

Jesse Kauppinen

HCCI-POLTTOMOOTTORIN MAHDOLLI- SUUDET VERRATTUNA OTTO- JA DIESELMOOTTOREIHIN

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Kesäkuu 2019

TIIVISTELMÄ

Jesse Kauppinen: HCCI-polttomootorin mahdollisuudet verrattuna otto- ja dieselmootoreihin
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Ympäristö- ja energiatekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma
Kesäkuu 2019

Liikennekäytössä olevista polttomootoreista suurin osa on otto- ja dieselmootoreita. Varsinkin dieselmootorit synnyttävät paljon typenoksidi- eli NOx-päästöjä, jotka aiheuttavat veden kanssa reagoidessaan esimerkiksi happosateita. NOx-päästöjen lisäksi diesel- ja ottomootorit tuottavat paljon CO₂ eli hiilidioksidipäästöjä. Ympäristöystävällisempiä autoja kehitellään jatkuvasti ja HCCI-moottori voisi olla yksi tulevaisuuden ratkaisuista.

HCCI tulee englannin kielen sanoista homogenous charge compression ignition, mikä tarkoittaa homogeenista täyttöä ja puristus-sytytystä. HCCI-moottori on ikään kuin otto- ja dieselmootorin yhdistelmä, sillä siinä puristetaan ilman ja polttoaineen homogeenista seosta, kuten ottomootorissa, mutta sytytys tapahtuu puristamalla, kuten dieselmootorissa.

Tässä työssä tarkastellaan HCCI-mootorin perusteita ja esitellään sen etuja verrattuna perinteisiin otto- ja dieselmootoreihin. Etuja ovat esimerkiksi otto- ja dieselmootoreita pienemmät hiilidioksidipäästöt sekä parempi polttoainetaloudellisuus. Työssä käydään läpi myös HCCI-tekniikkaan liittyviä haasteita, joita ovat muun muassa puristus-sytytyksen ajoituksen hallinta ja moottorin toiminta eri kuormituksilla. Haasteille esitellään myös muutamia mahdollisia ratkaisukeinoja.

Avainsanat: HCCI-moottori, polttomootori, puristus-sytytys

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. VERTAILTAVIEN POLTTOMOOTTOREIDEN PERUSTEITA	2
2.1 Perustietoa otto- ja dieselmoottoreista	2
2.2 HCCI-moottorin periaate	5
3. HCCI-MOOTTORIN ETUJA	6
3.1 HCCI-moottorin hyötysuhde	6
3.2 HCCI-moottorin päästöt	6
4. HCCI-MOOTTORIN HAASTEITA	8
4.1 Toiminta eri kuormilla	8
4.2 Kylmäkäynnistys	8
4.3 Korkeat häkä- ja hiilivetypäästöt	8
5. MENETELMIÄ HCCI-MOOTTORIN HAASTEIDEN RATKAISUIKSI	10
5.1 Pakokaasujen takaisinkierrätys (EGR)	10
5.2 Puristussuhde	11
5.3 Mekaaninen ahtaminen	12
5.4 Muuttuva venttiilien ajoitus	13
5.5 Imuilman lämpötila	14
6. HCCI-MOOTTORIN TULEVAISUUDEN NÄKYMIÄ	15
7. YHTEENVETO	17
LÄHTEET	18

1. JOHDANTO

Lisääntyvät kasvihuonekaasupäästöt ajoneuvomoottoreista aiheuttavat tarvetta kehittää puhtaampia teknologioita liikenteen tarpeisiin. Parempi polttoainetaloudellisuus ja moottorin korkeampi hyötysuhde pienempien päästöjen ohella olisivat tervetulleita parannuksia perinteisten moottoreiden rinnalle. [1] HCCI (homogenous charge compression ignition) -moottori voisi olla tulevaisuudessa potentiaalinen vaihtoehto täyttämään edellä mainittua tarvetta [2].

HCCI-moottori on yksinkertaisuudessaan yhdistelmä perinteisten otto- ja dieselmootto- reiden parhaita puolia [1,2]. Tällä hetkellä suurin osa liikennekäytössä olevista poltto- moottoreista on otto- ja dieselmootto- reita. Tässä työssä tarkastellaan HCCI-moottorin mahdollisuuksia otto- ja dieselmootto- reihin verrattuna pohjautuen tutkimuksiin, joita ai- heesta on tehty. Tarkasteltavia seikkoja ovat erityisesti mahdollinen päästöjen vähentä- minen, hyötysuhde, taloudellisuus ja toiminta erilaisissa ympäristöissä. Tämä työ pyrkii selvittämään edellä mainittuja asioita.

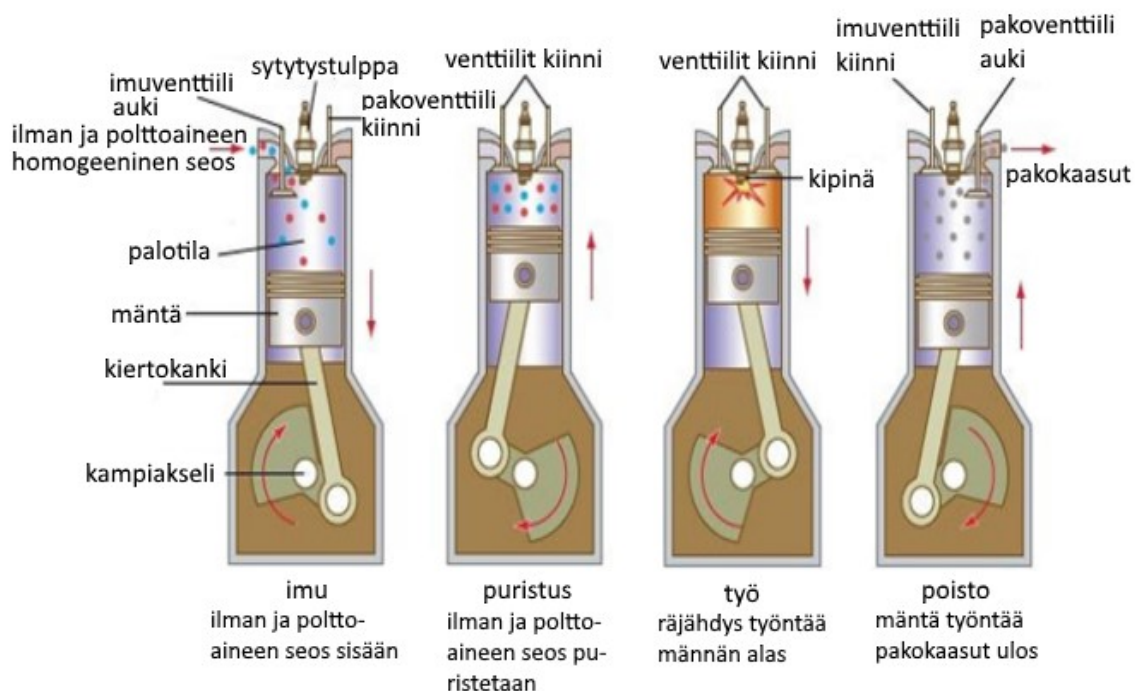
Luvussa 2 esitellään vertailuun valittujen moottoritekniikoiden perusteita. Tämän jälkeen luvussa 3 pureudutaan tarkemmin HCCI-polttomoottorin etuihin, minkä jälkeen luvussa 4 tarkastellaan haasteita ja ongelmia, joita HCCI-moottorit kohtaavat. Luvussa 5 esitel- lään muutamia mahdollisia ratkaisuja, joilla HCCI-moottoreiden kohtaamia haasteita py- ritään ratkaisemaan. Tämän jälkeen tehdään lyhyt katsaus HCCI-moottoreiden tulevai- suuden näkymiin ja lopuksi esitetään yhteenveto käsitellyistä asioista.

2. VERTAILTAVIEN POLTTOMOOTTOREIDEN PERUSTEITA

Polttomoottorit perustuvat tavallisesti kiertoprosesseihin. Usein kiertoprosessi saadaan aikaan mäntämoottorilla, jossa polttoaineen sisältämä kemiallinen energia muutetaan sylinterissä mäntien ja edelleen kiertokankien ja kampiakselin avulla lämpö- ja liike-energiaksi. Polttoaine, ilma ja pakokaasut saadaan sylinteriin sisään ja ulos venttiilien tai venttiilien ja suuttimien avulla. Tässä työssä tarkasteltavat otto-, diesel- ja HCCI-moottorit ovat kaikki mäntämoottoreita, mutta palamisreaktio aikaansaadaan eri tavoin toisiinsa nähden.

2.1 Perustietoa otto- ja dieselmoottoreista

Ottomoottori ymmärretään yleisemmin tavallisena bensiinimoottorina, mutta siinä voidaan käyttää polttoaineena myös kaasua. Ottomoottori sai nimen keksijänsä Nikolaus Oton mukaan, joka kehitti ottomoottorin vuonna 1876. Ottomoottorissa toteutettava prosessi koostuu neljästä tahdistä, jotka ovat imu-, puristus-, työ- ja poistotahti. [3] Ottomoottorissa toteutettavaa nelitahtista otto-sykliä on havainnollistettu kuvassa 1.

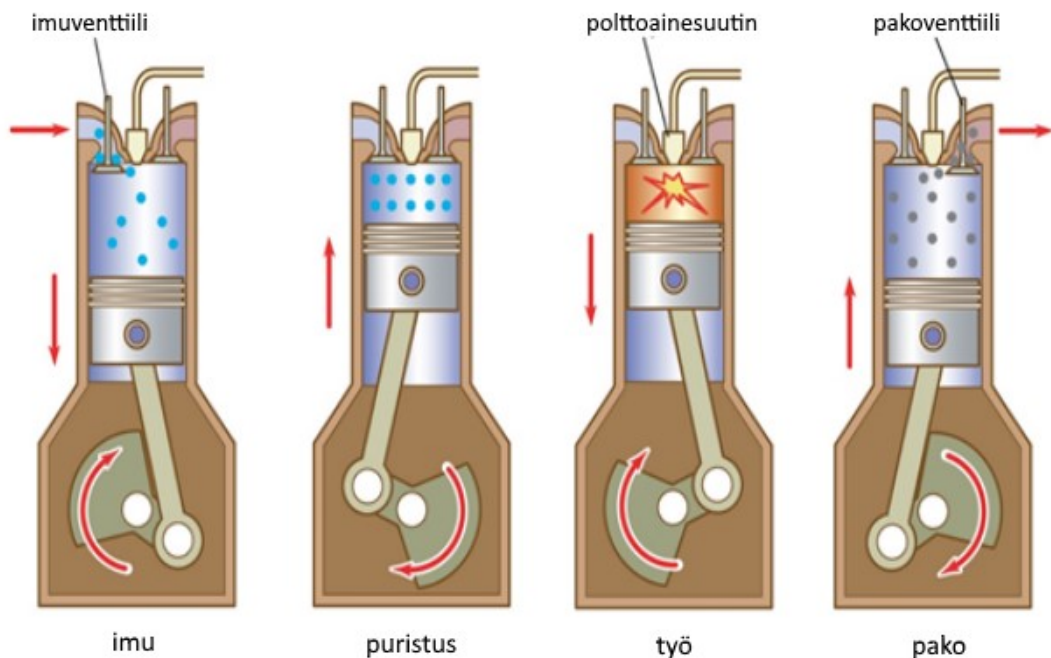


Kuva 1:

Otto-sykli, muokattu lähteestä [4]

Imutahdin aikana mäntä liikkuu alaspäin imuventtiilin ollessa auki ja sylinteriin imetään polttoaineen ja ilman seosta. Puristustahdissa kaikki venttiilit ovat kiinni ja mäntä liikkuu ylöspäin. Polttoaineen ja ilman seos puristuu männän liikkeessa ylöspäin, mikä aikaansaa seoksen lämpötilan nousemisen. Työtahdin alussa mäntä on ylhäällä ja puristettu polttoaineen ja ilman seos sytytetään sytytystulpan kipinän avulla. Seos laajenee räjähdysmäisesti työntäen mäntää samalla alas venttiileiden ollessa edelleen kiinni. Poistotahdin alussa pakuventtiili aukeaa ja mäntä liikkuu ylös työntäen pakokaasut pakuventtiiliin kautta ulos. [3,4]

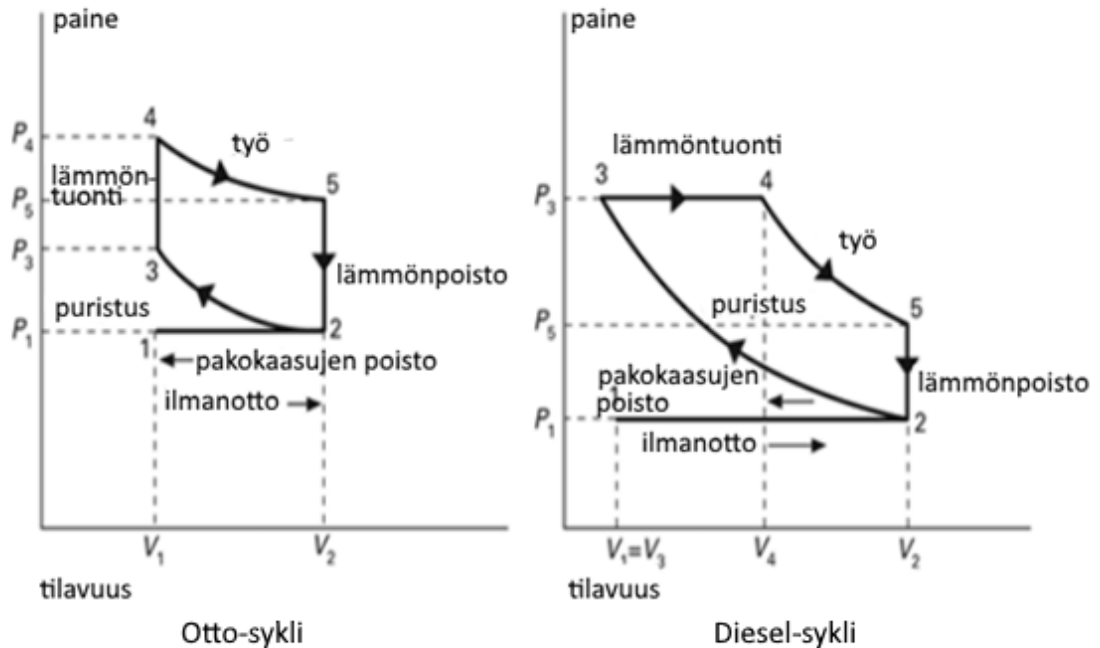
Dieselmoottorin keksi Rudolf Diesel. Ensimmäisen kerran Rudolf Diesel sai moottorinsa pyörimään hyvin vuonna 1897. [5] Dieselmoottori on suurelta osin samankaltainen kuin ottomoottori. Se eroaa ottomoottorista kuitenkin siten, että imutahdin aikana sylinteriin imetään ainoastaan ilmaa, minkä jälkeen puristustahdissa siis puristetaan myös pelkkää ilmaa. Polttoaine ruiskutetaan suuttimen läpi puristusvaiheen jälkeen. Polttoaine syttyy puristusvaiheessa kuumentuneen ilman kanssa tapahtuvan kontaktin ansiosta. Polttoaineena käytetään dieselöljyä. [3,6] Diesel-sykliä on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2:

Diesel-sykli, muokattu lähteestä [6]

Otto- ja dieselmootoreissa tapahtuvaa kiertosykliä on havainnollistettu pV-tasossa kuvassa 3. Kuvasta 3 nähdään, että ottomootorissa sytytys, joka on kuvassa ilmaistu sanoilla ”lämmön tuonti”, tapahtuu vakiotilavuudessa ja dieselmootorissa taas vakiopainneissa.

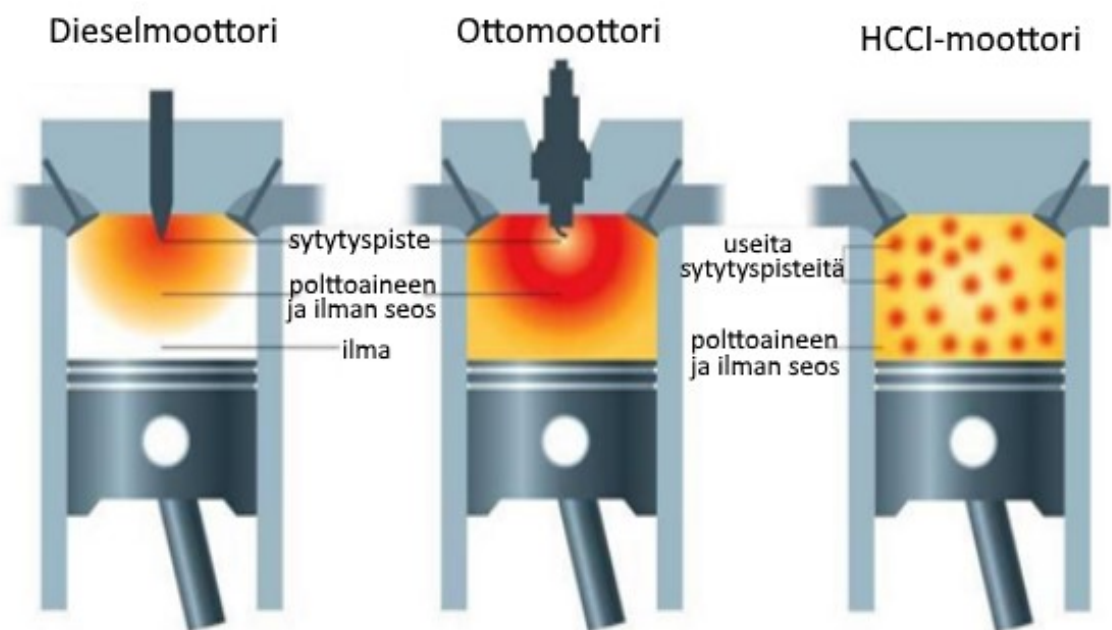


Kuva 3: Otto- ja dieselmootorin prosessi pV-tasossa, muokattu lähteestä [3]

Ideaalisessa tapauksessa puristus- ja työtahdit tapahtuvat molemmissa moottoreissa isentrooppisesti. Koska dieselmootorissa puristetaan pelkkää ilmaa, mahdollistaa se korkeamman puristussuhteen ottomootoriin nähden. Puristussuhteella tarkoitetaan puristustilavuuden, eli tilavuus kun mäntä on ylhäällä, ja iskutilavuuden summan suhdetta puristustilavuuteen. Ottomootorissa polttoaineen ja ilman seos saattaa syttyä itsestään ei toivotusti liian aikaisin, jos lämpötila ja paine kohoavat puristusvaiheen aikana liikaa. Tätä ilmiötä kutsutaan nakutukseksi ja se on haitallista moottorille, sillä polttoaineen sytytyessä liian aikaisin aiheutuu moottorin komponentteihin, kuten laakereihin ja kiertokanjiin tarpeettoman suurta rasitusta, mikä voi pitkään jatkuessa rikkoa moottorin. Tyypillisesti ottomootorissa puristussuhde on noin 8–9:1 ja dieselmootorissa 15–25:1. Dieselmootorin korkeampi puristussuhde aiheuttaa moottorin rakenteille enemmän rasitusta, mikä on huomioitava moottoria rakentaessa ja vaikuttaa siten moottorin massaan ja sen myötä myös hintaan. [3]

2.2 HCCI-moottorin periaate

HCCI-moottori on ikään kuin otto- ja dieselmoottorin yhdistelmä. Siinä puristetaan esisekoitettua ilman ja polttoaineen seosta, samaan tapaan kuin ottomoottorissa, mutta sytytykseen ei käytetä kipinää, vaan seos syttyy paineen ja lämpötilan noustessa puristusvaiheen lopulla itsestään. Esisekoitetun ilmapolttoaineseoksen ansiosta seos syttyy samalla hetkellä useasta kohdasta, eikä palamisen etenemiselle voida havaita tarkkaa rajaa. Syttyminen tapahtuu siis lähes kauttaaltaan samalla hetkellä, kun taas otto- ja dieselmootoreissa palo leviää syttymispisteestä. Ilmiötä on havainnollistettu kuvassa 4. [2]



Kuva 4: Syttymistapahtuma eri moottoreissa, muokattu lähteestä [3]

HCCI-moottorissa on mahdollista käyttää polttoaineena bensiiniä, dieseliä ja monia vaihtoehtoisia polttoaineita. Tekniikka mahdollistaa ottomoottoria korkeamman, noin 10–20:1 puristussuhteen HCCI-moottorille, mutta vaikeuksia aiheuttaa palamistapahtuman hallinta erilaisilla kuormilla. Dieselmoottoriin verrattuna HCCI-moottorissa palamisreaktio tapahtuu matalammassa lämpötilassa, jotka ovat HCCI-moottorissa noin 800–1100 K ja dieselmoottorissa 1900–2100 K. Matalamman lämpötilan ansiosta typen oksideja eli NO_x-päästöjä syntyy vähemmän kuin dieselmoottorissa. [1,2]

3. HCCI-MOOTTORIN ETUJA

Liikennekäytössä autovalmistajat pyrkivät yleisesti ottaen jatkuvasti valmistamaan ja kehittämään taloudellisempia ja pienipäästöisempiä ajoneuvoja. Parempi polttoainetaloudellisuus näkyy käyttäjälle välittömästi pienempinä polttoainekustannuksina. Esimerkiksi Suomessa henkilöautojen ajoneuvovero koostuu perusverosta, joka ensisijaisesti määräytyy ajoneuvon hiilidioksidipäästöjen mukaan, ja mahdollisesti käyttövoimaverosta muun muassa dieselautojen kohdalla [7]. Myös pienemmät päästöt siis vaikuttavat käyttökustannuksiin, minkä lisäksi päästöjen vähentäminen on tärkeää ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi.

3.1 HCCI-moottorin hyötysuhde

Ottomoottorissa erilaisille kuormille tarvittava säätö tapahtuu kuristamalla tulovirtausta kaasuläpän avulla, mikä aiheuttaa häviöitä ja johtaa heikkoon hyötysuhteeseen osakuormalla. HCCI-moottorissa näin ei ole, joten jo pelkästään se parantaa hyötysuhdetta. HCCI-moottorissa voidaan käyttää myös suurempaa puristussuhdetta kuin ottomoottorissa, mikä johtaa hyötysuhteen paranemiseen. Tämän ansiosta myös käytettäessä bensiiniä polttoaineena voidaan yltää dieselmootoreiden hyötysuhteeseen ja jopa sen yli. [1]

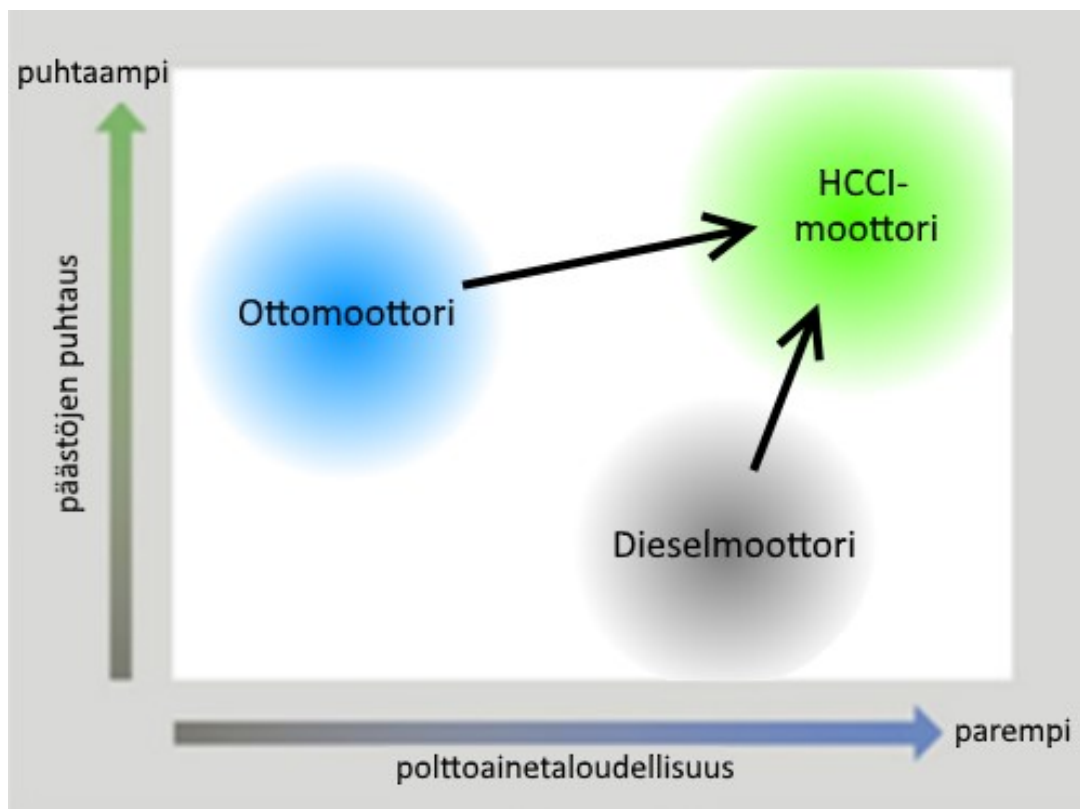
HCCI-moottorit soveltuvat kevyiden moottoreiden ohella myös raskaan kaluston moottoreiksi. Polttoaineeksi soveltuu bensiinin ohella myös diesel ja monet vaihtoehtoiset polttoaineet. Polttoprosessi voidaan toteuttaa HCCI-moottorissa erittäin laihalla polttoaineen ja ilman seoksella, mikä parantaa polttoainetaloudellisuutta. [3] Ottomoottorin hyötysuhteen ollessa noin 30 % ja dieselmootorin noin 40 % voidaan HCCI-moottoreilla päästä jopa yli 40 %:n hyötysuhteeseen [8].

3.2 HCCI-moottorin päästöt

Polttoainetaloudellisuus ja päästöjen vähentäminen ovat kaksi asiaa, joissa autoteollisuuden valmistajat pyrkivät kehittämään tuotteitaan koko ajan. HCCI-moottorin uskotaan olevan lupaava vaihtoehto näille molemmille tulevaisuudessa. Erityisesti dieselmootorit tuottavat päästöinä paljon typen oksideja ja pienhiukkasia. Niitä aiheutuu myös ottomoot-

toista, muttei keskimäärin aivan niin paljoa kuin dieselmoottoreista. Otto- ja dieselmoottoreiden päästöinä aiheutuu myös muita yhdisteitä, kuten hiilidioksidia ja hiilimonoksidia. [8]

HCCI-moottorissa palamisreaktio tapahtuu matalassa lämpötilassa ja laihalla seoksella verrattuna otto- ja dieselmoottoreihin. Alhaisemmalla lämpötilalla on suuri vaikutus erityisesti NO_x-päästöihin ja niinpä niitä syntyy vähemmän. Hyvin sekoitettu ilman ja polttoaineen laiha homogeeninen seos taas vähentää pienhiukkaspäästöjen syntymistä. [1] Päästöjä ja polttoainetaloudellisuutta HCCI-, otto- ja dieselmoottoreiden välillä on havainnollistettu kuvassa 5. Palamisreaktio on HCCI-moottorissa homogeenisen seoksen itsesyttymisen seurauksena kokonaisuudessaan tasaisempi ja siten parempi kuin otto- tai dieselmoottoreissa, joissa palaminen syttyy pistemäisesti ja leviää. [1,2]



Kuva 5: HCCI-, otto- ja dieselmoottorin päästöt ja polttoainetaloudellisuus, muokattu lähteestä [9]

HCCI-moottorissa palamisreaktio synnyttää NO_x-päästöjen lisäksi myös merkittävästi vähemmän hiilidioksidipäästöjä. Tämä on seurausta HCCI-moottorin korkeasta termisestä hyötysuhteesta ja sen seurauksena pienestä polttoaineen tarpeesta. [9]

4. HCCI-MOOTTORIN HAASTEITA

HCCI-prosessiin pohjautuva teknologia ei ole vielä täysin valmis, sillä siihen liittyy edelleen muutamia haasteita. Haasteet liittyvät muun muassa vaihteleviin olosuhteisiin, sytymistapahtuman ajoituksen hallintaan ja toiminta-alueeseen. [2,8]

4.1 Toiminta eri kuormilla

HCCI-moottori toimii melko hyvin ja luotettavasti matalalla ja keskitason kuormalla, mutta kun mennään raskaaseen kuormitukseen, alkaa vaikeuksia ilmentyä. Suurella kuormituksella palamisreaktion nopeus saattaa kasvaa, mikä voi johtaa kovaan meteliin, laiterikkoihin ja lopulta NO_x-päästöjen nousemiseen. [1]

Erilaisilla polttoaineilla voidaan vaikuttaa jonkin verran moottorin toimintaa erilaisilla kuormituksilla. Tämän lisäksi esimerkiksi EGR:n (exhaust gas recirculation) avulla voidaan hallita palamisprosessia. EGR kierrättää osan pakokaasuista uudelleen moottorin sylintereihin, mikä siirtää palamisreaktion alkamisajankohtaa myöhemmäksi. [1,2] EGR:ää käsitellään tarkemmin alaluvussa 5.1.

4.2 Kylmäkäynnistys

HCCI-moottori on herkkä imuilman lämpötilan muutoksille. Pienet muutokset vaikuttavat palamisreaktioon verrattain paljon. Itsesyttymiseen vaadittava lämpötila vaihtelee käytettävän polttoaineen mukaan, mutta on selvää, että kylmässä ulkoilman lämpötilassa, kun moottorikin on kylmä, on itsesyttymiseen vaadittu lämpötila vaikeampi saavuttaa kuin lämpimissä olosuhteissa. [1]

Eräs keino kylmäkäynnistykseen mahdollistamiseen on moottorin käynnistäminen apulaitteiden, kuten sytytystulpan avulla. Tämän jälkeen moottoria pidetään hetki käynnissä ja annetaan sen lämmitä haluttuun lämpötilaan ennen kuin siirrytään HCCI-tilaan. [2]

4.3 Korkeat häkä- ja hiilivetypäästöt

Vaikka typenoksidi- ja hiilidioksidipäästöt jäävätkin HCCI-moottoreissa pieniksi, on häkä- ja hiilivetypäästöjen havaittu olevan korkeammat kuin otto- ja dieselmoottoreissa. Häkä-

ja hiilivetypäästöjen alentaminen esimerkiksi katalysaattorin avulla on kuitenkin helpompaa kuin dieselmootoreissa typenoksidipäästöjen vähentäminen. [1]

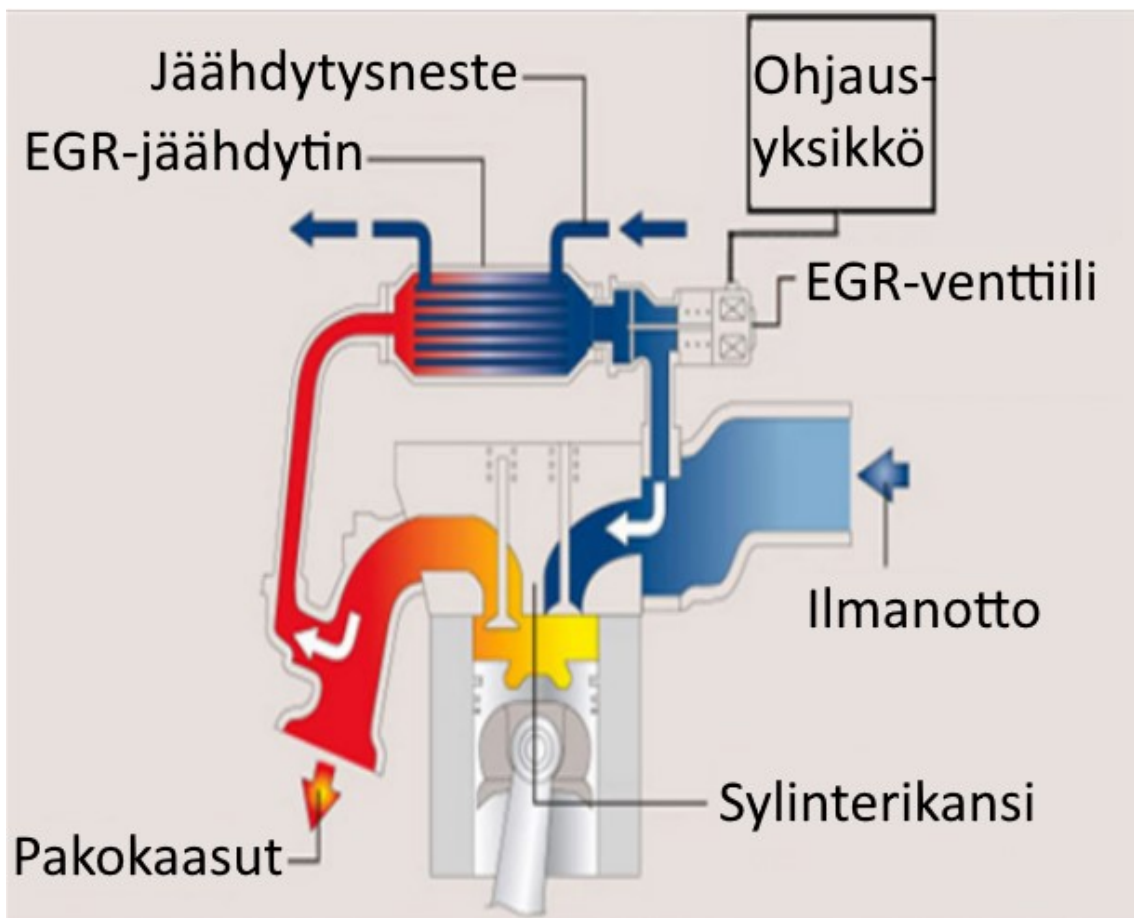
Korkeiden häkä- ja hiilivetypäästöjen hallitsemiseksi on tutkittu uusia vaihtoehtoja yleisesti käytössä jo olevien pakoputkistoon asennettavien katalysaattoreiden ja erilaisten suodattimien avuksi. Yksi tutkittu keino on sylinterin sisäisten osien, kuten männän pinnoittaminen katalyyttisellä aineella. Näin voidaan jo palamisreaktion aikana vaikuttaa syntyviin päästöihin katalyytin avulla. [10] Menetelmä eroaa perinteisestä tavasta siinä, että syntyviin päästöihin vaikutetaan jo palamisvaiheessa, eikä vasta pakoputkistossa palamistapahtuman ollessa jo ohi.

5. MENETELMIÄ HCCI-MOOTTORIN HAASTEIDEN RATKAISUIKSI

Eräitä HCCI-moottoreihin liittyviä haasteita ovat kapea toiminta-alue, sytytyksen ajoituksen hallinta, pitkä käynnistysaika ja korkeat hiilimonoksidi- ja hiilivety päästöt [10]. Jotta HCCI-moottoreita voitaisiin nähdä katukuvassa nykyisten otto- ja dieselmoottoreiden tilalla esimerkiksi henkilöautojen ja rekkojen voimanlähteenä, tulisi HCCI-tekniikkaan liittyvät haasteet ratkaista.

5.1 Pakokaasujen takaisinkieritys (EGR)

EGR:n (exhaust gas recirculation) eli pakokaasujen takaisinkierityksen vaikutusta HCCI-moottorin toimintaan on tutkittu laajalti. Kun osa pakokaasuista ohjataan EGR:n avulla takaisin sylinteriin, voidaan vaikuttaa esimerkiksi päästöihin, sytytyksen ajoitukseen ja palamisreaktion nopeuteen. [10] Pakokaasujen takaisinkieritystä EGR-venttiilin kautta on havainnollistettu kuvassa 6.



Kuva 6: Pakokaasujen takaisinkieritys EGR-venttiilin kautta, muokattu lähteestä [11]

Koska kuumaa pakokaasua ohjataan imuilman sekaan, voidaan sillä vaikuttaa ilman esilämmitykseen. Usein EGR-järjestelmään kuuluu osaksi lämmönvaihdin, jolla takaisinkierrettävien pakokaasujen lämpötilaa hieman alennetaan.

EGR:n käytön on havaittu siirtävän palamisreaktion alkua myöhemmäksi ja hidastavan palamisreaktion nopeutta. Se myös pienentää sylinterin sisällä vallitsevaa painetta ja laajentaa HCCI-moottorin toiminta-aluetta. [2,12] EGR:n avulla voidaan myös entisestään vähentää NOx- ja pienhiukkaspäästöjä. Tietyillä polttoaineilla EGR vaikuttaa tuntuvasti myös hiilivetyjen ja hiilimonoksidin määrään [10]

Pakokaasujen takaisinkierätyksen vaikutukset sytytyksen ajoitukseen ja palamisreaktion nopeuteen perustuvat esimerkiksi siihen, että happikonsentraatio kaasuseoksessa pienenee. Tämä johtuu yksinkertaisesti siitä, että palamiseen kuluu happea ja niinpä pakokaasuissa happi on kemiallisten reaktioiden seurauksena sitoutuneena muihin yhdisteisiin, kuten hiilimonoksiidiin ja hiilidioksiidiin, ja vapaan hapen määrä on merkittävästi pienempi. [10]

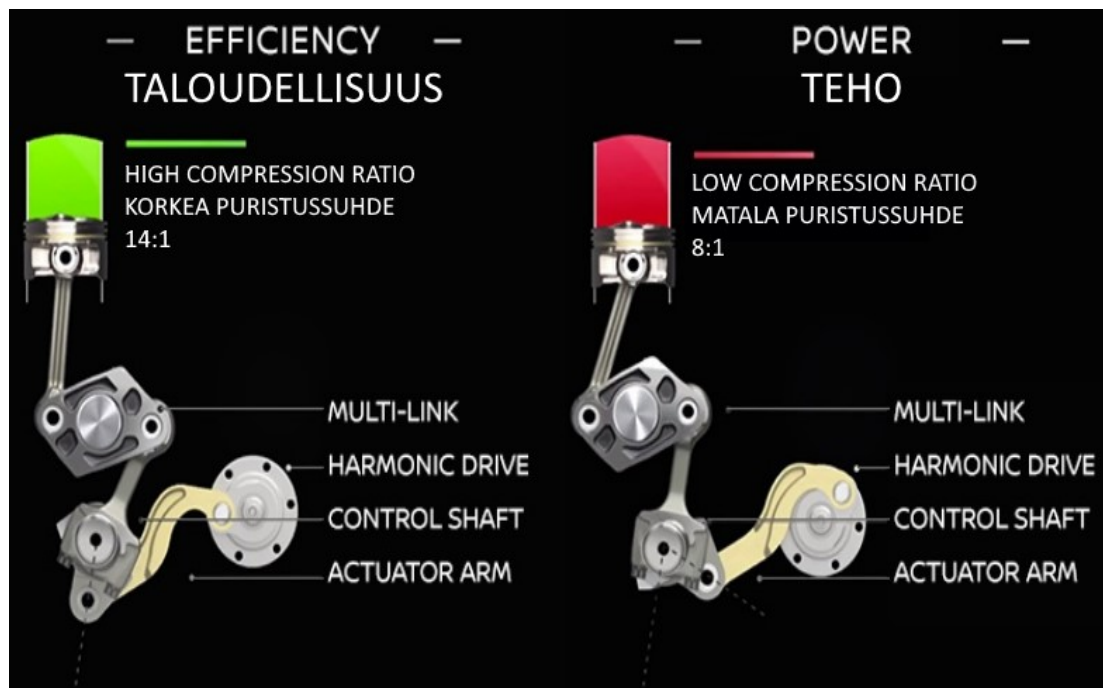
5.2 Puristussuhde

Puristussuhde vaikuttaa suoraan verrannollisesti paineeseen sylinterin sisällä. Polttomoottoreissa muutetaan polttoaineen kemiallista energiaa lämmöksi ja työksi. Useimpien polttomoottoreiden kohdalla puhutaan myös tehosta ja väännöstä. Korkea puristussuhde mahdollistaa korkean tehon myös laihalla polttoaineen ja ilman seoksella. Puristussuhteella on suuri vaikutus HCCI-moottorin toimintaan. Puristussuhteen kasvattaminen saa aikaan sylinterin sisällä puristustahdin aikana paineen lisäksi myös lämpötilan nousemisen entisestään, mikä helpottaa polttoaineen syttymistä. [10]

On tutkittu, että puristussuhteen nostaminen vähentää ilman esilämmityksen tarvetta HCCI-moottorissa. Se vähentää myös typen oksidipäästöjä, mutta hiilimonoksidipäästöjen on havaittu kasvavan puristussuhteen nostamisen myötä. Hiilimonoksidipäästöjen kasvu johtuu siitä, että palamisreaktio tapahtuu nopeammin korkeammassa lämpötilassa. [13]

On mahdollista rakentaa polttomoottori, jonka puristussuhdetta pystytään muuttamaan tilanteen mukaan. Ensimmäisenä muuttuvalla puristussuhteella varustetun moottorin rakensi Nissan Motor Corporationin tytäryhtiö Infiniti. Moottori kantaa nimeä VC-Turbo.

Moottorin kehitystyöhön meni aikaa yli 20 vuotta. [14,15] Infinitin VC-Turbo-moottorin muuttuvan puristussuhteen toteutusta on havainnollistettu kuvassa 7.



Kuva 7: VC-Turbo -moottorin muuttuva puristussuhde, muokattu lähteestä [15]

VC-Turbo hyödyntää monilinkkimekanismissa, joka muuttaa sylinterin sisällä liikkuvan männän ylä- ja alakuolokohdan paikkaa. Kun yläkuolokohdan paikka muuttuu, muuttuu myös puristustilavuus ja siten puristussuhde. VC-Turbo-moottorin puristussuhdetta pystytään vaihtelevaan 8:1 ja 14:1 välillä. [14] Muuttuvan puristussuhteen tekniikan tuominen HCCI-moottoreiden yhteyteen voisi mahdollisesti olla apukeino palamistapahtuman hallitsemiseksi HCCI-moottorissa. Muuttuvan puristussuhteen avulla voitaisiin HCCI-moottoreissa käyttää lähes mitä tahansa polttoainetta [2].

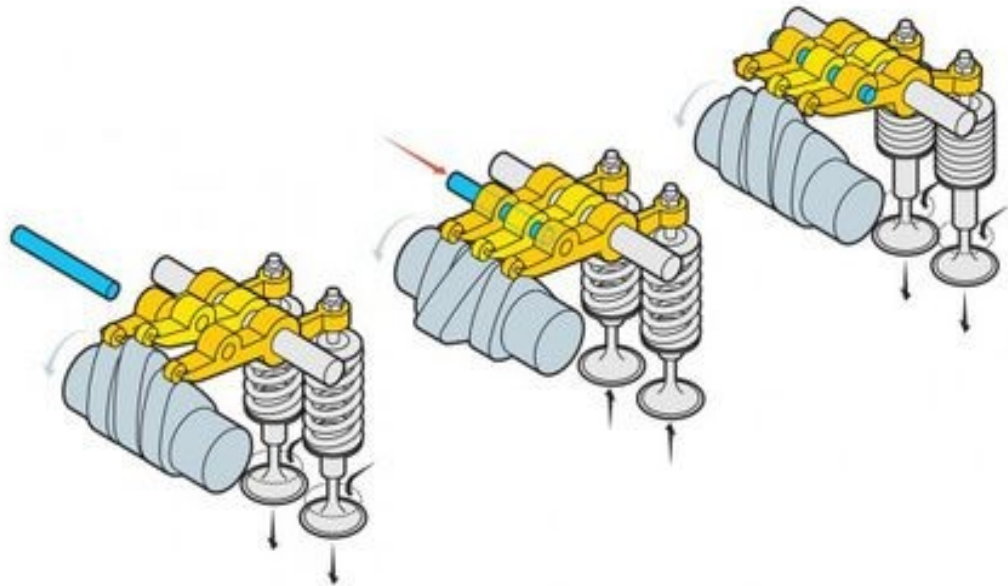
5.3 Mekaaninen ahtaminen

HCCI-moottorin kapea toiminta-alue on kyseisen moottorin yksi merkittävimmistä haasteista. Tavanomaiset HCCI-moottorit toimivat parhaiten keskikuormalla, mutta suuremmalla kuormalla laihan polttoaineen ja ilman seoksen aikaansaaminen on hankalaa. Pie-nellä kuormituksella palamistapahtuma taas on heikko. Nykyisin HCCI-tekniikkaa hyödyntävillä ajoneuvoilla pitäisi pystyä normaaliin ajoon ilman tarvetta siirtyä esimerkiksi sytytystulpalla avulla tapahtuvaan sytytyksen ajoitukseen ja hallintaan. [10]

Polttoaineen ja ilman laihan seoksen saavuttamista HCII-moottorissa suurilla kuormituksilla voidaan edesauttaa mekaanisella ahtamisella. Ahtimen avulla syötetään paineistettua ilmaa, jolloin ilmaa saadaan syötettyä moottoriin enemmän. Ahtamisen avulla HCII-moottorin toiminta-aluetta voidaan laajentaa. [10]

5.4 Muuttuva venttiilien ajoitus

Imu- ja pakoventtiilien ajoituksella on vaikutusta polttomoottorin toimintaan. Variable valve timing:n eli muuttuvan venttiilien ajoituksen tarkoitus on polttomoottoreissa lisätä suorituskykyä sekä vähentää polttoaineen kulutusta ja päästöjä. [10] Eri autovalmistajilla on omia nimityksiä muuttuvalle venttiilien ajoitukselle, joista esimerkkeinä BMW:n Vanos, Hondan VTEC, Nissanin VVEL ja Toyotan VVT-i. Esimerkkinä muuttuvasta venttiilien ajoituksesta on Hondan ratkaisua havainnollistettu kuvassa 8.



Kuva 8:

Hondan VTEC-järjestelmä [16]

VTEC on toteutettu siten, että nokka-akselissa on enemmän nokkia kuin venttiileitä ja kahta venttiiliä kohti kolme keinuvipua. Matalilla kierrosnopeuksilla nokka-akseli reunimaiset nokat ohjaavat keinuvipujen kautta venttiilien nostoa ja laskua, keskimmäisen nokan keinuvipu ei tässä vaiheessa vaikuta. Esimerkiksi korkeilla kierrosnopeudessa reunimaiset keinuvivut voidaan kytkeä yhteen keskimmäisen keinuvivun kanssa, jolloin erityisesti muotoiltu nokka ohjaa venttiilien nostoa ja laskua. Tällöin Venttiilit voivat nokan

muotoilusta riippuen aueta aiemmin ja mennä myöhemmin kiinni, mikä usein parantaa moottorin suorituskykyä korkeilla kierrosnopeuksilla. [16]

Muuttuvaa venttiilien ajoitusta voidaan hyödyntää myös HCCI-moottoreissa. Venttiilien ajoituksella voidaan HCCI-moottoreissa vaikuttaa palamistapahtuman ajoitukseen, syntyviin päästöihin ja toisaalta myös sylinteriin kehittyvään paineeseen. Venttiilien auki ja kiinni olon vaihdellessa myös sylinteriin tuodun ja sieltä poistuneen polttoaineen ja ilman seoksen määrä vaihtelee. Puristettavan määrän muuttuessa myös sylinterin sisäinen paine muuttuu. Palamistapahtuman ajoituksen paremmalla hallinnalla voidaan laajentaa HCCI-moottorin toiminta-aluetta kohti raskaampia kuormituksia. [10] Raskaalla kuormituksella HCCI-moottoreiden sytytyksen viivyttämiseksi on saatu lupaavia tuloksia muuttamalla imuventtiileiden sulkeutumista myöhäisemmäksi. Moottorin toiminta-aluetta voi laajentaa entisestään, mikäli venttiilien ajoitusta pystytään muuttamaan portaattomasti. Tämä voi tarjota mahdollisuuden palamistapahtuman dynaamiselle hallinnalle eri olosuhteissa. [17]

5.5 Imuilman lämpötila

Imuilman esilämmitystä on tutkittu hyvin paljon HCCI-moottoreihin liittyen. Ilman esilämmitys auttaa polttoaineen ja ilman seoksen homogoinnissa ja helpottaa itsesyttymistä HCCI-moottorissa. HCCI-moottorin laihan polttoaineen ja ilman seoksen sytyttämiseksi tarvitaan usein ilman esilämmitystä, jotta saavutetaan tarvittava paine ja lämpötila itsesyttymiselle. Imuilmaa ei ole kuitenkaan syytä lämmittää enemmän kuin on tarve, sillä se voi altistaa nakutukselle. Imuilman lämpötilan tarkkaa kontrollointia tarvitaan, jotta voidaan varmistaa toiminta mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella ja pienillä päästöillä, sekä sytytyksen ajoituksen hallinta. [10]

Imuilman esilämmityksellä on havaittu olevan vaikutusta HC ja CO -päästöihin alentavasti. NO_x-päästöihin ilman esilämmityksen vaikutukset riippuvat käytettävästä polttoaineesta. Esimerkiksi etanolipolttoaineella eivät NO_x-päästöt muutu, mutta bensiiniä käytettäessä ne saattavat jopa vähän kasvaa, kun käytetään ilman esilämmitystä. [18]

6. HCCI-MOOTTORIN TULEVAISUUDEN NÄKYMIÄ

Autovalmistajat eivät ole hylkäämässä polttomoottoreita sähköautojen tieltä pois, vaan pyrkivät kehittämään niitä edelleen. Monet valmistajat ovatkin esitelleet prototyyppisiä, joiden moottorit perustuvat HCCI-tekniikkaan. Esimerkiksi Volkswagen esitteli GCI nimeä kantavalla moottorilla varustetun prototyypin jo vuonna 2008 [19].

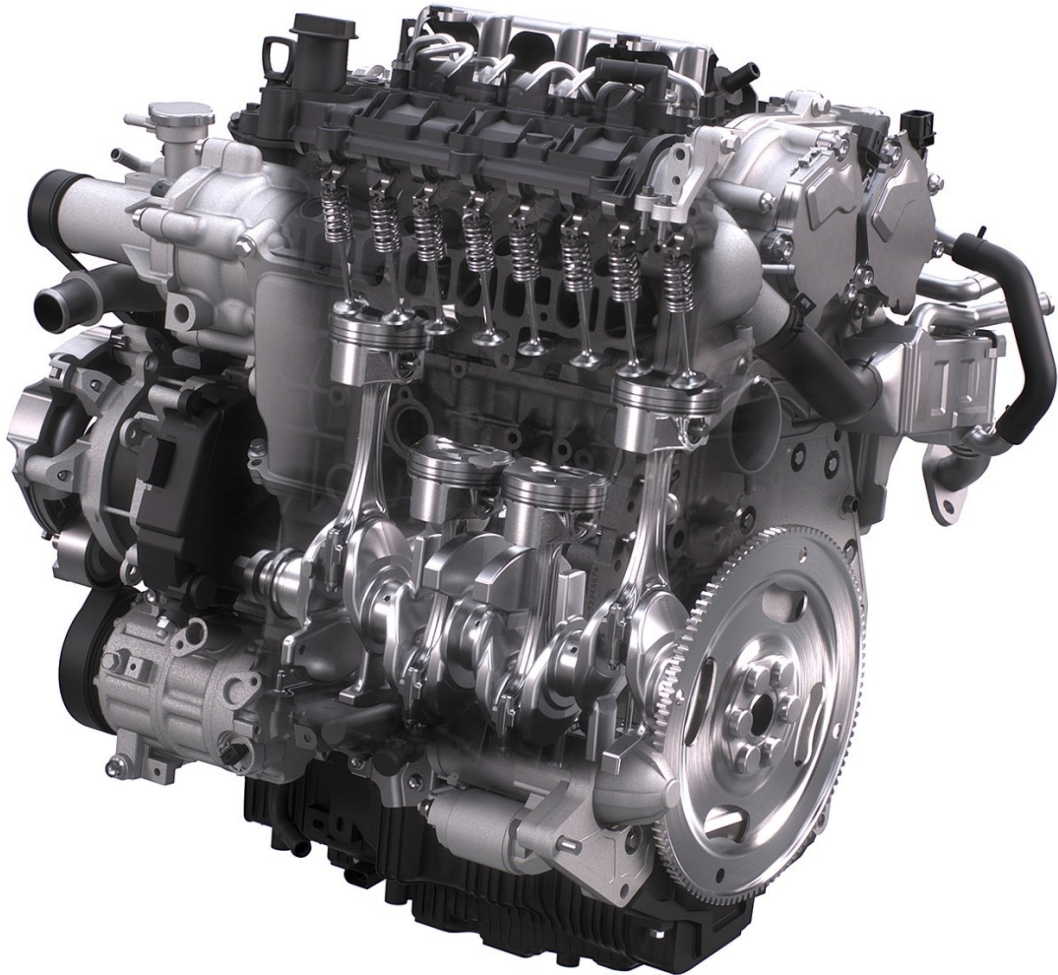
Volkswagenia aiemmin vuonna 2007 Mercedes Benz esitteli DiesOtto-nimisen moottorin, joka niin ikään oli pohjimmiltaan HCCI-moottori. Mercedesen DiesOtto-moottorissa oli kuitenkin sytytystulpat varmistamassa palamisreaktion onnistumista pelkän puristus-sytyksen lisäksi. DiesOtossa voidaan vaihdella, kummalla tavalla sytytys toteutetaan, mutta se vaatii myös puristussuhteen muuttamista siirryttäessä tulppasytytyksestä puristus-sytytykseen. Moottori ei ole päätenyt sarjatuotantoon, eikä siitä ole juuri kuulunut prototyypin esittelyn jälkeen. [20]

Vuosien kehitystyö näyttää hiljalleen kannattaneen, sillä Mazdan esittelemän SPCCI (spark controlled compression ignition) -moottorin odotetaan saapuvan markkinoille loppuvuodesta 2019. Mazdan moottorissa on DiesOtto-moottorin tapaan myös sytytystulpat, jotta pystytään varmistamaan moottorin toiminta eri olosuhteissa. Mazdan moottori kantaa nimeä Skyactiv-X. [21]

Skyactiv-X toimii tietyissä olosuhteissa lähes kokonaan puristus-sytyksellä HCCI-moottorin tavoin ja esimerkiksi suurilla moottorin pyörintänopeuksilla vaihdetaan tulppasytytykseen. Esimerkiksi DiesOtto-moottorissa oli ongelmia jouhevassa siirtymisessä HCCI- ja tulppasytytystilan välillä, ja moottori menetti hetkellisesti tehoa vaihdoksen aikana. Mazda on ratkaissut ongelman käyttämällä sytytystulppia jatkuvasti siten, että niiden käyttötapaa muutetaan tilanteen mukaan. [21]

HCCI-tilassa Mazdan Skyactiv-X käyttää sytytystulppia synnyttääkseen pienen paikallisen palon, joka saa aikaan paineen nousun sylinterin sisällä juuri sille tasolle, että loput sylinterissä olevasta polttoaineesta ja ilman seoksesta syttyy itsestään. Vaihdettaessa HCCI-tilasta täysin sytytystulpalla tapahtuvaan sytytykseen ei Mazdan moottorissa tapahdu viiveitä elektronisesti ohjatun venttiilien muuttuvan ajoituksen sekä palamisreak-

tion aikaan sylinterien sisäistä painetta mittaavien sensoreiden ansiosta. Moottorinohjausyksikkö huolehtii, että moottori toimii optimaalisella tavalla koko ajan. [21] Havainnekuva Skyactiv-X moottorista on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9: *Mazdan Skyactiv-X bensiinimoottori [21]*

Skyactiv-X:n puristussuhde on noin 16:1 ja valmistaja lupaa sen tuottavan vääntöä 10–30 prosenttia enemmän kuin samaan tuoteperheeseen kuuluva Skyactiv-G, joka on perinteisemmän kaltainen bensiinimoottori. Polttoainetaloudellisuuden odotetaan olevan 20–30 prosenttia parempi Skyactiv-G:hen nähden. [21] Jää nähtäväksi, lyökö Skyactiv-X automarkkinoilla läpi, mikäli se saapuu markkinoille aikataulussaan tai hieman myöhemmin.

7. YHTEENVETO

HCCI-moottorit omaavat paljon kehityspotentiaalia tulevaisuudessa ja saattavat olla yksi ratkaisu liikennemootoreiden tiukentuvien päästönormien saavuttamisessa [5]. Moottorilla on monia etuja, kuten pienemmät päästöt ja parempi polttoainetaloudellisuus verrattuna perinteisempiin otto- ja dieselmootoreihin, mutta muutamat asiat ovat vielä ongelmallisia ja samalla hidastavat HCCI-mootoreiden kaupallistumista. Yksi suurimmista haasteista on palamisreaktion hallinta erilaisilla kuormituksilla. Tekniikkaa tutkitaan kuitenkin ahkerasti ja odotettavissa on lähitulevaisuudessa ensimmäiset sarjatuotantoon päätyneet HCCI-tekniikkaa hyödyntävät henkilöautot [21]. Keskeisimpiä eroja HCCI-, otto-, ja dieselmootoreiden välillä on koottu taulukkoon 1.

Taulukko 1 *Tarkasteltujen moottoreiden vertailua*

	HCCI	Otto	Diesel
Seos palamisreaktion alkaessa	Homogeeninen	Homogeeninen	Heterogeeninen
Puristussuhde	10–20:1	8–9:1	15–25:1
Palamisreaktion lämpötila	800–1100 K	> 2000 K	1900–2100 K
Hyötysuhde	Jopa yli 40 %	30 %	40 %
Tärkeimmät päästöt	HC, CO	HC, CO, NOx	NOx, HC ja pienhiukkaset

Taulukossa 1 esitetyt johtopäätökset on käsitelty tarkemmin luvuissa 2–4. Työssä katsottiin eri polttomoottoreiden perusteita ja sen jälkeen tarkasteltiin HCCI-moottorin mahdollisia etuja ja ongelmia perinteisiin otto- ja dieselmootoreihin verrattuna. HCCI-mootoreiden kohtaamiin ongelmiin esiteltiin muutamia mahdollisia ratkaisuja ja esiteltiin myös hieman tulevaisuuden näkymiä.

LÄHTEET

- [1] Mulane S, Limaye S. Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engine Technology-A Review. International Journal of Current Engineering and Technology, Special Issue-4, 2016, pp.160–164.
- [2] Yao M, Zheng Z, Liu H. Progress and recent trends in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines. Progress in Energy and Combustion Science, vol.35, 2009, pp.398–437.
- [3] Law J, Rennie R. Internal-combustion engine, A Dictionary of Physics, Oxford University Press, Jan 2015, viitattu 14.4.2019, saatavissa: <http://www.oxfordreference.com.libproxy.tuni.fi/view/10.1093/acref/9780198714743.001.0001/acref-9780198714743-e-1525>
- [4] Cromer O, Proctor C. Gasoline engine, Encyclopedia Britannica inc, Mar 2013, viitattu 19.5.2019, saatavissa: <https://www.britannica.com/technology/gasoline-engine>
- [5] Ziemann M. Rudolf Dieselin hämärästä kuolemasta 100 vuotta – moottori voi edelleen hyvin, Yleisradio, syyskuu 2013, viitattu 19.5.2019, saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-6851735>
- [6] Armstrong L, Proctor C. Diesel engine, Encyclopedia Britannica inc, Mar 2018, viitattu 19.5.2019, saatavissa: <https://www.britannica.com/technology/diesel-engine>
- [7] Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, Ajoneuvoveron rakenne ja määrä, viitattu 15.4.2019, saatavissa: <https://www.traficom.fi/fi/liikenne/tieliikenne/ajoneuvoveron-rakenne-ja-maara>
- [8] Bendu H, Murugan S. Homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion: Mixture preparation and control strategies in diesel engines, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol.38, 2014, pp.732–746.
- [9] Nissan Motor Corporation, HCCI (Homogenous-Charge Compression Ignition), viitattu 15.4.2019, saatavissa: <https://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/hcci.html>
- [10] Sharma TK, Rao GAP, Murthy KM. Homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines: A review. Archives of Computational Methods in Engineering, vol.23, 2016, pp.623-657.
- [11] Quantum Tuning, EGR- Exhaust Gas Recirculation, viitattu 10.6.2019, saatavissa: <http://www.quantumtuning.co.uk/egr-service-solution.aspx>
- [12] Yao M, Zhang B, Zheng Z, Chen Z, Xing Y. Effects of exhaust gas recirculation on combustion and emissions of a homogeneous charge compression ignition engine fuelled with primary reference fuels. Proc Inst Mech Eng Pt D: J Automobile Eng, vol.221, 2007, pp.197-213.

- [13] Haraldsson G, Tunestål P, Johansson B, Hyvönen J. HCCI combustion phasing in a multi cylinder engine using variable compression ratio. SAE Transactions, 2002, pp.2654-2663.
- [14] Kojima S, Kiga S, Moteki K, Takahashi E, Matsuoka K. Development of a new 2L gasoline VC-Turbo engine with the world's first variable compression ratio technology, SAE Technical Paper, No.2018-01-037, 2018.
- [15] Nissan Motor Corporation, VC-Turbo – the world's first production-ready variable compression ratio engine, Dec 2017, viitattu 18.6.2019, saatavissa: <https://newsroom.nissan-global.com/releases/release-917079cb4af478a2d26bf8e5ac00ae49-vc-turbo-the-worlds-first-production-ready-variable-compression-ratio-engine>
- [16] Colwell K. Timing Changes: How Honda's VTEC Variable-Timing System Works, Car and Driver, Aug 2015, viitattu 25.5., saatavissa: <https://www.caranddriver.com/news/a15353612/timing-changes-how-hondas-vtec-variable-timing-system-works/>
- [17] Genzale C, Kong S, Reitz R. Modeling the Effects of Variable Intake Valve Timing on Diesel HCCI Combustion at Varying Load, Speed, and Boost Pressures. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol.130, 2008.
- [18] Zhang C, Pan J, Tong J, LI J. Effects of Intake Temperature and Excessive Air Coefficient on Combustion Characteristics and Emissions of HCCI Combustion. Procedia Environmental Sciences, vol.11, 2011, pp.1119–1127.
- [19] Willand J, Jelitto C, Jakobs J. The GCI combustion process from Volkswagen, MTZ Worldwide, vol.69, Apr 2008, pp.56–61.
- [20] Patrascu D, DiesOtto Engine Explained, Autoevolution, Apr 2009, viitattu 24.6.2019, saatavissa: <https://www.autoevolution.com/news/diesotto-engine-explained-5656.html>
- [21] Carney D, Mazda's New Skyactiv-X Engine Gives New Life to Internal Combustion, IEEE Spectrum, Jul 2018, viitattu 21.6.2019, saatavissa: <https://spectrum.ieee.org/transportation/efficiency/mazdas-new-skyactivx-engine-gives-new-life-to-internal-combustion>