

Oskari Lindroos

**POLTTOMOOTTOREIDEN TOIMINTA
SEKÄ KEINOT
KASVIHUONEPÄÄSTÖJEN
VÄHENTÄMISEEN**

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tekniikan kandidaatintyö
Joulukuu 2022

TIIVISTELMÄ

Oskari Lindroos: Polttomoottoreiden toiminta sekä keinot kasvihuonepäästöjen vähentämiseen

Tekniikan kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Materiaalitekniikka

Marraskuu 2022

Työssä tutustutaan polttomoottorin toimintaan ja selvitetään keinoja päästöjen vähentämiseen materiaalivalintojen osalta. Kasvihuonepäästöt aiheuttavat ilmaston lämpenemistä, joten ne tulisi saada mahdollisimman vähäisiksi. Polttomoottorit ovat vielä pitkään autojen pääasiallinen voimanlähde. Työn ensimmäisessä osiossa selvitetään lyhyesti polttomoottorin toiminta ja keskeisimmät osat. Polttomoottorit ovat pääsääntöisesti nelitahtisia. Ainoastaan pienissä työkoneissa saatetaan käyttää vielä kaksitahtimoottoreita. Nelitahtimoottorit ovat päästöiltään pienempiä kuin kaksitahtimoottorit.

Seuraavassa osiossa selvitetään kahden eri ahdintyyppin toimintaperiaate. Sen jälkeen työssä tutkitaan, että voidaanko ahtimissa käyttää eri materiaaleja päästöjen vähentämiseksi ja käyttöiän pidentämiseksi. Mekaaninen ahdin ottaa voimansa moottorin kampiakselilta. Tutkimuksia vaihtoehtoista materiaaleista mekaanisiin ahtimiin ei löytynyt, joten työssä selvitetään erityylisten mekaanisten ahtimien toimintaperiaatteet. Turboahdinten turbiinipyöriin löytyi vaihtoehtoisia materiaaleja. Nykyään turbiinipyörät ovat valmistettu pääasiassa nikkeliin pohjautuvista superseoksista, koska niillä on hyvä virumiskestävyys, korroosionkestävyys sekä lämpötilan kestävyys. Vaihtoehtoisesti turbiinipyörä voitaisiin valmistaa titaani-alumiini seoksesta, koska myös niiden ominaisuudet turbiinipyörään ovat hyvät, mutta niiden tiheys olisi vain puolet verrattuna nikkeliin perustuvasta seoksesta tehtyyn turbiinipyörään. Sekä nikkeliin että titaani-alumiiniin pohjautuvat turbiinipyörät voidaan valmistaa valamalla esimerkiksi metalli-injektiovalulla. Keraamista valmistettua turbiinipyörää on tutkittu. Piinitridistä voidaan valmistaa turbiinipyörä käyttämällä muunneltua tarkkuusvalua ja kahta kipsimuottia. Piinitridin lämmönsieto, korroosionkestävyys ja virumisen kestävyys ovat hyvät, mutta niissä ongelmana ovat säröjen syntyminen ja kasvaminen.

Seuraavaksi käsitellään katalysaattoreiden kehittämistä. Katalysaattorien tehtävänä on muuntaa pakokaasuissa esiintyvät päästöt vähemmän haitallisiksi. Häkä hapetetaan hiilidioksidiksi. Hiilivedyt hapetetaan hiilidioksidiksi ja vedeksi. Typen oksidit pelkistetään typpikaasuksi. Tutkimuksessa selvisi, että katalysaattorin kennon rakennetta muuttamalla voidaan saavuttaa tehokkaammat katalyysireaktiot suuremman reaktiopinta-alan avulla. Tutkimuksessa selvitettiin jalometallien korvaamista muilla materiaalivaihtoehdoilla. Kuparioksidi voisi korvata jalometallit katalysaattorissa. Kuparioksidin pitkäaikaiskestävyydestä tarvitaan kuitenkin lisää tutkimuksia.

Lopuksi tarkastellaan keinoja kitkan vähentämiseksi moottorin sylintereissä. Pinnoittamalla voitaisiin saavuttaa parempi kulumisen kestävyys ja pienempi kitka. Timantin kaltainen hiili, diamond-like carbon (DLC), voisi sopia pinnoitemateriaaliksi sylinterin pintaan. DLC-pinnoitetta tutkittiin moottoripyörän moottorissa. Pinnoitus saatiin aikaiseksi käyttämällä plasmalla tehostettua fysikaalista kaasufaasipinnoitusta hyödyntävää Flexicoat 850 - järjestelmää. Tutkimuksessa selvisi, että DLC-pinnoitetussa moottoripyörän moottorissa tehoa saatiin 5,8 % enemmän kuin pinnoittamattomasta moottorista. Lisäksi DLC-pinnoitetulla moottorilla kierroslukua saatiin 1000 kierrosta minuutissa enemmän.

Avainsanat: Polttomoottori, turboahdin, katalysaattori, jalometalli, kuparioksidi, timantin kaltainen hiili.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. POLTTOMOOTTORIN TOIMINTA	2
3. AHTIMIEN TOIMINTAMEKANISMI SEKÄ SAAVUTETTAVA HYÖTY	4
3.1 Turboahdin	4
3.2 Mekaaninen ahdin	8
4. KATALYSAATTORIEN TOIMINTA JA KEHITTÄMINEN	11
4.1 Kennon rakenteen parantaminen	12
4.2 Jalometallien korvaaminen	13
5. KITKAN VÄHENTÄMINEN	16
5.1 Sylinterin pinnoittaminen	16
5.2 Sylinterin hiominen	17
6. YHTEENVETO	18
LÄHTEET	19

LYHENTEET JA MERKINNÄT

DLC	diamond-like carbon, timantin kaltainen hiili
ICE	internal combustion engine
MIV	metalli-injektiovalu
MTV	muunneltu tarkkuusvalu
HIP	kuuma isostaattinen puristus, hot isostatic pressing
MLV	muunneltu liukuvalu
PCM	phase change material
FKFP	fysikaalinen kaasufaasipinnoitus
TDC	top dead center

1. JOHDANTO

Polttomoottorit ovat olleet ja tulevat olemaan vielä pitkään moottoriajoneuvojen pääasiallinen, tai vähintäänkin toissijainen, voimanlähde, erityisesti kylmissä olosuhteissa huolimatta sähkö- ja vetyautojen kiihtyvästä kehityksestä. Tässä työssä tutkitaan keinoja, joilla voidaan vähentää polttomoottoreiden kasvihuonepäästöjä, sekä selvitetään vaihtoehtoisia materiaaleja moottorin osiin. Tavoitteenani on selvittää vaihtoehdot, joilla moottorin osien valmistuskustannukset ovat kohtuulliset tai mahdollisesti pienemmät perinteisiin verrattuna.

Työni alussa kerron lyhyesti polttomoottoreiden toimintaperiaatteen sekä moottorin keskeiset osat. Seuraavaksi luvussa 3 esittelen lyhyesti turbo- ja mekaanisten ahtimien toimintaperiaatteet. Sen jälkeen keskityn tutkimaan vaihtoehtoisia materiaaleja turboahtimien turbiinisiivekkeisiin. Tarkoituksena on tutkia, voisiko perinteiset materiaalit korvata toisenlaisilla tai uudemmilla materiaaleilla, joiden ominaisuudet, massa, tiheys, kitka sekä kestävyys olisivat alhaisemmat ja paremmat kuin perinteisillä materiaaleilla, jotta vähentyneet päästöt ja parempi kestävyys saavutettaisiin.

Luvussa 4 esittelen katalysaattorin toimintaperiaatteen lyhyesti ja selvitan, voisiko katalysaattoreissa nykyisin käytettävät arvokkaat jalometallit, kuten platina ja palladium, korvata vaihtoehtoisella halvemmalla materiaalilla. Tavoitteena on tehdä katalysaattoreista edullisempia, jotta arvokkaat ja harvinaiset jalometallit voitaisiin hyödyntää muissa kohteissa ja täten välttää katalysaattoreiden varkauksia. Selvitan myös sen, toteutuisiko päästöjen vähentäminen vaihtoehtoisilla materiaaleilla. Tavoite saavutettaisiin myös jo sillä, että päästöt pysyisivät samoina kuin nykyisillä jalometalleilla, jos niiden kustannus olisi selvästi alhaisempi.

Luvussa 5 tutkin, millä keinoilla moottorin liikkuvien osien välistä kitkaa voitaisiin vähentää sylinterin ja männän välisellä hankauspinnalla. Keskityn selvittämään, millä materiaalilla ja pinnoitustekniikalla kitkaa voitaisiin vähentää. Hiomistekniikkoja hyödyntäen yhdessä pinnoittamisella voidaan kitkaa saada vähennettyä.

Työssäni pääpainona on keskittyä materiaalitekniikan näkökohtiin, ja työn aihe on kokonaisuudessaan hyvin laaja, joten joudun tiivistämään monia kohtia.

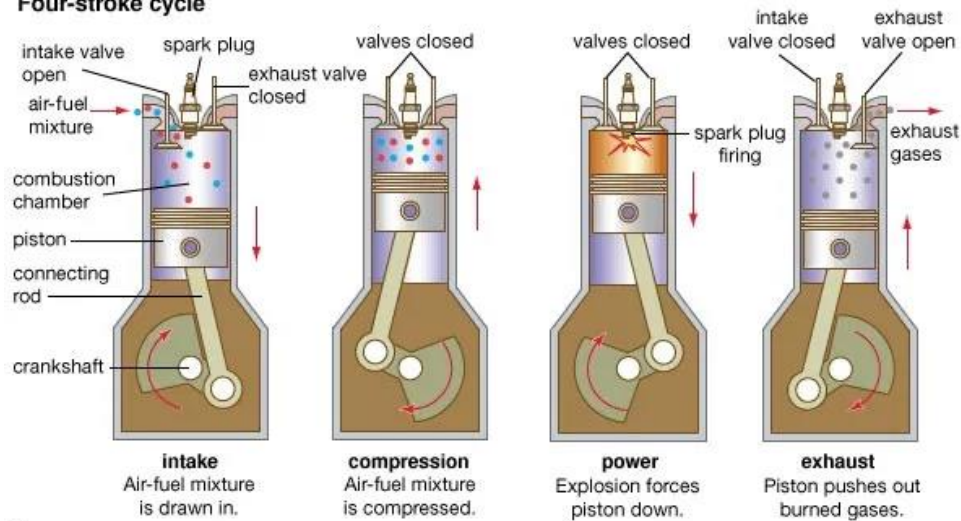
2. POLTTOMOOTTORIN TOIMINTA

Polttomoottori, eli Internal combustion engine (ICE), on lämpövoimakone, jossa lämpöä muutetaan mekaaniseksi liike-energiaksi. Polttomoottoreita ovat sekä mäntämoottorit että kaasuturbiinit. Peruseriaate kaikissa polttomoottoreissa on saada polttoaineen palaessa syntyvän lämpölaajenemisen avulla moottori liikuttamaan tiettyä pääakselia, josta liike-energia siirretään kohteeseensa; esimerkiksi ajoneuvoissa kytkimen ja vaihteiston kautta renkaille.

Mäntämoottori on ajoneuvoissa yleisin polttomoottori, johon aion tässä tutkimuksessani keskittyä. Mäntämoottoreita on kahta erilaista päätyyppiä, nelitahtimoottori ja kaksitahtimoottori. Nelitahtimoottori on nykyään lähes poikkeuksetta korvannut kaksitahtimoottorit ajoneuvoissa, mutta esimerkiksi mopoissa, veneiden perämoottoreissa, moottorisahoissa ja muissa vastaavissa pienkoneissa kaksitahtimoottoria käytetään edelleen sen keveyden ja yksinkertaisuutensa ansiosta. Kaksitahtimoottori kuluttaa enemmän polttoainetta kuin vastaavan kokoinen nelitahtimoottori. Toisaalta verratessa saman iskutilavuuden omaavaa kaksi- ja nelitahtimoottoria, on kaksitahtimoottori kevyempi ja tehokkaampi kuin vastaavan iskutilavuuden omaava nelitahtimoottori.

Nelitahtimoottori voi käyttää polttoaineenaan bensiiniä, dieselöljyä, etanolia, kaasua tai biodieseliä ja biokaasua. Nelitahtimoottorit jaetaankin polttoaineensa mukaan kahteen luokkaan; dieselmootoreihin ja bensiinimoottoreihin. Ne ovat molemmat mäntämoottoreita, mutta toiminta ja rakenne poikkeavat hieman toisistaan. Bensiinimoottorissa polttoaineen ja ilman seos sytytetään kipinällä ja dieselissä polttoaine ruiskutetaan suurella paineella sylinteriin juuri ennen kuin mäntä on ylimmässä mahdollisessa kohdassaan, top dead center (TDC), maksimipuristuksen aikaansaamiseksi. (Encyclopædia Britannica, Inc. 2022)

Four-stroke cycle

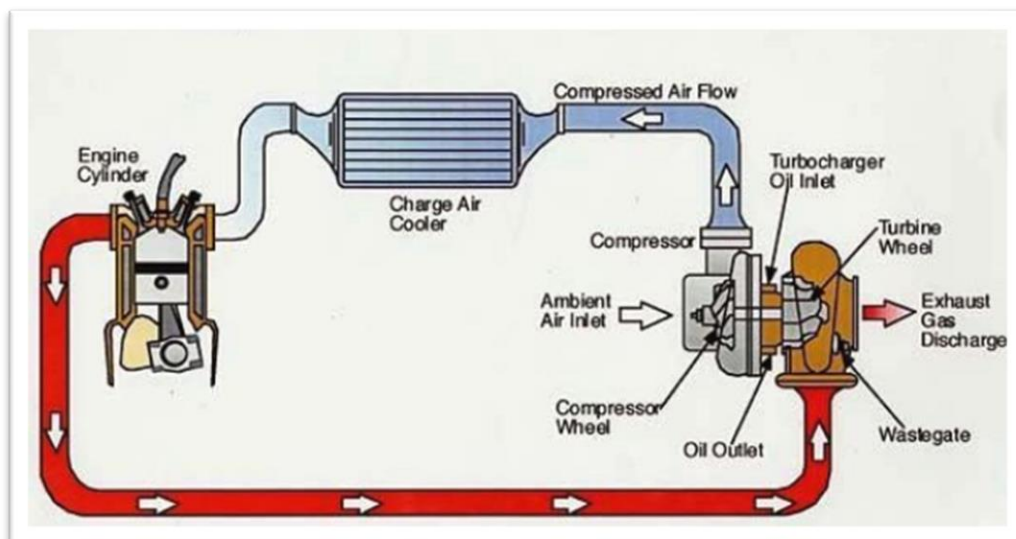


Kuva 1. Nelitahtimoottorin toimintaperiaate. (Encyclopædia Britannica, Inc. 2022)

3. AHTIMIEN TOIMINTAMEKANISMI SEKÄ SAAVUTETTAVA HYÖTY

3.1 Turboahdin

Turboahdin on mekaaninen laite, joka ahtaa ilmaa, eli myös palamiseen tarvittavaa happea, moottorin sylintereihin mahdollistaen suuremman polttoainemäärän puhtaan palamisen, mikä lisää myös moottorin suorituskykyä. Käytännössä moottorista saadaan turboahdinten avulla enemmän tehoa sekä vääntöä kuin vastaavan kokoisesta ahtamattomasta eli vapaasti hengittävästä moottorista. Sen ansiosta oikealla ajotavalla moottorin kulutus sekä päästöt vähentyvät, koska sama voima saadaan aikaiseksi pienemmällä kierrosnopeudella. Pienemmällä kierrosnopeudella moottoriin syötetyn polttoaineen määrä on alhaisempi samassa ajassa kuin suuremmilla kierrosnopeuksilla. Moottorin kierrosnopeutta ei kuitenkaan voi laskea loputtomasti turboahdintenkaan avulla, koska moottori rasittuu alikierroksilla riittämättömällä väännöllä ja turboahdinten saama voima aiheutuu suoraan pakokaasuvirtauksen aiheuttamasta paineesta. Lisäksi turboahdinten ominaisuutena on niin sanottu turboviive, joka tarkoittaa, että turbo alkaa ahtamaan ilmaa moottoriin kunnolla vasta tietyn kierrosluvun eli käytännössä tietyn pakokaasupaineen jälkeen. Tämän takia, erityisesti isoissa turboissa, tämä heikentää moottorin hyötysuhdetta alhaisilla kierroksilla ajettaessa. Moniin autoihin asennetaan siksi pienempi turbo alhaisemmille kierrosluville ja isompi turbo korkeammille kierroksille eli niin kutsuttu twin turbo. (Wen et al. 2018)



Kuva 2. Turboahtimen toimintakaavio. Samantyylinen kaavio pätee myös mekaaniselle ahtimelle ilman turbiinipyörää sekä sen kammiota, ja lisäksi kompressorille tulisi hihna kampiakselista. (Energy.gov. 2013)

Kuvasta 2 nähdään turboahtimen toimintakaavio. Turboahdin koostuu yksinkertaisimmillaan pako- ja kompressoriturbiineista, jotka ovat omissa koteloissaan ja kiinnitettyinä toisiinsa yhtenäisellä akselilla. Akseli on kiinnitetty laakereilla kiinni turbon runkoon. Myös voiteluöljy sekä mahdollinen neste- ja välijäähdytin on integroitu osaksi turboahdinta. Hukkaventtiilien avulla voidaan säätää turboahtimen aikaansaamaa painetta sekä imu- että pakupuolella, jottei moottori tai turboahdin vaurioituisi ylipaineesta. Turboahdin vaatii kuitenkin melko paljon tilaa, joten suunniteltaessa moottoria turboahtimen vaatima tila sekä sen muotoilu on syytä selvittää perusteellisesti ennen valmistamista. (Turbotekniikka Oy 2022)

Turboahdin saa voimansa, muutoin hukkaan menevästä, pakokaasujen virtauksen aiheuttamasta paineesta. Pakokaasuvirtaus pyörittää turboahtimen pakoturbiinia, joka on asennettu pakosarjan ja äänenvaimentimen väliin. Pakoturbiini on kytketty akselilla kompressoriturbiiniin, joka ahtaa ilmaa moottorin imusarjan kautta sylintereihin yleisesti välijäähdyttimen kautta. Välijäähdyttimen avulla moottoriin imetyn ilman lämpötilaa lasketaan, koska ahdettaessa ilmaa sen lämpötila nousee paineen kasvaessa. Välijäähdyttimen toimintaperiaate on samantyylinen kuin moottorin jäähdyttimen toiminta: yksinkertaisimmillaan sisältäen jäähdytysnesteen, pumpun ja lauhduttimen yhdistettynä putkilla toisiinsa. Jäätyessä ilman tiheys pienenee, joten moottoriin saadaan enemmän happea. Turboahtimen voitelu saadaan liittämällä turboahdin moottorin voitelujärjestelmään. Turboahdin voidellaan yleisesti

paineistetun voiteluöljyn avulla, jotta kitka ja kuluminen olisi pienimmillään. Nykypäivinä uusimmat turboahtimet ovat pääsääntöisesti nestejäähdytteisiä, minkä takia myös moottorin jäähdytysjärjestelmä on liitetty turboahtimeen. (Turbotekniikka Oy 2022)

Turboahdin kuumentuu erityisesti pakoturbiinin puolelta, toisin kuin mekaaninen ahdin, jossa sellaista ei ole, joten turboahdinta suunniteltaessa on huomioitava sopivat lämmönkestävät materiaalit pakokammiolle ja turbiinille. Erityisesti virumiskestävyys on oltava hyvä pitkän käyttöiän kannalta. (Turbotekniikka Oy 2022)

Turboahdinten turbiinipyörät valmistetaan nykyään pääsääntöisesti nikkeliin pohjautuvista superseoksista. Nikkeliin pohjautuvilla superseoksilla on erityisen hyvä virumisvastus, hapettumisen kestävyys, korroosion kestävyys ja murtolujuus. Niiden lämpötilan sietokyky on hyvä ja suurin käyttölämpötila on luokkaa 1 200 °C. Myös huoneenlämmössä ominaisuudet nikkeliin pohjautuvilla superseoksilla ovat riittävät, mikä pitää huomioida uusia materiaaleja kehitettäessä turboahdinten turbiiniksi, koska käynnistettäessä moottoria lämpötila on hetken aikaa alhaisempi ennen moottorin lämpiämistä. (Mali & Unune 2017)

Tutkimuksen (Liu et al. 2021) mukaan turbiinipyörät voitaisiin mahdollisesti tulevaisuudessa valmistaa titaani-alumiini (Ti-Al) -seoksiin perustuvalla metalliseoksella. Tämän Ti-Al-seoksen ansiosta turbiinipyörän kokonaismassa vähentyisi Liun et al. (2017) tutkimuksen mukaan noin 40–50 %. Nikkeliin pohjautuvien superseosten tiheys on korkeampi, noin 8,0 g/cm³, kuin Ti-Al-seosten tiheyden ollessa noin 3,9 g/cm³ (Wen et al. 2018). Vähentynyt kokonaismassa mahdollistaisi herkemmän reagoitokyvyn pakokaasuvirran kiihtyvyyden muutoksille ja täten vähentää energiankulutusta, päästöjä sekä turboviivettä. Korkean lämpötilan kestävästä materiaaleista nimenomaan Ti-Al-seokset ovat herättäneet kiinnostusta tutkijoissa niiden matalan tiheyden, suuren ominaislujuuden, erinomaisen hapetuksen kestävyuden ja virumisvastuksen ansiosta (Liu et al. 2021). Kaikki edellä mainitut ominaisuudet ovat tärkeässä asemassa turboahdinten turbiinisiivekkeitä suunniteltaessa. Tämän takia Ti-Al-seokset voisivat tulevaisuudessa korvata nikkeliin perustuvat seokset turbiinipyörän materiaalina.

Nykyään valaminen on pääasiallinen valmistusmenetelmä turbiinipyörälle. Tutkimuksessaan Kawasaki Heavy Industries, Ltd., Daido Steel Ltd., Mitsubishi Heavy Industries, Air Force Research Laboratory (AFPL) and General Electric Company (GE) olivat onnistuneesti valmistaneet turbiinipyörän Ti-Al-seoksesta valamalla. Niiden huomattiin kuitenkin kärsivän huonoista mekaanisista ominaisuuksista niiden epähomogeenisen mikrorakenteen vuoksi. Lisäksi valmistuskustannukset ovat korkeat materiaalin vähäisen käytön vuoksi, mikä toistaiseksi rajoittaa niiden käyttöä turboahtimia suunniteltaessa. Siitä syystä lisätutkimuksia tarvitaan

monimutkaisen muotoisten, halvan valmistuskustannusten ja hyvän suorituskyvyn omaavien Ti-Al-seoksisten turbiinipyörien suunnittelussa. (Mali & Unune 2017)

Metalli-injektiovalu (MIV) mahdollistaa monimutkaisten muotoisten metalliseokkappaleiden valmistamisen, kuten esimerkiksi Ti-Al- ja nikkeliin pohjautuvat superseokset voidaan valmistaa MIV-tekniikalla. MIV on lähes verkonmuotoisen mikrorakenteen sekä tehokkaamman materiaalin käytön mahdollistava teknologia, jolla saadaan tehokkaampi kemiallinen homogeenisyys ja yhtenäisempi mikrorakenne. Kyseisessä tekniikassa yhdistetään jauhemetallurgia muovin ruiskuvalutekniikkaan. Se on erityisen sopiva menetelmä monimutkaisten muotoisten ja pienen koon, luokkaa 100 mm, omaavien kappaleiden tuotantoon, koska sen avulla saavutetaan merkittävä suunnittelun vapaus. (Mali & Unune 2017; Liu et al. 2021)

Turboahdinten turbiinipyörä voidaan mahdollisesti valmistaa myös keraamisista materiaaleista, joilla on tunnetusti korkea sulamispiste sekä erinomainen korkean lämpötilan kesto. Lisäksi keraamit ovat kemiallisesti inerttejä. Viruminen on keraameissa vähäisempää kuin metalleilla, koska keraameilla on voimakkaammat atomienväliset sidokset. Verrattuna metalleihin keraamit ovat hauraita. Vetämisenkestävyys keraameilla on yleensä huono, mutta sen sijaan keraameilla on hyvä puristuskestävyys.

Yksi vaihtoehtoinen materiaali turbiinipyörälle olisi piinitridi (Si_3N_4). Se on todella kovaa, Moshin kovuusasteikossa arvolla 8,5, ja stabiili korkeissa lämpötiloissa (López-Suárez et al. 2009). Turboahdinten turbiinipyörä toimii korkeassa lämpötilassa ja korkeassa paineessa pakosarjassa pakokaasuvirtojen takia, joten hyvä korroosionkestävyys on välttämätön turbiinipyörälle. Kun vertaa metalliseoksiin, omaavat keraamiset materiaalit, mukaan lukien Si_3N_4 , yleensä paremman korroosionkestävyyden korkeissa lämpötiloissa. Kevyet kiderakenteiset keraamit ovat saaneet huomiota ja niitä on alettu tutkimaan korkean lämpötilan sovelluksiin, kuten turboahdinten turbiinipyöräksi, korvatakseen raskaammat metalliseokset. Juurikin matalan tiheydensä, korkean ominaislujuutensa, korkean Youngin moduulin ja erinomaisen korkeiden lämpötilojen hapettumisen sietokykynsä ansiosta ovat keraamiset materiaalit mielenkiintoinen ja sopiva vaihtoehto korvaamaan nikkelipohjaiset superseokset turbiinipyörissä. Si_3N_4 on yksi laajalti käytetty rakenteellinen keraami sen korkean kimmomoduulin, korkean veto- ja puristuslujuuden ja erinomaisen hapettumis- ja korroosionkestävyyden ansiosta korkeissa lämpötiloissa. Toisaalta ohuet seinät turboahdinten pakokammiossa ja monimutkaiset muodot rajoittavat sen käytännöllisyyttä ja potentiaalia sovellettaessa keraamisia materiaaleja tähän tarkoitukseen. (Wen et al. 2018)

Keraamisia kappaleita valmistettaessa haasteena on niiden korkeat sulamislämpötilat. Tämän takia monesti käytetään tyhjiösintrausta keraamisia kappaleita valmistettaessa, koska sintratessa

materiaalin ei tarvitse sulaa. Sintratessa raaka-aineena käytetty jauhemateriaali kiinnittyy yhteen diffuusion avulla. Turbiinipyörää valmistettaessa keraamista kuumapuristus sintraus ei kuitenkaan ole toimiva valmistusmenetelmä, koska sintratessa materiaaliin jää paljon huokosia, joihin syntyy helposti säröjä kovassa rasituksessa ja säröt suurenevat sekä leviävät ja lopulta hajottavat turbiinipyörän. Tutkimuksessa (Wen et al. 2018) valmistettiin turbiinipyöriä käyttäen muunneltua tarkkuusvalua (MTV) ja kuumaa isostaattista puristusta (HIP). Tässä menetelmässä käytettiin kahdenlaista moniosaista keraamista muottia. Toista kipsimuottia käytettiin muodon antamiseen imemällä kosteus pois keraamimassasta. Edellä mainittu menetelmä tunnetaan nimellä muunneltu liukuvalukäsittely (MLV). Perinteinen liukuvalu ja geelivalu eivät sovellu tähän valmistukseen, koska valmistettava turbiinipyörä on pehmeämpi ja heikompi kuin muotti. Toista keraamista muottia käytetään estämään valmistettavan keraamisen kappaleen kutistuminen ja vääristyminen. Keraamista turboahtimen turbiinipyörää valmistettaessa kyseisillä komposiittikäsittelyillä saadaan useita etuja materiaalin ominaisuuksiin, kuten hyvä pinnanlaatu, hyvä mittatarkkuus, parempi kulutuskestävyys, korkeampi korroosionkestävyys, suurempi kovuus, parempi väsymiskestävyys ja parempi virumislujuus.

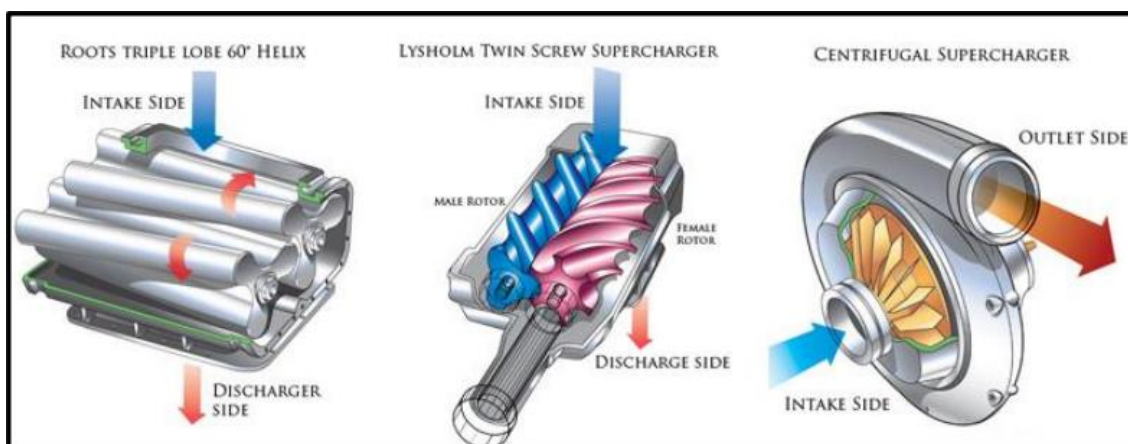
Tutkimuksessa tutkittiin piinitridisen turbiinipyörän ominaisuuksia käyttäen MTV+MLV+HIP - komposiittivalmistustekniikkaa saavutettujen materiaaliominaisuuksien sekä alhaisten kustannusten ja ympäristöystävällisyyden vuoksi. Valmistusprosessissa käytettiin sintrauksessa yleisesti käytettyjä lisäaineita Y_2O_3 ja Al_2O_3 . Koe- ja simulaatiotulosten perusteella kriittinen käyttölämpötila oli 700 °C ja kriittinen pyörimisnopeus oli $100\ 000\text{ r/min}$. Liian suurilla pyörimisnopeuksilla keraamiseen turbiinipyörään syntyy huokosia lämpölaajenemisen sekä keskipakoisvoiman takia. Syntyneet huokokset johtavat lopulta siihen, että mikrorakenteeseen syntyy säröjä, jotka suurenevat ja johtavat lopulta turbiinipyörän hajoamiseen. Johtuen faasimuutoksista ja kemiallisista reaktioista, yllämpötila saa aikaan rajapinnan halkeilua ja sidosten irtoamista, sekä taivutuslujuuden ja murtolujuuden heikentymistä. (Wen et al. 2018)

3.2 Mekaaninen ahdin

Mekaaninen ahdin, eli remmiahdin, on mekaaninen laite, joka ahtaa ilmaa moottoriin imusarjan kautta. Se saa käyttövoimansa kampiakselissa olevalta vetopyörältä, joka pyörittää remmiahtimen omaa rullaa saaden ahtimen ahtaamaan ilmaa moottoriin. Roottoreiden pyörimisnopeutta säätelemällä saadaan aikaiseksi haluttu ahtopaine. Roottorin pyörimisnopeus on verrannollinen moottorin pyörimisnopeuteen. Roottoreiden pyörimisnopeus voidaan määrittää

käyttämällä tarvittavan kokoisia rullia ahtimessa sekä kampiakselissa. Mitä pienempi rulla ahtimessa on, sitä suurempi on sen kierrosnopeus. Kampiakselin rullan halkaisijaa kasvatettaessa saadaan suurempi pyörimisnopeus ahtimeen. Ahtimen pyörimisnopeutta ei kuitenkaan voi kasvattaa liikaa, koska muutoin liian suuri ahtopaine jarruttaa moottoria ja voi vaurioittaa sitä. Mekaaninen ahdin sopii erityisesti pienempiin moottoreihin, joissa pakokaasuvirtaus ei ole kovin suuri.

Mekaanisen ahtimen etuna on viiveetön reagointi heti alhaisilta kierroksilta asti. Toisaalta mekaaninen ahdin kuluttaa jonkin verran energiaa moottorilta toisin kuin turboahdin, joka ottaa käyttövoimansa muutoin hukkaan menevältä pakokaasuvirralla. Kuitenkin remmiahtimen avulla saatu tehonlisäys ja erityisesti alaväännön lisäys voivat mahdollistaa pienemmän polttoaineen kulutuksen kuin samankokoisella ahtamattomalla moottorilla, koska lisääntynyt alavääntö mahdollistaa ajamisen alemmilla kierrosluvuilla. Mekaanisen ahtimen yhteydessä on käytössä lähes aina välijäähdytin, joka viilentää moottorin sisään tulevan ilman tehden siitä tiheämpää antaen moottorille enemmän happea, jolloin voidaan polttaa enemmän polttoainetta puhtaasti ja lisätä moottorin suorituskykyä. Mekaanisessa ahtimessa hyvänä puolena on myös se, että se ei kuumene paljoakaan toisin kuin turboahdin. Siten, sen käyttöikä voisi olla pidempi ja lisäksi vaatisi vähemmän huoltoa. (Vivek Sah. 2018)



Kuva 3. Kolme mekaanisten ahdinten päätyyppiä. (Mahmoudi 2015)

Mekaanisesta ahtimesta on kehitetty kolme erilaista päätyyppiä, jotka nähdään kuvassa 3. Roots supercharger eli Roots tyyppinen mekaaninen ahdin nähdään kuvassa 3 vasemmalla. Se sisältää kaksi vastakkaisiin suuntiin pyörivää roottoria. Roottorit ahtavat ilman moottoriin siivekkeiden onkaloissaan kotelon ulkoseinien puolelta vapauttaen ilman moottorin imusarjaan. Siivekkeiden tullessa ylöspäin hakemaan lisää ilmaa siivekkeet menevät toistensa sisään, ikään

kuin rattaat pyöriessään, eikä ilmaa pääse pakenemaan ulos. Roots tyyppin etuina on se, että se voi tuottaa suuria ahtopaineita jo pienillä kierrosluvuilla tehden siitä sopivan esimerkiksi 4-6 sylinterisiin moottoreihin, jotka toimivat yleensä huonosti alhaisilla kierrosluvuilla. (Breckenridge et al. 2020)

Twin-screw supercharger eli kaksoisruuvi mekaaninen ahdin nähdään kuvassa 3 keskellä. Se sisältää kaksi ruuvia, jotka pyörivät vastakkain. Naaras ruuvi ottaa ilman loveensa ja uros ruuvi pakottaa ilman kulkemaan ruuvien läpi alas moottorille. Tämä tyyli kuluttaa vähemmän energiaa moottorilta sekä kuumentaa vähemmän ilmaa kuin Roots tyyppi, vaikka toimintamekanismi näillä molemmilla on melko saman tyylinen. (Breckenridge et al. 2020)

Centrifugal supercharger eli keskipakoisremmiahdin on ikään kuin turboahtimen ilmaa moottoriin ahtaava laite, mutta saa voimansa kampiakselilta. Roottori pyörii nopeasti tuottaen nopean ilmavirtauksen alhaisella paineella. Ahdettu ilma kulkee diffuuserin läpi ennen kuin ilma kulkeutuu moottoriin. Tämä ahdintyyppi voisi sopia esimerkiksi moottoripyöriin, koska se vie vähän tilaa ja toimii hyvin korkeilla kierrosluvuilla. (Breckenridge et al. 2020)

Mekaanisten ahtimien kehittämisestä materiaalitekniikan osalta ei löytynyt lähdemateriaalia. Syynä voi olla, että turboahtimet ovat nykyään pääasiallisin ahdin. Lisätutkimuksia tarvitaan mekaanisten ahtimien kehittämiseksi.

4. KATALYSAATTORIEN TOIMINTA JA KEHITTÄMINEN

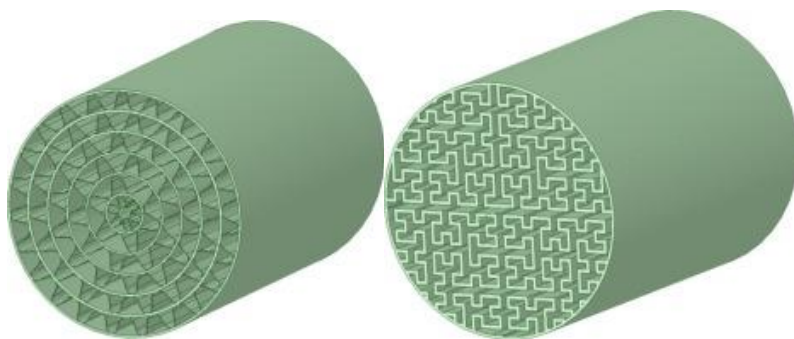
Katalysaattori on autojen pakoputkistossa oleva laite, joka hyödyntää katalyysiä pakokaasujen puhdistamisessa. Teräspellistä valmistetun ulkokuoren sisällä on tiheä keraaminen kennomainen rakenne, joka mahdollistaa mahdollisimman suuren pinta-alan, jotta nopeasti virtaavasta pakokaasusta ehtisi reagoimaan kaikki haitalliset yhdisteet vähemmän haitallisiksi katalysaattorin katalyysireaktioissa. Keraaminen kenno on pinnoitettu ohuella jalometallisella kerroksella, joka on tyypillisesti joko platinaa, palladiumia tai rodiumia.

Bensiinimoottoreissa käytetään kolmitoimikatalysaattoria. Pakokaasut puhdistuvat kolmella tavalla. Hiilimonoksidi (CO) eli häkä hapettuu hiilidioksidiksi (CO₂). Palamattomat hiilivedyt hapettuvat hiilidioksidiksi ja vedeksi (H₂O). Typen oksidit (NO_x) pelkistyvät typpikaasuksi (N₂). (Manojkumar et al. 2021)

Dieselmootoreissa käytetään kaksitoimikatalysaattoria, koska dieselmoottori toimii ilmaylimäärällä, joten typen oksidien pelkistäminen ei ole mahdollista. Dieselmoottorin kaksitoimikatalysaattori hapettaa hiilimonoksidin ja palamattomat hiilivedyt samoin kuten kolmitoimikatalysaattori (Manojkumar et al. 2021). Typen oksidien pelkistämiseksi typpikaasuksi on käytettävä muita ratkaisuja. Yksi nykyään käytetty ratkaisu on käyttää ureaa, jolle pitää olla oma säiliönsä. Urean ja veden liuos suihkutetaan pakoputken sisälle ennen katalysaattoria. Pakokaasun lämmön vaikutuksesta urea hajoaa ammoniakiksi NH₃ ja vedeksi. Katalysaattorissa ammoniakki reagoi typen oksidien kanssa, jossa ne pelkistyvät typpikaasuksi ja vesihöyryksi. Vaikka ratkaisu on toimiva, se on silti epäkäytännöllinen henkilöautoissa, koska ureasäiliö vaatisi tilaa, ja se olisi täytettävä säännöllisesti. Urean suihkuttaminen kuitenkin toimii typen oksidien vähentämisessä, joten sen käyttäminen on kannattavaa dieselmootoreissa ennen kuin muita ratkaisuja löydetään.

4.1 Kennon rakenteen parantaminen

Tutkimuksessa (Sathish Sharma et al. 2022) suunniteltiin keinoja parantaa bensiinikäyttöisen auton katalysaattorin kennorakennetta tehokkaammaksi. Tutkimuksessa kehitettiin uudenlainen kennorakenne, jossa on suurempi pinta-ala kuin perinteisessä katalysaattorissa. Suurempi pinta-ala mahdollistaa tehokkaamman katalyysireaktion perinteiseen katalysaattorin verrattuna. Kyseisessä tutkimuksessa selvitettiin myös keinoja päästöjen vähentämiseen käynnistettäessä moottoria kylmänä. Suurempi solutiheys mahdollistaisi tehokkaammat reaktiot.



Kuva 4. Vasemmalla perinteinen katalysaattori. Oikealla puolella uudenmallinen kennorakenne. (Sathish Sharma et al. 2022)

Kyseisessä tutkimuksessa havaittiin, että uuden kennorakenteen omaavan katalysaattorin katalyyttinen aktiivisuus oli perinteistä parempi. Häkä- ja hiilivetypäästöjen hapettuminen tehostui sekä samoin typen oksidien pelkistyminen. Uudella kennorakenteella saatiin 10,4 % suurempi pinta-ala ja 129 % suurempi kennotiheys perinteiseen verrattuna. Pakokaasujen virtaus saatiin tasaisemmaksi uudella kennolla. Tutkimuksessa käytettiin faasimuutosmateriaalia, Phase change material (PCM), jonka tarkoitus on tehostaa reaktioita sitomalla lämpöä. Kyseinen faasimuutosmateriaali sisälsi kaliumhydroksidia. Kyseisellä pinnoitteella saavutettiin alhaisemmat päästöt kylmällä katalysaattorilla. Kokonaisuudessaan uudenmallinen katalysaattori saavutti 17,39 % paremman reaktioaktiivisuuden. Pitkäaikaiskestävyyden osalta lisää tutkimuksia tarvitaan.

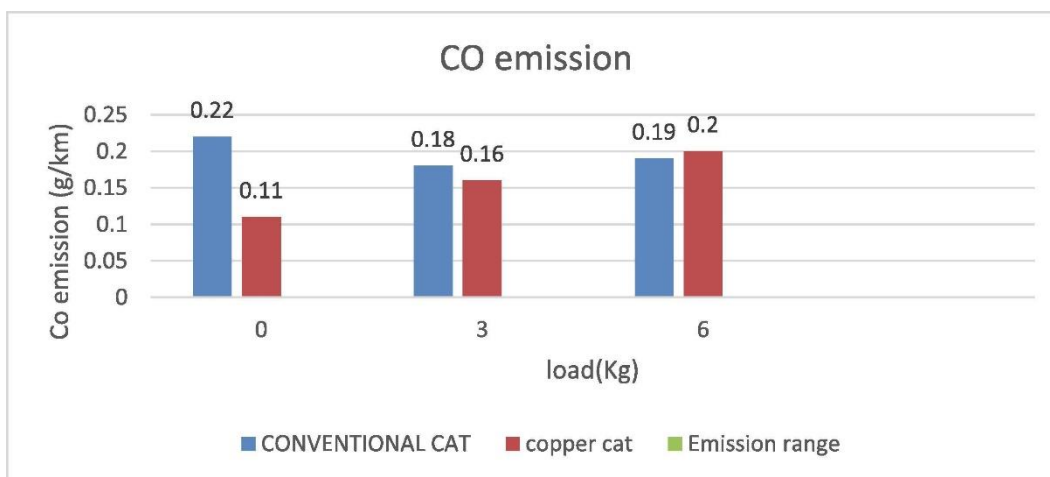
4.2 Jalometallien korvaaminen

Jalometallit ovat erittäin tehokkaita katalyyttejä pelkistysreaktioihin, kuten esimerkiksi pelkistämään tyydyttymättömät hiilivedyt sekä typen oksidit. Jalometallit ovat kuitenkin erittäin kalliita sekä harvinaisia, joten niiden korvaaminen muilla toimivilla vaihtoehdoilla olisi kannattavaa.

Tutkimuksessa (Manojkumar et al. 2021) selvitettiin jalometallien korvaamista kuparioksidilla katalyysireaktioiden aikaansaamiseksi auton katalysaattorissa. Hunajakennomainen katalysaattorin keraaminen kenno upotettiin laimean typpihapon ja kuparioksidijauheen suhteessa 1:1 muodostamaan liuokseen. Liuosta sekoitettiin, ja pinnoitteen annettiin muodostua 20 minuutin ajan. Sen jälkeen kennoa suihkutettiin paineilmalla ylimääräisen liuoksen poistamiseksi. Lopuksi kennon annettiin kuivua 48 tuntia. Kyseistä pinnoitustekniikkaa kutsutaan manuaaliseksi dispersiotekniikaksi.

Valmis kuparikenno kiinnitettiin katalysaattorin kuoren sisälle. Pakoputkisto ja kuparioksidi katalysaattori kiinnitettiin yksisynteriseen 661 cm³ dieselmoottoriin. Anturit kiinnitettiin pakoputkistoon katalysaattorin molemmiin puolin tulosten analysointia varten. Moottorissa käytettiin ureasäiliötä, ja urea suihkutettiin pakoputkistoon ennen katalysaattoria. Moottori oli yhdistetty pyörrevirtadynamometriin.

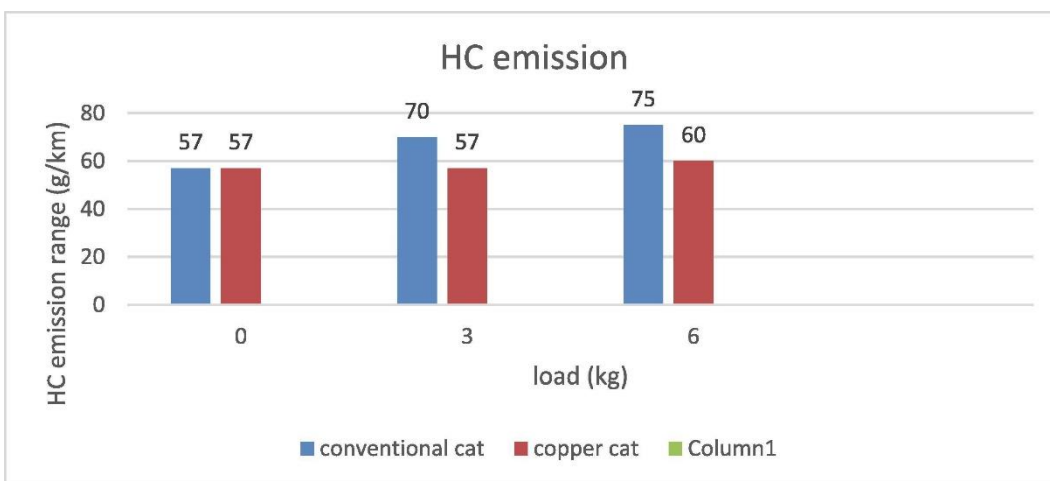
Koe suoritettiin kahdessa osassa. Ensiksi kokeessa käytettiin perinteistä jalometallilla pinnoitettua hunajakennomaista katalysaattoria. Seuraavassa vaiheessa samanlainen keraaminen kenno oli pinnoitettu kuparioksidilla, jolle koe suoritettiin.



Kuva 5. Katalysaattoreiden CO-päästöt. (Manojkumar et al. 2021)

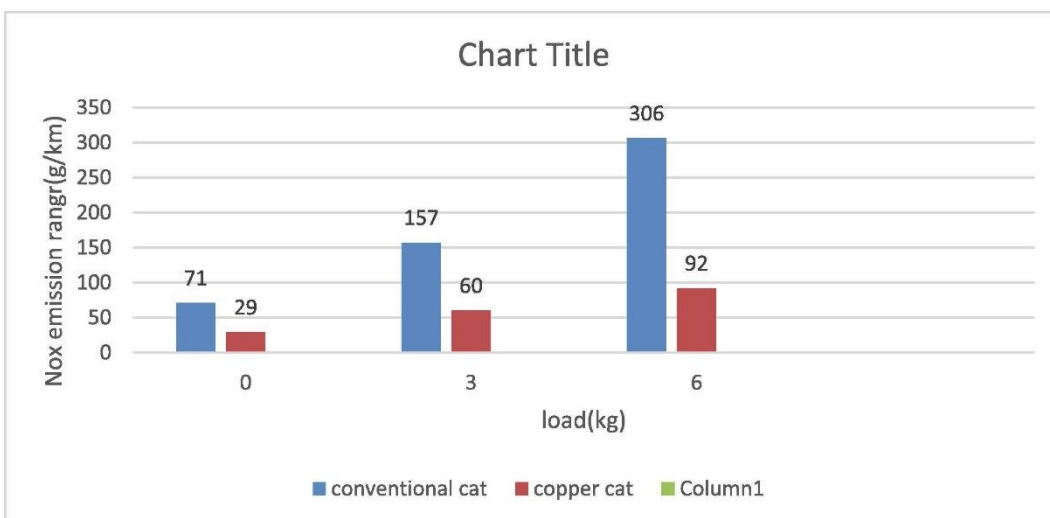
Kuvasta 5 nähdään, että tämän kokeen perusteella pienillä kuormituksilla kuparioksidikenno hapeuttaa hiilimonoksidin tehokkaammin hiilidioksidiksi kuin perinteinen katalysaattori. Suurilla

rasituksilla kaikki hiilimonoksidi ei ehdi hapettumaan niin tehokkaasti verrattuna pieneen rasitukseen. Tulosten perusteella kuparioksidi toimii CO-päästöjen katalysoimiseen.



Kuva 6. Katalysaattoreiden hiilivety päästöt. (Manojkumar et al. 2021)

Kuvan 6 perusteella hiilivety päästöt ovat tyhjäkäynnillä yhtä tehokkaat molemmilla katalysaattoreilla. Suuremmilla kuormituksilla kuparioksidia käyttävän katalysaattorin hiilivety päästöt ovat pienemmät kuin perinteisellä jalometallisella katalysaattorilla. Tämän kokeen perusteella kuparioksidi sopisi hyvin korvaamaan jalometallit hiilivety päästöjen hapettamiseksi hiilidioksidiksi ja vedeksi.



Kuva 7. Katalysaattoreiden typen oksidien päästöt. (Manojkumar et al. 2021)

Kuvan 7 perusteella kuparioksidi katalysaattori pelkistää jokaisella kuormituksella typen oksidit typpikaasuksi ja vedeksi selkeästi tehokkaammin kuin perinteinen katalysaattori. Huomioitavaa on, että kokeessa käytettiin ureaa. Ilmaylimäärällä toimiva dieselmoottori ei käytä kaikkea happea palamisessa, joten ympäröivä ilma voi vaikuttaa typen oksidien määrään. Tulosten perusteella kuparioksidi voisi korvata jalometallit ureaa käyttävässä dieselmoottorissa typen oksidien pelkistämiseksi. Kuparioksidisen katalysaattorin pitkäaikaiskestosta ei kuitenkaan löytynyt tietoa riittävästi, joten lisätutkimuksia tarvitaan asian selvittämiseksi.

5. KITKAN VÄHENTÄMINEN

Kitka tarkoittaa kahden pinnan välistä vastustavaa voimaa niiden hangatessa toisiaan. Käytännössä kitka johtuu kappaleiden epätasaisesta pinnasta mikrotasolla. Kitka ei juurikaan ole riippuvainen hankaavien kappaleiden välillä olevasta pinta-alasta. Sen sijaan kitkakertoimen suuruuteen vaikuttaa kappaleiden liikkumiseen tarvittavan voiman ja kappaletta pintaan puristavan kohtisuoran komponentin suhde. Lepokitka tarkoittaa kappaleiden välistä kitkaa silloin kun ne eivät liiku. Liikekitka tarkoittaa kappaleiden välistä kitkaa niiden liikkuessa. Lepokitka on aina yhtä suuri tai suurempi kuin liikekitka. Männän liikkuessa moottorissa kyseessä on liikekitka.

5.1 Sylinterin pinnoittaminen

Pinnoittaminen on yleinen menetelmä parantamaan materiaalien ominaisuuksia ja käyttöikä. Pinnoittamalla voidaan myös vähentää kitkaa kappaleiden hankauspinnoilla. Polttomoottorin teräksisiä sylintereitä ei kuitenkaan useimmiten pinnoiteta suurten valmistuskustannusten takia, vaikka jopa kolmasosa moottorin polttoainekulutuksesta kuluu kitkavoimien voittamiseen.

Timantin kaltainen hiili, Diamond-Like Carbon (DLC), on yhdistelmä timantin kiteisyyttä ja grafiitin levymäisyyttä. DLC on materiaalina lähes yhtä kovaa kuin timantti. Lisäksi DLC on myös joustavaa toisin kuin timantti. DLC on amofista materiaalia, joka on pääosin sp^3 -hybridisoitunut. Mukana saattaa olla myös sp^2 -hybridisoitunutta hiiltä riippuen DLC pinnoitteen laadusta. DLC-pinnoitteet kestävät hyvin kulutusta ja siksi sitä käytetäänkin esimerkiksi laakereissa (PSC Instruments, 2021). DLC-pinnoite voidaan valmistaa jo 100-200 °C lämpötilassa. Timanttipinnoite vaatisi 600-700 °C lämpötilan, jota kaikki materiaalit eivät kestäisi, ja se vaatisi paljon energiaa. DLC-pinnoitetta tutkittiin moottoripyörän alumiinisissa sylintereissä. Tarkoituksena oli pienentää moottorin polttoaineen kulutusta ja parantaa suorituskykyä kitkaa vähentämällä. Tutkimuksessa (Koszela et al. 2018) selvisi, että moottorin teho parani 5,8 % DLC-pinnoitetulla sylinterillä, ja kierroksia saatiin 1000 rpm enemmän verrattuna pinnoittamattomaan sylinteriin. Sylinterin pinta oli alun perin pinnoitettu Nikasil-pinnoitteella, joka koostuu nikkelihiikarbideista (Koski Jarno 2019). Nikasil-pinnoite sisältää pieniä, muutaman mikrometrien pituisia, kuoppia öljyn tartuttamiseksi. Pinnoitus saatiin aikaiseksi käyttämällä plasmalla tehostettua fysikaalista kaasufaasipinnoitusta (PVD) hyödyntävää Flexicoat 850 järjestelmää. DLC-pinnoitteen alla oli

kaksi välikerrosta, joista alimmaisina oli kromin adheesiovälikerros ja sen pinnalla kromi/volframikarbidi/hiili välikerros. Pinnoituksen suoritti automaattinen järjestelmä, ja koko pinnoitusprosessi kesti noin viisi tuntia, josta DLC-pinnoitteen osuus oli 150 minuuttia. Valmiin DLC-pinnoitteen tasainen paksuus oli 1,5 µm. Vaikka pinnoitus oli suoritettu moottoripyörän moottorille, voisi sitä soveltaa myös esimerkiksi autojen moottoreihin. Lisää tutkimustietoa kuitenkin vielä tarvitaan, jotta menetelmä voidaan hyödyntää massatuotannossa.

Sylinterin pinnoittaminen metallisella pinnoitteella voisi pidentää sylinterin käyttöikä. Tutkimuksessa (Khusainov & Glushchenko 2017) tutkittiin, että kupari voisi sopia vähentämään kitkaa sylinterin pinnalla. Kuparilla pinnoitetussa sylinterissä leikkausvastusta ja kitkakerrointa saadaan pienennettyä männänrenkaiden hangatessa sylinterin seinää vasten. Tutkimuksessa selvisi, että sylinterin kuluminen väheni kolminkertaisesti kuparilla pinnoitetussa sylinterissä. Pinnoite saadaan aikaiseksi kiinnittämällä sylinteriin pieniä kuparisia inserttejä, jotka männän liikkuessa muovautuvat ohueksi kalvoksi sylinterin pinnalle. Kuparisten inserttien käytön pitkäaikaiskestävyyttä ei ole kuitenkaan riittävästi tutkittu, joten lisää tutkimuksia tarvitaan.

5.2 Sylinterin hiominen

Suurin osa polttomoottorin kitkasta aiheutuu kampimekanismista. Kun mäntä liikkuu edestakaisin sylinterin sisällä, aiheutuu voitelusta huolimatta kitkahäviöitä. Kitkaa syntyy moottorissa sylinterin ja männän lisäksi monien eri liikkuvien osien välillä esimerkiksi jäähdytysnesteen pumpussa, laturissa, laakereissa ja voimansiirrossa. Kitkan määrää voidaan kuitenkin vähentää eri hiomis- ja pinnoitustekniikoilla.

Tutkimuksessa (Karpuschewski et al. 2016) tutkittiin eri hiomistekniikoita, joilla sylinterin pinnan kitkaa saataisiin vähennettyä. Tutkimuksessa selvisi, että pienillä hiomisnopeuksilla saadaan parhain lopputulos. Suurilla hiomisnopeuksilla teräksisessä sylinterissä alkaa tapahtua epätoivottuja kemiallisia reaktioita kitkan aiheuttaman korkean lämpötilan takia. Silikonikarbidista valmistetuilla hiomakivillä huomattiin saavutettavan hyvä lopputulos.

6. YHTEENVETO

Polttomootorilla varustetuissa ajoneuvoissa käytetään pääsääntöisesti nelitahtista mäntämootoria. Kaksitahtisia mäntämootoreita käytetään nykyään ainoastaan pienkoneissa. Polttomootorin suorituskykyä voidaan parantaa käyttämällä ahdinta. Mekaaninen ahdin saa voimansa kampiakselilta hihnan välityksellä. Turboahdin saa voimansa pakokaasuvirtauksesta. Turboahdinten turbiinipyörä valmistetaan pääsääntöisesti nikkeliin pohjautuvista superseoksista, joilla on hyvä lämpötilan, korroosion ja virumisen kestävyys. Titaani-alumiini -seoksesta valmistettu turbiinipyörä voisi olla vaihtoehtoinen materiaali turbiinipyörälle. Titaani-alumiini -pohjaisilla seoksilla saavutettaisiin noin puolet pienempi kokonaismassa, jolloin turbon energiankulutus olisi pienempi. Haasteena on kuitenkin suurempi hinta ja tasaisen kiderakenteen aikaansaaminen. Keraamisesta piinitridistä valmistetulla turbiinipyörällä saavutettaisiin myös alhainen tiheys sekä hyvät ominaisuudet korkeissa lämpötiloissa. Keraamien haasteena on kuitenkin epätasainen kiderakenne johtuen mikrotason säröistä, joita aiheutuu valmistettaessa turbiinipyörä sintraamalla. Piinitridistä valmistetun turbiinipyörän suurin käyttölämpötila havaittiin olevan 700 °C ja suurin pyörimisnopeus 100 000 rpm.

Katalysaattoreiden reaktiopinta on hunajakennomainen. Tutkimuksessa havaittiin, että kennon rakennetta muuttamalla voidaan saavuttaa 10,4 % suurempi pinta-ala katalyysireaktioille. Lisäksi kennotiheys saatiin 129 % suuremmaksi kuin perinteisen katalysaattorin kennotiheys. Uudenmallisella kennolla saavutettiin 17,39 % parempi reaktioaktiivisuus. Katalysaattoreissa käytetään arvokkaita jalometalleja katalyysireaktion aikaansaamiseksi. Ongelmana on jalometallien korkea hinta. Katalysaattoreissa käytetyt jalometallit voitaisiin tulevaisuudessa mahdollisesti korvata kuparioksidilla. Kuparioksidilla havaittiin saavutettavan dieselmootorissa yhtä hyvä katalyysireaktio kuin jalometalleilla. Epävarmaa kuitenkin on kuparioksidin pitkäaikaiskestävyys katalysaattoreissa.

Sylinterin ja männän välistä hankauskitkaa voidaan pienentää pinnoittamalla sylinterin pinta DLC-pinnoitteella. Alumiinisessa moottoripyörän moottorissa saatiin DLC-pinnoitteella 5,8 % enemmän tehoa kuin pinnoittamattomasta moottorista. Kierroslukua saatiin 1000 rpm enemmän DLC-pinnoitetulla moottorilla, joka viittaa alentuneeseen kitkaan. Kuparisia inserttejä tutkittiin sylinterin pinnoittamiseksi. Kuparipinnoitetulla sylinterillä saavutettiin alhaisempi leikkausvastus sekä pienempi kuluminen. Sylinterin pintaa hiotessa pienillä hiomisnopeuksilla huomattiin saavutettavan parhain lopputulos.

LÄHTEET

Breckenridge, B. C., Lynch, N. & Breckenridge, C. (2020). *Supercharged Miata Determining the Effects of a Supercharger on a Spark Ignition Engine. Supercharged Miata Determining the effects of a supercharger on a spark* By. 1–44. Saatavissa (22.03.2022): <https://digital.wpi.edu/downloads/05741v52q>

Encyclopædia Britannica, Inc. (2022). internal-combustion engine. Saatavissa (01.12.2022): <https://kids.britannica.com/kids/article/internal-combustion-engine/399511>

Karpuschewski, B., Welzel, F., Risse, K. & Schorgel, M. (2016). Reduction of Friction in the Cylinder Running Surface of Internal Combustion Engines by the Finishing Process. *Procedia CIRP*, 45, 87–90. Saatavissa (01.12.2022): <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.338>

Karpuschewski, B., Welzel, F., Risse, K., Schorgel, M. & Kreter, S. (2016). Potentials for Improving Efficiency of Combustion Engines Due to Cylinder Liner Surface Engineering. *Procedia CIRP*, 46, 258–265. Saatavissa (01.12.2022): <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.025>

Khusainov, A. S. & Glushchenko, A. A. (2017). Increasing Wear Resistance of Internal Combustion Engines Cylinders with Work Friction Surface Metal Coating. *Procedia Engineering*, 206, 1618–1622. Saatavissa (01.12.2022): <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.687>

Koski Jarno (2019), Polttomoottorin sisäiset pinnoitteet. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Insinööriyö. Saatavissa (01.12.2022): https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/172665/Koski_Jarno.pdf;jsessionid=EB4F790B9FCE73D34C0BD087F4027DBC?sequence=2

Koszela, W., Pawlus, P., Reizer, R. & Liskiewicz, T. (2018). The combined effect of surface texturing and DLC coating on the functional properties of internal combustion engines. *Tribology International*, 127(February), 470–477. Saatavissa (01.12.2022): <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.06.034>

Liu, Y., Pan, Y., Lu, X., Sun, J., Hui, T., Yang, Y., Yu, A., Qu, X. & Zhang, J. (2021). Fabrication of TiAl alloys turbocharger turbine wheel for engines by metal injection molding. *Powder Technology*, 384, 132–140. Saatavissa (01.12.2022): <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.01.070>

López-Suárez, A., Torres-Torres, C., Rangel-Rojo, R., Reyes-Esqueda, J. A., Santana, G., Alonso, J. C., Ortiz, A. & Oliver, A. (2009). Modification of the nonlinear optical absorption and optical Kerr response exhibited by nc-Si embedded in a silicon-nitride film. *Optics Express*, 17(12), 10056. Saatavissa (01.12.2022): <https://doi.org/10.1364/oe.17.010056>

Mali, H. S. & Unune, D. R. (2017). Machinability of Nickel-Based Superalloys: An Overview. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Saatavissa (01.12.2022): <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09817-9>

Manojkumar, R., Haranethra, S., Muralidharan, M. & Ramaprabhu, A. (2021). I.C. Engine emission reduction using catalytic converter by replacing the noble catalyst and using copper oxide as the catalyst. *Materials Today: Proceedings*, 45, 769–773. Saatavissa (01.12.2022) <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.804>

PCS Instruments (2021). The Science Behind Diamond like coatings (DLCs). Saatavissa (23.11.2022): <https://pcs-instruments.com/articles/the-science-behind-diamond-like-coatings-dlcs/>

Sathish Sharma, G., Sugavaneswaran, M. & Prakash, R. (2022). Design and validation of additive manufactured catalytic converter for the control of regulated and unregulated emissions of a gasohol fuelled spark ignition engine. *Fuel*, 309(May 2021), 122146. Saatavissa (01.12.2022): <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122146>

Turbotekniikka Oy, turbotekniikka.fi, etusivu >> turbot >> turboahdin toiminta. Saatavissa (18.12.2022): <https://turbotekniikka.fi/turbot/turboahdin-toiminta/>

Vivek Sah (2018). Tech Through Time: How a Supercharged Engine Works, *carsguide*, Saatavissa (1.12.2022): <https://www.carsguide.com.au/oversteer/tech-through-time-supercharging-58592>

Wen, D., Wang, S., Wang, G., Guo, P., Yang, L. & Yang, X. (2018). Fabrication processing and mechanical properties of Si₃N₄ ceramic turbocharger wheel. In *Ceramics International* (Vol. 44, Issue 9, pp. 10596–10603). Saatavissa (1.12.2022): <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.084>

Zawadzki, M., Staszak, W., López-Suárez, F. E., Illán-Gómez, M. J. & Bueno-López, A. (2009). Preparation, characterisation and catalytic performance for soot oxidation of copper-containing ZnAl₂O₄ spinels. *Applied Catalysis A: General*, 371(1–2), 92–98. Saatavissa (01.12.2022): <https://doi.org/10.1016/J.APCATA.2009.09.035>

Kuva 1: Encyclopædia Britannica, Inc. (2022). internal-combustion engine. Saatavissa (01.12.2022): <https://kids.britannica.com/kids/article/internal-combustion-engine/399511>

Kuva 2:

Internal Combustion Engine Basics. Energy.gov. (2013). Saatavissa (22.02.2022): www.energy.gov/eere/vehicles/articles/internal-combustion-engine-basics.

Kuva 3:

Mahmoudi, A. (2015). Nox, Co, Co₂ and Uhc Emission Levels of Gasoline Engine of Nissan Maxima: the Effects of Turbocharging. *6th Fuel and Combustion Conference of Iran, X*. Saatavissa (01.12.2022): https://www.researchgate.net/publication/317584845_NO_X_CO_CO_2_AND_UHC_EMISSION_LEVELS_OF_GASOLINE_ENGINE_OF_NISSAN_MAXIMA_THE_EFFECTS_OF_TURBOCHARGING

Kuva 4:

Sathish Sharma, G., Sugavaneswaran, M. & Prakash, R. (2022). Design and validation of additive manufactured catalytic converter for the control of regulated and unregulated emissions of a gasohol fuelled spark ignition engine. *Fuel*, 309(May 2021), 122146. Saatavissa (01.12.2022): <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122146>

Kuva 5, 6 ja 7:

Manojkumar, R., Haranethra, S., Muralidharan, M. & Ramaprabhu, A. (2021). I.C. Engine emission reduction using catalytic converter by replacing the noble catalyst and using copper oxide as the catalyst. *Materials Today: Proceedings*, 45, 769–773. Saatavissa (01.12.2022): <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.804>