



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

NELITAHTIMOOTTORIT

Henri Huusko

KONETEKNIikka

Kandidaatintyö

Huhtikuu 2021

TIIVISTELMÄ

Nelitahtimoottorit

Henri Huusko

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2021, 43 s.

Työn ohjaaja: Miro-Tommi Tuutijärvi

Työssä lukijalle esitellään nelitahtimoottorien historia, toiminta ja perehdytään erilaisiin ratkaisuihin päästöjen vähentämiseksi. Työn tavoitteena on antaa lukijalle kokonaiskuva nelitahtimoottorista ensin käymällä läpi sen historiaa keksimisestä lähtien ja tämän jälkeen esittelemällä yksinkertaisen nelitahtimoottorin toimintaperiaatteen, toimintaa tukevia järjestelmiä ja polttomoottoriin liittyvää termodynamiikkaa. Tämän jälkeen työssä pohditaan nelitahtimoottorien päästöjä autoteollisuuden näkökulmasta ja mietitään, kuinka päästöjä saataisiin vähennettyä tulevaisuudessa.

Asiasanat: Nelitahtimoottori, päästörajoitus, hyötysuhde

ABSTRACT

Four-stroke engines

Henri Huusko

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2021, 43 p.

Supervisor: Miro-Tommi Tuutijärvi

In this thesis, the reader is presented to the history of the four-stroke engine, its operation and is acquainted with the solutions to reduce emissions. The aim of this thesis is to give the reader a general view of the four-stroke engine by first presenting its history, then introducing the main operating principle, the supporting systems, and the basic thermodynamics of an internal combustion engine. After this, the four-stroke engine's emissions and how to reduce them in the future are discussed by the automotive industry's point of view.

Keywords: four-stroke engine, emission regulation, efficiency

ALKUSANAT

Työn tavoitteena on perehtyä nelitahtimoottorin historiaan, toimintaan ja tulevaisuuteen autoteollisuuden näkökulmasta. Työ kirjoitettiin aikavälillä 13.1.-12.4.2021. Haluaisin kiittää kandidaatintyöni ohjaajaa Miro-Tommi Tuutijärveä työn ohjaamisesta, vinkeistä koskien työn rajausta sekä hyvistä lähdemateriaaleista.

Oulussa, 12.4.2021

Henri Huusko

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto	7
2 Nelitahtimoottorien historia	8
2.1 Keksiminen ja kehitys	8
2.2 Käyttökohteet	10
3 Nelitahtimoottorin rakenne ja toiminta	12
3.1 Nelitahtimoottorin osat	12
3.2 Toimintavaiheet	14
3.3 Dieselmoottori	15
3.4 Moottorin toimintaa tukevat järjestelmät	16
3.4.1 Sähköjärjestelmä	17
3.4.2 Polttoainejärjestelmä	18
3.4.3 Jäähdytysjärjestelmä	22
3.5 Voitelujärjestelmä	24
4 Termodynamiikka ja hyötysuhde	25
4.1 Ottotyökierto	25
4.2 Dieseltäyökierto	28
5 Nykyhetki ja tulevaisuus	30
5.1 Yleisesti käytössä olevia ratkaisuja päästöjen vähentämiseen	30
5.1.1 Ahtaminen	31
5.1.2 Pakokaasujen puhdistus otto- ja dieselmoottoreissa	32
5.1.3 Hybriditekniikka	34
5.1.4 Biopolttoaineet	34
5.1.5 Downsizing ja sylinterien lepuutus	36
5.2 Nykyhetki	36
5.2.1 Freevalve	37
5.2.2 Mazda Skyactiv-X	38
5.2.3 Nissan VC-Turbo	39
5.3 Tulevaisuus	40
6 Yhteenveto	41
7 Lähdeluettelo	42

MERKINNÄT JA LYHENTEET

c_v	kaasun ominaislämpökapasiteetti vakiotilavuudessa
m	massa
p	paine
Q	lämpöenergia
T	lämpötila
V	tilavuus
W	mekaaninen työ
ε	puristussuhde
κ	kaasun ominaislämpökapasiteettien suhde
η	hyötysuhde

1 JOHDANTO

Työn aiheena on nelitahtimoottorit ja niiden historia. Työssä lukijalle esitellään nelitahtimoottorin kehityshistoria keksimisestä lähtien, sen toimintaperiaate, nykyhetki ja mahdollinen tulevaisuus. Valitsin työn, sillä moottorit ja varsinkin nelitahtimoottorit ovat kiinnostaneet minua jo lapsuudesta lähtien, ja olen harrastanut niiden parissa jo vuosia. Varsinkin nelitahtimoottorien monimutkaisempi tekniikka kaksitahtimoottoreihin verrattuna on kiinnostavaa, ja on mielenkiintoista nähdä, millainen niiden tulevaisuus on.

Nykyhetki on mielenkiintoinen nelitahtimoottorien ja ylipäätään polttomoottorien tulevaisuuden kannalta. Jatkuvasti tiukentuvat päästörajoitukset ja fossiilisten polttoaineiden vääjäämätön loppuminen tulevaisuudessa pakottavat moottorivalmistajat kehittämään moottoreista entistä vähäpäästöisempiä ja kevyempiä tai siirtymään suoraan sähkömoottoreihin kuten autoteollisuudessa nähdään tapahtuvan.

Mielenkiintoni heräsi siihen, että millä tavalla nelitahtimoottorien tekniikka on kehittynyt vuosien saatossa, ja kuinka sitä voitaisiin tulevaisuudessa vielä kehittää lisää. Tämän työn tarkoituksena onkin perehtyä syvällisemmin nelitahtimoottorin kehityshistoriaan ja toimintaperiaatteeseen varsinkin autoteollisuuden näkökulmasta, jotta voisimme ymmärtää, onko nelitahtimoottoreilla vielä tulevaisuutta.

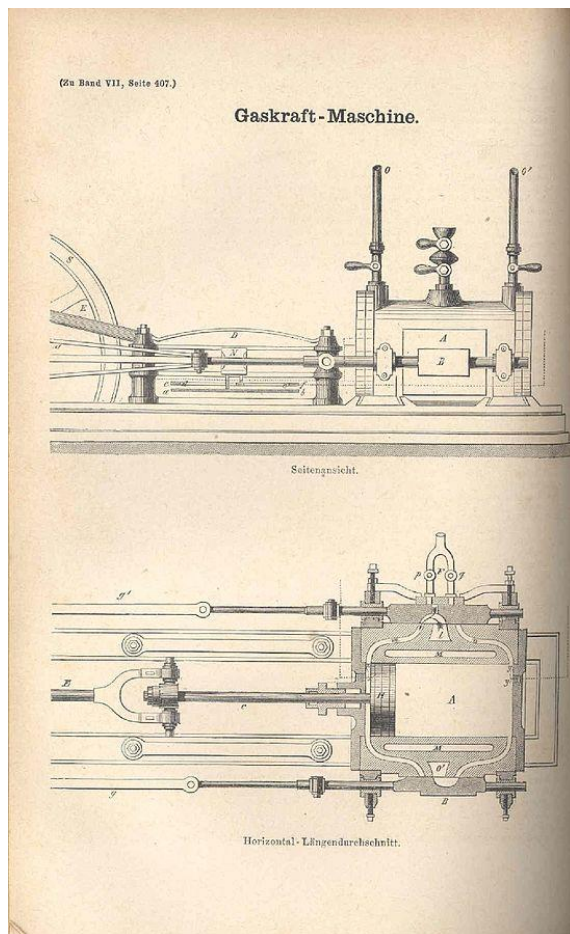
Näiden jälkeen työssä esitellään nelitahtimoottorien nykytilanne, ja millaisia innovaatioita moottoreihin on lähivuosina tuotu tai ollaan tuomassa. Työssä pohditaan myös, että millaisilla mahdollisilla ratkaisuilla tulevaisuudessa nelitahtimoottorien elinaikaa saataisiin pidennettyä, jotta niitä ei tarvitsisi täysin korvata sähkömoottoreilla.

2 NELITAHTIMOOTTORIEN HISTORIA

Nelitahtimoottori on jo yli 150 vuotta vanha. Sen kehitys alkoi 1800-luvun puolivälin jälkeen ja siitä lähtien sitä on kehitetty vuosi vuodelta paremmaksi. Nykyaikaisten nelitahtimoottorien hyötysuhde on moninkertaisesti parempi verrattuna ensimmäisiin prototyyppeihin, mutta moottorin peruseriaate on kuitenkin pysynyt samana. Suurin osa nykyaikaisista nelitahtimoottoreista hyödyntää otto- tai dieselprosessia, jotka molemmat kehitettiin 1800-luvun lopulla.

2.1 Keksiminen ja kehitys

Nelitahtimoottorin historia alkaa 1800-luvun puolivälistä. Tällöin pariisilainen J. J. E. Lenoir kehitti ja patentoi vuonna 1860 ensimmäisen kaupalliseen käyttöön tarkoitetun polttomoottorin, joka käytti polttoaineenaan valokaasua, ks. *kuva 1*. Kone oli atmosfäärinen moottori, eli siinä ei ollut puristustahtia, vaan polttoaine sytytettiin kipinällä sylinterissä normaalissa ilmapaineessa, joka teki moottorista hiljaisen, mutta hyvin tehottoman: Moottorissa oli vain 6 hevosvoimaa, ja sen hyötysuhde oli parhaimmillaan 5 % (Heywood 1988, s. 2). Lenoiria voidaankin pitää polttomoottorin keksijänä.



Kuva 1. Lenoirin polttomoottori (Meyers Konversations-Lexikon 1885–90).

Saksalaiset insinööri Nicolaus A. Otto ja saksalaisen sokeritehtailijan poika, yrittäjä Eugen Langen lähtivät kehittämään tätä Lenoirin moottoria, ja vuonna 1867 he esittelivät ja patentoivat atmosfääriseen polttomoottorin. Siinä polttoaineen ja ilman sekoituksen syttymisestä aiheutuva paineen nousu kiihdytti vapaan männän ulospäin suuntautuvaan liikkeeseen, joka loi tyhjiön sylinterin sisälle. Tämän jälkeen ilmanpaine työnsi männän taas takaisin sisään, ja täten mäntä liikkui edestakaisin. Moottorin hyötysuhde oli noin 19 %, joka oli jo huomattavasti parempi kuin Lenoirin alkuperäisen moottorin hyötysuhde. (Pitkänen 1999, s. 5)

Moottori oli kuitenkin painava ja omasi edelleen heikon hyötysuhteen, joten Otto ryhtyi suunnittelemaan moottoria, jonka yhdessä kierrossa olisi neljä männän iskua eli tahtia. Nämä tahdit olivat imutahti, puristustahti, työtahti ja pakotahti. Ensimmäinen prototyyppi valmistettiin vuonna 1876, ja se oli valtava kehitysaskel edelliseen moottoriin verrattuna.

Moottori tuotti 2,2 kW tehoa, ja sen hyötysuhde oli 17–19 prosenttia (Pitkänen 1999, s. 5). Merkittävin kehitys oli kuitenkin moottorin huomattavasti pienentynyt koko ja tilavuus. Tämän läpimurron johdosta polttomoottorin ympärille kehittyi kokonainen teollisuus, ja vuoteen 1890 mennessä niitä oli myyty jo 50 000 kappaletta. Otto-prosessi, jossa ilman ja polttoaineen sekoitus sytytetään kipinällä, tuleekin hänen nimestään, ja Ottoa voidaan pitää nykyaikaisen nelitahtimoottorin keksijänä. (Heywood 1988, s. 2)

Saksalaiset Wilhelm Maybach ja Gottlieb Daimler sekä heistä itsenäisesti toiminut Carl Benz kehittivät vuosina 1882–86 ensimmäiset bensiiniä polttoaineenaan käyttävät polttomoottorit. Nämä moottorit kehitettiin erilaisten kulkuneuvojen voimanlähteiksi: Daimler ja Maybach kehittivät moottoripyörän vuonna 1885 ja Benz kolmipyöräisen moottorivaunun vuonna 1886, jota pidetään ensimmäisenä autonä. Benz kehitti myös sähkösytytysjärjestelmän vuonna 1882, jota käytettiin tässä kyseisessä autossa. (Pitkänen 1999, s. 5)

Toinen yleisesti käytössä oleva polttomoottorityyppi ottomoottorin lisäksi on dieselmoottori, jonka kehitti saksalainen insinööri Rudolf Diesel vuonna 1892. Dieselmoottorissa polttoaineen ja ilman sekoitusta ei sytytettykään kipinällä, vaan se puristettiin niin suureen paineeseen, että tästä johtuva lämmön nousu sai sekoituksen syttymään itsestään. Tämä kaksinkertaisti hyötysuhteen muihin polttomoottoreihin verrattuna ja mahdollisti suuremman puristussuhteen ilman vaaraa nakutuksesta tai räjähdyksestä. (Heywood 1988, s. 4)

2.2 Käyttökohteet

Nelitahtisia polttomoottoreita käytetään nykyään kaikkialla: Niin autoissa, kuorma-autoissa, pienemmissä laivoissa, moottoripyörissä kuin moottorikelkoissa. Polttomoottorien käyttökohteet voidaankin jakaa kolmeen pääryhmään, jotka ovat maa- ja vesiliikenteen ajoneuvot, sähkövirran tuottaminen ja teollisuuslaitteiden voimanlähteet (Pitkänen 1999, s. 1).

Autoteollisuudessa nelitahtimoottoreita on käytetty jo yli 100 vuotta. Ensimmäistä kertaa nelitahtinen polttomoottori oli Carl Benzin vuonna 1886 julkisuudessa esittelemässään

Benz Patent-Motorwagenissa. Siinä oli noin litran tilavuuden omaava yksisylinterinen nelitahtimoottori, jossa oli 0.5 hevosvoimaa (Daimler 2021). Tämä auto oli autoteollisuuden uranuurtaja, ja oli mukana edistämässä nelitahtimoottorin leviämistä muihin käyttökohteisiin. Nykyään kaikki polttomoottorilla toimivat autot käyttävät joko otto- tai dieselprosessia hyödyntävää nelitahtimoottoria. Poikkeuksena ovat muutamat hybridivoimansiirtoa käyttävät autot, joiden polttomoottoreissa hyödynnetään Atkinsonin työkiertoa.

Moottoripyörissä nelitahtimoottorit ovat syrjäyttäneet kaksitahtimoottorit lähes kokonaan. Vielä muutama vuosikymmen sitten kaksitahtimoottorit olivat suosittuja moottoripyörissä niiden keveyden, halpojen valmistuskustannuksien ja helpon huollettavuuden vuoksi, mutta nykyään niitä käytetään enimmäkseen vain pienissä mopoissa. Varsinkin polttoaineen ruiskutustekniikan tuonti moottoripyörien nelitahtimoottoreihin on kasvattanut niiden suosioita tehon noustessa ja kylmäkäynnistettävyyden parantuessa. Ruiskutustekniikan ansiosta moottoripyörä on myös helppokäyttöisempi, kun käyttäjän ei itse tarvitse säätää moottorin polttoaineen seossuhdetta.

Moottorikelkoissakin nelitahtimoottorit ovat alkaneet yleistymään, vaikkakin kaksitahtimoottorit ovat vielä enemmistössä. Nelitahtimoottorien yleistyminen otti suuren harppauksen vuonna 2002, kun Yamaha esitteli uuden RX-1 moottorikelkkansa. Siinä oli Yamahan YZF-R1-moottoripyörästä otettu ja hieman muokattu nelisylinterinen, nelitahtinen kaasuttimilla ruokittu rivimoottori. Se oli ensimmäinen suorituskykyinen moottorikelkka, jossa oli nelitahtimoottori (Yamaha 2021). Nykyään nelitahtimoottorit ovat yleistyneet entisestään, kun polttoaineensuihkutus ja turboahtaminen ovat yleistyneet. Ongelmana on kuitenkin vielä nelitahtimoottorin suurempi paino ja koko kaksitahtimoottoriin verrattuna, mitkä varsinkin moottorikelkoissa ovat suuria tekijöitä.

Nelitahtimoottoreita käytetään myös esimerkiksi kuorma-autoissa, veneissä ja laivoissa. Näissä käytetään yleensä dieselmoottoreita, sillä ne kuluttavat vähemmän ja omaavat suuremman vääntömomentin kuin ottomoottorit.

3 NELITAHTIMOOTTORIN RAKENNE JA TOIMINTA

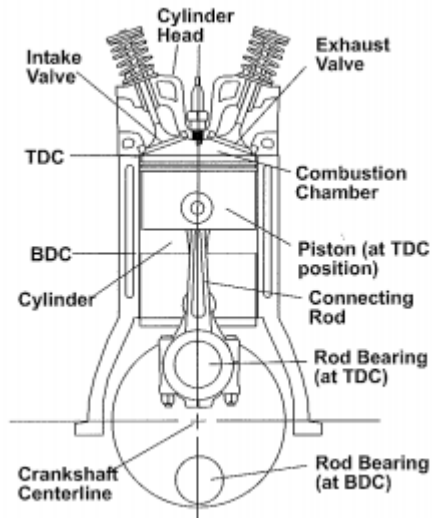
Yksinkertaisuudessaan polttomoottorin toiminta perustuu siihen, että mäntä puristaa polttoaineen ja ilman seoksen sylinterissä pieneen tilavuuteen, joka sitten sytytetään joko kipinällä, tai seos syttyy itsestään suuresta paineesta johtuvan lämpötilan nousun vuoksi. Polttoaineseoksen syttyminen aiheuttaa nopean tilavuuden kasvun, ja tämän seurauksena mäntä liikkuu alaspäin. Tämä edestakainen liike muutetaan pyöriväksi liikkeeksi kiertokangen ja kampiakselin avulla, joka mahdollistaa esimerkiksi auton liikkumisen eteenpäin.

Tässä kappaleessa lukijalle esitellään yksinkertaisen nelitahtimoottorin eri osat, toiminta pääpiirteittäin ja sen toimintaa tukevat järjestelmät. Nämä toimivat pohjana, kun viimeisessä kappaleessa lähdemme miettimään nelitahtimoottorin mahdollisia parannuskeinoja ja tulevaisuutta.

3.1 Nelitahtimoottorin osat

Perinteisen nelitahtimoottorin rakenne on melko yksinkertainen, vaikka siinä onkin enemmän liikkuvia osia kuin kaksitahtimoottorissa. Rakenteen tärkeimmät osat selviävät alla olevasta Hoagin (2005, s. 3) kuvasta, jossa on kuvattuna yksinkertainen mäntämoottori, *ks. kuva 2*.

Edetään kuvassa ylhäältä alaspäin: Ylimpänä moottorissa on sylinterinkansi (cylinder head). Sylinterinkannen sisällä on pako- ja imuventtiilit ja näiden kanavat (intake ja exhaust valve). Jakoketjulla tai hihnalla toimivassa moottorissa kannessa on myös nokka-akseli, joka ohjaa venttiilejä, kun taas työntövarsilla toimivassa moottorissa nokka-akseli on kannen ulkopuolella, ja työntövarret hoitavat venttiilien ohjaamisen.



Kuva 2. Mäntämoottorin rakenne (Hoag 2005).

Sylinterinkansi kiinnittyy itse sylinteriin (cylinder), jonka sisällä on mäntä (piston). Männen ja sylinterinkannen välissä on puristustila, jonka tilavuus muuttuu männen liikkua yläkuolokohdan (TDC) ja alakuolokohdan (BDC) välillä. Ylä- ja alakuolokohdan tilavuuksien välistä suhdetta kutsutaan puristussuhteeksi. Tilavuuksien erotus on taas itse sylinterin tilavuus, ja kun tämä kerrotaan moottorin sylintereiden lukumäärällä, saadaan koko moottorin tilavuus. (Hoag 2005, s. 3)

Mäntä kiinnittyy kampiakseliin kiertokangella (connecting rod). Kiertokangen ja kampiakselin (crankshaft) liitoksessa on kiertokangen laakeri (rod bearing), ja kun kampiakseli pyörii keskikohtansa ympäri, keskikohtaan ja kiertokangen laakerin välinen ero määrittää männen siirtymän pystysuunnassa. Ylä- ja alakuolokohdan välistä männen siirtymää kutsutaan iskuksi. Isku on yhtä suuri kuin kampiakselin ja kiertokangen laakerin keskikohtien välisen etäisyyden suuruus, eli kammensäde kerrottuna kahdella. Sylinterin halkaisijaa kutsutaan poraukseksi. (Hoag 2005, s. 3)

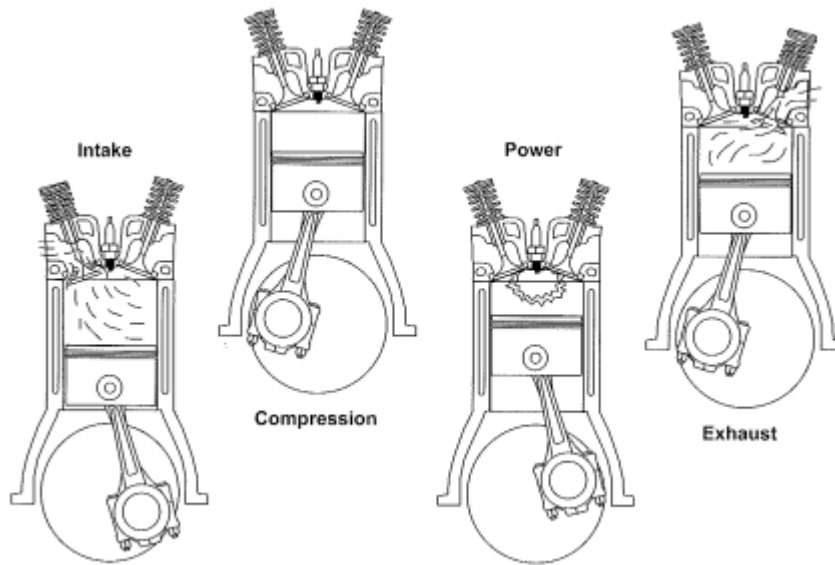
Nelitahtimoottorin rakenne voi vaihdella suuresti. Pitkäsen (1999, s. 2) mukaan sylinterit voidaan järjestää riviin, v-, w ja x-muotoon, laaka-asentoon ja tähtimuotoon. Autoteollisuudessa käytettävät moottorit voivat vaihdella kolmesylinterisistä jopa 16-sylinterisiin moottoreihin (Hoag 2005, s.6). Suurin osa niistä on kuitenkin neli- ja

kuusisylinteristen välillä; tästä suurempia moottoreita käytetään pääasiassa urheiluautoissa, loistoautoissa ja maastoautoissa.

3.2 Toimintavaiheet

Nelitahtisen ottomoottorin kierrossa on nimensä mukaisesti neljä vaihetta eli tahtia, ks. *kuva 3*. Nämä tahdit ovat seuraavanlaiset:

1. Imutahti (Intake), joka alkaa, kun mäntä on yläkuolokohdassa. Kun mäntä liikkuu alas alakuolokohtaan, se vetää alipaineen avulla polttoaineseosta sylinteriin. Jotta polttoaineseos pääsee sylinteriin, imuventtiili aukeaa juuri ennen tahdin alkua ja sulkeutuu tahdin loputtua alakuolokohdassa.
2. Puristustahti (Compression), joka alkaa, kun molemmat venttiilit ovat sulkeutuneena, ja mäntä liikkuu alakuolokohdasta yläkuolokohtaan. Tässä tahdissa polttoaineseos puristuu puristussuhteen mukaisesti murto-osaan sen alkuperäisestä tilavuudesta, ja tahdin lopussa palotapahtuma käynnistyy, ja sylinterissä oleva paine nousee nopeasti.
3. Työtahti (Power), joka alkaa, kun mäntä on yläkuolokohdassaan, ja palotapahtuma on käynnistynyt. Kun polttoaineseos palaa, sylinterissä oleva paine nousee nopeasti tilavuuden ollessa rajattu, ja palamisesta syntyvät kaasut työntävät männän takaisin alas alakuolokohtaan, mikä pakottaa kampiakselin pyörivään liikkeeseen. Kun mäntä lähestyy alakuolokohtaa, pakuventtiili aukeaa aloittaakseen pakokaasujen poistamisprosessin, ja samalla sylinterin paine laskee. Työtahdissa mäntään kohdistuu noin viisi kertaa enemmän työtä, kuin mitä sen täytyi tehdä puristustahdissa.
4. Poistotahti (Exhaust), joka on viimeinen tahti. Osa pakokaasuista poistuu paineeron vuoksi heti kun pakuventtiili aukeaa männän lähestyessä alakuolokohtaa, ja loput pakokaasut poistuvat männän liikkeessä takaisin ylös. Kun mäntä lähestyy yläkuolokohtaa, imuventtiili aukeaa taas, pakuventtiili sulkeutuu heti yläkuolokohdan jälkeen, ja kierto alkaa alusta. (Heywood 1988)



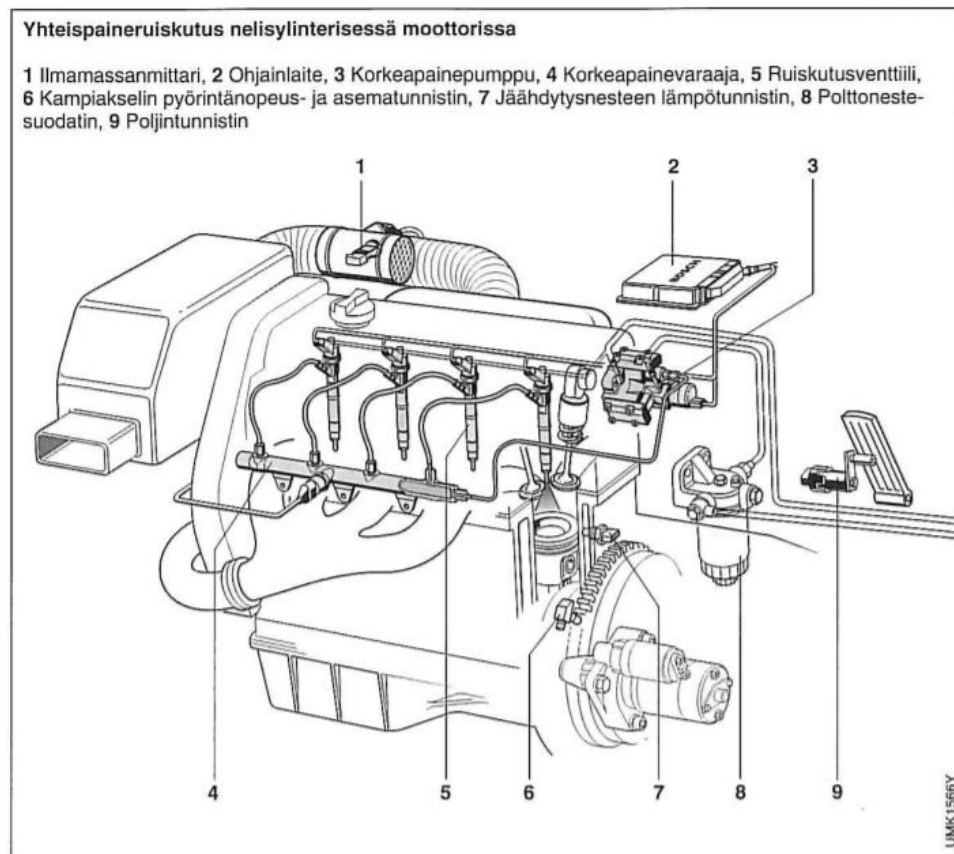
Kuva 3. Nelitahtimoottorin kierto (Hoag 2005)

3.3 Dieselmoottori

Nelitahtisen dieselmoottorin työkierto on samanlainen kuin ottomoottorissa, mutta ilma-polttoaineseosta ei sytytetä sähkökipinällä, vaan se syttyy itsestään todella korkean paineen alaisena. Dieselmoottoreissa polttoaine suihkutetaan suuttimella joko palotilan ulkopuolella olevaan pyörre-, esi-, tai ilmakammioon, tai kuten nykyään suoraan palotilaan. Dieselmoottori vaatii tarkan ilma-polttoaineseoksen täydellisen palamisen saavuttamiseksi, ja epätäydellinen palaminen ilmeneekin dieselmoottorille tyypillisenä savuttamisena. Moottori toimiikin yleisesti ilmaylimäärällä, eli ilma-polttoaineseos on heterogeeninen. (Kleimola, Pohjanpalo 1981, s. 59)

Dieselmoottorit ovat yleensä ahdettuja, eli niihin syötetään ilmapumpun eli ahtimen avulla ylipaineista ja esipuristettua ilmaa. Ahtamisen vuoksi moottorissa voidaan polttaa enemmän polttoainetta samassa tilavuudessa, jonka seurauksena sen hyötysuhde nousee, ja polttoaineenkulutus laskee. Moottoreista voidaan rakentaa myös pienempiä ja kevyempiä, kun samasta litratilavuudesta saadaan enemmän tehoa irti. (Kleimola, Pohjanpalo 1981, s. 88: 89)

Common Rail eli yhteispainesuihkutusteknologia on vähentänyt huomattavasti dieselmoottoreiden kulutusta ja päästöjä. Teknologian suurin hyöty on se, että polttoaineen suihkutuspainne ja suihkutuss määrä voidaan määrätä toisistaan riippumatta, mikä parantaa seoksen hallintaa eri tilanteissa ja täten vähentää kulutusta. Tämän mahdollistaa polttoaineen esi- ja jälkisuihkutus, joita varten järjestelmässä on erillinen korkeapainepumppu, paineen varaaja, sekä magneettiohjatut suihkutusventtiilit, ks. kuva 4. Perinteisissä jakaja- ja rivipumpuilla varustetuissa suihkutusjärjestelmissä tämä ei ollut mahdollista. (Bosch 1999, s. 8)



Kuva 4. Yhteispainesuihkutus eli Common Rail (Bosch 1999, s. 8).

3.4 Moottorin toimintaa tukevat järjestelmät

Yllä mainitut osat ovat nelitahtimoottorin rakenteen kannalta tärkeimpiä osia, mutta toimiakseen se tarvitsee myös useita moottorin toimintaa tukevia järjestelmiä. Näitä ovat

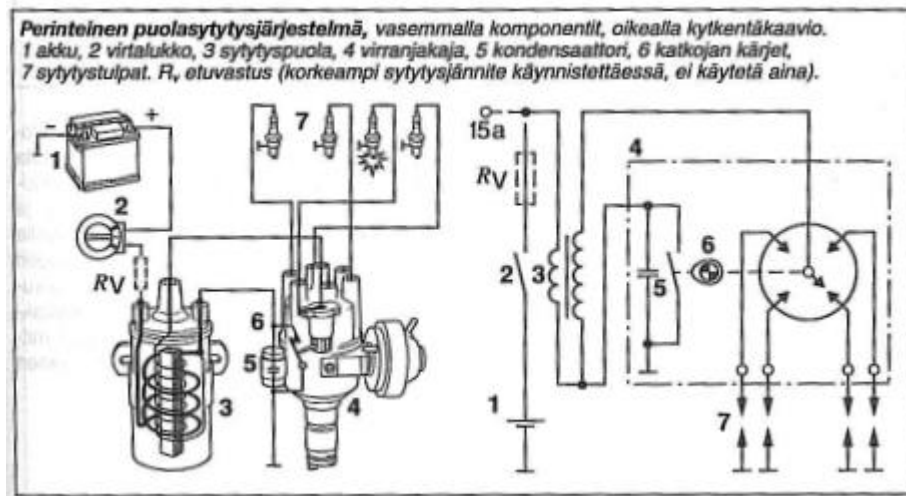
ottomoottorissa sähköjärjestelmä, polttoainejärjestelmä, jäähdytysjärjestelmä, voitelujärjestelmä, pakoputkisto ja erilaiset apulaitteet.

3.4.1 Sähköjärjestelmä

Sähköjärjestelmä on varsinkin ottomoottorin kannalta kriittinen järjestelmä, jotta polttoaineseos saadaan sytytettyä sähkökipinällä. Vanhanaikainen dieselmoottori mekaanisella syöttöpumpulla voi pysyä käynnissä täysin ilman sähköjärjestelmääkin, koska polttoaine syttyy itsestään paineen alla, joten sen sytyttämiseen ei tarvita erillistä kipinää. Yksinkertaistetusti nelitahtimoottorin sähköjärjestelmään kuuluu akku, laturi, starttimoottori ja polttoaineen sytytysjärjestelmä.

Akun tarkoitus on syöttää virtaa ajoneuvon koko sähköjärjestelmään. Sitä ladataan laturilla, joka on tavallisesti kiinnitetty moottorin kylkeen, ja jota pyöritetään kampiakselin ja laturin päissä olevalla hihnapyörillä ja niiden ympärillä olevalla hihnalla. Moottorin toiselta puolelta sen kyljestä löytyy starttimoottori. Starttimoottorin päässä on hammaspyörä, joka pyörittää moottorin ja vaihdelaatikon välissä olevaa vauhtipyörää, jonka ulkokehällä on myös hammastus.

Sytytysjärjestelmä koostuu vanhanaikaisessa moottorissa sytytystulpista, sytytyspuolasta ja virranjakajasta, ks. kuva 5. Sytytyspuolan tehtävänä on tuottaa korkeajännite sytytystulpan kipinän luomista varten. Se myös varaa akulta saatua sähköenergiaa katkojen ollessa suljettuna ja luovuttaa sen korkeajännitteisenä toisiokäämin kautta jollekin moottorin sytytystulpalle. Virranjakajan tehtävänä on jakaa sytytyspuolalta saatu sytytysjännite määrättyssä järjestyksessä sytytystulpille. Se myös luo sytytysimpulssit katkojan kärkien avulla tai kärjettömässä järjestelmässä anturin avulla. (Bosch 2006)



Kuva 5. Perinteinen puolasytytysjärjestelmä (Bosch 2006).

Täyselektronisessa sytytysjärjestelmässä sytytyspuola ja virranjakaja ovat korvattu ohjainlaitteella, ja jokaisella sylinterillä on oma sytytyspuolansa heti sytytystulpan päässä. Ohjainlaite tahdistaa sähköenergian eri sylintereille tavallisesti nokka-akselin asentotunnistimen avulla. Tämän tyyppinen sähköjärjestelmä mahdollistaa paremman sytytyksen optimoinnin ja vähentää mekaanisia osia. (Bosch 2006)

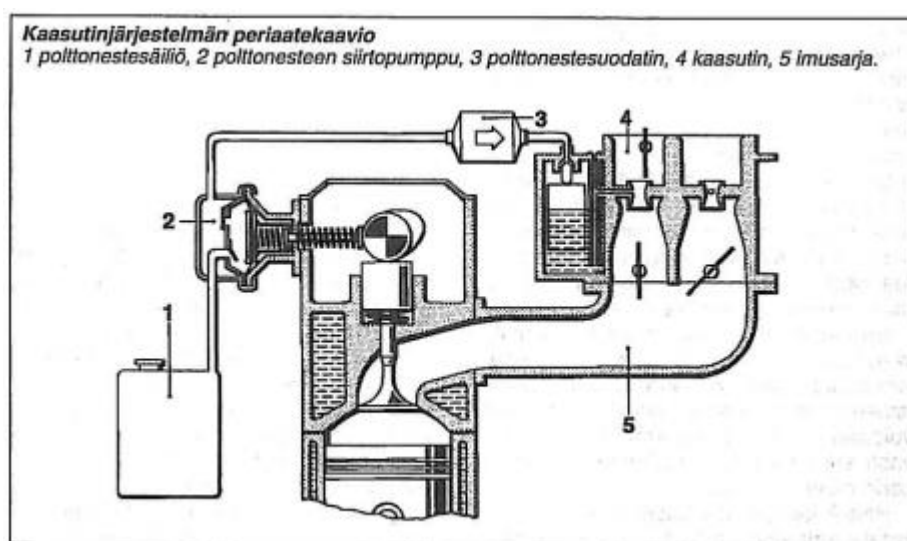
Polttoaineensuihkutus- ja sytytysjärjestelmä on nykyään yhdistetty, jolloin ne toimivat yhdessä parhaan mahdollisen palotapahtuman luomiseksi. Bosch oli edelläkävijänä tässä tekniikassa esitellessään jo vuonna 1979 järjestelmän, jota kutsuttiin nimellä Motronic. Järjestelmä sisältää tunnistimia, joilla ohjainlaite tunnistaa ajoneuvon ja moottorin eri käyttötilanteet, ja säätelee sytytystä ja polttoaineensuihkutusta sen mukaan. Näin saadaan selvästi vähennettyä moottorin kulutusta ja päästöjä, ja parannettua sen toimintaa eri käyttötiloissa ja olosuhteissa. Järjestelmää on jatkuvasti kehitetty vuosien mittaan, ja eri autovalmistajat ovat kehittäneet sen pohjalta lukuisia omia ratkaisujaan. (Bosch 2006)

3.4.2 Polttoainejärjestelmä

Polttoainejärjestelmään tehtävänä on syöttää moottorin sylintereihin oikeanlaista polttoaineen ja ilman seosta palotapahtuman aikaansaamiseksi. Ilma on tärkeässä roolissa seoksen muodostamisessa, sillä 1 l polttoainemäärän täydelliseen palamiseen tarvitaan niinkin paljon kuin 9500 l ilmaa. Tällöin ilma-polttoaineseos on stökiometrinen, eli sen

ilmakertoimen arvo on yksi. Tasaisessa maantieajossa seoksen ilmakertoimen arvo on tavallisesti hieman yli yksi, eli seosta kutsutaan laihaaksi, ja kun moottorista vaaditaan huipputehoa, on ilmakertoimen arvo yleensä alle yksi, eli seosta kutsutaan rikkaaksi. Seoksella on myös keskeinen merkitys päästöihin, sillä pakokaasujen puhdistukseen tarkoitettu katalysaattori vaatii ihanteellisesti toimiakseen seoksen täydellisen palamisen. (Bosch 2006)

Perinteisessä polttomoottorissa polttoainejärjestelmä koostuu mekaanisesta polttoainepumpusta, kaasuttimesta ja imusarjasta, ks. kuva 6. Polttoainepumppu imee nokka- tai jakaja-akselin käyttämänä polttoaineen tankista ja siirtää sen kaasuttimeen. Yleensä väliin asennetaan myös suodatin, joka suodattaa polttoaineesta mahdolliset epäpuhtaudet, jotta ne eivät joutuisi kaasuttimeen ja sieltä moottoriin. (Bosch 2006)



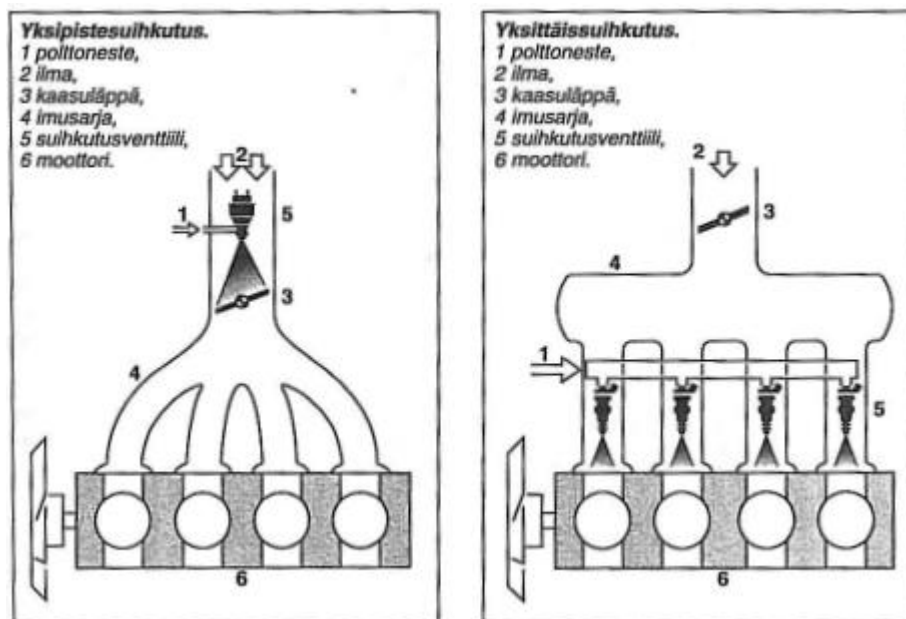
Kuva 6. Kaasutinjärjestelmän periaatekaavio (Bosch 2006)

Yleisimmin käytetty kaasutintyyppi on putouskaasutin. Ihanteellinen polttoaineseos muodostetaan kohokammion ja suutinjärjestelmien avulla, joka siirretään tarkoituksen mukaisen imusarjan kautta sylinteriin. Imusarja ja sylinterinkannen imukanavat suunnitellaan siten, että ilma-polttoaineseoksen virtaus ja jakautuminen on paras mahdollinen. Vaakakaasuttimia käytetään tilanteissa, joissa moottorin rakenteen on oltava mahdollisimman matala. (Bosch 2006)

Kaasuttimessa on kaasuläppä, jota käytetään autossa kaasupolkimella. Kaasuläppä määrittää moottoriin virtaavan ilmamäärän, ja kaasutin annostelee sen sekaan tarvittavan määrän polttoainetta riippuen kaasuläpän asennosta. Kaasuläpän asento siis määrää moottorin tuottaman tehon. Koho ja neulaventtiili säätelevät polttoaineen virtausta kaasuttimeen, ja koho pitää kohokammiossa olevan polttoaineen vakiotasolla. Kaasuttimeen virtaavan ilman määrä mitataan kaasuttimen kurkussa: Kun ilman virtausnopeus nousee ja paine vähenee, kurkun ja kohokammion välisen paine-eron ansiosta polttoaine siirtyy kohokammioista moottoriin.

Kaasutinjärjestelmää käytetään nykyään pääasiassa enää vain pienemmissä moottoripyörissä, pienkoneissa, ja erilaisissa avustavissa moottoreissa, kuten sähkögeneraattoreissa. Varsinkin autoteollisuudessa on jo siirrytty täysin polttoaineen suihkutukseen, sillä se säästää polttoainetta, ja ilma-polttoaineseos saadaan muodostettua tarkemmin.

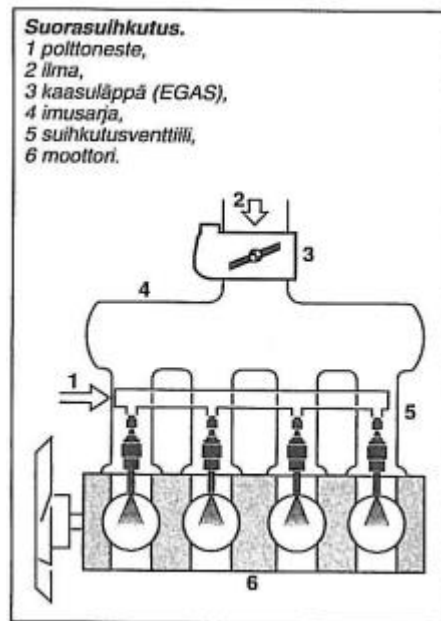
Polttoaineen suihkutusjärjestelmiä on lukuisia, niin mekaanisia kuin elektronisia, vaikkakin nykyään autoteollisuudessa kaikki järjestelmät ovat elektronisesti ohjattuja. Yksipistesuihkutuksessa yksi suihkutusventtiili suihkuttaa polttoaineen imusarjaan, joka jakaantuu kaikille sylintereille. Yksittäissuihkutuksessa jokaiselle sylinterille on oma suihkuventtiilinsä, milloin niille on mahdollista annostella juuri tietty määrä polttoainetta. Ilman määrää ohjataan imusarjaa ennen olevalla kaasuläpällä, *ks. kuva 7.* (Bosch 2006)



Kuva 7. Järjestelmät ulkoisella seoksenmuodostuksella (Bosch 2006).

Ilma-polttoaineseosta säädetään erilaisilla antureilla. Näitä ovat esimerkiksi lambda-anturi, joka mittaa hapen määrää pakokaasussa, ilmamassa-anturi ennen kaasuläppää ja kaasuläpän asentoanturi. Näillä tiedoilla ohjausyksikkö säätelee moottorin käyttötilanteeseen juuri sopivan seoksen. (Bosch 2006)

On myös olemassa järjestelmiä sisäisellä seoksenmuodostuksella, jossa polttoaine suihkutetaan suoraan palotilaan, ks. kuva 8. Tekniikkaa on käytetty jo pitkään dieselmoottoreissa, jotka toimivat ilmaylimäärällä, mutta se on yleistynyt myös ottomoottoreissa. Järjestelmän etuna on se, että imusarjassa kulkee enää vain ilma, eikä sinne voi enää varastoitua polttoainetta, joka muodostaa ns. märkiä alueita (Bosch 2006). Tämä taas vähentää polttoaineen kulutusta, kun seoksesta muodostetaan entistä tarkempi. Suorasuihkutuksella saadaan myös laskettua männän ja sylinterin lämpötilaa, jolloin moottorin puristussuhdetta voidaan nostaa.



Kuva 8. Suorasuihkutus (Bosch 2006)

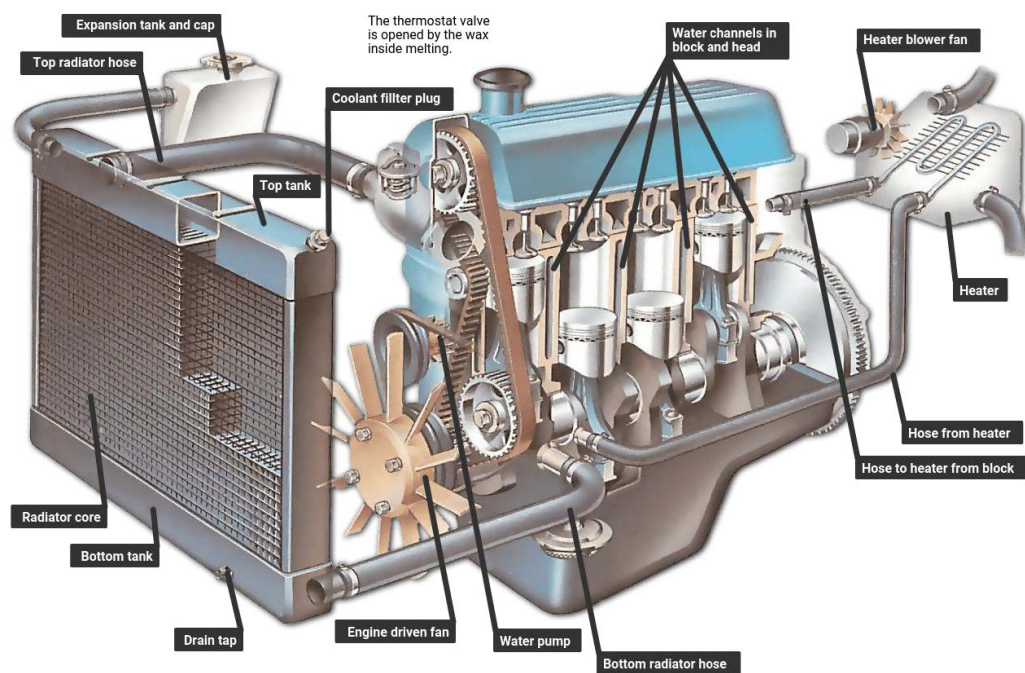
3.4.3 Jäähdytysjärjestelmä

Nelitahtimoottorit voivat olla ilma-, öljy-, tai nestejäähdytteisiä, tai jäähdytyksessä voidaan hyödyntää näiden yhdistelmää. Autoteollisuudessa moottorit ovat nykyään yksinomaan nestejäähdytteisiä, mutta ilmajäähdytys oli aikanaan hyvinkin suosittua, ja siitä ennustettiin jopa korvaajaa vikaherkälle nestejäähdytykselle. Tekniikka kuitenkin kehittyi vuosien saatossa, ja ilma- ja/tai öljyjäähdytteisiä moottoreita käytetään pääasiassa enää moottoripyörissä ja muissa yksinkertaisissa sovellutuksissa. Nestejäähdytyksen etuna on nopeampi tavoitelämpötilan saavuttaminen ja helpompi lämmön hallinta eri olosuhteissa. Nestejäähdytteisistä järjestelmistä saadaan myös lämpöä auton sisälle, kun taas ilmajäähdytteisestä moottorista lämmön eristäminen on vaikeampaa.

Ilmajäähdytteisten moottoreiden sylintereissä käytetään jäähdytysripoja, jotka kasvattavat sylinterin pinta-alaa ja täten nopeuttavat lämmön siirtymistä sylinteristä ilmaan. Moottorille tuleva ilmavirta voidaan luoda pelkästään ajoneuvon liikkeestä kuten moottoripyörissä, tai ilmavirtaa tehostetaan moottorissa kiinni olevalla puhallimella, joka siirtää ilmaa sylinterien läpi ja siirtää lämmenneen ilman pois moottorista. Esimerkiksi Volkswagen Kuplassa tähän puhallinjärjestelmään on myös yhdistetty öljyjäähdytys: Öljyä kierrätetään moottorin ulkopuolella jäähdyttimen kautta, ja puhallin puhaltaa ilmaa

tämän jäähdyttimen läpi. Tällöin lämpö siirtyy öljystä ilmaan, ja moottori jäähtyy. (McNessor 2015)

Nestejäähdytys toimii samalla periaatteella kuin öljyjäähdytys: Jäähdytysnestettä kierrätetään pumpulla auton ulkopuolella jäähdyttimessä, josta lämpö siirtyy nesteestä ilmaan ilmavirran ansiosta. Jäähdytystä voidaan myös tehostaa jäähdyttimessä kiinni olevalla tuulettimella, kun liikkeestä saatava ilmavirta ei jäähdytä moottoria riittävästi, ks. kuva 9. Jäähdytysjärjestelmään kuuluu myös termostaatti, joka säätelee nesteen virtausta järjestelmässä: Kun moottori on kylmä, termostaatti on suljettuna, jolloin neste kiertää vain pumpun ja moottorin välillä, jolloin se lämpenee nopeammin. Kun taas moottori alkaa lämpenemään, termostaatti avautuu, jolloin neste pääsee kiertämään jäähdyttimen kautta, ja moottori alkaa viilenemään. Moottorin saavuttaessa tavoitelämpötilan termostaatti vaihtelee auki- ja kiinniasennon välillä, jolloin lämpötila pysyy tasaisena. (Hoag 2005, s. 159)



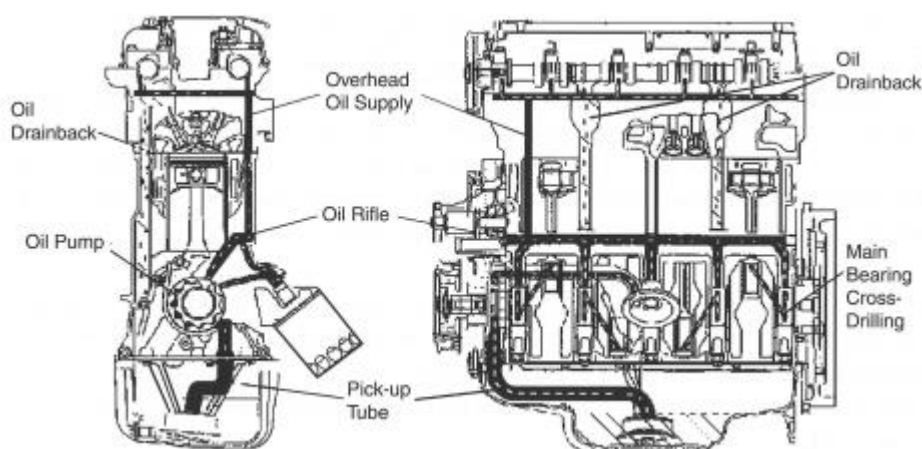
Kuva 9. Nestejäähdytysjärjestelmä autossa (howacarworks.com 2021).

3.5 Voitelujärjestelmä

Voitelujärjestelmä on erittäin tärkeä osa nelitahtimoottorin toimintaa. Hoagin (2005, s. 142) mukaan voitelu vähentää moottorin kitkaa ja kulumista, mutta sillä on myös useita muita tehtäviä: Se jäähdyttää moottoria, auttaa tiivistämisessä, puhdistaa pintoja, suojaa korroosiolta ja kuljettaa epäpuhtaudet öljynsuodattimeen.

Voitelussa käytetään erityyppisiä öljyalaatuja, joista kukin on suunniteltu tiettyihin moottoreihin ja olosuhteisiin. Halutut ominaisuudet saadaan lisäämällä öljyyn erilaisia lisäaineita. Esimerkiksi erilaisilla hajotusaineilla ja puhdistusaineilla estetään öljyn lian kertyminen moottorin osien pinnoille ja avustetaan niiden kuljettamista öljynsuodattimeen. Öljyyn lisätään myös emäksisiä aineita, jotka vähentävät moottorin palamistuotteiden öljyyn liukenemisesta johtuvaa happanemista. Tätä käytetään myös sopivan öljynvaihtovälin määrittämisessä. Muut lisäaineet auttavat mm. kulumisen ja korroosion estämisessä, öljyn viskositeetin vaihtelun vähentämisessä ja hapettumisen estämisessä. (Hoag 2005, s. 142: 143)

Öljyä kierrätetään moottorissa öljypumpun avulla. Se nostaa öljyn öljypohjasta putken avulla ja kierrättää sen moottorin läpi voidellen kaikki vaadittavat pinnat, kuten liukulaakerit. Epäpuhtaudet jäävät suodattimeen, ja lopulta öljy palaa takaisin öljypohjaan, *ks. kuva 10*. (Hoag 2005, s. 145)



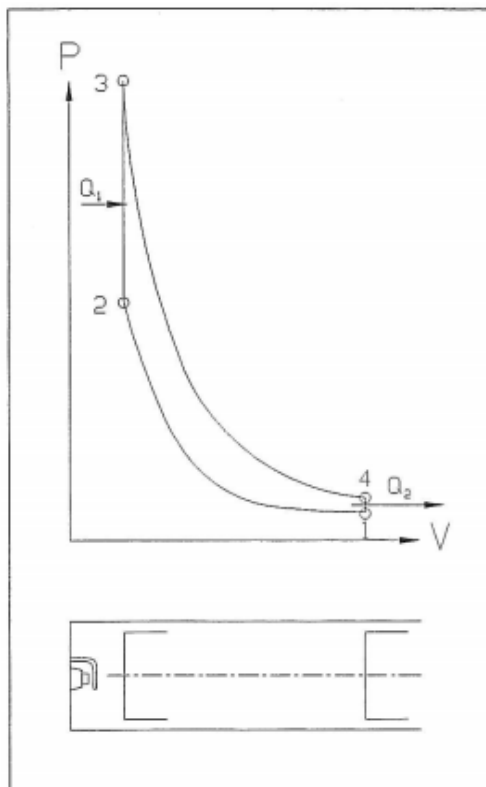
Kuva 10. Nelisynterisen moottorin voitelujärjestelmä (Hoag 2005)

4 TERMODYNAMIKKA JA HYÖTYSUHDE

Työkiertojen termodynamiikkaa tarkastelemalla voidaan moottorille laskea teoreettinen hyötysuhde, sillä polttomoottorin voidaan ajatella termodynaamisesti olevan perinteinen lämpövoimakone, jossa polttomoottorin tapauksessa palamisreaktiossa syntyvä lämpö muutetaan mekaaniseksi työksi. Matemaattisesti laskettu teoreettinen hyötysuhde on kuitenkin huomattavasti korkeampi kuin moottorin oikea hyötysuhde, sillä se ei ota huomioon kaikkia kiertoprosessissa tapahtuvia häviöitä (Pitkänen 1999, s. 34). Se on kuitenkin hyvä keino, kun halutaan ymmärtää paremmin hyötysuhteeseen vaikuttavia tekijöitä, ja siksi seuraavassa kappaleessa käsittelemme asiaa yksinkertaistetusti otto- ja dieselyökiertojen kannalta.

4.1 Ottotyökierto

Ottomoottorin työkierto sisältää neljä vaihetta, jotka on esitelty kuvassa 11:



Kuva 11. Ottotyökierto (Pitkänen 1999, s. 39)

Ottomoottorin työkierto tapahtuu Pitkäsen (1999) mukaan seuraavanlaisesti:

Välillä 1–2 tapahtuu adiabaattinen puristus, jolloin sylinteripaine kasvaa, ja tilavuus pienenee mekaanisen työn seurauksena

Välillä 2–3 systeemiin tuodaan lämpöenergiaa isokoorisesti: Sylinteripaine kasvaa entisestään, mutta tilavuus ei muutu

Välillä 3–4 kaasu paisuu adiabaattisesti, jolloin tilavuus kasvaa, ja paine pienenee, jonka seurauksena polttoaineen sisältämästä lämpöenergiasta saadaan mekaanista työtä

Välillä 4–1 osa lämpöenergiasta luovutetaan ympäristöön isokoorisesti, ja työkierto alkaa alusta

Kuten huomataan, yllä kuvatussa kiertoprosessissa ei oteta huomioon erilaisia häviöitä, kuten männän ja sylinterin välistä kitkaa ja lämmön johtumista ilmasta sylinteriin, vaan ajatellaan, että jokainen tapahtuma on puhtaasti isokoorinen tai adiabaattinen. Tästä seuraakin se, että todellinen hyötysuhde on huomattavasti alempi, kuin mikä seuraavaksi teoreettisesti laskettuna saadaan:

Yleisesti työkierron hyötysuhde määritellään kaavasta (1):

$$\eta = W/Q_1 = 1 - Q_2/Q_1 \quad (1)$$

missä

W on kiertoprosessista saatu mekaaninen työ [J]

Q_1 on systeemiin tuotu lämpöenergia [J]

Q_2 on systeemistä poistettu lämpöenergia [J]

Polttoaineessa kiertoprosessiin tuotu lämpöenergia saadaan kaavasta (2):

$$Q_1 = mc_v(T_3 - T_2) \quad (2)$$

missä

m on sylinterissä olevan kaasun eli ilma-polttoaineseoksen massa [kg]

c_v on kaasun ominaislämpökapasiteetti vakiotilavuudessa [J/kg°C]

T_3 ja T_2 ovat systeemin lämpötilat kuvan 11 pisteissä 3 ja 2

Kiertoprosessista poistettu lämpöenergia saadaan kaavasta (3):

$$Q_2 = mc_v(T_4 - T_1) \quad (3)$$

missä

T_4 ja T_1 ovat systeemin lämpötilat kuvan 11 pisteissä 3 ja 2

Kaavojen (1), (2) ja (3) avulla moottorin hyötysuhteeksi saadaan kaava (4):

$$\eta = 1 - (T_4 - T_1) / (T_3 - T_2) \quad (4)$$

Kun tähän kaavaan sovelletaan puristussuhteen määritelmää, saadaan moottorin yksinkertaistettu teoreettinen hyötysuhde kaava (5):

$$\eta = 1 - 1 / \varepsilon^{\kappa-1} \quad (5)$$

missä

η on moottorin teoreettinen hyötysuhde

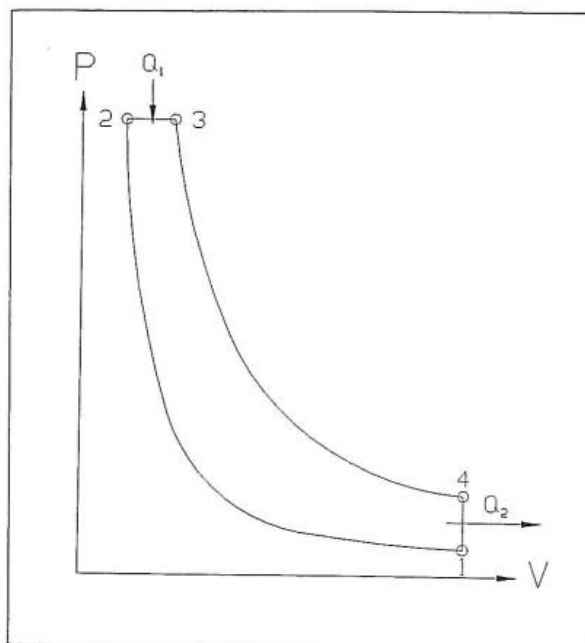
ε on moottorin puristussuhde

κ on kaasun ominaislämpökapasiteettien suhde

Huomataan, että ainoastaan moottorin puristussuhteella on merkitystä moottorin teoreettisen hyötysuhteen kannalta: Mitä suurempi puristussuhde on, sitä suurempi on moottorin hyötysuhde. Ongelmaksi muodostuu kuitenkin se, ettei puristussuhdetta voida kasvattaa loputtomiin, vaan moottorin rakenteelliset rajoitukset tulevat lopulta vastaan. Puristussuhteen kasvaessa kasvaa myös riski mahdolliselle nakutukselle, eli polttoaineen ennenaikaiselle syttymiselle suuresta paineesta johtuen. Myöskin kitkahäviöt kasvavat puristussuhteen noustessa, mikä heikentää hyötysuhteen kasvua (Pitkänen 1999, s. 40). Näiden tekijöiden vuoksi bensiinimoottorien puristussuhde vaihtelee tavallisesti 6:1–12:1 välillä, eikä 12:1 puristussuhteen yli yleensä mennä. Nykyään on kuitenkin olemassa autoteollisuudessa käytettäviä ottomoottoreita, jotka ylittävän reilustikin tämän puristussuhteen. Näitä käsittelemme kappaleessa 5.

4.2 Dieselyökierto

Pitkäsen (1999, s. 43) mukaan dieselmootorin työkierto on samankaltainen kuin ottomoottorissa, mutta dieselyökierrossa lämpö tuodaan systeemiin vakioaineessa, ja täten prosessia kutsutaankin vakioaineekierroksi. Kuvassa 12 on esitetty teoreettinen dieselyökierto:



Kuva 12. Dieselyökierto (Pitkänen 1999, s. 43)

Dieselmoottorin työkierto tapahtuu Pitkäsen (1999) mukaan seuraavanlaisesti:

Välillä 1–2 tapahtuu adiabaattinen puristus, jolloin sylinteripaine kasvaa, ja tilavuus pienenee mekaanisen työn seurauksena

Välillä 2–3 systeemiin tuodaan lämpöenergiaa isobaarisesti: Sylinteripaine pysyy vakiona, mutta tilavuus kasvaa

Välillä 3–4 kaasu paisuu adiabaattisesti, jolloin tilavuus kasvaa, ja paine pienenee, jonka seurauksena polttoaineen sisältämästä lämpöenergiasta saadaan mekaanista työtä

Välillä 4–1 osa lämpöenergiasta luovutetaan ympäristöön isokoorisesti, ja työkierto alkaa alusta

Dieselyökierron hyötysuhde saadaan laskettua kaavasta (6):

$$\eta = 1 - (p^k - 1) / \kappa (p - 1) \varepsilon^{\kappa - 1} \quad (6)$$

missä

ρ on polttosuhde V_3/V_2 (kuva 12)

Dieselmoottorin teoreettista hyötysuhdetta voidaan parantaa kahdella tekijällä: Korottamalla puristussuhdetta ja pienentämällä polttosuhdetta. Dieselmoottorin hyötysuhde on samalla puristussuhteella huonompi kuin ottomoottorin, mutta koska dieselmoottorissa ei ole vaaraa nakutukselle, voidaan sen puristussuhdetta nostaa ottomoottoria korkeammalle, jolloin käytännössä saadaan parempi hyötysuhde. Dieselmoottorien puristussuhteet vaihtelevatkin 12:1 ja jopa 24:1 välillä. Ylärajan puristussuhteelle asettaakin suurin sallittu yläpaine, jonka moottori rakenteellisesti kestä.

5 NYKYHETKI JA TULEVAISUUS

Päästörajoitusten tiukentuessa jatkuvasti on moottorivalmistajien kehitettävä uusia keinoja pienentää moottoriensa päästöjä ja kulutusta. Euroopan komission mukaan autojen päästöjen täytyy vähentyä 25 % vuoteen 2025 mennessä ja 37,5 % vuoteen 2035 mennessä (European Commission 2021). Tämä aiheuttaa merkittäviä haasteita autovalmistajille, ja pakottaa heidät keksimään entistä uusia ratkaisuja lyhyellä aikataululla. Yrityksen käyttävätkin moottorien kehitystyöhön nykyään huomattavia summia rahaa ja kilpailevat keskenään parhaasta ratkaisusta.

Sähköautoista on toivottu ratkaisua ilmastonmuutoksen hillitsemiseen. Akkujen kehitys on kuitenkin ollut verrattain hidasta, ja niiden valmistus itsessään aiheuttaa huomattavia määriä päästöjä. Myös sähköautojen lataamiseen tarvittavan sähkön tuottaminen aiheuttaa kasvihuonepäästöjä, sillä suurin osa maailman sähköstä tuotetaan yhä fossiilisin polttoainein (Hannah Ritchie 2021). Tämä onkin syy siihen, miksi polttomoottoreita yhä kehitetään, eikä kaikkia resursseja suunnata sähköteknologiaan.

Tässä kappaleessa käydään läpi nelitahtimoottoreiden kehitystyön nykytilaa ja pohditaan, millaisia ratkaisuja polttomoottoreille voitaisiin kehittää niiden tulevaisuuden turvaamiseksi. Asiaa käsitellään autoteollisuuden moottorivalmistajien ja autojen moottoritekniikan näkökulmasta, sillä autoilun päästöt ovat olleet suuresti otsikoissa viime vuosina, ja niitä kiristetään jatkuvasti lisää. Kappaleessa esitellään erilaisia yleisesti käytössä olevia teknisiä ratkaisuja, joilla päästöjä on jo saatu vähennettyä, sekä moottorivalmistajien omia innovaatioita, joita ei vielä ole laajemmassa käytössä.

5.1 Yleisesti käytössä olevia ratkaisuja päästöjen vähentämiseen

Nykyaikana autoteollisuudessa on käytössä lukuisia keinoja autojen päästöjen vähentämiseen. Esimerkiksi pakokaasuja puhdistetaan katalyysaattoreilla, hiukkassuodattimilla ja pakokaasujen takaisinkierätyksellä. Viime vuosikymmenenä turboahtaminen on yleistynyt myös ottomoottoreissa, ja suuri osa nykyaikaisista bensiinimoottoreista onkin ahdettuja: Tällä saavutetaan huomattavasti parempi

hyötysuhde moottorista, ja samalla voidaan pienentää sen tilavuutta ja kokoa. Polttoaineen suorasuihkutus on myös yleistynyt, koska sillä palotapahtumaa voidaan hallita tehokkaammin, ja polttoaineesta saadaan enemmän irti. Myös polttoaineita kehitetään, ja biopolttoaineilla pyritään saamaan merkittäviä päästövähennyksiä tulevaisuudessa. Palamisprosessissa syntyy myös hiilidioksidipäästöjä, joita voidaan hillitä ainoastaan parantamalla hyötysuhdetta tai käyttämällä yllä mainittuja biopolttoaineita.

5.1.1 Ahtaminen

Ahtaminen on nykyään hyvin yleinen tapa autoteollisuudessa kasvattaa autojen suorituskykyä ja vähentää päästöjä. Kuten ylempänä tekstissä todettiin, dieselmoottoreissa ahtaminen on ollut yleistä jo hyvin pitkään, mutta ottomoottoreissa se on alkanut yleistymään vasta viimeisen 20 vuoden aikana.

Ahtaminen on hyvin tehokas tapa nostaa moottorin hyötysuhdetta, sillä mitä enemmän moottoriin saadaan syötettyä ilmaa, sen enemmän siinä voidaan polttaa polttoainetta. Tyypillisesti ahtamiseen käytetään turboahdinta tai mekaanista ahdinta: Turboahdimen etuna on, että se pyörii pakokaasun virtauksen vaikutuksesta, minkä sisältämä energia menisi tavallisesti hukkaan. Mekaanisen ahtimen pyörittämiseen tarvittava energia otetaan suoraan moottorin kampiakselilta, jolloin se luonnollisesti vie moottorilta hieman tehoa. Mekaanisessa ahtamisessa ei tehon tuotossa kuitenkaan tapahdu samanlaista viivettä kuin turboahdamisessa, vaikkakin nykyteknologian avulla turboahdimien viive on saatu lähes eliminoitua. (Baines 2005)

Esimerkiksi Volvo on yhdistänyt nämä molemmat ahtamisen tekniikat, ja sen suuritehoiset bensiinimoottorit ovatkin sekä turboahdettuja että mekaanisesti ahdettuja. Tällä tekniikalla pyritään saamaan moottorin tehoalueesta mahdollisimman laaja: Mekaaninen ahdin tuo vääntöä ja hyvän kaasunvasteen, kun taas turboahdin tuo moottoriin huipputehoa. Tällä teknologialla moottorista saadaankin yli 300 hevosvoimaa sen tilavuuden ollessa vain kaksi litraa. (Volvo 2021)

5.1.2 Pakokaasujen puhdistus otto- ja dieselmoottoreissa

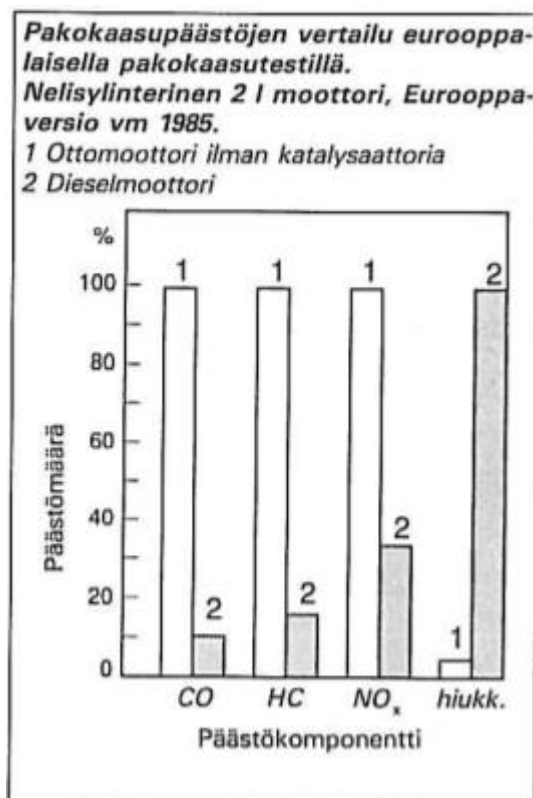
Ottomoottorin palamisprosessissa syntyy hiilimonoksidia CO, palamattomia hiilivetyjä HC ja typen oksideja NO_x. Pakokaasu täytyy tämä vuoksi puhdistaa pakoputkistossa, etteivät nämä saasteet pääse ilmakehään. Tätä varten on kehitetty katalysaattori, jolla pakokaasusta voidaan puhdistaa kaikkia näitä saasteita pois. (Heywood 1988, s. 648)

Perinteinen katalysaattori koostuu tavallisesti metallikuoresta, jonka sisällä on erittäin tiheä verkko, joka pinnoitetaan alumiinioksidilla ja katalyyttinä toimivalla jalometallilla. Tämä jalometalli on usein platinaa tai rhodiumia. Verkon pinta-ala on katalysaattorin kokoon nähden erittäin suuri, mikä mahdollistaa tehokkaan katalyyysin jalometallin ja kaasun välillä. Pakokaasun virratessa katalysaattorin läpi sen sisältämän verkon jalometalli nopeuttaa hiilivetyjen hapettumista vedeksi ja typen oksidien hapettumista vähemmän haitalliseksi hiilidioksidiksi. Katalysaattori ei täten suodata pakokaasusta mitään saasteita, vaan se muuntaa ne vähemmän haitalliseksi. (Heywood 1988, s. 649)

Nykyään katalysaattorit ovat kolmitoimisia, jolloin samalla katalysaattorilla pakokaasusta saadaan hiilimonoksidien ja hiilivetyjen hapettamisen lisäksi vähennettyä typen oksideja. Tämä onnistuu vain stökiometrisellä seoksella. Katalyyysi tuo pakokaasun eri kaasujen yhdistelmän lähes tasapainotilaan, joka sisältää vettä, hiilidioksidia ja typpikaasua N₂. Täten sitä kutsutaan kolmitoimiseksi, sillä se poistaa pakokaasusta kaikki kolme eri saastetta (Heywood 1988, s. 655). Dieselmoottoreissa ei kuitenkaan voida käyttää kolmitoimikatalysaattoreita, sillä ne toimivat ilmaylimäärällä, eli palaminen ei ole stökiometristä.

Dieselmoottorissa on tyypillisesti alhaiset hiilimonoksidin ja palamattomien hiilivetyjen päästöt, mikä johtuu sille ominaisesta korkeasta ilmakertoimesta. Dieselmoottorissa on myös ottomoottoria alhaisemmat typen oksidien NO_x-päästöt, vaikkakin nykyaikana dieselmoottoreiden tehokkuuden parantuessa myös typen oksidien päästöt ovat kasvaneet. Autoteollisuuden dieselmoottorit ovatkin nykyään varustettu SCR-tekniikalla (Selective Catalytic Reduction), jossa auton pakoputkistoon ruiskutetaan ureaa, joka reagoi typen oksidien kanssa erityisessä SCR-katalysaattorissa, jolloin niiden päästöjä saadaan vähennettyä jopa 90 %. (Diesel Technology Forum 2021)

Suurin tekijä dieselmoottorin päästöissä ovat kuitenkin hiukkaspäästöt, jotka ovat selvästi ottomoottoria korkeammat, ks. kuva 11. Ne koostuvat pääosin hiilihiukkasista eli noesta ja hiilivety-yhdisteistä. (Bosch 1990, s. 3)



Kuva 11. Otto- ja dieselmoottorien pakokaasupäästöjen vertailu (Bosch 1990, s. 3)

Hiukkassuodatin on tärkeä elementti dieselmoottorin päästöjen vähentämisessä. Se on pakoputkeen sijoitettava putkimainen keramiikkasuodatin, joka suodattaa nopea pakokaasujen seasta. Muodoltaan ja rakenteeltaan se muistuttaa ottomoottorin katalysaattoria, mutta sen sisällä olevat putket on suljettu toisesta päästä keramiikkatulpalla, johon noki jää pakokaasun virratessa sen läpi. Dieselmoottoireissa käytetään myös katalysaattoreita hiilimonoksidi- ja hiilivety-päästöjen vähentämiseen, vaikkei niillä olekaan yhtä suurta merkitystä kokonaispäästöissä kuten ottomoottorissa (Bosch 1990, s. 30).

5.1.3 Hybriditekniikka

Hybridisähköisten ajoneuvojen tarkoitus on yhdistää sähköajoneuvojen ja polttomoottoriajoneuvojen hyvät puolet. Hybriditekniikassa sähkömoottori toimii avustavana parina polttomoottorille. Sähkömoottori voi olla sijoitettu esimerkiksi vaihdelaatikon ja polttomoottorin väliin tai laturin tilalle polttomoottorin apulaitteeksi. Tällä tekniikalla pyritään vähentämään päästöjä tai joissain tapauksissa lisäämään auton suorituskykyä. (CTCN 2021)

Hybridiajoneuvoja on monenlaisia. Yksinkertaisin niistä on mikrohybridi, joka ei käytännössä ole hybridi samalla tavalla kuin muut hybridiajoneuvot. Tässä tapauksessa sähkömoottori ei avusta auton etenemistä, vaan toimii laturin sijasta generaattorina ja korvaa myös perinteisen starttimoottorin. Se lataa akkua auton jarruttaessa ottamalla talteen jarrutusenergiaa ja mahdollistaa Start & Stop-teknologian, eli auton nopean sammuttamisen ja käynnistämisen pysähtyneenä polttoaineen kulutuksen ja täten päästöjen vähentämiseksi. (CTCN 2021)

Kevythybrideissä ja täyshybrideissä sähkömoottori on kytketty polttomoottorin kanssa sarjaan siten, että se avustaa esimerkiksi liikkeellelähdessä ja kiihdytyksissä. Täyshybridissä oleva suurempi akusto mahdollistaa myös lyhyen ajomatkan pelkällä sähköllä; kevythybridissä sähkömoottori toimii vain avustavana tekijänä. Sähkömoottori kerää myös talteen jarrutusenergiaa ja lataa sillä ajoneuvon akustoa. Kuten ensimmäisellä tekniikalla, tälläkin pyritään päästöjen vähentämiseen, kun polttomoottorin kuormitusta voidaan muuttaa tilanteen mukaan. (CTCN 2021)

5.1.4 Biopolttoaineet

Biopolttoaineet ovat tehokas ja melko yksinkertainen keino vähentää liikenteen päästöjä, sillä niitä voidaan jo käyttää nykyisessä, vanhenevassa autokannassa. Suomessa kaikki polttoaineet sisältävät tietyn määrän biokomponentteja, ja biopolttoaineilla onkin tarkoitus vähentää liikenteen hiilidioksidipäästöjä 15 % vuoteen 2030 mennessä. Tämä on yhtä paljon kuin sähköautojen mahdollinen päästöjä vähentämispotentiaali. (Autoalan Tiedotuskeskus 2021)

Biopolttoaineita ovat biodiesel, uusiutuva diesel ja biokomponentteja sisältävä bensiini. Biodieselissä on happea sisältäviä FAME-komponentteja (Fatty Acid Methyl Ester), eli estereitä. Näitä estereitä voidaan valmistaa esimerkiksi rypsiöljystä, ja biodieseliä voidaan sekoittaa fossiilisen dieselin sekaan enimmillään 7 % nykyisen laatustandardin mukaisesti. (Autoalan Tiedotuskeskus 2021)

Uusiutuva diesel eroaa biodieselistä, sillä sitä ei ole ollenkaan jalostettu raakaöljystä. Se on fossiilisen dieselin kaltainen parafiininen polttoneste, mutta se on biologista alkuperää. Biodieseliä voidaan valmistaa useista erilaisista raaka-aineista ja prosesseista: Esimerkiksi Nesteen valmistama My Diesel valmistetaan vetykäsittelyllä, ja sitä voidaan valmistaa esimerkiksi eläinrasvoista, kasvirasvoista ja muista eloperäisistä rasvoista. Uusiutuvaa dieseliä voidaan valmistaa myös synteettisesti esimerkiksi puubiomassasta tai muusta kasvipohjaisesta biomassasta. (Autoalan Tiedotuskeskus 2021)

Bensiinit sisältävät tunnetusti etanolia, joka valmistetaan biologisesti käymisreaktion tuloksena erilaisista hiilihydraateista, kuten perunasta ja sokerista. Bensiinin E-luku määrää, paljonko bensiinissä saa enimmillään olla etanolia. Esimerkiksi tavallisimmissa 98-oktaanisessa E5 bensiinissä saa olla enimmillään 5 % etanolia ja 95-oktaanisessa E10 bensiinissä enimmillään 10 % etanolia. Suomessa myydään myös korkeaseosetanolia E85, mutta sitä voidaan käyttää vain autoissa, joissa on etanolille soveltuva polttoainejärjestelmä ja moottori. (Autoalan Tiedotuskeskus 2021)

Tällä hetkellä kehitetään myös synteettisiä polttoaineita hiilestä ja vedystä. Esimerkiksi suomalaisen energiayhtiöllä St1:llä on käynnissä hanke, jossa etanolin tuotannossa syntyvästä hiilidioksidista ja uusiutuvaa sähköenergiaa hyödyntämällä tuotetusta vedystä valmistetaan synteettistä hiilivety-polttoainetta. Tavoitteena on, että tulevaisuuden polttoaineet voidaan valmistaa synteettisesti ilman fossiilisia komponentteja. Tähän on kuitenkin vielä aikaa, sillä esimerkiksi vedyn tuottaminen uusiutuvan sähkövirran avulla vedestä aiheuttaa suuret tuotantokustannukset. (St1 2021)

Biopolttoaineiden haittapuolena on kuitenkin se, että ne voivat kilpailla samoista raaka-aineista elintarviketuotannon kanssa. Biopolttoaineet jaotellaankin kolmeen sukupolveen: Ensimmäisen sukupolven polttoaineet sisältävät elintarviketuotantoon

soveltuvia raaka-aineita, kun taas toisen ja kolmannen sukupolven biopolttoaineiden valmistuksessa ei käytetä elintarvikkeiksi soveltuvia raaka-aineita. Toisen sukupolven polttoaineet valmistetaan esimerkiksi selluloosasta, kun taas kolmannen sukupolven polttoaineet valmistetaan kokonaan vielä hyödyntämättömistä raaka-aineista, kuten levästä. Näitä ei kuitenkaan ole vielä tuotannossa, vaan ne ovat tulossa tulevaisuudessa. (Autoalan Tiedotuskeskus 2021)

5.1.5 Downsizing ja sylinterien lepuutus

Moottorien downsizing eli tilavuuden pienentäminen on ollut yksi autoteollisuuden hallitsevista trendeistä 2010-luvulla. Pääperiaatteena on pienentää moottorin tilavuutta säilyttämällä suuremman moottorin teho. Tämän tavoitteena on pienentää päästöjä, vähentää moottorin kulutusta ja keventää sitä. Pienempi mäntä johtaa myös pienempään kitkaan moottorin ja sylinterin välillä (Patil 2017). Downsizing mahdollistetaan yleensä ahtamalla moottori, jolloin se saadaan toimimaan paremmalla hyötysuhteella. Muita tekniikoita moottorin koon pienentämiseen ovat esimerkiksi suorasuihkutusta, pakokaasun takaisinkierätyksi eli EGR ja muuttuman ajoituksen käyttö.

Eräs autovalmistajien käyttämä keino kulutuksen vähentämiseen on moottorin sylinterien lepuutus: Idea on sama kuin downsizingissä, mutta moottorin kokoa ei pienennetä fyysisesti, vaan sen tilavuus pienentyy hetkellisesti sylinterien lepuuttamisen johdosta. Yleensä palotapahtuma katkaistaan sulkemalla tietyn sylinterin imu- ja pakoventtiilit sekä lopettamalla polttoaineensyöttö, jolloin mäntä liikkuu edelleen edestakaisin kampiakselin ansiosta, muttei kuluta polttoainetta. Tällöin moottorin kuormituspistettä saadaan siirrettyä paremman hyötysuhteen alueelle. Tekniikkaa käytetään yleisimmin suurissa V6- ja V8-moottoreissa. (McIntosh 2018)

5.2 Nykyhetki

Polttomoottoreita kehitetään yhä jatkuvasti, ja uusia ratkaisuja päästöjen vähentämiseen etsitään kuumeisesti. Nelitahtimoottorin tulevaisuus autoteollisuudessa näyttääkin nykyään epävarmalta, ja muutamat autovalmistajat ovat jo ilmoittaneet siirtyvänsä seuraavan kymmenen vuoden aikana täysin sähkömoottoreihin. Myös monet maat ovat

ilmaisseet aikomuksensa kieltää polttomoottoriautojen myynti kokonaan, jotta liikenteen paikalliset päästöt saataisiin kuriin. Tästä huolimatta nelitahtimoottoreihin kehitetään jatkuvasti uusia ratkaisuja, ja seuraavassa kappaleessa tuodaankin esille muutamia näistä, ja minä kirjoittajana kerron myös omia tulevaisuuden näkemyksiäni.

5.2.1 Freevalve

Eräs lupaavimmista tulevaisuuden teknologioista on superautoja valmistavan Koenigseggin sisaryhtiön kehittämä nokka-akseliton moottori Freevalve. Moottorin peruseräite on se, että imu- ja pakoventtiilejä ei ohjata mekaanisesti moottorin pyörimisen mukaan, vaan jokaista venttiiliä voidaan ohjata täysin itsenäisesti. Jokaisen venttiilin päässä on pneumaattinen ohjausyksikkö, joka liikuttaa venttiiliä ylös ja alas täysin vapaasti riippumatta moottorin muusta toiminnasta. (Freevalve 2021)

Freevalven (2021) mukaan sen tekniikalla on lukuisia etuja verrattuna tavallisiin nokka-akselilla ohjattaviin moottoreihin. Esimerkiksi palotapahtumaa voidaan ohjata huomattavasti tarkemmin kuin ennen, minkä johdosta moottorin hyötysuhdetta voidaan kasvattaa, nakutusta voidaan vähentää tai kokonaan poistaa korkeillakin puristussuhteilla ja venttiilien aukeamiset voidaan optimoida juuri oikeanlaisiksi. Tämän johdosta kulutus pienenee, ja samalla teho kasvaa. Tekniikalla voidaan myös eliminoida perinteisen hukkaportin tarve ahdetussa moottorissa.

Kun tätä tekniikkaa on käytetty Qoroksen tuottamassa 1,6 litraisessa nelisynterisessä moottorissa, Freevalven (2021) mukaan sen teho on noussut jopa 45 % ja vääntö 47 %. Polttoaineen kulutusta on myös saatu vähennettyä 15 % ja tyhjäkäynnistä syntyvää häviötä 17,2 %. Tekniikan avulla voidaan myös parantaa kylmäkäynnistystä käytettäessä paljon etanolia sisältäviä polttoaineita, se mahdollistaa sylintereiden poistamisen käytöstä vajaalla kuormituksella polttoaineen säästämiseksi ja sen avulla ahdetusta moottorista voidaan hetkellisesti tehdä jopa kaksitahtinen matalilla kierroksilla. Moottorin puristussuhdetta voidaan myös muuttaa kesken käynnin paremman hyötysuhteen saavuttamiseksi.

Ratkaisulla saadaan myös huomattavia säästöjä moottorin koon suhteen: Koekäytetyn 1,6 litraisen moottorin korkeutta on saatu vähennettyä 50 mm, syvyyttä 70 mm ja painoa jopa 20 kiloa. Tämä on mahdollista sen vuoksi, että moottorissa ei esimerkiksi tarvita enää jakohihnaa tai jakoketjua, nokka-akselia, ylimääräisiä hammas- tai hihnapyöriä eikä kaasuläppää. Freevalven tekniikkaa käyttävä moottori onkin huomattavasti yksinkertaisempi kuluvilta osiltaan, ja tekniikka eliminoi esimerkiksi jakohihan tai jakoketjun vaihdon tarpeen. (Freevalve 2021)

Freevalven (2021) mukaan sen työskentelee OEM-valmistajien kanssa, ja sen tavoitteena on saada tekniikka lopulta kaupalliseen ja maailmanlaajuiseen käyttöön. Vaikka Freevalvea on kehitetty jo vuosia, ei ole vielä tietoa, milloin se mahdollisesti tulee kaupalliseen käyttöön. Ongelmana on mahdollisesti vielä kustannukset perinteiseen moottoriin nähden, mutta idea nokka-akselittomasta moottorista kuulostaa erittäin lupaavalta, ja se voisi olla yksi potentiaalinen ratkaisu polttomoottorin eliniän kasvattamiseen.

5.2.2 Mazda Skyactiv-X

Mazda on ottanut erilaisen reitin päästöjä vastaan taistelussa verrattuna moneen muuhun autovalmistajaan: Se kehittää jatkuvasti polttomoottoreitaan, eikä ole julkaissut vielä montaa täysin sähköistä autoa. Mazdan tavoitteena onkin, että vuoteen 2035 mennessä vielä 85 % sen autoista toimii polttomoottorilla (Mazda 2021). Strategia on lähes päinvastainen verrattuna esimerkiksi Volvon tulevaisuuden suunnitelmiin: Se aikoo vuodesta 2030 eteenpäin valmistaa ainoastaan sähköautoja.

Mazda onkin ensimmäisenä maailmassa tuonut sarjatuotantoon henkilöauton bensiinimoottorin, jossa bensiiniä ei sytytetä perinteiseen tapaan pelkällä kipinällä, vaan se syttyy puristuksen ja kipinän seurauksena. Moottorin tarkoituksena onkin yhdistää otto- ja dieselmoottorien hyvät puolet: Hyvät vääntöominaisuudet matalilla kierroksilla, ilman dieselin hiukkaspäästöjä ja bensiinimoottorin korkeaa kulutusta. (Mazda 2021)

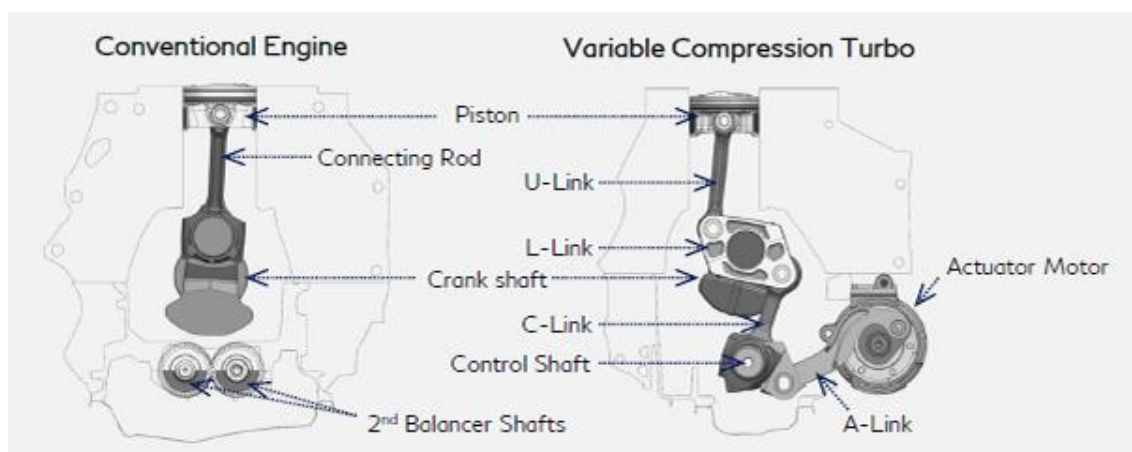
Mazda (2021) kutsuu tekniikkaansa Spark Controlled Compression Ignition SPCCI:ksi. Moottori hyödyntää suurta puristussuhdetta ja laihaa seosta toimiessaan siten, että kipinä

sytyttää vain pienen osan ilma-polttoaineseoksesta, mikä saa aikaan sen, että paine sylinterissä kasvaa ja saa koko seoksen syttymään itsestään, kuten dieselmoottorissa. Tämän seurauksena palotapahtuma on nopeampi ja puhtaampi kuin perinteisessä ottomoottorissa.

Mazdan (2021) mukaan tällä tekniikalla saavutetaan lukuisia hyötyjä tavalliseen ottomoottoriin verrattuna: Moottori tuottaa enemmän tehoa ja jopa 30 % enemmän vääntöä Mazdan edellisen sukupolven moottoreihin verrattuna, se kuluttaa 20-30 % vähemmän, ja ajomukavuus on parempi alhaisilla kierroksilla saavutettavan väännön vuoksi. Moottori toimii myös tavallisella bensiinillä, ja se on suunniteltu toimimaan hybridivoimansiirron kanssa.

5.2.3 Nissan VC-Turbo

Myös Nissan on kehittänyt ja tuonut markkinoille valtavirrasta poikkeavan moottorin, joka kantaa nimeä VC-Turbo. Kirjaimet VC tulevat sanoista Variable Compression eli muuttuva puristussuhde: Nissanin (2021) moottori onkin ensimmäinen muuttuvapuristussuhteinen sarjavalmistettava moottori. Moottorissa hyödynnetään eräänlaista linkkujärjestelmää, joka mahdollistaa männän ylä- ja alakuolo-kohtien muuttamisen moottorin käydessä, ks. kuva 12.



Kuva 12. Tavallisen moottorin ja VC-turbomoottorin vertailu (Nissan 2021)

Kuten ylempänä todettiin, moottorin teoreettinen hyötysuhde on suoraan riippuvainen sen puristussuhteesta. Ongelmaksi kuitenkin muodostuu nakutus ja moottorin rakenteen kestävyys, joten tavallisessa moottorissa joudutaan tyytymään tiettyyn puristussuhteeseen. Moottorissa olisi kuitenkin mahdollista käyttää korkeampaa puristussuhdetta sen ollessa pienemmän kuormituksen alaisena, ja tähän Nissanin (2021) VC-Turbo tuo ratkaisun: Kun autolla ajetaan tasaista vauhtia, ja moottoria kuormitetaan vain vähän, sen puristussuhde voidaan nostaa niinkin korkeaksi kuin 14:1. Kun taas autolla kiihdytetään, ja moottoria kuormitetaan paljon, se voidaan laskea 8:1 asti. Puristussuhde vaihtelee ajon aikana tällä välillä riippuen kuormituksesta. Kuten työssä aikaisemmin esiteltyjen tekniikkojen tavoitteena, tämänkin tarkoituksena on yhdistää hyvä suorituskyky alhaiseen polttoainenkulutukseen.

5.3 Tulevaisuus

Tulevaisuudessa Freevalven, Mazdan ja Nissanin kehittämien ratkaisujen kaltaiset tekniikat tulevat toivottavasti yleistymään, sillä ne ovat lupaavia ja voisivat olla mahdollinen osaratkaisu päästöjen pienentämiseen. Yksittäinen tekniikka tuskin tulee tuomaan ratkaisua päästöongelmiin, mutta näiden yhdistäminen voisi olla avain ratkaisuun. Esimerkiksi moottori, jossa olisi Freevalven itsenäisesti toimivat venttiilit, Mazdan puristussytytteinen palotapahtuma ja Nissanin vaihtuvan puristussuhteen mahdollistava mekanismi, voisi olla erittäin vähäkulutteinen ja polttoainetehokas. Ongelmaksi kuitenkin muodostuu moottorin monimutkaisuus ja kustannukset, eikä tällaista moottoria välttämättä tulla koskaan näkemään, vaikka erittäin mielenkiintoinen se olisikin.

Vaikka tulevaa onkin hankala ennustaa, uskon, että nelitahtimoottoreilla on autoteollisuudessa vielä pitkä tulevaisuus edessään. Kuten todettu, jo nyt on olemassa lupaavia ratkaisuja tulevaisuuden varalle, ja uusia kehitetään jatkuvasti. Myös erilaiset biopolttoaineet ja ympäristöystävällisemmät voiteluöljyt tulevat varmasti olemaan suuressa roolissa jatkossa, ja niitä kehitetäänkin jatkuvasti ympäristöystävällisemmäksi.

6 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli esitellä nelitahtimoottorin historia ja toiminta sekä miettiä sen nykytilannetta ja tulevaisuutta. Työssä lähdettiin liikkeelle käsittelemällä nelitahtimoottorin keksimistä ja varhaisia kehitysaiheita, minkä jälkeen tuotiin esille sen yleisimpiä käyttökohteita. Tämän jälkeen esiteltiin nelitahtimoottorin toimintaa ja siihen liittyvää termodynamiikkaa, ja viimeisenä käsiteltiin sen nykyaikaa ja tulevaisuutta autoteollisuuden tiukentuneiden päästörajoitusten näkökulmasta.

Vaikka nelitahtimoottoreita käytetään nykyään vielä suurimmassa osassa autoja, tuli työn kirjoituksen aikana kuitenkin selväksi, että elämme todennäköisesti sen elinkaaren loppupuolella. Alati tiukentuvat päästörajoitukset ja fossiilisten polttoaineiden vääjäämätön loppuminen tulevaisuudessa ovat ajaneet moottorivalmistajat ahtaalle, ja trendi onkin selvästi sähköautojen yleistymistä kohti.

Vielä 2000-luvun alussa kaksilitrainen ahtamaton bensiinimoottori oli yleinen koko autoteollisuudessa, mutta nykyään lähes kaikki moottorit ovat ahdettuja ja pienempiä tilavuudeltaan. Eri moottorivalmistajat ovat myös kehittäneet omaperäisiä ratkaisuja hyötysuhteen parantamiseksi, joista ylempänä käsitelimme esimerkiksi Freevalven nokka-akselitonta ja Nissanin muuttuvapuristussuhteista moottoria. Myös hybridisaatio on tuonut lisävuosia nelitahtimoottorille, ja nykyään suuri osa moottoreista onkin vähintään kevythybridejä 48 Voltin sähköjärjestelmällä.

Vaikka nelitahtimoottorin tulevaisuus näyttääkin synkältä, uskon, että sillä on vielä useita kymmeniä vuosia edessään. Moottorivalmistajat kehittelevät jatkuvasti uusia tekniikoita, ja tulemme todennäköisesti näkemään tulevaisuudessa melko erikoisiakin ratkaisuja. Varsinkaan japanilaiset autovalmistajat eivät ole vielä lähteneet täysimääräisesti sähköistämään autojaan, vaan he kehittävät yhä polttomoottoreita suurilla resursseilla. Työn kirjoitushetkellä esimerkiksi Nissan kertoi polttomoottorista, jonka hyötysuhde olisi jopa 50 %. Tämä olisi merkittävä harppaus nykyisiin moottoreihin verrattuna, ja onkin mielenkiintoista nähdä, tuleeko tämän kaltainen moottori vielä massatuotantoon. Tulevaisuus näyttää mihin suuntaan kehitys polttomoottorin vie.

7 LÄHDELUETTELO

Autoalan Tiedotuskeskus, 2021. Biopolttoaineet, nestemäiset biopolttoaineet [verkkodokumentti]. Suomi: Autoalan Tiedotuskeskus. Saatavissa: https://www.aut.fi/tieliikenne/polttoaineet_ja_kayttovoimat/biopolttoaineet [viitattu 4.2.2021]

Bosch (2006) Autoteknillinen taskukirja. 6.painos. Helsinki: Autoalan koulutuskeskus Oy, 1021 s. ISBN 9789519155173

Bosch, 1990. Dieselmootoreiden polttonesteidenruiskutus. Helsinki: Autoalan koulutuskeskus Oy

Bosch, 1999. Yhteispaineruiskutusjärjestelmä (diesel), Common Rail. Helsinki: Autoalan koulutuskeskus Oy

Chinmay Patil, Sanjyot Varade, Swapnil Wadkar, 2017. A Review of Engine Downsizing and its Effects [verkkodokumentti]. Intia: INPRESSCO. Saatavissa: <https://inpressco.com/wp-content/uploads/2017/06/Paper75319-324.pdf> [viitattu 5.2.2021]

CLIMATE TECHNOLOGY CENTRE & NETWORK, 2021. Hybrid electric vehicles [verkkodokumentti]. Tanska: CTCN. Saatavissa: <https://www.ctc-n.org/technologies/hybrid-electric-vehicles> [viitattu 19.1.2021]

Daimler, 2021. Company History: The First Automobile [verkkodokumentti]. Saksa: Daimler. Saatavissa: <https://www.daimler.com/company/tradition/company-history/1885-1886.html> [viitattu 22.1.2021]

Diesel Technology Forum, 2021. What is SCR? [verkkodokumentti]. Yhdysvallat: Diesel Technology Forum. Saatavissa: <https://www.dieselforum.org/about-clean-diesel/what-is-scr> [viitattu 29.3.2021]

European Commission, 2021. CO₂ emission performance standards for cars and vans [verkkodokumentti], 2020. Brysseli: Euroopan komissio. Saatavissa: https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/regulation_en [viitattu 19.1.2021]

Freevalve, 2021. Camless Engine Technology [verkkodokumentti]. Ruotsi: Freevalve. Saatavissa: <https://www.freevalve.com/> [viitattu 4.2.2021]

Hannah Ritchie, 2021. Electricity Mix. Oxford: Our World in Data [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://ourworldindata.org/electricity-mix> [viitattu 19.1.2021]

Heywood J B, 1988. Internal Combustion Engine Fundamentals. Yhdysvallat: McGraw-Hill Book Co., 917 s. ISBN 0-07-100499-9

How a Car Works, 2021. How the coolant circulates [verkkodokumentti]. <https://www.howacarworks.com/illustrations/how-the-coolant-circulates> [viitattu 26.1.2021]

Jil McIntosh, 2018. How It Works: Cylinder deactivation [verkkodokumentti]. Yhdysvallat: Driving. Saatavissa: <https://driving.ca/auto-news/news/how-it-works-cylinder-deactivation> [viitattu 12.2.2021]

Jorma Pitkänen, 1999. Polttomoottoritekniikan perusteet. Suomi: Teknillinen korkeakoulu, 126 s. ISBN 9512227304, 9789512227303

Kevin L. Hoag, 2005. Vehicular Engine Design. Yhdysvallat: SAE International, 219 s. ISBN 0-7680-166T-4

Matti Kleimola, Yrjö Pohjanpalo, 1981. Dieselmoottori. Suomi: Kustannusosakeyhtiö Tammi ja tekijät, 479 s. ISBN 951-30-4849-7

Mazda, 2021. SKYACTIV-X: a revolutionary new combustion engine [verkkodokumentti]. Japani: Mazda. Saatavissa: <https://www.mazda.com/en/innovation/mazda-stories/engineers/skyactiv-x/> [viitattu 5.2.2021]

Meyers Konversations-Lexikon 4. painos (1885–90) Saksa: Brockhaus Enzyklopädie

Mike McNessor, 2015. Air-Cooled Engines [verkkodokumentti].
<https://www.hemmings.com/stories/article/air-cooled-engines> [viitattu 26.1.2021]

Nissan, 2021. VC-Turbo Engine [verkkodokumentti]. Japani: Nissan. Saatavissa:
https://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/vc_turbo_engine.html [viitattu 12.2.2021]

Nicholas C. Baines, 2005. Fundamentals of Turbocharging. Yhdysvallat: Concepts NREC, 261 s. ISBN 0-933283-14-8

Volvo, 2021. Combustion engines [verkkodokumentti]. Uusi-Seelanti: Volvo. Saatavissa:
<https://www.volvocars.com/nz/why-volvo/human-innovation/future-of-driving/propulsion/combustion-engines> [viitattu 4.2.2021]

Yamaha, 2021. Feature: The Versatility of Yamaha 4-Stroke - The Character of Yamaha Engines [verkkodokumentti]. https://global.yamaha-motor.com/business/4st-snowmobiles-10th-anniv/edition3/feature_002/ [viitattu 22.1.2021]