

ILMANSUODATTIMEN AUTOMAATTINEN PUHDISTUS

Olli Saviluoto
Opinnäytetyö AMK
Syksy 2025
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Koneautomaatio

Tekijä: Olli Saviluoto
Opinnäytetyön otsikko: Ilmansuodattimen automaattinen puhdistus
Työn ohjaaja: Timo Väyrynen
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2025
Sivumäärä: 34 + 4 liitettä

Tämä opinnäytetyö tehtiin Valtra Oy Ab:n Suolahden tehtaalle. Opinnäytetyön taustalla oli tarve parantaa traktorin moottorin ilmansuodattimen tukkeutumisesta johtuvia haittoja sekä vähentää manuaalisen puhdistuksen määrää ja käytettyä huoltoaikaa. Tavoitteena oli tutkia ilmansuodattimen automaattisia puhdistusvaihtoehtoja sekä testata valittua menetelmää.

Työssä tarkasteltiin tutkimuksia ilmasuodattimien puhdistukseen ja tehokkuuteen liittyen, jonka perusteella valittiin testausmenetelmäksi matalataajuusvärinä. Kyseisestä menetelmästä ei löytynyt tutkimuksia ajoneuvokäytöstä patruunamallisilla suodattimilla.

Valittua menetelmää testattiin Oulun ammattikorkeakoulun autolaboratorion tiloissa. Valtran toimittamaa suodatinkotelokokonaisuutta testattiin irrallisena traktorista. Moottorin tuottamaa virtausta simuloitiin pakokaasuimureilla. Värinän tehokkuutta mitattiin suodattimen massan perusteella, ja imureiden ollessa käynnissä värinällä oli negatiivinen vaikutus, kun taas imureiden ollessa sammutettuna suodattimen massa keventyi keskimäärin 2,7 %.

Tuloksien perusteella rakennettu testauslaitteisto ja menetelmä eivät osoittautuneet tehokkaaksi puhdistusmenetelmäksi ajoneuvokäytössä. Matalataajuusvärinän käyttöä ajoneuvosovelluksessa patruunamallisilla suodattimilla pitää testata pitkäkestoisissa tutkimuksissa, jotta voitaisiin saada selville värinän vaikutukset rakenteiden ja suodattimien kestoikään. Värinän tuottajan sijainnista sekä arvoista pitäisi tehdä useita tutkimuksia optimaalisten parametrien löytämiseksi. Tutkimuksissa testaukseen vaikuttavat muuttujat pitäisi pystyä vakioida standardien mukaisesti.

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Program in Mechanical Engineering
Option of Machine Automation Engineering

Author: Olli Saviluoto

Title of thesis: Automatic cleaning methods for tractor air intake filters

Supervisor(s): Timo Väyrynen

Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2025

Number of pages: e.g. 34 + 4 appendices

This thesis was done for Valtra Oy Ab's Suolahti factory. The thesis was motivated by the need to improve the inconvenience caused by the clogging of the tractor engine air filter and to reduce the amount of manual cleaning and the maintenance time used. The aim was to investigate automatic air filter cleaning options and to test the selected method.

The thesis investigated studies related to the cleaning and efficiency of air filters, based on which low-frequency vibration was chosen as the testing method. No studies were found on vehicle-mounted use of cartridge-type filters for this method.

The selected method was tested in the Oulu University of Applied Sciences' automotive laboratory. The filter housing assembly supplied by Valtra was tested separately from the tractor. The flow produced by the engine was simulated with exhaust gas extractors. The effectiveness of vibration was measured based on the filter mass, and when the vacuum cleaners were running, vibration had a negative effect, while when the vacuum cleaners were off, the filter mass was reduced by an average of 2.7 %.

Based on the results, the test equipment and method built did not prove to be an effective cleaning method for mobile use. The use of low-frequency vibration in a mobile application with cartridge-type filters should be tested in long-term studies to determine the effects of vibration on the durability of structures and filters. Several studies must be conducted on the location and values of the vibration generator to find optimal parameters. In addition, the variables affecting the testing should be standardized according to standards.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
SISÄLLYS	4
1 JOHDANTO	5
2 VALTRA OY AB:N ESITTELY	6
3 ILMANSUODATTIMEN MERKITYS	7
3.1 Tutkimuskohteena oleva suodatin	7
4 PUHDISTUSMENETELMÄT	9
4.1 Suodatinmedia	9
4.2 Sykloni.....	10
4.3 Sähköstaattinen erotin.....	11
4.4 Värähtely	12
4.5 Puhallusmenetelmä.....	13
4.6 Akustinen aggloromaatio	14
4.7 Märkäpesurit.....	14
4.8 Pölynpoistiventtiili sekä scavenger	15
4.9 Kaupalliset ratkaisut	15
5 MUOTOILUN JA ILMAVIRTAUKSEN VAIKUTUKSET	18
6 STANDARDIT JA TESTIPÖLY	19
7 TESTAUSMENETELMÄN VALINTA	20
8 SUUNNITTELU	21
9 TESTAUS	24
9.1 Testauslaitteisto	24
9.2 Testausmenetelmä	25
10 TULOKSET	27
11 POHDINTA	29
LÄHTEET	30
LIITTEET	34

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö sai alkunsa, kun Valtra esitteli Konetekniikan pitching-tilaisuudessa Oulun ammattikorkeakoululla erilaisia kehityskohteita traktoreihin liittyen. Traktorin moottorin ilmansuodattimen tukkeutuminen aiheutti haasteita, sillä suodattimen puhdistus vaatii työtehtävän keskeytyksen ja manuaalisen puhdistuksen. Pölyisissä olosuhteissa puhdistuksen voi joutua tekemään useita kertoja päivässä, ja pitkällä aikavälillä tästä aiheutuu kustannuksia seisahduksien muodossa. Esityksen aikana nähtiin kilpailijan käyttämä puhdistustapa, ja Valtra oli kiinnostunut saamaan tietoa muista automaattisen puhdistuksen menetelmistä.

Suuri osa maatalous- ja raskaan kaluston koneista käyttää polttomoottoreita, joissa ilmansuodatin on keskeinen komponentti. Ilmansuodattimen tukkiutuessa moottorin polttoaineen kulutus kasvaa ja tehot heikkenevät, minkä takia suodattimen puhtaana pitäminen on olennaista toiminnan kannalta. Ilmansuodatin varmistaa myös moottorin puhtaana pysymisen ja tätä kautta ennaltaehkäisee moottorin liikkuvien osien ennenaikaista kulumista. Pölyn ja maa-aineksen päästessä moottorin palotilaan, ne kiillottavat ja naarmuttavat sylinteripintoja, mikä aiheuttaa suojaavan öljykerroksen heikkenemistä ja kiihdyttää kulumista. Kulumisen takia ohivirtauksen määrä kasvaa, jolloin polttoaineseos ja pakokaasut vuotavat männänrenkaiden välistä kampikammioon ja aiheuttavat kammion paineen nousua sekä tehon laskua.

Opinnäytetyössä käydään läpi erilaisia puhdistusmenetelmiä ja niihin liittyviä tutkimuksia. Tarkoituksena on kerätä tietoa puhdistusmenetelmistä ja testata valittua menetelmää. Tutkimuksen kohteena on Valtran G-sarjan traktorin moottorin ilmansuodatin. Tässä mallissa käytetään Mann+Hummelin valmistamaa Entaron HD 10 -suodatinta.

2 VALTRA OY AB:N ESITTELY

Valtra Oy AB on Suomessa toimiva maatalouskoneiden valmistaja, joka on yhdysvaltalaisen AGCO-yhtiön tytäryhtiö. Valtra työllistää yli 1700 henkilöä maailmanlaajuisesti ja myy tuotteita yli 75 maassa. Pohjoismaissa Valtra on johtava maatalouskoneiden valmistaja sekä palveluntarjoaja. Valtran tehtaat sijaitsevat Suomessa Suolahdessa, missä myös Valtran johto sijaitsee, sekä Mogi das Cruzesissa Brasiliassa. Kuvassa 1 näkyy Suomen tehdas, joka koostuu suunnittelukeskuksesta, kokoonpano- ja vaihteistotehtaasta, Valtra Unlimited Studiosta, varaosa- ja huoltokeskuksesta sekä Atrium-vierailukeskuksesta. (Valtra s.a.)



KUVA 1. Valtran Suolahden tehdaskompleksi

Tehdas toimii täysin uusiutuvalla energialla, ja 81 % sen tuottamasta jätteestä kierrätetään ja loput poltetaan energiaksi (Valtra 23.04.2024).

3 ILMANSUODATTIMEN MERKITYS

Polttomoottorissa ilmansuodatinta käytetään estämään ilmassa olevien partikkelien kulkeutuminen moottorin sisälle, mikä kuluttaisi moottoria ennenaikaisesti. Partikkelien kulkeutuessa moottorin palotilaan, ne aiheuttavat sylinteripintojen kulumista, mikä vähentää moottorin tehoa ja kasvattaa polttoaineen kulutusta. (Dziubak 2019, 66–67.)

Kahden toisiinsa nähden liikkuvan osan välissä olevan öljykalvon täytyy olla riittävän paksu, jotta kulumista ei aiheutuisi. Tähän vaikuttavat öljyn viskositeetti sekä lämpötila, voideltujen pintojen nopeus, laakerien mitat ja kuormitusvoimat. Mäntämoottorissa voitelukalvon paksuus sylinterin seinämän ja männän välillä vaihtelee männän nopeuden mukaan. Kalvon paksuus on pienin männän vaihtaessa suuntaa, milloin se pysähtyy hetkellisesti sylinterin päissä, eli ala- ja yläkuolonkohdassa. Näissä pisteissä kalvo voi hävitä hetkellisesti kokonaan ja moottoriin kulkeutuneet partikkelit aiheuttavat vahinkoa partikkelin koosta riippumatta. (Dziubak 2019, 66–67.)

Nykyaikaisilla suodattimilla moottoriin ilman mukana kulkeutuvat partikkelit ovat kokoluokaltaan alle 5 mikrometriä. Tätä suurempien partikkelien kulkeutuminen moottoriin kertoo ilmansuodatusjärjestelmän vioittumisesta. Partikkelin kulkeutuminen moottoriin aiheuttaa kulumista, sillä partikkeleilla on hankaavia ominaisuuksia. Kaikkien partikkeleiden, joiden kokoluokka on suurempi kuin mikrometri, ja jotka ovat mineraaliperäisiä uskotaan aiheuttavan osien kulumisen kiihtymistä. Kuitenkin alle mikrometrin kokoiset hiukkaset ovat erityisen haitallisia, sillä ne toimivat metallipintojen kiillotusaineena. Öljykalvo ei tartu kiillottuneeseen pintaan, mikä kiihdyttää kulumista. (Dziubak 2019, 66–67.)

3.1 Tutkimuskohteena oleva suodatin

Opinnäytetyön tutkimuskohteena oli Mann+Hummelin valmistama Entaron HD-10 -ilmansuodatin. Mann+Hummel on vuonna 1941 perustettu saksalainen perheyrittäjä, joka on yksi maailman suurimmista suodatinvalmistajista. Mann+

Hummel valmistaa suodattimia ja suodatinratkaisuja useille eri teollisuudenaloille erilaisiin käyttötarkoituksiin. (Mann+Hummel 2025.)

Kuvassa 2 näkyvä Entaron HD 10- suodatin on pölyisiin olosuhteisiin valmistettu suodatinkokonaisuus, joka on valmistajan mukaan kooltaan 30 % pienempi kuin muut tehokkuudeltaan vastaavat suodattimet. Suodatinkokonaisuus koostuu kotelosta, huoltokannesta, pääsuodattimesta sekä toissijaisesta suodattimesta. Kotelossa on valmiit kiinnityspisteet kotelon asentamiseksi kohteeseen. Kotelon päädyssä on ulkopuolella liitäntämahdollisuus huoltokytkimelle, joka ilmoittaa suodattimen tukkeutumisen paine-eron avulla. Kotelon ilman sisääntulokanava on mahdollista hitsata kuuteen eri asentoon mahdollistaen sopivuuden erilaisiin asennuskohteeseen. Ilman sisääntulokanava on samansuuntainen kotelon ympyrän tangentin kanssa, mikä tuottaa ilmavirralle pyörteen. Tämän pyörteen mukana osa partikkeleista kulkeutuu kannessa olevan scavenger-liittymän kautta pois järjestelmästä. Suodatinkotelon sisäpuolella on kaksi ympyrälieriön mallista suodatinelementtiä, joista ulomman tarkoitus on suodattaa ilmassa olevat partikkelit ja sisemmän tarkoitus on suojata puhdasta ilmanottokanavaa suodattimen vaihdon aikana sekä varmistaa ettei pääsuodattimen läpi kulkeutuvat partikkelit pääse moottoriin. Pikakiinnityksellä avattava pääty mahdollistaa nopean ja työkaluttoman suodattimen vaihdon. (Mann+Hummel 2025.)



KUVA 2. Entaron HD 10 -suodatinkotelo (Mann+Hummel 2025)

4 PUHDISTUSMENETELMÄT

Tässä luvussa esitellään menetelmiä ja kaupallisia ratkaisuja, joita käytetään partikkelien suodattamiseksi kaasusta.

4.1 Suodatinmedia

Ilmansuodatukseen käytetään useilla teollisuuden aloilla erilaisia suodatinmedioita. Media koostuu huokoisesta materiaalista, jonka pintaan läpikulkevan virtauksen sisältämät partikkelit tarttuvat. Kaasussa olevien partikkelien saavuttaessa suodatinmedian voivat partikkelit suodattua neljällä eri tavalla: iskeytyminen, sieppaus, diffuusio ja elektrostaattinen suodatus. Iskeytyminen tapahtuu, kun partikkeli ei kerkeä vaihtaa äkillisesti suuntaa ilmavirran mukana vaan törmää suodattimen kuituihin. Tämä perustuu kappaleen inertiaan ja on suurimpien partikkeleiden pääasiallinen suodatustapa. Sieppauksessa partikkeli tarttuu kuituihin, kun partikkelia kuljettavan ilmavirran ja lähimmän kuidun etäisyys on pienempi kuin partikkelin säde. Tämä tapa suodattaa useimmat alle mikrometrin kokoiset partikkelit. Brownin liike on kaasussa tai nesteessä olevien molekyylien jatkuvaa satunnaista liikettä, joka aiheuttaa partikkeleille tarpeeksi kineettistä energiaa poiketakseen alkuperäiseltä reitiltään. Partikkeleiden poiketessa reitiltään, joka on ilmavirran suuntainen, törmäävät ne suodattimen kuituihin. Tätä ilmiötä kutsutaan diffuusioksi. Muista menetelmistä poiketen diffuusio voi suodattaa erittäin kevyitä ja pieniä partikkeleita. Elektrostaattisessa suodatuksessa partikkelit kiinnittyvät suodattimen kuituihin ja toisiinsa sähkövarauksella. (Han ym. 2021, 2–3)

Yleisin mediatyyppi autoteollisuudessa on vaihdettavissa oleva patruuna, joka sisältää huokoisesta materiaalista valmistetun laskostetun pinnan. Laskostamalla saavutetaan mahdollisimman suuri pinta-ala, joka kasvattaa suodatuskykyä. Yleisesti materiaaleina käytetään selluloosaa ja polyesteriä. Kuvassa 3 näkyvä suodatin on testauksissa käytetty Mann+Hummelin HD-10-suodatinkotelon suodatuspatruuna, jonka suodattava osa on laskostettua selluloosaa ja synteettisiä kuituja ja päädyt polyuretaanivaahtoa. (Mann+ Hummel 2023)



KUVA 3. Mann+Hummel HD-10-Suodatinpatruuna (Mann+Hummel 2023)

Teknologian kehitys on mahdollistanut nanokuitujen kehittämisen ja hyödyntämisen partikkeleiden suodattamiseksi. Selluloosaan ja polyesteriin verrattuna nanokuitu on kevyempää ja vahvempaa sekä kosteutta hylkivää. Nanokuiduilla voidaan päällystää suodattimen pinta, jolloin tarttuvat partikkelit jäävät suodattimen pinnalle. Tämä mahdollistaa puhdistuksen paineilmalla vahingoittamatta suodattimen kuituja. Muutaman mikrometrin paksuisella kerroksella nanokuituja saavutetaan korkeampi suodatustehokkuus ilman että sillä olisi merkittävää vaikutusta järjestelmäpaineeseen. (Dziubak 2019, 68–69.)

4.2 Sykloni

Sykloni on laite, joka erottelee kaasuista partikkelit keskipakoisvoiman avulla. Perinteisessä syklonissa sisään virtaava ilma pakotetaan alaspäin kulkeväksi pyörteeksi laitteen pyöreällä ja kartiomaisella muodolla. Partikkelit kiertävät keskipakoisvoiman takia pyörteen ulkoreunoilla ja painuvat alaspäin pölynpoistoaukkoon, jonka kautta ne hävitetään. Pölynpoistoaukon juuressa pyörteen suunta kääntyy ylöspäin säilyttäen kiertosuuntansa ja nousee puhdistettuna puhtaan ilman poistoaukosta ulos. Partikkelien poisto voi tapahtua joko keskipakoisvoimalla tai painovoiman vaikutuksen avulla. Syklonin sisäpintojen täytyy olla

mahdollisimman sileät, jotta partikkelit liukuvat helposti niitä pitkin ulos syklonista. (Lipták 1974, 563–564,566.)

Sykloneita käytetään pääasiallisesti suurempien partikkeleiden suodatukseen. Syklonin kokoa pienentämällä ja kappalemäärää suurentamalla voidaan suodattaa myös pienempiä partikkeleita. Tällöin syklonit mahtuvat pienempään tilaan, jolloin käytetään nimitystä multisykloni. Multisyklonin haittapuolena on korkeampi paineenalenema. (Lipták 1974, 487.)

Multisykloneissa on usein kaikille sykloneille yhteinen pölynpoistovenkki raken- teen alaosassa. Sykloneiden eriävät etäisyydet venttiilistä ja siihen liitetystä imusta aiheuttavat virtauseroja sykloneiden välillä, joka heikentää suodatuste- hokkuutta. Jakamalla yhteisen pölynpoistokotelon useaan eri osaan tai sijoitta- malla pölynpoistovenkki samalle etäisyydelle kaikista sykloneista saadaan tasat- tua syklonien virtauksia ja parannettua suodatustehokkuutta. (Dziubak, 2021, 23, 25).

Donaldsonin valmistamissa kuvassa 4 näkyvissä PSD-suodatinkotelokokonai- suuksissa korkean hyötysuhteen omaava multisykloni on integroitu kompaktien suodatinkoteloiden yhteyteen. (Donaldson 2025)



KUVA 4. Donaldsonin PSD-suodatinkotelot, joissa kiinnitettynä multisyklonit (Do- naldson 2025)

4.3 Sähköstaattinen erotin

Sähköstaattisen erottimen puhdistusmenetelmässä ilmasta tai nesteestä erote- taan partikkelit korkean jännitteen aiheuttaman sähkökentän avulla. Partikkelit

kulkevat negatiivisesti varattujen metallisten johtimien ohi, joihin syötetään suurta jännitettä. Jännite aiheuttaa koronapurkauksen, joka varaa ohikulkevat partikkelit saman varauksiseksi. Varatut partikkelit kiinnittyvät tämän jälkeen vastakkaisella varauksella oleviin levyihin. Levyt puhdistetaan mekaanisesti värinää käyttämällä tai vesipesulla, minkä jälkeen partikkelit kerätään painovoiman vaikutuksesta. Erottimet jaotellaan yksi- tai kaksivaihe-erottimiksi niiden toimintaperiaatteen mukaan. Yksivaiheisissa erottimissa partikkelien varaus ja keräys tapahtuu samassa järjestelmässä, kun taas kaksivaiheisessa erottimessa ne ovat erillisiä vaiheita. (Lipták 1974, s.692–694.)

Puhdistettavan kaasun tai nesteen virtauksen tulee olla mahdollisimman lineaarista sekä tasaista parhaan suorituskyvyn varmistamiseksi. Hitaampi virtaus mahdollistaa suuremman altistumisajan sähkövaraukselle, mikä parantaa myös suodatustehokkuutta. Keräävän elementin jatkuva puhdistus on tärkeää sillä partikkelit eivät tartu, mikäli kerääntynyt kerros on tarpeeksi paksu estääkseen varauksen johtumisen. Sähköstaattiset erottimet toimivat jopa 800°C:n lämpötiloissa ja voivat käsitellä suuria ilmamääriä aiheuttamatta suuria painehäviöitä. Haittapuolena on suuri koko, kalliit kustannukset ja heikko toimivuus varausta hylkivien hiukkasten kanssa. (Lipták 1974, s.692–702.)

4.4 Värähtely

Suodatinmedioita ja pintoja voidaan puhdistaa kohdistamalla niihin mekaanista värinää, joka irrottaa partikkelit. Matalilla taajuuksilla voidaan käyttää sähkömoottoria, paineilmaväristintä tai hydraulista väristintä. Värinän aiheuttaa epäkeskeisesti jakautuneen painon liike. Teollisuuskäytössä on käytetty pitkään matalataajuisia värinää kankaisten pussisuodattimien puhdistamiseksi. Pussisuodattimien puhdistuksessa amplitudi, taajuus ja värähdysten lukumäärä korreloivat suoraan keskenään. Värinää käytettäessä tietyn rajan jälkeen jäännöspaine sekä virtausnopeuden kasvu ovat minimaalisia. Korkealla amplitudilla ja matalalla värähdysten lukumäärällä voidaan saavuttaa sama puhdistustehokkuus ja jäännöspaine, mutta suodattimen läpi virtaavan ilmavirran nopeus on epätasaisempi suodattimen eri päissä käytettäessä korkeaa amplitudia. (Walsh & Spaite 1962, 57–61.)

Korkeiden taajuuksien muodostamiseksi käytetään ultraäänimuuntimia. Muuntimet on valmistettu pietsosähköisistä materiaaleista, kuten keramiikasta tai kvartsisista, jotka kykenevät muuttamaan muotoaan niihin kohdistetun sähköjännitteen avulla. Sähköjännitettä kohdistetaan nopeina impulsseina materiaaliin, joka aiheuttaa korkeataajuisia värähtelyä ja siirtää sitä eteenpäin. (Modsonic 2023.)

Ragulskis ym. (2017) tutkimuksessa testattiin teoreettisen laskelman kautta ultraäänimuunninta puhdistamaan lasiselta testipinnalta ISO-12103-A4-standardin mukaista testipölyä. Tuloksien perusteella suurin puhdistusnopeus voidaan saavuttaa noin 1000 Hz:n taajuudella. (Ragulskis ym. 2017.)

4.5 Puhallusmenetelmä

Puhallusmenetelmässä suodattimeen kohdistetaan ilmavirtaus lyhyiden pulssien aikana. Ilmavirtaus kohdistetaan suodattimen normaalia imusuuntaa nähden vastakkaiseen suuntaan, mikä aiheuttaa partikkelien irtoamisen suodattimen pinnasta. (Lo, Chen & Pui 2009, 141.)

Ilmasäiliötä ohjataan sähkömagneettisella venttiilillä, joka sulkee ja avaa ilmakanan sähkövirran avulla. Puhdistuksen alkaessa venttiili saa sähkövirran, jonka ansiosta venttiiliin kalvon yläpuolelle jäänyt ilma poistuu venttiilistä. Ilman poistuminen aiheuttaa paine-eron kalvon eri puolien välillä ja saa kalvon liikkumaan nopeasti, minkä ansiosta koko säiliö tyhjentyy nopeasti suuttimen kautta. (Tameson 2025.)

Suodattimen geometrialla on vaikutusta siihen, onko puhdistus järkevää toteuttaa paineen kasvaessa tiettyyn pisteeseen vai säännöllisesti tietyllä aikavälillä. Suodattimen laskossuhde saadaan jakamalla yksittäisen poimun korkeus kahden poimun välisellä etäisyydellä. Laskossuhteen ollessa yli 4, puhdistus toimii paremmin, kun se suoritetaan tietyllä aikavälillä. Paineilmapulssin pidentämisellä ei ole vaikutusta puhdistustehokkuuteen, mikäli paine on kriittisen pisteen alapuolella. (Lo ym. 2009, 147, 149.)

Kaupallisessa ratkaisussa ilmavirta kohdistetaan yleensä kiinteän suuttimen läpi suodattimen pintaan. Li ym. (2019, 1002, 1005) tutkimuksessa testattiin pyörivän

roottorin rakentamista suodattimen sisälle. Heidän tutkimuksessansa vertailtiin tyypillisiä suuttimia heidän itse suunnittelemaansa roottoriin. Testauksista saatujen tuloksien mukaan puhdistuksen jälkeistä jäännöspainetta saatiin laskettua 27,33 % sekä puhdistusväliä kasvatettua 15,7 % verrattuna tyypillisiin suuttimiin. Roottorissa oli 36 reikää, jotka toimivat suuttimina. Roottori oli laakeroitu päistä, jotta se pystyi pyörimään ilmapulssin saavuttaessa suuttimet ja jakamaan ilmavirran tasaisesti suodattimen pinta-alalle. (Li ym. 2019, 1002, 1005)

Pulse-jetin tehokkuutta on myös yritetty kasvattaa lisäämällä suodattimen sisälle erimallisia kartioita, jotka jakaisivat ilmapulssin kohdistusta suuremmalle pinta-alalle. Testien perusteella umpinainen päästä pyöristetty ympyrälieriö vähensi tarpeesta johtuvaa puhdistustiheyttä, paransi pulssisuihkun tasaisuutta sekä vähensi järjestelmän jäännöspainetta verrattuna tyhjään suodattimeen. (Li, Li & Zhou 2015, 251.)

4.6 Akustinen aggloromaatio

Akustisessa aggloromaatiossa ilmavirtaan kohdistetaan suuri äänenpaine, minkä takia pienet hiukkaset kerääntyvät suuremmiksi kokonaisuuksiksi. Menetelmä ei suodata partikkeleita, mutta kasvattaa suodatustehokkuutta ja mahdollistaa harvempien suodatinelementtien käytön. Muihin menetelmiin verrattuna akustinen aggloromaatio on tehokas poistamaan alle mikrometrin kokoisia partikkeleita. Liu ym. (2009, 20, 22, 24) kokeellisessa testauksessa kammioon syötettiin ilmavirran mukana lentotuhkaa, johon kohdistettiin kaiuttimen tuottama etenevä ääniaalto korkealla 147:n desibelin äänenpaineella ja 1400 Hz:n taajuudella. Alle mikrometrin kokoisten hiukkasten lukumäärä väheni 68,4 % ja alle 2.5 mikrometrin kokoisten hiukkasten lukumäärä väheni 75,6 % (Liu ym. 2009, 20, 22, 24.)

4.7 Märkäpesurit

Märkäpesurit ovat säiliöitä, jotka suodattavat partikkeleita kaasusta nesteen avulla. Partikkelit tarttuvat nesteeseen, kun säiliön sisällä olevista suuttimista vapautetaan nestettä, joka kohtaa ilmavirran pisaroina. Partikkelit kulkeutuvat

nestesumun ja pisaroiden mukana pois systeemistä ja puhdas ilmavirta poistuu eri reittiä. Ilmavirran sumutuksen sijaan säiliön reunat voidaan myös kastella kaapeammasta paikasta, johon partikkelit törmäävät ja tarttuvat. (Lipták 1974, 586–587.)

Ilmavirran mukana voi kulkeutua nestettä, minkä vuoksi virtausnopeus ja pisarakoko on pidettävä riittävän pieninä. Raakailman suunta nestesumuun verrattuna voi olla joko vastakkainen, samansuuntainen tai kohtisuora. Märkäpesurien etuina on korkea suodatustehokkuus ja mahdollisuus muokata helposti suodatettavien partikkelien kokoaluetta. (Lipták 1974, 586–596.)

4.8 Pölynpoistoverkko sekä scavenger

Pölynpoistoverkko on esierottimessa tai suodatinkotelon liittymässä oleva kuminen verkko. Tulppa sulkeutuu moottorin ilmanoton imun vaikutuksesta, ja siihen kerääntyy keskipakois- ja painovoiman avulla partikkeleita. Moottorin käynti aiheuttaa jaksottaista imua, joka mahdollistaa verkkoon avautumisen käynnin aikana. Verkko avautuu myös moottorin ollessa sammutettuna, jolloin verkkoon kerääntyneet partikkelit ja kosteus pääsevät poistumaan järjestelmästä. (Donaldson 2025.)

Suodatinkotelon keräämät partikkelit voidaan poistaa myös verkkoon sijasta samasta portista käyttämällä imuvirtausta, jota kutsutaan nimellä scavenger. Ilmavirtaus imulle voidaan ottaa moottorin pyörittämästä tuulettimesta tai pakokaasukanavasta. Pakokaasukanavaa käytettäessä poistuvat pakokaasut aiheuttavat imun kanavaan liitettyyn scavenger-porttiin. (Knaus solutions s.a.)

4.9 Kaupalliset ratkaisut

Suodattimen puhdistamiseen on useita valmiita kaupallisia ratkaisuja. Husqvarna on yhdistänyt DE 130 H- pölynkeräimessään syklonin sekä pulse-jet-järjestelmän. Jakamalla suodattimen kahteen osaan voidaan puhdistus suorittaa häiritsemättä virtausta ja keskeyttämättä työtehtävää. (Husqvarna Construction 2.9.2024).

Moottorien ilmanotto-kanavien päähän asennettavilla esierottimella voidaan parantaa suodatuskykyä helposti. Valmistajan mukaan kuvassa 5 näkyvä Redekopin Kas-esierotin suodattaa A4-luokan testipölyä jopa viisi kertaa tehokkaammin kuin kolmen kilpailijan valmistamat mallit. (Redekop 2025.)



KUVA 5. Redekop Kas-esierotin (Redekop 2025)

Irrallisten suodattimien puhdistukseen valmistetut laitteet hyödyntävät usein paineilmalla tapahtuvaa puhdistusta. Kuvassa 6 näkyvä Sonic Dry Cleanin valmistama SDC-7-suodattimenpuhdistus laite käyttää imua, puhallusta, värinää ja pyörimistä saavuttaakseen 99,6 % puhdistustehokkuuden. Ensimmäisessä syklistä laite pyörittää ja värittää suodatinta puhaltamalla ilmaa suodattimen sisäpuolelta ulospäin imien irronneen materiaalin samalla pois. Toisessa syklistä värinä lakkaa ja suodatinta puhalletaan sekä ulko- että sisäpuolelta suuttimien ollessa vastakkain toisia kohtaan. (Sonic Dry Clean 2025.)



KUVA 6. Sonic Dry Clean SDC-7 (Sonic Dry Clean 2025)

AFC:n kehittämä manuaalinen suodatinpuhdistussarja liitetään paineilmakompressoriin, jonka tuottama ilmavirtaus saa puhdistimen päässä olevan ja kuvassa 7 näkyvän suuttimen pyörimään. Suodatinta liikutetaan manuaalisesti ylös ja alas suunnassa irrallisen suodattimen sisällä, minkä seurauksena ilmavirta kohdistuu koko suodattimen sisäpinta-alaan. (Air Filter Cleaner 2025)



KUVA 7. Air Filter Cleanerin valmistama pyörivä suutin (Air Filter Cleaner 2025)

5 MUOTOILUN JA ILMAVIRTAUKSEN VAIKUTUKSET

Ilmavirran kotelossa täytyy pysyä mahdollisimman suoraviivaisena, jotta turbulenssia ei esiinny ja painehäviö on pieni sekä partikkelit kulkevat haluttua reittiä. Tästä syystä kotelo ja suodatin on usein muotoiltu pyöreäksi, ja ilmavirran tuloliitäntä on sijoitettu kotelon ympyrän tangentin suuntaisesti. Ilmavirran ollessa liian nopea suodatinkotelossa, partikkelit kulkeutuvat sen mukana suodattimeen. Liian hitaalla ilmavirralla sykloninen efekti jää pieneksi ja partikkelit imeytyvät suoraan suodattimeen. (Almeida, Azevedo, Yoshino, Oliveira & Trindade 2017, 3,5.)

Suodatinkokonaisuus voidaan myös optimoida laskennallisen virtausdynamiikan ohjelmistolla yhdelle järjestelmälle, millä voidaan saavuttaa suuret hyödyt verraten yleisiin suodattimiin, jotka on optimoitu toimimaan useissa erilaisissa järjestelmissä. Suodatusjärjestelmää on tärkeää tarkastella kokonaisuutena, sillä yhden komponentin parametrien tai geometrian muutos vaikuttaa myös muihin järjestelmän komponentteihin. Suodattimen ominaisuuksia voidaan parantaa suunnittelemalla päätytiivistys vähemmän tilaa vieväksi, sekä valitsemalla järjestelmään sopiva laskostetun suodatinmedian poimujen välinen etäisyys. Näillä toimenpiteillä saadaan kasvatettua suodatinmedian pinta-alaa ja saadaan suodattimelle riittävä pölynpito kapasiteetti ilman, että painehäviö kasvaa liikaa. Almeida ym. (2017, 5–7) tutkimuksen mukaan $21 \text{ m}^3/\text{h}$ virtauksella suodattimen optimoinnilla voidaan saavuttaa pölynpitokapasiteettiin jopa 33 % parannus ISO Coarse- testipölyllä ja jopa 51 % parannus ISO Fine- testipölyllä painehäviön ollessa jopa 31 % pienempi. Tämä menetelmä on kuitenkin erityisen aikaa ja resursseja vievää. (Almeida ym. 2017, 5–7.)

6 STANDARDIT JA TESTIPÖLY

Luotettavien tuloksien saavuttamiseksi testausta ohjaavat standardit, jotka määrittävät testauskäytännöt sekä käytettävät materiaalit. Standardi SFS EN-ISO 12103-1 määrittelee viisi testipölylaatua, joita käytetään suodatinjärjestelmien testauksessa. Testipölylaadut on valmistettu Arizonan aavikolla sijaitsevasta hiekasta, jonka ainesosille kulkuneuvot yleensä altistuvat. Materiaalien kuluttavien ominaisuuksien testipölyä on käytetty myös laakerien ja tiivisteiden ja erilaisten kumiosien kulumisen tutkimiseen. (ISO 12103-1:2024, V)

Standardissa SFS EN-ISO 5011 käsitellään polttomoottorien ja kompressorien tuloilman laitteistojen testausmenetelmät ja vaatimukset. (ISO 5011:2020, 1)

Valtra toimitti testauksessa käytettävät testipölyt. Opinnäytetyön aikana tehtiin kartoitus testissä käytettävistä A2 - ja A4-testipölyjen valmistajista, toimittajista ja hinnoista. Kartoituksessa otettiin huomioon vain ne toimittajat, jotka toimittavat pölyjä Suomeen. Kartoitus löytyy liitteestä 1.

Partikkelien kokoluokalla on olennainen vaikutus suodatuksen esierotukseen sekä suodatinmedian pölynpitokapasiteettiin. Tehtäessä suodatintestejä, joiden tarkoitus on kuvata olosuhteita mille laite yleensä altistuu, testauspöly on kerättävä laitteen ilmaan nostamista partikkeleista maaperästä keräämisen sijaan. Kerätyn testauspölyn partikkelijakaumaa voidaan verrata standardin mukaisiin pölyihin ja määritellä sopiva pölylaatu. Almeida ym. (2017, 8) tutkimuksen mukaan sokeriruokopelloilla toimivan puimurin suodatintestejä tehtäessä huomattiin, että ISO Fine- luokan testipöly vastaa todellisia olosuhteita paremmin vaikkakin standardi määrittelee käyttämään ISO Coarse- pölyä kyseisessä testauksessa. (Almeida ym. 2017, 8.)

7 TESTAUSMENETELMÄN VALINTA

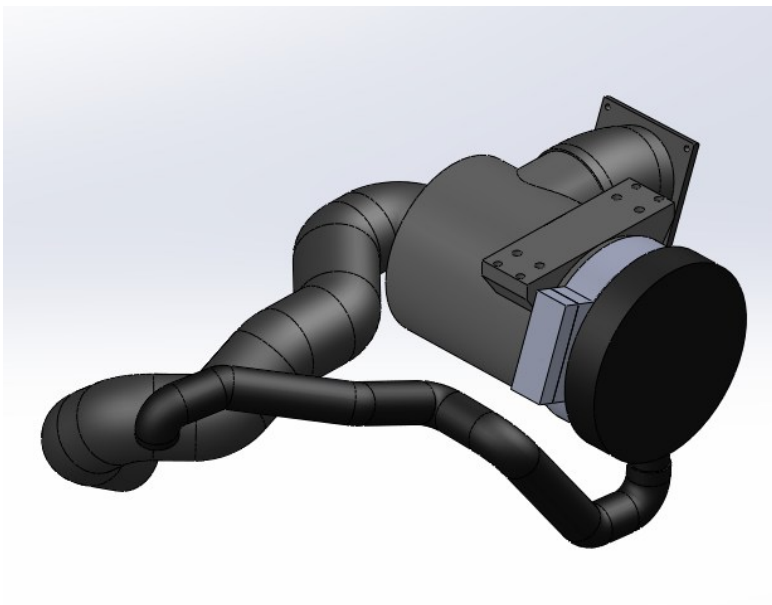
Traktorin ilmansuodattimelle asetetaan useita erilaisia vaatimuksia. Ilmansuodattimen kotelon täytyy olla mahdollisimman pieni, jotta se vie mahdollisimman vähän tilaa konehuoneesta. Samanaikaisesti kotelon aiheuttaman paineen aleneman täytyy olla mahdollisimman pieni, suodattimen pölynpitokapasiteetin ollessa mahdollisimman suuri.

Testausmenetelmää valittaessa oli tärkeää, että menetelmä voitaisiin asentaa tekemättä muokkauksia alkuperäiseen suodatinkoteloon tai suodattimiin.

Testausmenetelmä valittiin vertailemalla eri menetelmiä keskenään. Arvostelukriteereinä käytettiin kokoa, olosuhteiden kestoa, kustannusta, tehokkuutta, monimutkaisuutta, äänihaittaa, energiankulutusta, vaikutusta suodattimeen, paineen alenemaa sekä laitteiston määrää. Menetelmät pisteytettiin tutkimustiedon perusteella ja kohteeseen soveltuen, ja valinta tehtiin niiden mukaan. Pisteytystaulukot löytyvät liitteestä 3 ja 4. Sykloni sai suurimman pistemäärän, jonka jälkeen tuli tärinämoottori ja pulse-jet. Patruuna-mallisten suodattimien testauksesta värinällä ei löytynyt tutkimuksia, ja se voitaisiin testata ilman rakennemuutoksia, joiden lisäksi se sai vertailussa hyvät pisteet. Näiden syiden vuoksi tutkimusmenetelmäksi valittiin tärinämoottori.

8 SUUNNITTELU

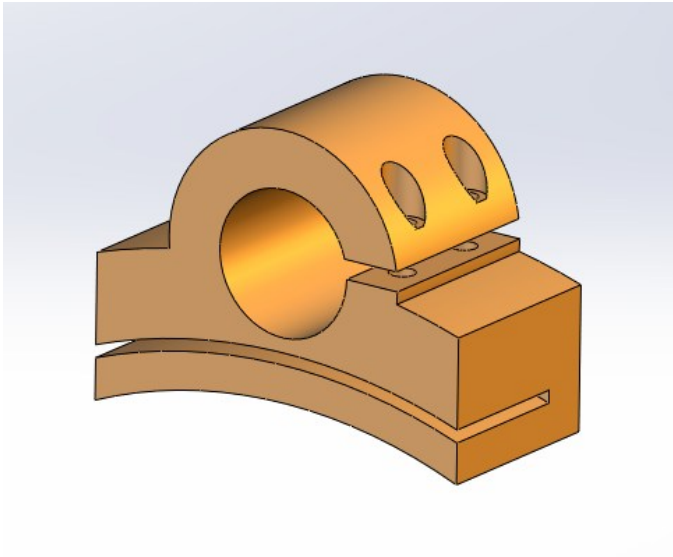
Testausmenetelmän valinnan jälkeen alkoi suunnittelu. Kuvassa 8 oleva Suodatinjärjestelmä mallinnettiin SolidWorks-ohjelmistolla, tarkoituksena tutkia järjestelmän ja pääsuodattimen ominaisvärähtelytaajuuksia sekä mallintaa värinälähdettä. Värinän simuloiminen osoittautui kuitenkin haastavaksi, sillä useille materiaaleille ei löytynyt vaadittavia arvoja ja tietyissä arvoissa pienikin muutos aiheutti suuret eriarvoisuudet, jonka takia tulokset eivät olleet järkeviä.



KUVA 8. Mallinnettu suodatinkokoonpano ja moottoripidike

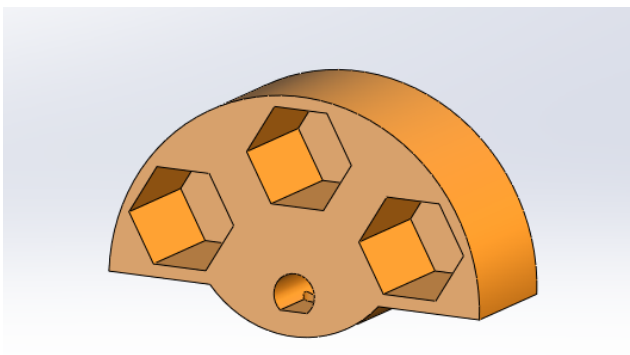
Värinän lähteenä käytettiin 12 V:n DC-moottoria. Moottori suunniteltiin kiinnitettäväksi pantaan, joka kiristettäisiin kotelon ympärille. Tällä tavalla kiinnitys ei vahingoittaisi koteloa ja sen voisi asentaa myös muihin suodatinkotelomalleihin. Alkuperäisen suunnitelman mukaan moottoripidike ja panta 3D- tulostettaisiin yhtenä kappaleena Oulun Yliopistolla sijaitsevan FabLabin laitteilla. Pannan suuren halkaisijan vuoksi tämä ei ollut mahdollista käytössä olevilla laitteilla, joten panna käytettiin metallista ilmasäiliön panta.

Kuvassa 9 ja 10 näkyvät moottorin pidike sekä epäkeskopaino 3D-tulostettiin Oulun FabLabin tiloissa PLA-muovista. Moottori kiinnitettiin pidikkeeseen kahdella ruuvilla puristamalla, ja panta kiristettiin pidikettä vasten, jolloin se pysyi kiinni kotelossa.



KUVA 9. Moottorinpidike

Kuvassa 10 näkyvään vastapainoon tehtiin kolme koloa, johon voisi asettaa muttereita painon säätämiseksi. Testauksessa vastapainon kaikki paikat täytettiin muttereilla.



KUVA 10. Vastapaino

Moottorin ohjaus toteutettiin valmiilla DC-moottorin nopeussäätimellä sekä 13.1/230V virtalähteellä.

Testauksien oli tarkoitus simuloida traktorin moottorin yleisintä kierrosaluetta työtehtävien aikana. Valtran suunnittelijan kanssa keskustelun jälkeen tavoite kierrosnopeudeksi päätettiin 1800 rpm, mikä vastaisi n. 460 m³/h moottorin virtausta ja 34,6 m³/h scavenger-virtausta. Moottorin tuottamat ilmavirrat näkyvät liitteessä 2.

9 TESTAUS

Testaus suoritettiin Oulun ammattikorkeakoulun autolaboratorion tiloissa kevään 2025 aikana. Valtra toimitti testattavan HD 10 -suodatinkotelon suodattimiseen sekä testipölyt.

9.1 Testauslaitteisto

Suodatinkotelo kiinnitettiin puiseen alustaan pulteilla sekä kumisilla O-renkailla, joilla saatiin värähtelyä hillittyä. Moottorin aiheuttamaa ilmavirtausta simuloitiin kahdella pakokaasuimurilla ja scavenger-imua hitsausimurilla. Imurien päissä oli ilmanvaihtokanaviin suunnitellut virtaussäätimet, joilla voitaisiin tarvittaessa kuristaa ilmavirta, jotta se vastaisi todellisia olosuhteita. Suodatinkoteloon kiinnitettiin 100 mm ilmanvaihtoputki puhtaan ilman puolelle ja 125 mm ilmanvaihtoputki raakailman puolelle. Scavenger-liittymään kiinnitettiin alkuperäinen kumiletku, joka kiinnittyi 100 mm ilmanvaihtoputkeen. Scavenger-liittymään menevä pöly suodatettiin painovoimaisesti sekä G4-Coarse-luokan suodatinkankaalla.

Moottorinkiinnike ja panta kiristettiin suodatinkotelon kansipuolen päähän. Suodattimen toisessa päässä oleva muovinen kirkas suojus ohjaa ilmavirtaa, mutta estää samalla pölyn pääsyä suodattimeen, jonka takia suurin osa pölystä kertyi vastakkaiseen päähän.



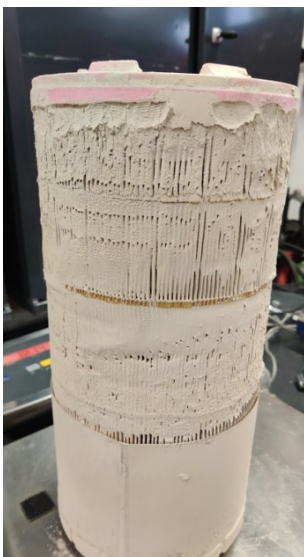
KUVA 11. Testauskoonpano

Pakokaasun poistoimureita käytettiin tuottamaan vaadittava ilmavirta suodattimen läpi. Imureiden tuottama virtaus ei ollut tiedossa, eikä sitä pystynyt säätämään, joten virtaus mitattiin TSI Velocicalc 9565-P -monitoimimittarilla sekä TSI Probe 964 -mittasondilla. Ilmanvirtaus mitattiin asettamalla mittasondi virtauskanavaan reiän läpi ja pitämällä sitä paikallaan virtauksen mukaisessa asennossa.

9.2 Testausmenetelmä

Ilmansuodattimen tukkeutuminen piti määritellä Mann+Hummelin painekeytkimen avulla. Painekeytkimeen oli asetettu ennalta määrätty arvo, joka on tässä tapauksessa 50 mbar. Kun paine kasvaa yli tämän arvon, päästää kytkin virtaa läpi, ja muutos tarkastetaan yleismittarilla. Imureissa ei kuitenkaan riittänyt alipaine laukaisemaan tätä kytkintä. Myös 30mbar kytkintä testattiin mutta tälläkään ei paine riittänyt, joten testaus suoritettiin syöttämällä vakiomäärä pölyä. Pölymäärä testattiin syöttämällä pölyä, kunnes suodatin oli silmämääräisesti erittäin tukkeutuneen näköinen.

Värinää testattiin kahdella eri testipölylaadulla, ISO Coarsella eli A4 laadulla ja ISO Finellä eli A2 laadulla. Kaikki testit suoritettiin 20,8 celsiusasteen lämpötilassa, 28,9 % suhteellisella ilmankosteudella ja 410,4 m³/h pääimun virtauksella scavenger imun virtauksen ollessa 10,8 m³/h. Molemmilla laaduilla värinää testattiin kahdella eri tavalla, kaikki imurit päällä sekä vain scavenger-imuri päällä. Tällä tavalla saatiin testattua miten värinä vaikuttaa moottorin ollessa käynnissä ja moottorin ollessa sammutettuna mutta scavenger-imun ollessa päällä. Pöly sekoitettiin ennen annostelua, jotta mahdolliset kasaantumukset hajoaisivat. Pölyä punnittiin ensin 1200 g, joka sen jälkeen kaadettiin suppiloon. Punnituksessa käytettiin puntaria, jossa oli 0,01 g mittaustarkkuus. Tämän jälkeen kaikki imut laitettiin päälle ja suppilon päähän laitettiin paineilmaa. Pölyä syötettiin mahdollisimman tasaisesti 15 minuutin ajan, jonka jälkeen kaikki imut sammutettiin, ja suodattimet irrotettiin ja punnittiin. Tämän jälkeen suodattimet laitettiin takaisin koteloon ja imut laitettiin päälle. Moottorilla kiihdytettiin 30 sekunnissa 0–130 Hz:iin, joka mitattiin hyödyntämällä mobiililaitteessa käytettävää ohjelmaa. Tämän jälkeen imurit sammutettiin ja suodattimet punnittiin. Ensimmäiset testit tehtiin A2 pölyllä, jonka jälkeen käytettiin A4 pölyä. Scavenger-imun suodatinkangas vaihdettiin jokaisen testin jälkeen, ettei sen tukkiutuminen muuttaisi tuloksia. Sisemmät varmuussuodattimet vaihdettiin jokaisen testin välissä, mutta niiden ulkonäkö tai massa eivät muuttuneet testin aikana, joten niitä ei sisällytetty tulostaulukoon.



KUVA 12. Suodatin A2-testipölyn syötön jälkeen

10 TULOKSET

Taulukossa 1 näky testauksen tulokset. Pääsuodattimien pienet massaerot johtuvat todennäköisesti suodattimen ympäri kiertävästä liimauksesta, joka oli paikoin epätasaista. Tuloksista nähdään, että värinällä oli sama vaikutus pölylaadusta huolimatta. Imurien ollessa käynnissä värinän aikaan suodattimien massa kasvoi molemmilla testilaaduilla. Pelkästään scavenger-imua käytettäessä suodattimen massa väheni keskimäärin 2,71 %. Ensimmäistä suodatinta testattiin kaksi kertaa massan kasvaessa ensimmäisen testauksen aikana.

TAULUKKO 1. Testaustulokset

Suodatin	Testipöly	Tapa	Suodattimen Massa	Massa syötön jälkeen (g)	Massa puhdistuksen jälkeen (g)	Erotus (g)
2	A2	Käynnissä	726	1213	1223	-10
2	A2	Sammutettu	726	1223	1188	35
3	A4	Sammutettu	730	1189	1154	35
4	A4	Sammutettu	725	1204	1176	28
5	A4	Käynnissä	724	1059	1061	-2

Tuloksista voidaan todeta, että kyseinen järjestelmä ei ollut tehokas. Värinä kulkeutui suodattimeen päätytiivistyksien kautta, joka heikensi värinää. Myös scavenger-liittymän imu olisi pitänyt olla kolminkertainen, jotta se olisi vastannut oikeaa tilannetta. Tämän takia pölynpoisto pääimun ollessa päällä kasvoi

negatiiviseen suuntaan. VelociCalc-9656-P-monitoimittari oli viimeksi kalibroitu vuonna 2021 mikä voi myös aiheuttaa heittoa virtauksen mittauksessa.

11 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia erilaisia suodattimen puhdistusmenetelmiä ja tutkimuksia sekä testata valittua menetelmää. Aihe osoittautui haastavaksi sen laajuuden takia ja se oli uusi myös oppilaitokselle, sillä esimerkiksi tarvittavat standardit tilattiin erikseen sillä niitä ei löytynyt valikoimasta entuudestaan. Alkuperäinen aikataulu ei pitänyt testausvaiheen viivästyessä mikä vaikutti myös opinnäytetyön valmistumisen ajankohtaan. Testaus jäi lopulta kevyeksi, eikä kaikkia muuttujia pystytty vakioimaan standardien mukaisesti käytössä olevilla laitteistoilla. Esimerkiksi ilmavirran kosteuden ja lämpötilan säätäminen ei ollut mahdollista, ja pölynsyöttö tehtiin manuaalisesti, mikä saattoi aiheuttaa epätasaisia tukkeumia suodattimessa. Testauksessa käytetyt laitteistot tuottivat odotettua heikompaa ilmavirtaa ja alipainetta, mikä myös vaikutti osaltaan tuloksiin.

Työn aikana nousi esiin useita kehittämis- ja jatkotutkimusmahdollisuuksia. Automatisoidun testipenkin suunnittelu ja rakennus voisivat olla oma erillinen opinnäytetyön aihe, jolloin suodattimien testauksista voitaisiin kerätä laajasti luotettavaa dataa uusien tutkimuksien parissa. Vaikkakin värinä osoittautui tässä tutkimuksessa tehottomaksi menetelmäksi, voitaisiin sen tehokkuutta tutkia integroidun multisykloni-esierottimen puhdistuksessa, sillä sen tukkiutuminen yksittäisten syklonien eriävien virtauksien takia aiheuttaa suodatustehokkuuden laskua. Suodattimen pyörittämisellä voitaisiin hyödyntää keskipakovoiman aiheuttavaa vaikutusta ja tasata partikkelien kerääntymistä. Partikkeleiden kanssa kosketuksissa olevien pintojen pinnoittaminen kitkan vähentämiseksi saattaisi parantaa puhdistustehokkuutta. Värinän parametrien optimointi sekä pitkäaikaiset vaikutukset suodatinkokonaisuuden materiaaleihin olisivat myös hyviä tutkimuskohteita.

Opinnäytetyö oli aiheena mielenkiintoinen ja avasi uusia näkökulmia sekä parannusehdotuksia ja tarjoaa hyvän pohjan mahdollisille jatkotutkimuksille.

LÄHTEET

Air Filter Cleaner 2025. Luettavissa: https://airfiltercleaner.com/?srsltid=AfmBOopnDXo6OKQKD9Mr1uHQ_9gYGliVgLkS5HaH-bkCYW2ai0E_JPv9L. Luettu: 18.11.2024.

Almeida, A., Azevedo, E., Yoshino, F., Oliveira, M., Trindade, W. 2017. Increase of engine air filter elements service interval for medium and heavy duty vehicles by means of air induction system design optimization. XXV Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva, 4(1). Luettavissa: DOI: 10.5151/engpro-simea2017-30. Luettu: 7.12.2024

Donaldson 2025. Powercore psd air cleaner. Luettavissa: <https://www.donaldson.com/en-us/engine/filters/products/air-intake/cleaners/psd/>. Luettu 3.1.2025

Donaldson 2025. Vacuator valves automatically expel dust and water. Luettavissa: <https://www.donaldson.com/en-in/engine/filters/technical-articles/vacuator-valves-automatically-expel-dust-water/#:~:text=As%20dirty%20air%20is%20drawn,air%20cleaner%20'self%20cleaning'>. Luettu: 2.11.2024

Dziubak, T. 2019. Properties of material with nanofiber layer used for filtering the inlet air. Combustion Engines, 177(2), s. 66–75. Luettavissa: <https://doi.org/10.19206/CE-2019-212>. Luettu: 21.4.2025.

Dziubak, T.2021. Experimental Studies of Dust Suction Irregularity from Multi-Cyclone Dust Collector of Two-Stage Air Filter. Energies, 14(3577). Luettavissa: <https://doi.org/10.3390/en14123577>. Luettu: 13.2.2025

Han, S., Kim, J. & Ko S.H. 2021. Advances in air filtration technologies: structure-based and interaction-based approaches. Materialstoday advances, 9. Luettavissa: <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2021.100134>. Luettu: 11.12.2024

Husqvarna Construction 2.9.2024. (FI) Husqvarna DE 130 H - Tehokas työnkulku ilman keskeytyksiä. Video. Katsottavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=eIk-b6XDOJ4> Katsottu: 1.11.2024.

ISO 12103-1:2024. Road vehicles — Test contaminants for filter evaluation — Part 1: Arizona test dust. Luettavissa: <https://www.iso.org/standard/85949.html>. Vaatii lisenssin. Luettu: 19.10.2024.

ISO 5011:2020. Inlet air cleaning equipment for internal combustion engines and compressors — Performance testing. Luettavissa: <https://www.iso.org/standard/72490.html>. Vaatii lisenssin. Luettu: 18.10.2024.

Knaus-solutions s.a. What is an exhaust scavenger port? Luettavissa: <https://knaus-solutions.com/what-is-an-exhaust-scavenger-port/> Luettu: 1.11.2024

Li, J., Li, S. & Zhou, F. 2015. Effect of cone installation in a pleated filter cartridge during pulse-jet cleaning. Powder Technology, 284 s. 245–252. Luettavissa: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.06.071>. Vaatii lisenssin. Luettu: 1.1.2025

Li, S., Jin, H., Hu, S., Tan, X., Liu, H., Xie, B., Jianhong, K., Zhou, F. 2019. Effect of novel built-in rotator on the performance of pleated cartridge filter. Powder Technology, 356, s. 1001–1007. Luettavissa: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.08.052>. Vaatii kirjautumisen. Luettu: 3.1.2025

Lipták, B. 1974. Environmental Engineers` Handbook. Air pollution. Chilton Book Company. Pennsylvania.

Liu, J., Zhang, G., Zhou, J., Wang, J., Zhao, W., Cen, K. 2009. Experimental study of acoustic agglomeration of coal-fired fly ash particles at low frequencies. Powder Technology, 193, s. 20–25. Luettavissa: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.02.002>. Vaatii kirjautumisen. Luettu: 4.1.2025

Lo, L., Chen, D. & Pui, D. 2009. Experimental study of pleated fabric cartridges in a pulse-jet cleaned dust collector. Powder Technology, 197(3), s. 141–149.

Luettavissa: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.09.007>. Vaatii kirjautumisen.
Luettu: 21.11.2024.

Mann+Hummel 2023. Air cleaner catalog. Luettavissa: <https://oem.mann-hummel.com/en/oem-products/air-cleaners/entaron-hd-cd.html>. Luettu 9.11.2024.

Mann+Hummel 2025. Entaron HD/CD. Luettavissa: <https://oem.mann-hummel.com/en/oem-products/air-cleaners/entaron-hd-cd.html>. Luettu 9.11.2024.

Mann+Hummel 2025. MANN+HUMMEL for a cleaner world: Leadership in filtration since 1941. Luettavissa: <https://www.mann-hummel.com/en.html>. Luettu 12.11.2024.

Modsonic 2023. How do ultrasonic transducers work? Luettavissa: <https://modsonic.com/ultrasonic-transducer-working/#> Luettu: 20.12.2024.

Pitenius, T. 2024. Tehdas toimii 100 % uusiutuvalla energialla. Valtra. Luettavissa: <https://www.valtra.fi/blogi/valtra-world/Tehdas-toimii-100-uusiutuvalla-energialla.html> Luettu: 15.11.2024.

Ragulskis, K., Bubulis, A., Mažeika, D., Kandrotaitė-Janutienė, R., Ragulskis, L. & Bartkus, A. 2017. Vibrational method of cleaning of surfaces from homogeneous waste materials. Journal of Vibroengineering, 19, (3), s. 1709–1717. Luettavissa: <https://doi.org/10.21595/jve.2017.18079>. Luettu: 27.11.2024

Redekop 2025. Revolutionary pre-cleaning technology. Luettavissa: <https://redkopmf.com/kas-pre-cleaner/>. Luettu 12.10.2024.

Sonic Dry Clean 2025. SDC system. Luettavissa: <https://sonicdryclean.com/sdc-system/>. Luettu: 1.2.2025

Tameson 2025. Pulse jet solenoid valve-how do they work. Luettavissa: <https://tameson.com/pages/pulse-jet-solenoid-valves> Luettu: 5.11.2024

Valtra s.a. Yritystiedot. Luettavissa: <https://www.valtra.fi/tietoa-valtrasta/yritystiedot.html>. Luettu: 12.10.2024.

Walsh, G. & Spaite, P. 1962. *An Analysis of Mechanical Shaking in Air Filtration*. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 12(2), s. 57–61. Luettavissa: doi: 10.1080/00022470.1962.10468047. Luettu: 14.12.2024

LIITTEET

Liite 1 Testauspölyjen hinnastot ja saatavuudet

Liite 2 Moottorin ilmamäärät

Liite 3 Valintataulukon pisteytys

Liite 4 Valintataulukon perustelut

Luovutettu toimeksiantajalle

Luovutettu toimeksiantajalle

Luovutettu toimeksiantajalle

Luovutettu toimeksiantajalle