisi kokeilla pienentää, jotta vähemmän vettä sumuttuisi suoraan pakoputken sisäseinämään. Testauksessa huomattiin, että vesi virtasi pakoputken seinämällä ja näin purkautui nestemäisenä putken päästä. Vedellä vaikutti siis olleen taipumus tarttua kalvoksi

pakoputken seinämiin. Suutinkulman pienentäminen voisi auttaa ongelmaan, että vesi virtaisi vaan kulkeutuisi pisaroina pakokaasuvirran mukana.

Huomionarvoista olisi myös selvittää, että olisiko mahdollista käyttää suoraan vesijohtovettä, sillä repijää käytetään usein tehdas-alueilla ja halleissa, jossa on vesipiste. Vesijohtoveden käytöllä pumppu saattaisi jäädä tarpeettomaksi. Pakkanen aiheuttaa myös lisähaasteita ja se vuoksi tulee ottaa huomioon laitteiston jäätyksen estäminen, tai että se ainakin sulaisi kun kone on käynnissä.

## LÄHTEET

1999/92/EY. 1992. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi vähimmäisvaatimuksista räjähdyskelpoisten ilmaseosten aiheuttamalle vaaralle mahdollisesti alttiiksi joutuvien työntekijöiden turvallisuuden ja terveyden suojelun parantamiseksi. Viitattu 28.3.2014. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:31999L0092&from=en>

Beck, H. Glienke, N. Möhlmann, C. Combustion and explosion characteristics of dusts (BIA-Report 13/97). 1997. HVBG (Federation of Statuary Accident Insurance Institutions of the Industrial Sector). Viitattu 28.3.2014. <http://www.dguv.de/ifa/Publikationen/Reports-Download/BIA-Reports-1997-bis-1998/BIA-Report-13-97/index-2.jsp>

Butz, J. R. Carey, R. 2011. Application of fine water mists to fire suppression. National Institute of Standards and Technology (NIST). Viitattu 13.12.2014. [http://www.nist.gov/el/fire\\_research/upload/R0301020.pdf](http://www.nist.gov/el/fire_research/upload/R0301020.pdf)

Catalyst Handbook for non-road vehicles. 2007. N. d. Artikkele Johnson Mattheyn verkkosivuilla. Viitattu 12.3.2015. <http://ect.jmcatalysts.com/pdfs-library/Catalyst-Handbook-the-right-chemistry-for-tier-4.pdf>

Dietsche, Karl-Heinz., Klingebiel., Maria., Papandreou, Stavros., Schumacher, Herbert., Boström, Björn,. Dieselmoottorin ohjausjärjestelmät. 2007. Robert Bosch. 2. p. Suomeksi 2010.

Emission Standards: Europe: Nonroad Engines. 2014. N.d. Viitattu 10.11.2014. <http://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>

Esimerkkejä eräiden pölyjen palo- ja räjähdysominaisuuksista. N. d. Työterveyslaitoksen ATEX-tiedonlähteitä. Viitattu 28.3.2014. [http://www.ttl.fi/fi/kemikaaliturvallisuus/atex/atex\\_tietoa/Documents/polyt.pdf](http://www.ttl.fi/fi/kemikaaliturvallisuus/atex/atex_tietoa/Documents/polyt.pdf)

Fagerholm, N. 1986. Termodynamiikka. Tampere:Tammer-Paino.

Heywood, J. B. 1988. Internal combustion engine fundamentals. McGraw-Hill College.

Jokinen, T. 1998. Tuotekehitys. Helsinki:Valopaino Oy

Jääskeläinen, H. 2011. Diesel Exhaust Gas. DieselNet Technology Guide. Viitattu 29.9.2014. [https://www.dieselnet.com/tech/diesel\\_exh.php](https://www.dieselnet.com/tech/diesel_exh.php)

Laaksonen, E. 2005. Puupölyjen aiheuttama palo - ja räjähdysvaara ja sen torjuminen mekaanisessa puunjalostusteollisuudessa. Riskienhallinta If-vakuutusyhtiö Oy. Viitattu 28.3.2014. [http://www.ttl.fi/fi/kemikaaliturvallisuus/atex/atex\\_tietoa/Documents/puupoly.pdf](http://www.ttl.fi/fi/kemikaaliturvallisuus/atex/atex_tietoa/Documents/puupoly.pdf)

- Lienhard, J. H. IV. Lienhard, J. H. V. 2012. A heat transfer textbook. Massachusetts: Phlogiston Press. Viitattu 4.6.2014 <http://web.mit.edu/lienhard/www/ahttv202.pdf>
- Majewski, W. A. 2009. Filters Regenerated by Fuel Combustion. Dieselnet Technology Guide. Viitattu 21.3.2014. [https://www.dieselnet.com/tech/dpf\\_sys\\_fuel.php](https://www.dieselnet.com/tech/dpf_sys_fuel.php)
- Nave, C.R. 2014a. Hyperphysics - Heat transfer. Viitattu 11.12.2014. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/heatra.html>
- Nave, C.R. 2014b. Hyperphysics -Specific heat. Viitattu 11.12.2014. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/spht.html>
- Nave, C.R. 2014c. Hyperphysics -Heat of vaporisation. Viitattu 11.12.2014. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/phase2.html>
- Off-Highway Emissions Regulations. N.d. Päästötasojen ohjelehti. Viitattu 12.3.2015 [http://cumminsemissionsolutions.com/CES/CESContent//SiteContent/en/Binary\\_Aset/PDF/CES\\_Pocketcard\\_Off\\_Highway\\_FINAL.pdf](http://cumminsemissionsolutions.com/CES/CESContent//SiteContent/en/Binary_Aset/PDF/CES_Pocketcard_Off_Highway_FINAL.pdf)
- Theodore, L. 2011. Heat Transfer Applications for the Practicing Engineer. New Jersey: John Wiley & Sons
- Valtanen, E. 2009. Tekniikan taulukkokirja. 15. p. Mikkeli: Genesis-kirjat.

## LIITTEET

### Liite 1. Pakokaasun massavirran ja jäähdystehon laskenta

1. lasketaan moottorin inemä ilmamäärä tyhjäkäynnillä

Moottorin kierrosluvuus

Moottori tahtiluvun määräävä kerroin

$$v_{\text{eng}} := 14.9 \cdot l \quad n_1 := 900 \cdot \frac{1}{\text{min}}$$

$$VE := 1 \quad CF := 2$$

tyhjäkäynti

VE oletetaan olevan 1 koska tyhjäkäynnillä ahdin ei ahda

$$\text{Ilmämäärä: } q_v := \frac{v_{\text{eng}} \cdot n_1 \cdot VE}{CF} = 0.112 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (\text{Kaava 8.})$$

$$q_v = 0.112 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\rho_{\text{ilma}} := 1.29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$m_{\text{ilma}} := \rho_{\text{ilma}} q_v = 0.144 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

(Valtanen 2009, 302)

Käytännössä vielä enemmän, joten halutaan laskea varman päälle lisäämällä 25% ->

$$Q_{m, \text{eg}} := m_{\text{ilma}} \cdot 1.25 = 0.18 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Laitteistosta poistuvan pakokaasun lämmön on sanottu olevan 650 °C, haluttu lämpötila on 330 °C

$$\Delta T_2 := 650 \text{ °C} - 330 \text{ °C} = 320 \text{ K}$$

$$c_v := 717 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$c_p := 1005 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

(Valtanen 2009, 332)

Jäähdytykseen tarvittava teho

$$P_{\text{jäähd}} := \Delta T_2 \cdot c_p \cdot Q_{m, \text{eg}} = 5.795 \times 10^4 \frac{\text{J}}{\text{s}} \quad (\text{Kaava 6.})$$

$$P_{\text{jäähd}} = 57.951 \cdot \text{kW}$$

## Liite 2. Vesisuihkutusmäärän laskenta

veden lämmitys

$$T_{\text{vesi},0} := 40 \text{ } ^\circ\text{C} = 313.15 \text{ K}$$

$$\Delta T_{\text{vesi}} := 60 \text{ K}$$

$$c_{\text{vesi}} := 4182 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \quad (\text{Valtanen 2009, 331})$$

Lämmitys energia:  $E_1 := \Delta T_{\text{vesi}} \cdot c_{\text{vesi}} = 2.509 \times 10^5 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}}$  (Kaava 3.)

veden höyrystyslämpö  $r_{\text{vesi}} := 2257 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}}$  (Valtanen 2009, 337)

Lämmitettävän ja höyrystettävän veden määrä

$$q_m := \frac{P_{\text{jäähd}}}{r_{\text{vesi}} + E_1} = 0.023 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$q_{v,\text{vesi}} := \frac{q_m}{1000 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 1.386 \cdot \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

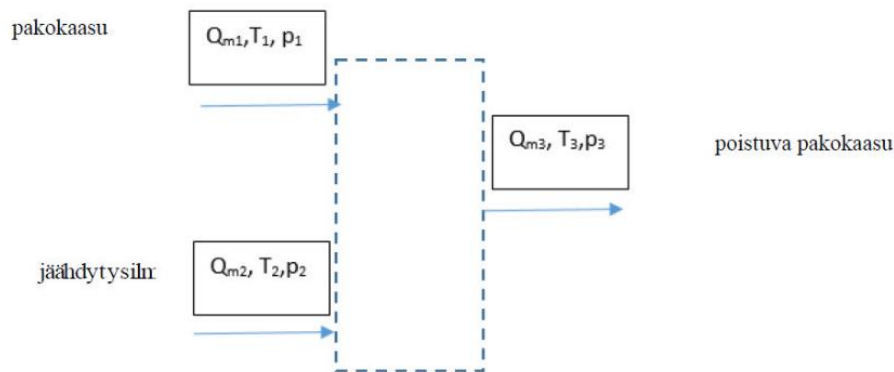


### Liite 3. Ilmansekoittimen laskenta

Lasketaan paljonko pakokaasuun pitää sekoittaa ilmaa, jotta pakokaasu jäähtyy tarpeeksi.

$$Q_{m1}c_p \cdot (T_1) + (Q_{m2})c_p \cdot (T_2) = (Q_{m1} + Q_{m2}) \cdot c_p \cdot T_3 \text{ solve, } Q_{m2} \rightarrow -\frac{Q_{m1} \cdot T_1 - Q_{m1} \cdot T_3}{T_2 - T_3}$$

$$\begin{aligned} T_0 &:= 273.15\text{K} & p_0 &:= 101.325\text{kPa} & Q_{m1} &:= 0.18 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 0.18 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \\ \rho_0 &:= 1.293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} & c_p &:= 1005 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} & & \end{aligned} \quad (\text{Valtanen 2009. 315})$$



pakokaasu	ympäröivä ilma	viileä pakokaasu
$T_1 := 650^\circ\text{C} = 923.15\text{K}$	$T_2 := 50^\circ\text{C} = 323.15\text{K}$	$T_3 := 330^\circ\text{C} = 603.15\text{K}$
$p_1 := p_0 = 1.013 \times 10^5\text{Pa}$	$p_2 := p_0$	$p_3 := p_0$

Oletetaan kaasu ilmaksi ja lasketaan eri lämpöisten kaasujen tiheys

$$\begin{aligned} \rho_1 &:= \rho_0 \cdot \frac{p_1 \cdot T_0}{p_0 \cdot T_1} = 0.383 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} & \rho_2 &:= \rho_0 \cdot \frac{p_2 \cdot T_0}{p_0 \cdot T_2} = 1.093 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} & & (\text{Valtanen 2009. 315}) \\ \rho_3 &:= \rho_0 \cdot \frac{p_3 \cdot T_0}{p_0 \cdot T_3} = 0.586 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

Lasketaan sekoitusilmamäärä jolloin poistuvan pakokaasun lämpötila on  $330^\circ\text{C}$

$$Q_{m2} := -\frac{Q_{m1} \cdot T_1 - Q_{m1} \cdot T_3}{T_2 - T_3} = 0.206 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Tilavuusvirta ympäristön lämpötilassa

$$Q_{v2} := \frac{Q_{m2}}{\rho_2} = 188.221 \cdot \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

Tilavuusvirran suhde

$$Q_{v1} := \frac{Q_{m1}}{\rho_1} = 0.47 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Massavirtojen suhde

$$\frac{Q_{m2}}{Q_{m1}} = 1.143$$

$$\frac{Q_{v2}}{Q_{v1}} = 0.376$$



927022 Pakokaasun jäähdytyslaitteiston prototyyppin komponentit

Liite 5. Komponenttien kustannuslaskelma

Tanan nimi	Nimike	Tyyppi	koodi	määrä	Toimittaja	(Tarjoushinta á Yhteensä
202178	Pumppu	24VDC, 10Bar	R3811343A	1	Sgn tekniikka	122,72 122,72
202176	Suutin	1,4 l/min@7 bar	B1/4LND-ss14	1	Sgn tekniikka	55 55
202180	Paineensäädin	G1/2" - R1/2", max 10 bar	B23120-1/2-PP	1	Sgn tekniikka	30 30
202202	Painemittari	G1/4, 0-30 bar	58801050-AR	1	Sgn tekniikka	12,5 12,5
202207	Vesisuodatin	1/2" - 1/2", 40mesh, letkuasenteinen	46400-0002	1	Sgn tekniikka	14,76 14,76
202198	Vesäiliö	HDPE, 60l, valkoinen	20061	1	Cipax	92 92
202203	Sisäkierreyhde	1/2", asennettuna säiliöön	e60062	1	Cipax	13 13
202211	Letkuliitin	messinki, 13mm - G1/2"	T1213M	4	Ares	4 16
202212	Letkuliitin	messinki, 9mm - G1/2"	T129M	1	Ares	4,11 4,11
202214	Letkuliitin	messinki, 8mm - G1/4"	T148M	1	Ares	2,83 2,83
202215	T-yhde	messinki, 1/2"	E080115	2	Onninen	3,7 7,4
202216	Perusliitin	NPTF 3/8" - BSP 1/2"	8FMK4S	2	Parker	7 14
202204	Vesiletku	8mm, 10bar (Air-Water 10)	AW008	2m	Ares	3,11 €/m 6,22
202206	Vesiletku	12mm, 10bar (Air-Water 10)	AW012	5m	Ares	3,38 €/m 16,9
48B013	Letkukiristin	ABA 13-20mm	48B013	6		1 6

**Yhteensä 413,44**

## Liite 6. Konseptien vertailu

Arvostelukriteeri	Lämmönvaihdin						Sekoitin			
	Ilma-neste			Ilma-ilma			Ilma-neste		Ilma-ilma	
	Paino-arvo	Pisteet	Painotetut pisteet	Pisteet	Painotetut pisteet	Pisteet	Painotetut pisteet	Pisteet	Painotetut pisteet	
Hinta	0,3	2	0,6	2	0,6	5	1,5	5	1,5	
Koko	0,1	2	0,6	1	0,3	2	0,6	4	1,2	
Paino	0,1	2	0,6	2	0,6	3	0,9	5	1,5	
Yksinkertaisuus	0,2	2	0,6	2	0,6	4	1,2	3	0,9	
Säädettävyyys	0,05	3	0,9	3	0,9	4	1,2	2	0,6	
Elinikä	0,1	3	0,9	4	1,2	4	1,2	5	1,5	
Huoltotarve	0,05	2	0,6	3	0,9	4	1,2	5	1,5	
Virtauksen läpäisy	0,1	2	0,6	2	0,6	5	1,5	4	1,2	
<b>Yhteensä</b>	<b>1</b>	<b>18</b>	<b>5,4</b>	<b>19</b>	<b>5,7</b>	<b>31</b>	<b>9,3</b>	<b>33</b>	<b>9,9</b>	

## Liite 7. Jäähdytyslaitteiston vaatimuslista

JÄÄHDYTYSLAITTEISTON VAATIMUSLISTA		
KV=Kiinteä vaatimus, VV=vähimmäsisivaatimus, T=Toive		
Vaatumuksen		
tyyppi	Vaatimus	
Mitat		
KV	Laitteiston tulee mahtua repijän kyytiin	
T	Laitteet muuttavat muita rakenteita mahdollisimman vähän	
Suoritusarvot		
VV	Pakokaasun poistumislämpötila	330°C
VV	Toiminta-aika	40min
VV	Kestoikä	20v
Rakenteen vaatimukset		
VV	Rakenteen pitää kestää jälkikäsitteilyn vikaantumislämpötila	900°C
T	Yksinkertainen rakenne	
KV	Jälkiasennettavissa	
KV	Käyttöjännitte	24VDC
Käyttö-olot		
KV	-30 °C - 50 °C	
KV	Tärinän ja pölyn kestävyys	
Kustannukset		
KV	Hinta ja tehokkuus tasapainossa	