



Traktoreiden ja työkoneiden
moottorit
Jukka Ahokas

Sisällys

1	Traktoreiden ja työkoneiden moottorit	3
1.1	Dieselmoottorin toimintaperiaate	3
1.2	Polttoainejärjestelmät	4
1.2.1	Mekaaniset polttoainejärjestelmät	4
1.2.2	Elektroniset polttoainejärjestelmät	4
1.2.3	Säätimet	4
1.3	Ahtaminen	6
1.4	Tehonmittausmenetelmät	7
1.5	Suoritusarvot	9
1.5.1	Polttoaineteho	9
1.5.2	Teho	9
1.5.3	Teoreettinen ilman tarve	9
1.5.4	Ilmakerroin	9
1.5.5	Volymetrinen hyötysuhde	10
1.5.6	Tehollinen keskipaine	10
1.5.7	Moottorin vääntömomentti ja sitkeys	10
1.5.8	Moottorin polttoainetalous	11
1.5.9	Keskiteho	11
1.5.10	Polttoainetankin koko	13
1.6	Päästöt	13
1.6.1	Palaminen	14
1.6.2	Päästöjen haitallisuus	14
1.6.3	Moottoreiden päästörajat	15
1.6.4	Päästöttekniikka	16
2	Vaihtoehtoisia voimanlähteitä ja polttoaineita	18
2.1	Biodiesel	19
2.2	Kaasumaiset polttoaineet	19
2.3	Sähkökäyttö	20
2.3.1	Verkkosähkö	22
2.3.2	Akkukäyttö	22
2.3.3	Hybridikäyttö	22
2.3.4	Polttokenno	23

Johdanto

Tähän monisteeseen on koottu traktori- ja työkonemoottoreiden perustietoa. Monista tämän monisteen asioista saa lisätietoa internetistä. Käyttämällä sopivia hakusanoja voit hakea kirjallisuutta, kuvia ja toimintaa selvittäviä videoita. Etenkin Youtube palvelu tarjoaa useita hyviä toimintaa kuvaavia videoita ja periaatteita selostavia animaatioita. Lähinnä kyse on siitä, että osaat käyttää oikeita englanninkielisiä termejä. Tätä ja englanninkielistä kirjallisuutta varten kirjoituksessa on esitetty myös englannin kielessä käytettyjä termejä.

Moottoreiden lisäksi tässä tarkastellaan vaihtoehtoisten voimanlähteiden mahdollisuuksia traktori- ja työkonenäytössä.

Joulukuu 2021 Tarkennuksia ja pieniä laajennuksia tekstiin

Luku 1

Traktoreiden ja työkoneiden moottorit

Aivan pienimpiä, lähinnä yksiakselisia puutarhatraktoreita lukuunottamatta traktoreiden ja työkoneiden moottorit ovat suoraruiskutusdieselmoottoreita. Päästö määräysten ja polttoainetalouden vaatimusten ansiosta moottoritekniikka on kehittynyt viimeaikoina merkittävästi. Mekaanisesti toimivista polttoainejärjestelmistä on siirrytty elektronisesti ohjattuihin ahdettuihin moottoreihin.

Traktorikäytössä moottoreilta halutaan toisenlaisia ominaisuuksia kuin esim. ajoneuvokäytössä. Tässä kapaleessa ei puututa moottorin varsinaiseen suunnitteluun, vaan selvitetään traktorimoottorien perusrakenteita ja niiltä vaadittavia ominaisuuksia. Verrattaessa traktorin moottoreita esim. automoottoreihin, traktoreissa moottorit on suunniteltava siten, että ne kestävät nimellistehon käytön jatkuvasti. Myös työn luonne vaikuttaa moottorin ominaisuuksiin. Traktorikäytölle on ominaista hyvän sitkeyden vaatimus, koska raskaan työn aikana (kyntö, äestys) vaihteen vaihtaminen vauhdissa mekaanisilla vaihteistoilla ei ole mahdollista. Monipuoliset ja portaattomat vaihteistot mahdollistavat monipuolisemman ajon hallinnan ja teknisesti edistyneissä malleissa on mahdollista valita erilaisia toimintatapoja. Moottorin huolto on myös suunniteltava helppoksi ja yksinkertaiseksi. Huoltokorjaamot voivat olla kaukana, jolloin tavanomaiset huollot ja korjaukset on pystyttävä tekemään maataloilla tai jopa maastossa.

Traktorin moottori on osa runkorakennetta, jolloin sen on kestävä myös ulkopuolisia voimia. Samalla moottorin on oltava kapea, jotta etupyörien kääntökulma olisi riittävä ja traktori olisi ketterä käsitellä. Näkyvyyden takia traktorin keulalla ei saisi olla näköesteitä, jonka takia moottoritila apulaitteineen pyritään saamaan mahdollisimman pieneen tilaan. Traktorin perä on tarkoitettu työkoneiden kiinnitykselle, työkoneille pitää olla oma toimintatilansa.

Traktori- ja puimurimoottorin käyttöteho on usein korkea ja ajonopeus on alhainen, jolloin ilmavirta ei jäähdytä moottoria. Tämän takia niissä tarvitaan voimakkaammat jäähdytyspuhaltimet kuin esimerkiksi kuorma-autoissa. Polttoainesäätön takia puhaltimet voivat olla 'viskopuhaltimia' eli niiden nopeutta ohjataan kuormituksen mukaan, jolloin säästetään polttoainetta.

1.1 Dieselmoottorin toimintaperiaate

Katsotaan lyhyesti miten dieselmoottori toimii. Imutahdin aikana imuventtiili on auki ja pakoventtiili on kiinni, mäntä liikkuu alaspäin ja imee ilmaa sylinteriin. Ahdin auttaa tässä ja pumpppaa lisäilmaa sylinteriin. Kun mäntä lähtee ylöspäin alkaa puristustahti. Imuventtiili sulkeutuu ja mäntä puristaa ilmaa kasaan. Puristuksessa sylinterin ilmatilavuus pienenee, jonka seurauksena ilman lämpötila kohoaa. Kuumentuneeseen ilmaan ruiskutetaan (sumutetaan) polttoainetta. Suuttimissa on pienet reiät ja polttoaine sumuuntuu, kun se pakotetaan suuren paineen avulla sylinteriin. Kuuma sylinterin ilma sytyttää polttoaineen ja se palaa räjähtäen. Paine sylinterissä nousee ja painaa mäntää alas ja tekee työtä. Työvaiheen jälkeen pakokaasut pitää poistaa sylinteristä pakotahdin aikana. Voit tutustua periaatteen esimerkiksi Youtube sivustolla kirjoittamalla hakuun 'diesel engine principle'.

Se kuinka paljon palamisilmaa sylinteriin saadaan määrää sen kuinka paljon voimaa ruiskuttaa polttoainetta sinne. Ahtamisella pumpataan ilmaa sylinteriin, jolloin polttoainetta voidaan käyttää enemmän ja moottorista saadaan suurempi teho. Ahtaminen lämmittelee ilmaa ja jäähdyttämällä sitä välijäähdyttimen avulla lämpötila saadaan laskettua, jolloin ilman tiheys suurenee ja ilmamäärä lisääntyy. Tämän ansiosta voidaan vielä lisätä polttoaineannosta.

Dieselmoottorissa palavan seoksen muodostumisaika on lyhyt, koska polttoaineen ruiskuttaminen aloittaa myös palamisen. Ottomoottorit suoraruiskutteisia lukuunottamatta toimivat toisella tavalla, niissä palava seos muodostetaan moottorin ulkopuolella imusarjassa ja tämä siirtyy imutahdin aikana sylinteriin. Ottomoottorin ilma- ja polttoainemäärää säädetään kuristamalla imuilmaa kaasuläpän avulla. Dieselmoottorissa imuilmaa ei säädetä ja tämän takia niissä on polttoaineen teoreettiseen palamisilmamäärään nähden runsaasti ylimääräistä ilmaa. Tästä johtuu dieselmoottorin päästöongelma, korkeassa lämpötilassa ja ilmaylimäärässä syntyy typen oksideja. Toisaalta dieselmoottori on ottomoottoria taloudellisempi mm sen takia, että palamisilmaa ei kuristeta kaasuläpällä.

Elektroniset polttoainejärjestelmät ovat muuttaneet moottoritekniikkaa. Mekaanisessa ruiskutusjärjestelmässä joudutaan antamaan koko polttoainemäärä ker-

ralla, elektorinisessa järjestelmässä polttoainemäärä voidaan jakaa useaan ruiskutusannokseen, joilla halitaan paremmin palamista.

1.2 Polttoainejärjestelmät

1.2.1 Mekaaniset polttoainejärjestelmät

Mekaanisia polttoainelaitteita on vanhoissa moottorimalleissa. Koska traktorin tai puimurin kestoikä on pitkä, tässä tutustutaan myös näihin polttoainelaitteisiin, niillä varustettuja traktoreita on käytössä vielä pitkään.

Kuvassa 1.1 on esimerkki dieselmoottorin mekaanisesta polttoainejärjestelmästä. Siirtopumppu pumppaa polttoaineen tankista suodattimen kautta ruiskutuspumppuun. Ruiskutuspumpussa tapahtuu polttoaineen määrän säätö ja ruiskutuspumppu pumppaa polttoaineen korkeapaineisena ruiskutussuuttimille, jotka aukeavat kun paine nousee riittävän korkeaksi. Moottorin tarvitsema polttoainemäärä riippuu moottorin kuormituksesta ja siirtopumppu pitää mitoittaa siten, että polttoainetta aina riittää. Tällöin kaikkea siirtopumpun tuottamaa polttoainetta ei käytetä ja ylimääräinen polttoaine pitää palauttaa takaisinvirtauksena polttoainesäiliöön. Myöskin ruiskutussuuttimilta tulee pieni takaisinvirtaus, joka palautetaan kylmäkynnistyssäiliön kautta polttoainesäiliöön. Suuttimien vuotovirtaus pitää kylmäkynnistyslaitteen polttoainesäiliön täynnä.

Moottorin polttoaineen kulutusta mitattaessa on varmistuttava, että kaikki polttoainejärjestelmän paluuvirtukset on otettu huomioon. Normaalisti kulutusta mitattaessa paluuvirtaukset muutetaan siten, etteivät ne palaa säiliöön, jolloin kulutus voidaan mitata polttoainesäiliöstä otetusta polttoaineesta. Muutos voidaan tehdä esim. asentamalla pieni välisäiliö tai venttiilistö siirtopumpun imupuolelle. Tämä muutos voi vaikuttaa polttoaineen lämpötilaan ja ruiskutuspumpun paineeseen.

Kuvassa 1.2 on esitetty kaavakuvallisesti dieselmoottoreissa käytössä olevia mekaanisia ruiskutusjärjestelmiä. Yksittäispumppujärjestelmässä on jokaiselle sylinterille oma erillinen ruiskutuspumppu. Rivipumpussa jokaisella sylinterillä on oma ruiskutuspumppuelementti, mutta poikkeuksena yksittäispumppujärjestelmästä nämä on koottu yhteen yksikköön riviin. Jakajapumpussa on yksi sylinterille yhteinen ruiskutuspumppu ja jakolaitteisto annostelee polttoaineen vuoronperään suuttimille. Pumppusuutinjärjestelmässä pumppuelementit on ydistetty suuttimiin. Yhteispainejärjestelmässä on korkeapaineinen säiliö, josta ruiskutus annostellaan sylintereihin suuttimien kautta. Nämä voivat olla mekaanisesti toimivia tai elektronisesti toimivia. Ruiskutusaineet ovat normaalisti 300 - 500 bar, paitsi yhteispaineruiskutuksessa se on jopa 2500 bar. Korkea ruiskutusaine aikaansaa tehokkaamman ruiskutuksen.

Rivipumpun (inline injection pump) toimintaperiaa-

te selviää kuvasta 1.3. Pumpun männän ollessa alhaalla polttoaine pääsee virtaamaan sylinteriin. Iskun alkaessa mäntä sulkee polttoainetiehyen. Ruiskutus jatkuu niin kauan, kunnes männän ura tulee oikean puolen poistoaukon kohdalle. Säädin säätää syöttömäärää ruiskutuspumpun mäntää kiertämällä. Männän vino lovi muuttaa ruiskutuksen loppumiskohtaan ja muuttaa samalla ruiskutusmäärää.

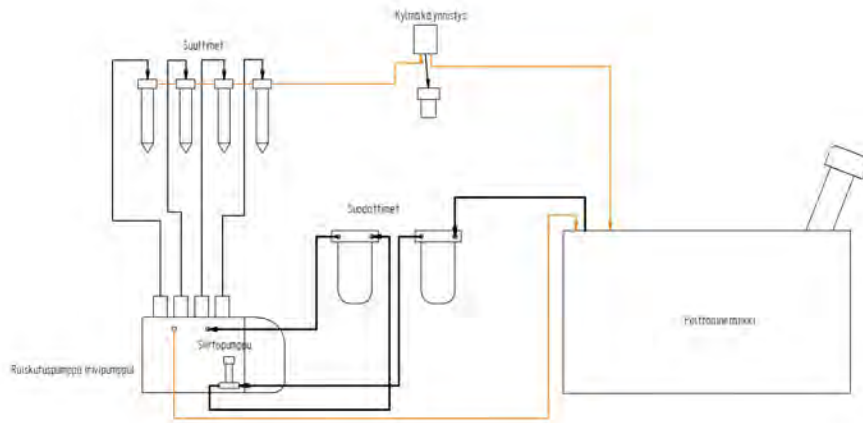
Jakajapumpun (distributor injection pump) toimintaperiaate selviää kuvasta 1.4. Siirtopumppu pumppaa polttoaineen päässä olevaan sylinteriin (kuvan vasen puoli). Roottorin pyöriessä edelleen päädyn nokkarengas tulee iskuvaiheeseen (kuvan oikea puoli) ja männät puristavat polttoaineen ruiskutussuuttimiin. Polttoainemäärän säätö tapahtuu rajoittamalla jakajapumpun sylinteriin tulevaa polttoainemäärää. Tämä voidaan hoitaa esimerkiksi kuristamalla siirtopumpulta tulevaa virtausta. Rivipumppuun verrattuna jakajapumpun eri sylintereihin pumppaamat polttoainemäärät ovat aina samat, koska yksi ja sama yksikkö ruiskuttaa polttoaineen. Pumpun ulostulotiehyitä on kehällä moottorin sylinterimäärän verran. Jakajapumpun vaikeudet liittyvät tarkkoihin välyksiin ja pumpun voiteluun, pienet voiteluhäiriöt tai epäpuhtaudet voivat tuhota pumpun. Jakajapumppuun on helppo liittää ennakonsäätölaite. Tämä tehdään kiertämällä päädyn nokkarengasta. Ennakonsäätölaite on tarpeen nopeakäyntisissä dieselmoottoreissa suurilla pyörimisnopeuksilla kompensoimassa syttymisjättämää.

1.2.2 Elektroniset polttoainejärjestelmät

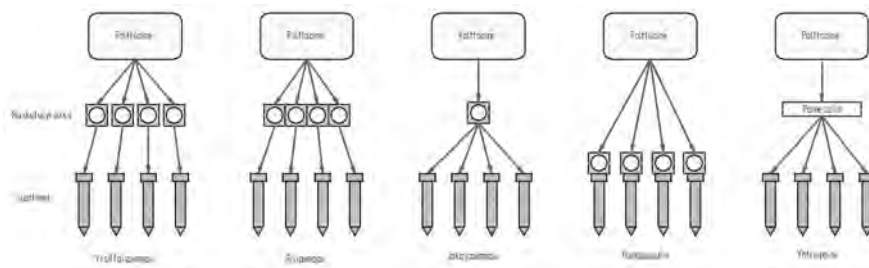
Uudet dieselmoottorit toimivat elektronisilla järjestelmissä. Kuvan 1.5 yhteispaineruiskutusjärjestelmää (common rail) hallitaan elektronisesti. Korkeapaine-pumppu pitää järjestelmässä 2 000 barin luokkaa olevan paineen. Suuttimien avautumista ohjataan elektronisesti. Mekaanisissa ruiskutusjärjestelmissä koko annos joudutaan antamaan kerralla. Yhteispaineruiskutuksessa annos voidaan pilkkoa osiin, jolloin palotapahdus on hallitumpaa. Tämän ansiosta melua ja päästöjä voidaan vähentää. Tiukentuneiden päästömääräysten takia elektronisesti ohjattu yhteispaineruiskutus on yleisesti käytetty dieselmoottoreissa.

1.2.3 Säätimet

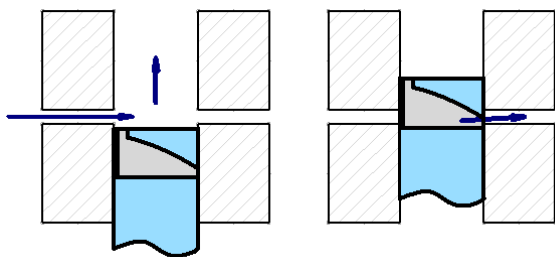
Moottorin säätimen (governor) tehtävänä on halutun pyörimisnopeuden vakiona pitäminen ja moottorin ryntäämisen esto. Kaasuvivulla valitaan pyörimisnopeus, jolla moottorin halutaan toimivan ja säädin pitää polttoaineen syöttöä säätämällä nopeuden vakaina. Säädin vaikuttaa myös moottorin sitkeyteen, eli siihen kuinka paljon polttoainetta ruiskutetaan pyörimisnopeuden laskiessa. Säätimet voivat olla keskipakoiset tai alipainesäätimiä, hydraulisia tai sähköisiä. Traktoreissa on käytetty keskipakoissäätimiä, mutta sähköiset säätimet ovat nykyisin käytössä elektronisesti ohjattuisa järjestelmissä.



Kuva 1.1: Esimerkki mekaanisesta polttoainejärjestelmästä.



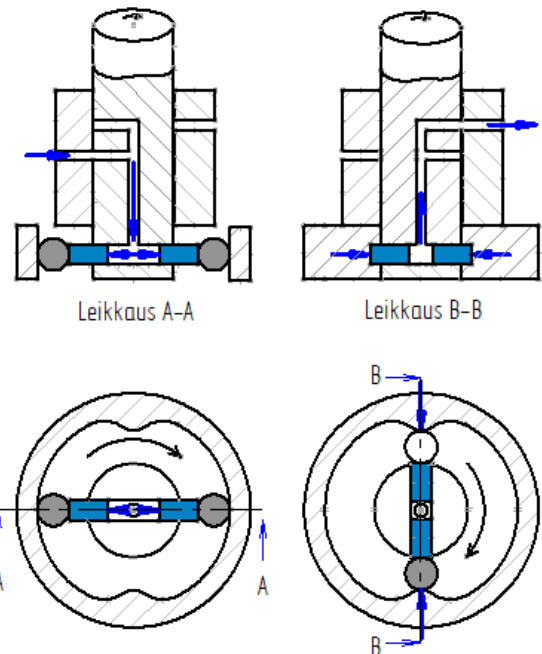
Kuva 1.2: Dieselmootoreiden mekaanisia ruiskutusjärjestelmiä



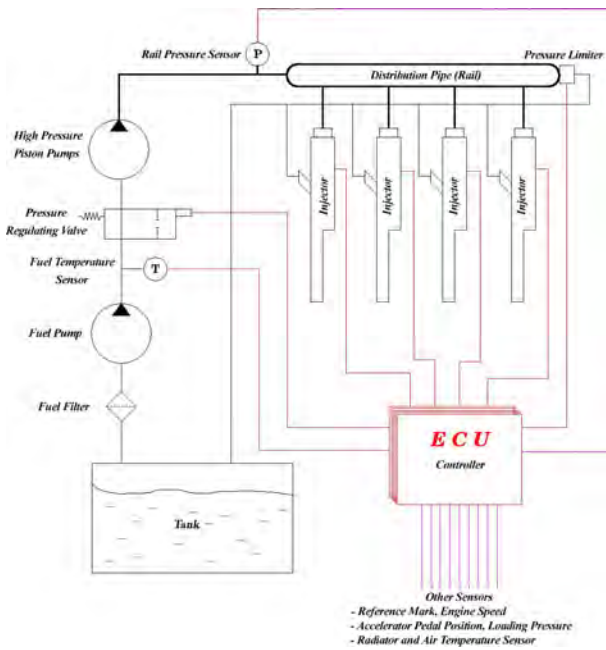
Kuva 1.3: Rivipumpun toimintaperiaate

Kuvassa 1.6 on mekaanisen säätimen toimintaperiaate. Säädin on tyypiltään keskipakoissäädin. Pyörimisnopeuden kasvaessa säätimen painot siirtyvät keskipakoisvoiman vaikutuksesta ulospäin. Tämä vaikuttaa ruiskutuspumppun säätövipuun. Haluttu nopeus asetetaan kaasuvivulla. Käytännössä säätimet ovat monimutkaisempia ja niissä voidaan säätää moottorin käyttymistä osa- ja ylikuormilla.

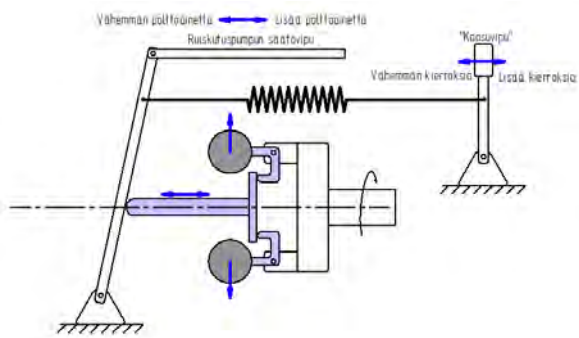
Jos tarkastellaan säädintä pelkästään säätimenä, silloin sen tehtävänä on pitää moottorin nopeus tasaisena. Traktorikäytössä tällainen "jyrkkä säätökäyrä" ei ole kuitenkaan hyvä. Ajo-ominaisuudet ovat miellyttävämmät, jos säädin ei toimi jyrkästi vaan hieman laajemmalla alueella. Säätimen ja moottorin toiminnan mukaan voidaan puhua erilaisista toimintapisteteistä. Tämä terminologia ei ole kovin vakiintunutta. Kuvassa 1.7 on esitetty kuinka säädin hallitsee moottoria. Pisteessä A on moottorin suurin pyörimisnopeus (high idle). Pisteessä B on moottorin nimellisoikeus



Kuva 1.4: Jakajapumpun toimintaperiaate, yläkuva sivulta katsottuna, alakuva päästä katsottuna



Kuva 1.5: Yhteispaineruiskutuksen periaate [Polk E]



Kuva 1.6: Yksinkertaistettu säätimen periaate

(nominal speed) ja sitä vastaavasta tehosta käytetään nimeä nimellisteho (nominal power). Tätä suuremmilla nopeuksilla säädin rajoittaa polttoaineen syöttöä, jotta pyörimisnopeus ei tulisi liian korkeaksi. Väliä A-B kutsutaan säätimen säätökäyräksi (governor control) ja säätimen toimintaa kuvaa nopeuden säätösuhde, yhtälö 1.1.

$$R = \frac{2(n_{max} - n_{nim})}{n_{max} + n_{nim}} \cdot 100 \quad (1.1)$$

- R säätösuhde
- n_{max} moottorin suurin pyörimisnopeus
- n_{nim} moottorin nimellisoikeus

Traktorimoottoreissa tämä säätösuhde on tavallisesti 3 - 10 %. Moottori, jonka säätökäyrä on laaja antaa käytännön työssä hieman suuremman tehon kuin jyrkkä käyrä.

Säätökäyrän aluetta B-C kutsutaan rajamomenttikäyräksi (load control). Tällöin säädin ei rajoita pyörimisnopeutta, vaan pyrkii pitämään sen haluttuna polttoaineen syöttöä säätämällä ja ottamalla huomioon moottorin toimintakyvyn.

Sähköisissä säätimissä on mahdollista rakentaa samaan laitteeseen erilaisia säätökäyriä, joista voidaan tilanteen mukaan valita sopivin. Jos halutaan vakaa pyörimisnopeus esim. voimanottoakselikäytössä, valitaan jyrkkä käyrä. Väylätekniikan ansiosta moottorin ohjaus ja esimerkiksi traktorin vaihteisto voivat toimia yhdessä, jolloin voidaan valita esimerkiksi vakioajonopeus tai polttoaineen säästömodei.

Esimerkki. Kuvan 1.7 tapauksessa moottorin suurin nopeus on n 2450 1/min ja nimellisoikeus on 2200 1/min. Mikä on säätimen säätösuhde?

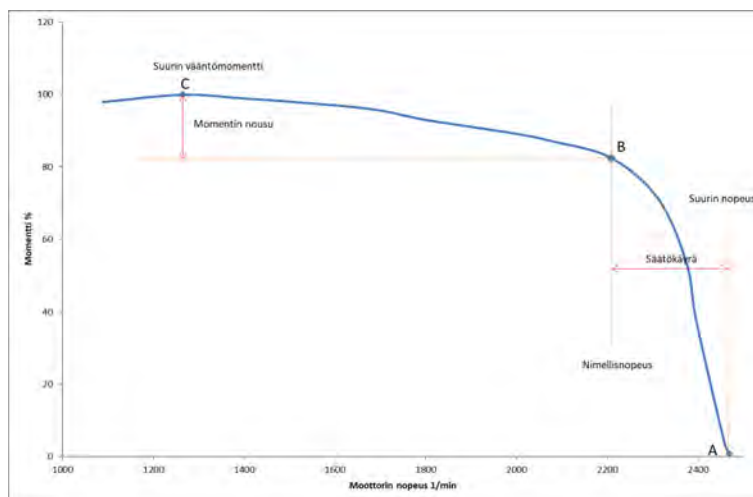
$$R = \frac{2(2450 - 2200)}{2450 + 2200} \cdot 100 = 10,8\%$$

1.3 Ahtaminen

Ahtaminen (super charging) on keksintönä lähes yhtä vanha kuin moottorikin, ensimmäiset ahdinkokeilut tehtiin jo 1800-luvun lopulla. Ahtimet ovat yleistyneet maansiirtokoneissa ja kuorma-autoissa 1950-luvun jälkeen ja traktoreissa ja henkilöautoissa 1970-luvun jälkeen. Ahtamisella parannetaan moottorin volymetristä hyötysuhdetta, ts. sylinteriin saadaan suurempi ilmamäärä. Tämä taas mahdollistaa suuremman polttoainemäärän käytön ja suuremman tehon. Tehon lisäksi ahtamisella voidaan vaikuttaa moottorin hyvään sitkeyteen, kun huolehditaan riittävästä ilmamäärästä jo alhaisilla pyörimisnopeuksilla. Ahtaminen mahdollistaa suuremmat litratehot, mutta moottorin rakenteen on kestävä lisäantynyt kuormitus. Moottorin laakeroinnin pitää kestää suurentuneet paineet ja moottorin (kansi, männät, venttiilit) pitää sietää korkeampia lämpötiloja.

Ahtaminen tapahtuu puhaltimen tai pumpun eli ahtimen avulla. Käyttövoimansa mukaan ahtimia voi olla kolmea tyyppiä: mekaaniset ahtimet (esim. Rootsin puhallin), pakokaasuahdit (turboahdit, paineaaltoahdit, turbo charging) ja ulkopuolisen apuvoimakoneen käyttämät ahtimet. Traktoreissa näistä on käytössä pakokaasuahdit. Kun ahtimet 1950-luvulla yleistyivät, mekaaniset ahtimet olivat hallitsevia. Hyvin pian siirryttiin kuitenkin pakokaasuahdamiseen, kuva 1.8. Siinä moottorin pakokaasut pyörittävät turbiinipyörän avulla kompressoripyörää, joka puhalttaa ilmaa sylinteriin. Pakokaasuahdin käyttää hyväksi moottorin pakokaasuvirtauksessa olevaa energiaa ja siten se saa käyttövoimansa muuten hukattavasta energiasta ja moottorin hyötysuhde paranee.

Pakokaasuahdimen ongelmana on, ettei se pysty kattamaan koko moottorin nopeusaluetta sellaisenaan. Moottorin nopeuden alentuessa ahtimen pitäisi pystyä pumppaamaan lisäilmaa, jotta voitaisiin antaa reilusti lisää polttoainetta. Jos ahdin mitoitetaan tämän mukaan, suurilla kierroksilla ahtopaine nousee liian korkeaksi. Pakokaasuahdamisen yhteydessä voidaan joutua rajoittamaan ahtopainetta. Normaalisti ahtopaineet ovat suurimmillaan 1 bar luokkaa. Suuret paineet voivat johtaa moottorin suuriin rasituksiin ja kaikki



Kuva 1.7: Säätimen säätökäyrä



Kuva 1.8: Pakokaasuahntimen poikkileikkaus, punainen osa on turbiini, sininen osa kompressori [Turbocharger]

moottorit eivät tätä siedä. Ahtopainetta rajoitetaan sijoittamalla pakosarjaan ns. hukkaportti (waste gate). Kun ahtopaine nousee korkeaksi, hukkaportti aukeaa päästämällä osan pakokaasuista ahtimen ohi. Tämä pienentää ahtimen nopeutta ja ahtimen pumppaamaa ilmamäärää.

Pakokaasuahntimet ovat myös kehittyneet, niiden hyötysuhteet ovat parantuneet ja turbiinipyörät ovat pienentyneet. Tämä on pienentänyt toimintaviivettä. Myöskin ahtimeen itseensä on tullut säätäviä osia, jotka mahdollistavat tasaisen ahtopaineen jo alhaisilla nopeuksilla. Henkilöautoissa käytetään runsaasti muuttuvageometrisia ahtimia. Niissä on turbiinipyörässä johdinsiivikko, joka ohjaa ilmapirtausta. Siivikon asentoa voidaan muuttaa nopeuden muuttuessa, jolloin ahdin toimii hyvin sekä alhaisilla että korkeilla kierroksilla. Ahtamiseen liittyy myös välijäähdytys (intercooler). Ahtaminen nostaa imuilman lämpötilaa ja pienentää sylinterin täytöstä, koska ilman tiheys pienenee. Jäähdyttämällä imuilma saadaan sylinterin täytösaste on suuremmaksi. Ahtamisen aiheuttama lämpötilan nousu lisää myös typen oksideja ja välijäähdyttimen

käyttö taas vähentää niitä. Välijäähdyttimet voivat olla ilmasta veteen tai ilmasta-ilmaan toimivia.

Kuvassa 1.9 on ottomoottorin ahtamisen periaatepiirros. Dieselmoottorissa ei ole kaasuläppää (throttle), katalyysaattoria (catalytic converter) eikä blowoff venttiiliä. Hukkaportti (wastegate) estää liian suuret ahtopaineet avaamalla pakokaasuille virtaustiehyen turbiinin ohi, jolloin ahtimen nopeus alenee.

1.4 Tehonmittausmenetelmät

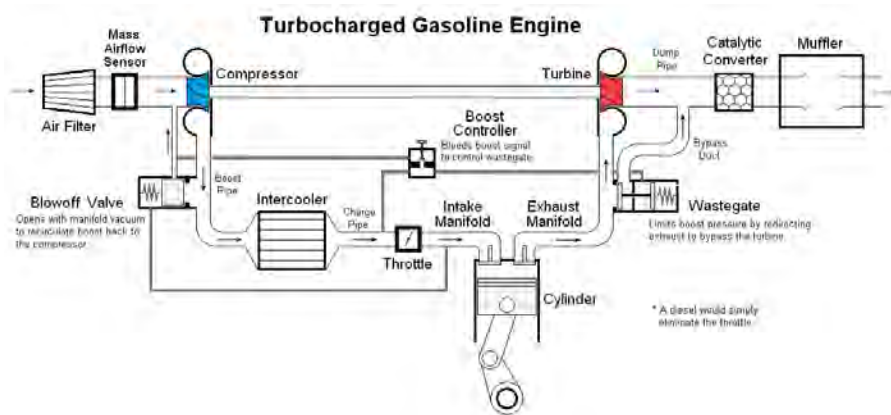
Moottorin tehonmittausmenetelmiä on useita. Menetelmät ovat erilaiset moottorien käyttötavan mukaan. Esimerkiksi paikalliskäyttöön tarkoitetut moottorit mitataan erilailla kuin ajoneuvomoottorit. Traktoreiden osalta käytetään kahta eri tehonmittausta, moottoriteho ja voimanottoakseliteho. Oikeastaan kolmaskin menetelmä on, vetoteho. Moottoriteho mitataan pelkästään moottorista. Testeissä traktorin moottorin irrottaminen ja asentaminen testipenkkiin olisi työlästä ja sen takia käytetään usein voimanottoakselitehon mittausta. Sen etuna on, että traktorin toiminnalle välttämättömät apulaitteet ovat mukana ja niiden ottama teho on mukana mittauksessa. OECD työryhmä on tehnyt ja päivittää jatkuvasti traktoreiden testimenetelmiä. Ne on saatavissa osoitteesta OECD traktoritesti.

Traktoritestien tuloksia on saatavissa osoitteista:

- OECD testiraportit
- Nebraka testiraportit
- DLG testiraportit.

Lisäksi tehonmittausraportteja on ammattilehdissä, kuten Koneviesti Koneviesti, Top Agrar Top Agrar ja Profi Profi.

Traktoreiden päästömittausten yhteydessä voidaan mitata myös moottoriteho, tällöin käytetään ISO 14396 [ISO 14396] menetelmää.



Kuva 1.9: Ahdetun ottomoottorin periaatepiirros [Turbocharger]



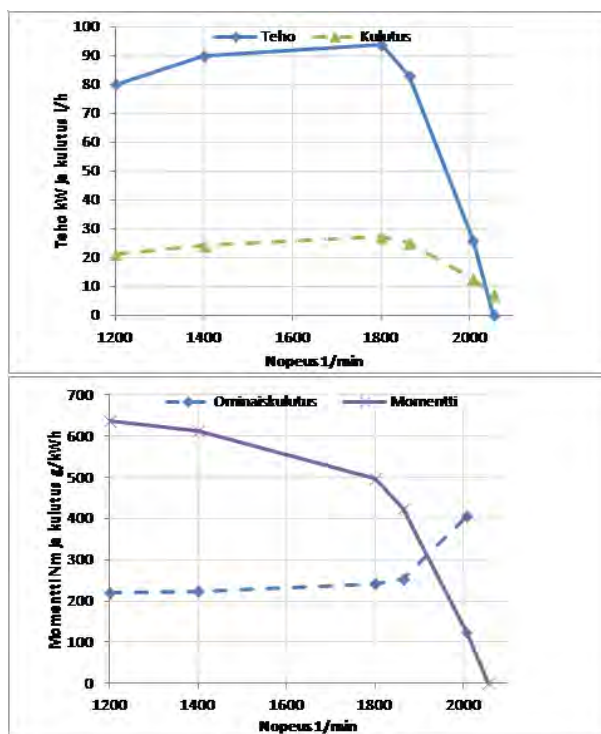
Kuva 1.10: Traktorin voimanottoakselitehon mittaus

Esimerkki OECD:n mukaisesta voimanottoakselitehon mittauksesta on kuvassa 1.11. Siinä teho on mitattu kaasuvivun täydellä asennolla. Mittaus aloitetaan suurimman tehon kohdalta ja sitä jatketaan osakuormien alueella ja lopuksi ylikuorman alueella. Osakuormilla tarkoitetaan nimellistehon kohtaa suurempia pyörimisnopeuksia, jolloin säädin lähtee rajoittamaan pyörimisnopeutta. Ylikuormat taas ovat nimellisnopeutta pienemmillä nopeuksilla mitattuja arvoja. Mitattaessa rekisteröidään pyörimisnopeus, vääntömomentti ja polttoaineen kulutus. Näistä lasketaan tyypillisesti teho ja polttoaineen ominaiskulutus.

Imuilman lämpötila, polttoaineen lämpötila ja ilmanpaine vaikuttavat moottorin antamaan tehoon. Mittausmenetelmissä voi olla käytössä korjauskertoimia, joilla arvot redusoidaan normaalitilanteeseen tai niissä on annettu olosuhteille raja-arvot, joissa mittaus voidaan tehdä. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että moottorin antama teho vaihtelee olosuhteiden muuttuessa. Myöskin tämä tarkoittaa sitä, että tehoilmoituksissa yhden kW tarkkuus on riittävä.

Tehomittaukseen ja moottorin ominaisuuksien ilmoittamiseen liittyy terminologiaa, joka ei ole kovin hyvin vakiintunut.

- Nimellisteho (nominal power). Kohta, jossa säädin lähtee rajoittamaan pyörimisnopeutta. Tämä



Kuva 1.11: Esimerkki traktorin voimanottoakselitehon mittaustuloksesta

voi myös olla valmistajan ilmoittama arvo, joka on tarkoitettu esimerkiksi jatkuvan käyttötehon arvoksi.

- Nimellisnopeus (nominal speed). Nimellistehoa vastaava moottorin nopeus.
- Suurin teho (maximum power). Nykymoottorit antavat tyypillisesti suurimman tehon ylikuorman alueella eli nimellisnopeutta alhaisemmalla nopeudella.
- Suurin vääntömomentti (maximum torque). Moottoria kuormitettaessa vääntömomentti kasvaa kunnes se lähtee hyvin alhaisilla kierroksilla jälleen laskuun. Suurin moottorin antama vääntömomenttiarvo ilmoitetaan.

- Suurinta vääntömomenttia vastaava nopeus (equivalent speed at maximum torque). Suurin vääntömomentti saadaan usein laajalla pyörimisnopeusalueella. Tällöin joko ilmoitetaan alue missä se saadaan tai kohta, jossa momentti on selvästi suurimmillaan.

1.5 Suoritusarvot

1.5.1 Polttoainetehto

Moottorin polttoaineen kulutuksesta voidaan laskea moottoriin polttoaineen muodossa viety teho (polttoainetehto on teoreettinen maksimiteho) Dieselpolttoaineen lämpöarvo on normaalisti meillä 42 – 43 MJ/kg Dieselpolttoaineen tiheys on 0,82 – 0,84 kg/l. Talvilaadut ovat kevyempiä ja kesälaadut raskaampia. Polttoainetehto voidaan laskea yhtälön 1.2 avulla.

$$P_{pa} = q_m H_g \quad (1.2)$$

P_{pa}	polttoainetehto
q_m	polttoaineen kulutus (massavirtaus)
H_g	polttoaineen lämpöarvo

Esimerkki. Puimuri kuluttaa puidessa 20 l/ha. Mikä on puinnin polttoainetehto?

Käytetään polttoaineen tiheytenä 0,83 kg/l, jolloin energian kulutus hehtaaria kohden on $20 \text{ l/ha} \cdot 0,83 \text{ kg/l} \cdot 43 \text{ MJ/kg} = 714 \text{ MJ/ha} = 198 \text{ kWh/ha}$. Jos hehtaarin puintiin kuluu 1,5 h, polttoainetehto on $\frac{198 \text{ kWh/ha}}{1,5 \text{ h/ha}} = 132 \text{ kW}$.

1.5.2 Teho

Moottorin teho saadaan laskettua, kun nopeus ja vääntömomentti on mitattu yhtälön 1.3 avulla.

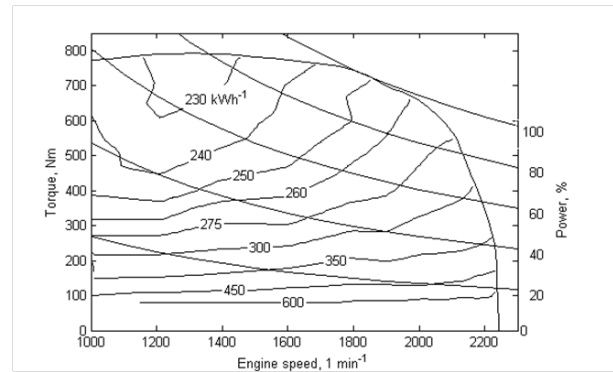
$$P = M\omega \quad (1.3)$$

P	teho (power)
M	vääntömomentti (torque)
ω	moottorin kulmanopeus

Kulmanopeus saadaan moottorin pyörimisnopeudesta $\omega = \frac{2\pi n}{60}$, kun laatuna on 1/min. Laskuyhtälö on laaduttuna tällöin yhtälön 1.4 mukainen. Esitteissä ilmoitetaan usein moottorin teho ja sitä vastaava pyörimisnopeus. Jos halutaan tietää momentti, se voidaan laskea ratkaisemalla yhtälö 1.3 momentin suhteen.

$$P = M \cdot \frac{2\pi n}{60} \quad (1.4)$$

P	teho [W]
M	vääntömomentti [Nm]
n	moottorin pyörimisnopeus [1/min]



Kuva 1.12: Esimerkki moottorin simpukkakäyrästä [Jokiniemi ym 2016]

Moottorin koko suoritusarvokäyrästä mitataan hyvin harvoin, koska mittaus kestää kauan. Täydellisessä mittauksessa aloitetaan täydellä kaasulla. Tämän jälkeen moottorin nopeutta alennetaan (vähemmän kaasua) asteittain ja tehdään käyrän mittaus uudestaan. Jokaisen mittauspisteen jälkeen joudutaan odottamaan 10 - 15 min, jotta moottorin toiminta (lämpötilat) tasaantuvat. Tämän takia mittaus on pitkäkestoinen. Tuloksena saadaan moottorin simpukkakäyrästä, kuva 1.12.

Esimerkki. Moottorin suurimmaksi tehoksi on ilmoitettu 96 kW ja vastaava moottorin nopeus on 2100 1/min. Mikä on moottorin vääntömomentti?

Ratkaistaan yhtälöstä 1.4 vääntömomentti, $M = \frac{60 \cdot P}{2\pi n} = \frac{60 \cdot 96000}{2 \cdot 3,14 \cdot 2100} = 437 \text{ Nm}$.

1.5.3 Teoreettinen ilman tarve

Teoreettisella ilmantarpeella tarkoitetaan sitä ilmamäärää, jonka 1 kg polttoainetta tarvitsee palaakseen. Tavanomaiset ilman tarpeet ovat seuraavat: bensiini $L_o = 14,8 \text{ kg/kg}$ ja dieselöljy $L_o = 14,5 \text{ kg/kg}$. Nämä lukemat tarkoittavat täydelliseen palamiseen tarvittavaa vähimmäisilmamäärää. Ottomoottoreissa ilmamäärä on lähellä teoreettista määrää, dieselmoottoreissa ilmamäärä on aina teoreettista suurempi.

Esimerkki. Traktorin moottori kuluttaa 20 l/h dieselpolttoainetta. Kuinka paljon ilmaa tarvitaan tämän polttamiseen?

Dieselpolttonesteen tiheys on luokkaa 0,83 kg/l, jolloin polttoainetta kuluu $20 \cdot 0,83 = 16,6 \text{ kg/h}$ ja palamisilman tarve on $14,5 \cdot 16,6 = 241 \text{ kg/h}$. Kun ilman tiheys on luokkaa $1,2 \text{ kg/m}^3$, ilmaa tarvitaan $200 \text{ m}^3/\text{h}$.

1.5.4 Ilmakerroin

Ilmakerroin λ ilmoittaa mikä on todellisen ilmamäärän ja palaamisen tarvittavan teoreettisen ilmamäärän

suhde. Ilmakertoimet ovat usein seuraavia: ottomoottorit $\lambda < 1$ ja dieselmoottorit $\lambda = 1,4 - 2$. Ottomootto-reissa käytetään pientä ilmavajetta, jotta katalysaattori toimisi kunnolla. Dieselmootto-reissa on aina ilmaylimäärä. Tämä johtuu siitä, että siinä ei ilmanvirtausta moottoriin rajoiteta kuten ottomootto-reissa on tehty 'kaasuläpän' avulla. Ottomootto-reissakin on viime aikoina siirrytty suoraruiskutteisiin järjestelmiin, jotka toimivat dieselin yhteispaineruiskutuksen tavoin. Osassa näistä ei ole myöskään rajoitettu kaasuläpällä ilman virtausta sylinteriin.

Esimerkki. Kuinka paljon edellisen esimerkin todellinen ilmamäärä on, jos ilmakerroin on 1,8?
 $1,8 \cdot 200 \text{ m}^3/\text{h} = 360 \text{ m}^3/\text{h}$.

1.5.5 Volymetrinen hyötysuhde

Imukanavan painehäviöistä ja ilman lämpenemisestä johtuen ahtamattomissa moottoreissa sylinteriin saatu ilmamäärä on iskutilavuutta pienempi. Volymetrinen hyötysuhde on usein 50 - 60 % luokkaa. Ahtamalla täytössuhde on luokkaa 1 eli sylinteriin saatu ilmamäärä on iskutilavuuden suuruinen.

1.5.6 Tehollinen keskipaine

Tehollista keskipainetta käytetään kuvaamaan moottorin viritysastetta. Se voidaan kuvitella saatavan vähentämällä sylinterin keskipaineesta kitkavoimien häviöpaine. Kyseessä on hyötypaine, jonka kampikoneisto muuttaa vääntömomentiksi. Nelitahtisille moottorille saadaan teholliseksi keskipaineeksi yhtälö 1.5.

$$p_e = \frac{4\pi M}{V_i} \quad (1.5)$$

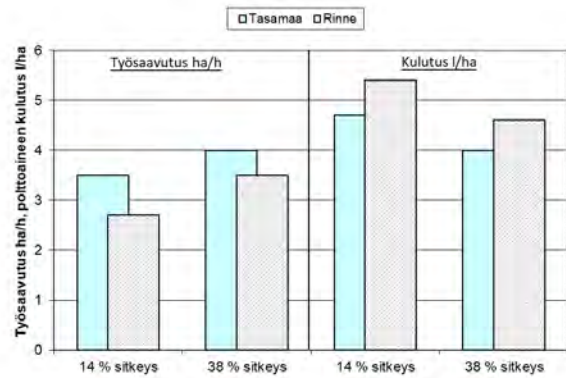
p_e tehollinen keskipaine
 M vääntömomentti
 V_i iskutilavuus

Teholliset keskipaineet ovat suurimmillaan 20 bar luokkaa.

Esimerkki. Moottorin vääntömomentti on 437 Nm ja iskutilavuus on 5 l. Mikä on moottorin tehollinen keskipaine?
 $p_e = \frac{4\pi M}{V_i} = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 437 \text{ Nm}}{\frac{5}{1000} \text{ m}^3} 1,1 \text{ MPa} = 11 \text{ bar}$.

1.5.7 Moottorin vääntömomentti ja sitkeys

Moottorin vääntömomentti ratkaisee millä nopeudella mikin työ voidaan tehdä. Vääntömomentin täytyy olla yhtä suuri kuin kaikki vastukset yhteensä. Jos moottori ei pysty tuottamaan tarvittavaa momenttia, se joko sammuu tai sitten vaihteiston avulla on vaihdettava välitystä siten, että moottori jaksaa tehdä työn. Maatalouskäytössä vetovastus on usein suuri ja ajonopeus



Kuva 1.13: Sitkeyden vaikutus työsaavutukseen ja polttoaineen kulutukseen

Taulukko 1.1: Traktorimoottoreiden sitkeyssuosituksia [Karvonen J.]

Rinnekulma °	Suosittelava sitkeys %
0	15 - 20
3	20 - 23
5	23 - 26

alhainen. Jos maalaji muuttuu kovemmaksi tai traktori nousee rinnettä, vastusvoimat lisääntyvät. Ajovaihdetta ei voida vaihtaa, koska vedon katkaiseminen pysäyttää traktorin heti ja huonontaa nopeasti työsaavutusta. Usein ajetaan lähes samasta kohdasta useaan kertaan, esim. äestettäessä ja kynnettäessä, jolloin jatkuva vaihteen vaihtaminen olisi rasittavaa. Moottorin ominaisuuksien on tällöin oltava sellaiset, että näistä lisävastuksista selvitään. Jos moottori ei pysty vastaamaan vastukseen, on käytettävä jatkuvasti pienempää ajovaihdetta. Tällöin moottorin koko tehoa ei pystytä hyödyntämään. Moniportaiset ja portaattomat voimansiirrot yhdessä elektronisen ohjauksen kanssa soveltuvat automaattisesti välityksen ja moottorin työhön sopiviksi, jolloin näissä traktoreissa moottorin sitkeydellä ei ole samaa merkitystä kuin mekaanisissa järjestelmissä.

Moottorin suurin sitkeys määritetään kuvan 1.7 mukaisesti, yhtälön 1.6 avulla. M_{max} on moottorin suurin momentti (piste C kuvassa 1.7) ja M_{nim} on moottorin nimellinopeutta vastaava momentti (piste B kuvassa 1.7).

$$s = \frac{M_{max} - M_{nim}}{M_{nim}} 100 \quad (1.6)$$

Kuvassa 1.13 on esitetty sitkeyden vaikutus muokauksessa työsaavutukseen ja polttoaineen kulutukseen [Karvonen J.]. Koe on tehty vaihtamalla traktorin ruiskutuspumppu, muuten koeolosuhteet olivat samat. Työsaavutus parani sitkeämmällä moottorin säädöllä tasamaalla 14% ja rinnepellolla 30%. Polttoaineen kulutus väheni sitkeämmällä säädöllä 15%.

Mittauksista on saatu taulukon 1.1 sitkeystarpeita traktoreille, joilla on mekaaninen voimansiirto.

Esimerkki. Traktorimoottorille on annettu esitteessä seuraava tiedot. Nimellisteho 92 kW nopeudella 1900 1/min. Suurin vääntömomentti 550 Nm nopeudella 1500 1/min. Mikä on moottorin sitkeys? Lasketaan moottorin kulmanopeudet. $1900 \text{ 1/min} = \frac{1900 \cdot 2 \cdot \pi}{60} = 199 \text{ rad/s}$ ja $1500 \text{ 1/min} = 157 \text{ rad/s}$. Nimellistehon vääntömomentti on tällöin $M = \frac{92}{199} = 462 \text{ Nm}$. Suurimman vääntön kohdalla teho on $P = 550 \cdot 157 = 86,4 \text{ kW}$. Momentin nousu on $550 - 462 = 88 \text{ Nm}$ ja sitkeys on $s = \frac{550 - 462}{462} 100 = 19 \%$.

1.5.8 Moottorin polttoainetalous

Kuvassa 1.14 on esitetty moottorin polttoaine-energian jakautuminen. Lähtökohtana on ollut keskiraskas työ, jolloin moottorin hyötysuhde on 30% luokkaa. Raskaisissa töissä moottorin hyötysuhde on lähempänä 40%. Suurin osa polttoaineen tehosta kuluu moottorin häviöihin, pakokaasujen mukana poistuvana energiana ja moottorin kitkahäviöinä. Kitkahäviöitä voidaan vähentää käyttämällä alhaisia moottorin nopeuksia. Jos moottoria käyttää paikallaan, kulutuslukema tyhjäkäynnillä voi olla esimerkiksi 1 l/h luokkaa. Jos käytetään täysiä moottorin kierroksia paikallaan, kulutus voi olla esimerkiksi 8 l/h. Lisääntynyt moottorin kitka ja ilmanvaihto tarvitsee 7 l/h lisää polttoainetta. Tämä on nähtävissä myös kuvasta 1.12, jossa pienin ominaiskulutus on saavutettu suhteellisen alhaisilla pyörimisnopeuksilla.

Moottorin ominaiskulutus ilmoitetaan muodossa kuinka monta grammaa tarvitaan yhden kWh työn tekemiseen. Tätä kutsutaan moottorin ominaiskulutukseksi (specific fuel consumption). Ominaiskulutus saadaan laskettua jakamalla polttoaineen kulutus q teholla P , yhtälö 1.7.

$$q_{om}[g/kWh] = \frac{q[g/h]}{P[kW]} \quad (1.7)$$

Esimerkki. Moottorin antama teho on 70 kW ja polttoainetta kuluu 16 kg/h, mikä on ominaiskulutus?

$$q_{om} = \frac{16000}{70} = 229 \text{ g/kWh}$$

Maataloustraktoreiden tehot mitataan yleisesti voimanottoakselilta. Tällöin apulaitteiden ja osittain voimansiirron häviöitä on mukana. Voimanottoakselitehon katsotaan olevan hyvin lähellä pyörän akseleilta saatavaa tehoa. Traktorin 'sivistyminen' eli hydraulisten kytkinten, automaation yms takia polttoainetalous karsii, koska lisälaitteet vievät oman osansa moottorin tehosta. Voimanottoakselilta mitattuna parhaimmat traktorit pääsevät suurimman tehon kohdalla luokkaa 220 g/kWh kulutuksiin. Keskimääräinen kulutus on luokkaa 250 - 270 g/kWh. Kuvaan 1.15 on kerätty testituloksista moottorin ominaiskulutuksen arvoja nimellistehon kohdalta. Moottorin koon kasvaessa ominaiskulutusarvot pienenevät.

Tehonmittauksessa mitattu kulutus ei kuitenkaan kerro käytännön työnteon kulutusta. Työssä apulaitteiden ottama teho kasvaa, jolloin polttoainetalous heikenee. Jos moottorin sitkeys on huono, moottori joutuu toimimaan jatkuvasti hyötysuhteeltaan huonolla alueella. Lisäksi traktoria harvoin kuormitetaan täydellä teholla, keskimääräinen vuotuinen tehon käyttö onkin vain 30 - 50 % nimellistehosta ja keskimääräinen moottorin nopeus 1500 - 1700 r/min. Tällöin hyvä polttoainetalous osakuormilla on tärkeä. Moottorin ominaiskulutusten erot ovat monasti pienet, usein vain 10 % luokkaa. Traktorin kuljettaja voi vaikuttaa kulutukseen useita kymmeniä prosentteja. Suurimpia vaikuttajia ovat ajotapa ja työkoneneen säätö ja kunnossa pito.

Moottorin ominaiskulutus ilmoittaa myös moottorin hyötysuhteen. Dieselöljyn ja kevyen polttoöljyn lämpöarvo on n 43 MJ/kg. Muutetaan MJ yksikköön kWh, koska pohdiskelu on helpompaa tehdä näin. Energiasisällöksi saadaan 11,9 kWh/kg. Kevyen dieselpolttoaineen tiheys on kesä- ja talvilaadusta riippuen 0,82 - 0,84 kg/l. Kun käytetään arvona 0,83 kg/l, saadaan yhden polttoöljylitran energiasisällöksi 9,9 kWh/l. Käytännössä voidaan sanoa, että täydellisesti poltetusta kevyestä poltto-/dieselöljystä saadaan 10 kWh/l. Tämän mukaan, kun moottorin kulutus ja teho tiedetään, saadaan hyötysuhteeksi, yhtälö 1.8.

$$\eta = \frac{P[kW]}{10 \cdot q[l/h]} \quad (1.8)$$

Hyötysuhde voidaan laskea myös ominaiskulutuksesta yhtälön 1.9 mukaisesti.

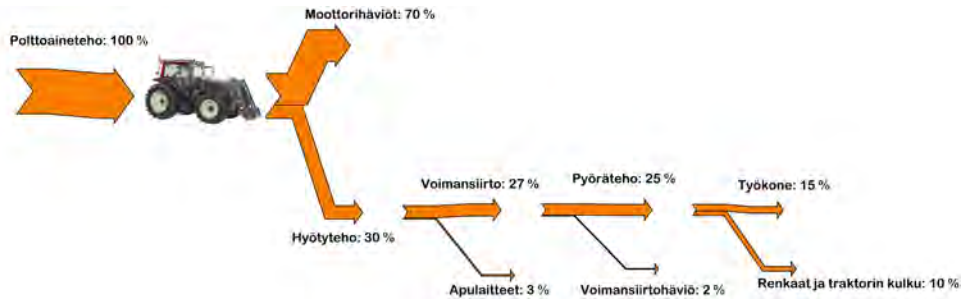
$$\eta = \frac{83,7}{q_{om}[g/kWh]} \quad (1.9)$$

Parhaiden moottoreiden hyötysuhteet ovat 50 % luokkaa. Traktoridieseleissä hyötysuhteet ovat normaalisti 30 - 35 %.

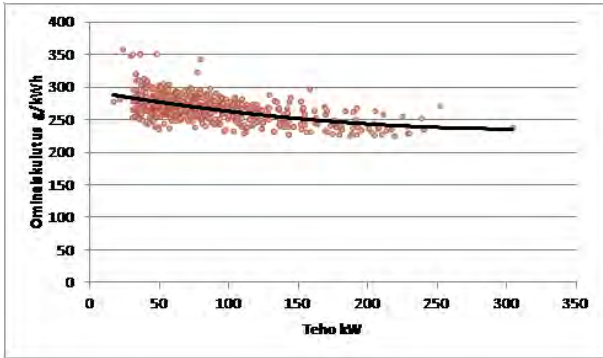
Esimerkki. Kuvan 1.12 traktorista otetaan 60 % moottoritehosta (50 kW). Mikä on kulutus, jos joko ajetaan 'hanat auki' tai ajetaan hyvin säästeliäästi? Moottorin rajamomenttikäytä leikkaa 60% tehon 2200 1/min moottorinopeuden kohdalla, jolloin ominaiskulutus on 310 g/kWh luokkaa. Moottorin otto-teen ollessa 50 kW polttoainetta kuluu $50 \cdot 310 = 16 \text{ kg/h}$. Vaihdetaan suuremmalle vaihteelle ja pudotetaan moottorin nopeus 1200 - 1400 1/min luokkaan, jolloin ajonopeus pysyy samana ja ominaiskulutus on 230 g/kWh. Tuntikulutus on 12 kg/h eli säästetään 4 kg/h polttoainetta. Tämä tarkoittaa n 5 l/h tilavuusmitoissa. Polttoaineen kulutuksen säästöohje kuuluu, vaihda isommalle vaihteelle ja alenna moottorin kierroksia.

1.5.9 Keskiteho

Traktorikäytön keskitehot vaihtelevat suuresti. Tiloilla on useampia traktoreita ja uusimpia käytetään yleensä



Kuva 1.14: Polttoainetehton jakautuminen traktorissa

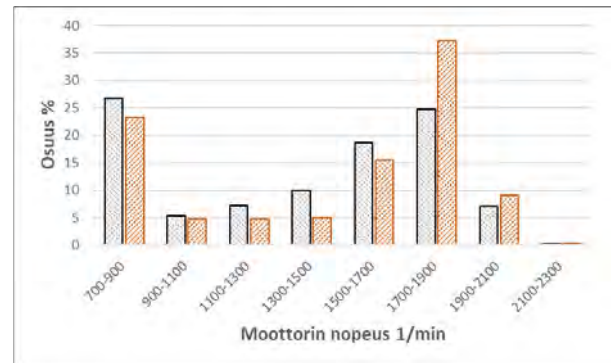
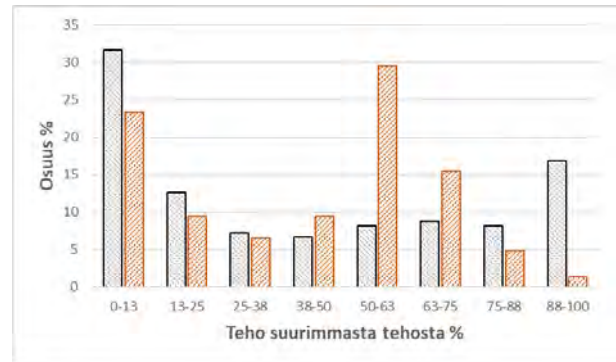


Kuva 1.15: Traktorin ominaiskulutus ja moottoriteho

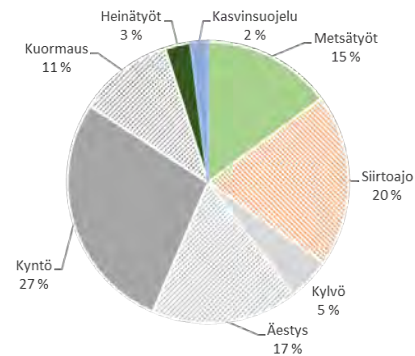
raskaimpiin töihin ja vanhempia kevyihin töihin. Lisäksi käyttötavat vaihtelevat, karjataloilla käyttö on monipuolisempaa kuin viljataloilla. Karjataloilla vuotuiset käyttötunnit ovat muutama tuhat tuntia, kun viljataloilla käyttötunnit ovat satoja tunteja. Kuvassa 1.16 on kahden samanmallisen teholtaan 160 kW traktorin tehon ja moottorin pyörimisnopeuden käytöt n 1600 käyttötunnin aikana [Janulevicius ym 2010] Liettualla maataloilla. Keskimääräinen käyttöteho oli 43% suurimmasta tehosta ja pyörimisnopeuden keskiarvot olivat n 1400 1/min. Kummankin traktorin pienen tehon (0-13%) käyttö on ollut huomattavan suurta. Tässä on mukana kevyttä käyttöä ja tyhjäkäyntiä. Traktorin käyttö on erilaista kuin ajoneuvojen käyttö. Autoilla ajetaan etenkin maantieajossa suurimmaksi osaksi jatkuvalla melko tasaisella kuormalla. Traktorin käytössä esimerkiksi päisteet ja pienet siirtymiset vähentävät keskitehon tarvetta.

Witneyn [Witney 1988] mukaan Yhdysvalloissa tehdyssä tutkimuksessa traktorin keskimääräinen käyttöteho oli 55% suurimmasta tehosta. Vakolan traktori-koetuksissa on myös seurattu traktorien tehonkäyttöä [Vakola koetusselostus]. Keskimääräinen tehonkäyttö on ollut 20-40% nimellistehosta ja keskiarvo oli n 30%. Käyttö vastasi lähinnä viljanviljelytilan käyttöä ja mukana oli myös metsätöitä sekä nurmiviljelyä, kuva 1.17. Maataloustöiden lisäksi traktoreille tehtiin suoritusarvomittauksia.

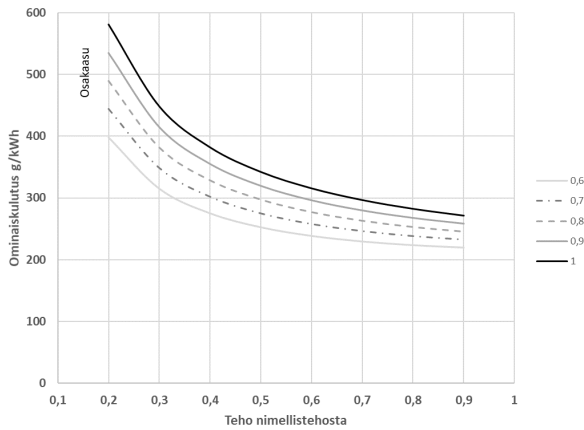
Traktorin polttoaineen kulutus riippuu kuormitusasteesta kuvan 1.18 mukaisesti. Kuva on piirretty standardin ASAE D497 [ASAE D497] mukaan. Osakaasu tarkoittaa kaasuvivun asentoa ja sitä kautta moottorin nopeutta. Polttoaineen kulutusta voidaan vähentää



Kuva 1.16: Kahden samanmallisen traktorin tehonkäyttö[Janulevicius ym 2010]



Kuva 1.17: TraktORITYÖN JAKAUMA VAKOLAN KOETUKSISSA



Kuva 1.18: Ominaiskulutuksen riippuvuus kuormituksesta ja moottorin nopeudesta. Osakaasu tarkoittaa kaasuvivun asentoa, 1= täysikaasu

etekin keveissä maataloustöissä käyttämällä alhaisia moottorin nopeuksia. Moottoreiden nimellisaivot ovat luokkaa 2000 - 2200 1/min. Nopeus 1400 1/min vastaisi tällöin osakaasua 0,6 - 0,7. Jos traktorin tehon käyttö on 30 - 50% nimellistehosta, kulutus on 0,6 - 0,7 osakaasulla kuvan 1.18 mukaan 250 - 350 g/kWh. Vuotuinen ominaiskulutus on siten n 300 g/kWh riippuen tehon käytöstä ja ajotavasta.

Edellä esitettyjen perusteella voidaan arvioida traktorin vuotuisesta kulutuksesta yhtälön 1.10 avulla.

$$Q_a = \frac{q_{om} \cdot P_{nim} \cdot k_a \cdot t}{r} \tag{1.10}$$

Q_a	vuotuinen polttoaineen kulutus
q_{om}	polttoaineen ominaiskulutus
P_{nim}	nominaali-teho
k_a	kuormitusaste
t	käyttötunnit
r	polttoaineen tiheys

Esimerkki. Traktorin vuotuiset käyttötunnit ovat 500 h, kuormitusaste on 40% ja nimellisteho on 80 kW. Kuinka paljon traktori kuluttaa polttoainetta? Oletetaan, että traktorilla ajetaan järkevästi suhteellisen pienillä moottorin nopeuksilla ja osakaasu on 0,7. Kuvan 1.18 mukaan ominaiskulutus 40% kuormitusasteella on tällöin 300 g/kWh. Käytetään polttoaineen tiheytenä 830 g/l. Kulutukseksi saadaan $Q_a = \frac{300 \cdot 80 \cdot 0,4 \cdot 500}{830} = 5800$ l. Jos traktorilla ajettaisiin jatkuvasti kaasu auki, ominaiskulutus olisi 380 g/kWh ja vuotuinen kulutus olisi 7300 l.

Esimerkki. Traktorin vuotuiset käyttötunnit ovat 450 h ja polttoaineen kulutus on 3600 l. Traktorin nimellisteho on 65 kW. Mikä on traktorin kuormitusaste?

Ratkaistaan yhtälöstä 1.10 kuormitusaste k_a , $k_a = \frac{Q_a \cdot r}{q_{om} \cdot P_{nim} \cdot t}$. Ominaiskulutukseksi valitaan 270 g/kWh ja polttoaineen tiheydeksi 830 g/l, jolloin saadaan $k_a = \frac{3600 \cdot 830}{270 \cdot 65 \cdot 450} = 38\%$.

1.5.10 Polttoainetankin koko

Polttoainetankin tai energiasäilön koko määräytyy käyttövaatimuksista. Tankin koko voidaan laskea yhtälön avulla

$$V_t = q_{om} r P_{nim} k t \tag{1.11}$$

V_t	polttoainetankin koko
q_{om}	moottorin ominaiskulutus
r	polttoaineen tiheys
P_{nim}	moottorin nimellisteho
k	moottorin kuormitusaste
t	ajoaika

Esimerkki. Traktoria käytetään muokkauksessa. Moottorin nimellisteho on 95 kW, ominaiskulutus on 260 g/kWh ja moottorin kuormitusaste on 85%. Ajoajan halutaan olevan 12 h ja polttoaineen tiheys on 830 g/l. Kuinka paljon polttoainetta tähän tarvitaan?

$$V_t = \frac{260 \text{ g/kWh}}{830 \text{ g/l}} \cdot 95 \text{ kW} \cdot 0,85 \cdot 12 \text{ h} = 304 \text{ l eli } 3,2 \text{ l/kW.}$$

Renius [Renius 1999] on antanut seuraavat suositukset polttoainetankin koolle.

- Kevyt työ 1,5 l/kW
- Keskiraskas työ 2,0 l/kW
- Raskas työ 2,5 l/kW

1.6 Päästöt

Päästöissä (emission) ja polttoaineista käytetään omia vakiintuneita lyhenteitä, jotka ovat peräisin niiden englanninkielisistä nimistä:

Lyhenne	Eng. nimi	Suom. nimi
CO	Carbon Oxide	Hiilimonoksidi
CO ₂	Carbon Dioxide	Hiilidioksidi
HC	Hydrocarbon	Hiilivety
NOx	Nitrogen Oxides	Typenoksidit
PM	Particulate Matter	Hiukkasmassa
PN	Particulate Number	Hiukkaslukumäärä

Taulukko 1.2: Polttoaineiden ominaisuuksia

Polttoaine	Tiheys kg/m ³	Alempi lämpöarvo MJ/kg	Koostumus
Metaani	0,7	50	CH ₄
Propani	1,8	46	C ₃ H ₈
Bensiini	750	43	C ₆ H ₁₈
Diesel	830	43	C ₁₆ H ₃₄
Etanoli	785	27	C ₂ H ₆ O

1.6.1 Palaminen

Polttoaineet ovat hiilivetyjä, joiden koostumus riippuu polttoaineesta. Lyhyimmät hiilivetyketjut on kaasuisia ja pisimmät raskaissa polttoaineissa. Taulukossa 1.2 on eri polttoaineiden ominaisuuksia ja keskimääräisiä kemiallisia koostumuksia. Nestemäiset polttoaineet eivät sisällä pelkästään yhtä aineosaa, vaan siinä on mukana useita eri hiilivetyjä. Taulukon 1.2 koostumus on eräänlainen keskiarvo. Esimerkiksi bensiinin hiilivetyjen hiiliatomien määrä vaihtelee C₄- C₁₂ väliltä.

väliltä.

Palamiseen käytetään ilmaa, joka on pääasiassa typen ja hapen seos. Typeä (N₂) on 78 tilavuusprosenttia ja happea (O₂) 21 tilavuusprosenttia ja loppu on erilaisia jalokaasuja ja vesihöyryä. Ilmasta vain happi ottaa osaa palamiseen, paitsi korkeissa palamislämpötiloissa typpikin reagoi ja muodostuu typen oksideja. Lisää polttoaineiden palamisesta löytyy esimerkiksi kirjan Engineering Principles of Agricultural Machines kappaleesta 2 [Srivastava ym].

Polttomootoreiden hyötysuhteet ovat suhteellisen heikot ja parhaimmillaankin voidaan päästä vain lähes 50% hyötysuhteeseen. Palaminen ei ole täydellistä ja pakokaasuissa on haitallisia komponentteja (päästöjä, emissions). Hiilivedyt muodostuvat hiilestä ja hapesta, joten täydellisessä palamisessa pitäisi syntyä vain vettä ja hiilidioksidia. Palamisen ollessa epätäydellistä pakokaasuissa on hiilimonoksidia (CO), palamattomia hiilivetyjä (HC), typen oksideja (NO_x) ja hiukkasia (PM = Particulate Matter).

1.6.2 Päästöjen haitallisuus

Hiilidioksidipäästö

Kun lasketaan polton aiheuttamaa hiilidioksidimäärää, se saadaan suoraan polttoaineen hiilen muuttumisesta hiilidioksidiksi. Arvot voidaan laskea polton kemiallisista yhtälöistä, kun polttoaineen keskimääräinen koostumus tiedetään. Tilastokeskus käyttää laskennassaan taulukon 1.3 mukaisia arvoja. Kiinteiden polttoaineiden osalta on muistettava, että niiden tilavuuspainot (kuormapainot) ovat huomattavasti tiheyttä pienempiä. Kaasumaisten polttoaineiden tiheys riippuu myös lämpötilasta ja paineesta.

Päästöjen esittämistavassa on vaihtelua. Yksikkönä voi olla g/MJ tai g/kWh. Ensimmäisessä tavassa kyse on yleensä päästöstä polttoaineen energian suhteen, jälkimmäisessä päästöstä tuotettua työtä kohden.

Selvyyden vuoksi toisinaan merkitään yksikköön mitä kohden päästö on ilmoitettu. Liikennepolttoaineissa ja nykyisin myös polttoöljyissä veloitetaan käyttämään biopolttoaineita. Tästä johtuen taulukon arvot ovat hieman erilaiset verrattuna pelkkien fossiilisten vastaavien polttoaineiden arvoihin.

Tieliikenteessä on ollut käytössä CO₂ raja-arvot paketti- ja henkilöautoille. Raskaille ajoneuvoille on kehitteillä oma menetelmä. Työkonemootoreille tätä rajaa ei ole.

Esimerkki. Traktori kuluttaa kynnössä 20 l/ha moottoripolttoöljyä. Kuinka suuri hiilidioksidipäästö siitä syntyy ja kuinka paljon energiaa käytetään hehtaaria kohden?

Moottoripolttoöljyn tiheys on 806 g/l (taulukon 1.3 dieselöljy) ja lämpösisältö 42,8 MJ/kg, jolloin hehtaaria kohti käytetään 20·0,806 = 16,1 kg polttoainetta. Energiana tämä on 16,1·42,8 = 689 MJ, mikä vastaa 191 kWh. Hiilidioksidipäästö on 689·64,7 = 44,6 kg/ha. Miksi hiilidioksidia syntyy enemmän kuin mitä polttoainetta alunperin on? (Palamisen happi saadaan ilmasta.)

CO₂-ekvivalentti

Ilmastovaikutus otetaan huomioon laskemalla hiilidioksidiekvivalentti (CO₂-ekv., CO_{2ekv}). Ilmaston lämpenemisvaikutusta arvioitaessa käytetään yleisesti IPCC laskentamenetelmää [IPCC 2006]. Siinä lasketaan päästökaasujen vaarallisuus siten, että laskennassa on mukana hiilidioksidin lisäksi metaani (CH₄) ja typpioksiduli (ilokaasu, N₂O). 100 vuoden ajanjaksolla metaanin GWP-kerroin (Global Warming Potential) on 25 ja typpioksidulin 298. Hiilidioksidin kerroin on 1 eli metaani on 25 kertaa ja typpioksiduli 298 kertaa haitallisempi kuin hiilidioksidi ilmaston lämpenemisen kannalta. Biopolttoaineiden käytössä poltossa syntyvää hiilidioksidia ei oteta huomioon, koska kasvien ajattelun sitovan sen uudelleen kasvukierrossa. Työkoneiden päästömittauksissa ei mitata metaania eikä typpioksiduulia. Maataloudessa käytettävien dieselmoottoreiden tyypilliset kasvihuonepäästöarvot on esitetty taulukossa 1.4. Kun tätä taulukkoa verrataan taulukkoon 1.3, CO₂-arvo on tässä korkeampi. Tämä johtuu siitä, että taulukossa 1.3 on otettu huomioon Suomen polttoaineiden bio-osuus.

Taulukko 1.3: Tilastokeskuksen laskennassa käyttämät hiilidioksidipäästömäärät polttoaineen energiaa kohden [Polttoaineluokitus 2021]

Polttoaine	CO ₂ päästö g/MJ	Lämpö-arvo MJ/kg	Tiheys kg/l
Nestekaasu	65,0	46,2	0,52
Moottoribensiini ¹	66,3	41,9	0,745
Dieselöljy ²	64,7	42,8	0,806
Kevyt polttoöljy ³	70,9	43,2	0,834
Bioetanoli	72,0	26,6	0,79
Jyrsinturve	107,6	10,1 ⁴	0,32
Halot, rangat ja pilkkeet	112,0	14,0 ⁴	
Hake	112,0	9,5 ⁴	
Biokaasu	54,6	20,0 MJ/m ³	

¹Polttoaineen bio-osuus 10,5% ²Polttoaineen bio-osuus 12,0% ³Polttoaineen bio-osuus 3,0% ⁴Tyypillinen arvo, lämpöarvo riippuu kosteudesta

Taulukko 1.4: Tyypillisiä maatalouden dieselmootoreiden päästöarvoja [IPCC 2006]

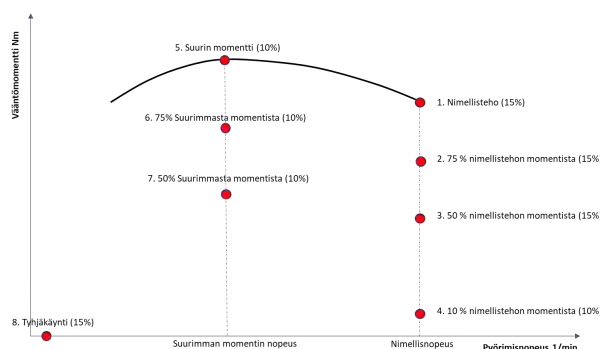
Kaasu	Tyypillinen arvo g/MJ	Alin arvo g/MJ	Ylin arvo g/MJ
CO ₂	74,1	72,6	74,8
CH ₄	0,00415	0,00167	0,0104
N ₂ O	0,0286	0,0143	0,0858

Esimerkki. Kynnössä polttoaineen kulutus on 20 l/ha. Kuinka paljon tästä tulee CO_{2ekv} päästöjä? Jatketaan edellisen esimerkin mukaisin arvoin. Polttoaineenergiaa käytettiin 689 MJ ja hiilidioksidipäästö oli 44,6 kg/ha. Metaanipäästönä käytetään taulukon 1.4 arvoa 0,00415 g/MJ, jolloin saadaan $0,00415 \frac{g}{MJ} \cdot 689 MJ = 2,9$ g/ha. Typpioksidulin tyypillinen arvo on 0,0286 g/MJ, jolloin saadaan $0,0286 \frac{g}{MJ} \cdot 689 MJ = 19,7$ g/ha. Hiilidioksidiekvivalenttiarvo saadaan nyt käyttämällä IPCC 2006 [IPCC 2006] kertoimia, $44,6 + 25 \cdot 0,0029 + 298 \cdot 0,0197 = 50,5$ kg/ha. Hiilidioksidiekvivalentti on 5,9 kg/ha suurempi kuin pelkkä hiilidioksidipäästö. Laskennassa käytetyt päästöarvot kuvaavat keskimääräistä vuotuista käyttöä, eivätkä ne kuvaa kovin hyvin kynnön kuormitusta ja olosuhteita. Laskentatulos on siten vain arvio tilanteesta.

Työkoneiden valtakunnalliset päästölaskennat löytyvät TYKO sivustolta [TYKO 2020].

1.6.3 Moottoreiden päästörajat

Päästörajat annetaan ominaispäästöinä, mikä tarkoittaa että ne on suhteutettu tehtyyn työhön samalla tavalla kuin ominaiskulutus annetaan, g/kWh. Päästöarvot määritetään usean kuormituspisteen painotettuna keskiarvona ja ne kuvaavat keskimääräistä koneen käyttöä. Päästömittauksissa käytetään ISO 8178 mukaisia mittapisteitä. Tässä standissa on useita osia, joissa määritetään polttoaine, mittausten menetelmät ja



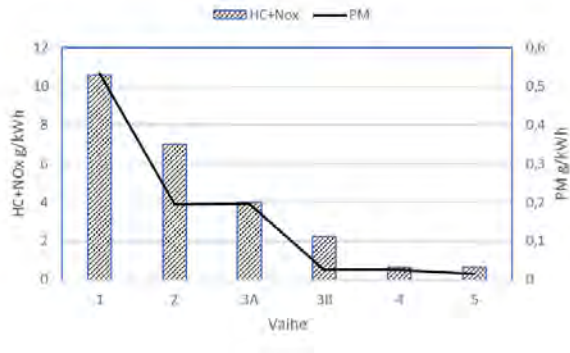
Kuva 1.19: Maataloustraktorin päästömittauksen kuormituspisteet ja kunkin pisteen painoarvot [ISO 8178]

moottoriperheet. Käytössä on kaksi perustestisarjaa vakiokuormatesti (NRSC Non-Road Steady Cycle) ja transienttitesti (NRTC Nonroad Transient Cycle).

Kuvaan 1.19 merkattu punaisella ympyrällä vakiokuormatesti mittauspisteet ja niiden viereen mikä on pisteen painoarvo lopullisessa tuloksessa. Mittaus tehdään kolmella eri pyörimisnopeudella, nimellisnopeudella, suurimman momentin nopeudella ja tyhjäkäynnillä. Nimellistehon ja suurimman momentin kohdalla käytetään kolmea tai neljää eri kuormitusastetta. Vakiokuormatestin lisäksi tehdään transienttitesti. Siinä on jatkuvasti vaihteleva kuormitus, jolloin myös kiihdytysten ja hidastusten vaikutus tulee mukaan päästömittaukseen.

Traktorin päästöarvo on siten keskiarvo eri mittapisteistä ja erilailla kuormitetusta moottorista ja se kuvaa jollain tarkkuudella traktorin keskimääräistä vuotuista päästöarvoa. Jos halutaan selvittää jonkin työn päästömääriä, silloin pitäisi tietää tuolla kuormituksella syntyvät moottorin päästöt. Esimerkiksi raskaassa työssä (kyntö, äestys) traktoria kuormitetaan voimakkaasti ja silloin pitäisi tietää vähintäänkin kuvan 1.19 1 ja 2 pisteiden päästötulokset. Näitä tuloksia ei kuitenkaan ole yleisesti saatavissa.

Työkoneiden ja maataloustraktoreiden moottoreiden



Kuva 1.20: Traktorimoottorien päästörajojen muutokset

päästörajat ovat EU:n direktiivissä [EU 97/68/EC] määritetty ja niiden rajat ovat taulukossa 1.5. Päästörajat ovat kiristyneet vuodesta 1999 lähtien vaiheittain ja taulukossa on viidennen vaiheen (Stage V) rajat. Kuvassa 1.20 on esitetty kuinka päästörajat ovat muuttuneet viimeisen kahdenkymmenen vuoden aikana. Vaatimukset ovat tiukentuneet nopeasti ja voimakkaasti, päästörajat ovat viimeisimmissä vaatimuksissa kymmenesosa siitä mitä ne alussa olivat. Tämä on tarkoittanut jatkuvaa moottoreiden kehittämistä.

Tarkempia tietoja eri vaiheista ja moottorityyppien vaatimuksista löytyy EU lainsäädännöstä ja sivustolle EU Nonroad on koottuna näitä vaatimuksia. Viidennessä vaiheessa hiukkaspäästöjä on tiukennettu entisestään ja hiukkasmäärälle (PN) on annettu raja-arvo. Lisäksi kaasumoottoreille tai osaksi kaasuja käytetyille moottoreille on annettu raja-arvot.

Kun moottorin käyttöteho ja päästöt tunnetaan, päästön massavirta voidaan laskea yhtälöllä 1.12.

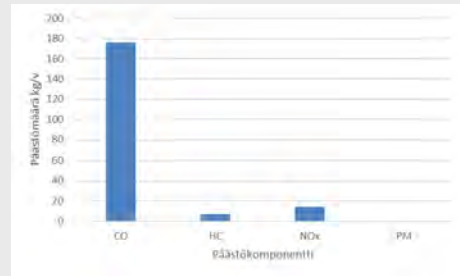
$$q_m = q_{ok}P \tag{1.12}$$

q_m päästökomponentin massavirta
 q_{ok} päästökomponentin ominaispäästö
 P moottoriteho

Esimerkki. Traktorin moottori noudattaa päästömääräyksiä. Mikä on sen vuotuinen päästömäärä, jos käyttöteho vastaa mittausten vakiokuormatestin painotusta. Keskimääräinen käyttöteho on 40 kW ja käyttötuntimäärä on 880 h.

Moottoriteho $P = 40 \text{ kW}$. $CO = 5 \frac{g}{kWh} \cdot 40 \text{ kW} \cdot 880 \text{ h} = 176 \text{ kg}$, $HC = 0,19 \frac{g}{kWh} \cdot 40 \text{ kW} \cdot 880 \text{ h} = 6,7 \text{ kg}$, $NOx = 0,4 \frac{g}{kWh} \cdot 40 \text{ kW} \cdot 880 \text{ h} = 14,1 \text{ kg}$ ja $PM = 0,015 \frac{g}{kWh} \cdot 40 \text{ kW} \cdot 880 \text{ h} = 0,5 \text{ kg}$.

Hiilidioksidipäästö on $CO_2 = 846 \frac{g}{kWh} \cdot 40 \text{ kW} \cdot 880 \text{ h} = 29779 \text{ kg}$.



Päästöt ilmoitetaan tehtyä työtä kohti. Maataloudessa tärkeä yksikkö on pinta-ala ha. Polttoaineen kulutukset vaihtelevat riippuen traktorista, sen koosta ja työkoneista. Jos esimerkiksi maata muokataan, siihen tarvitaan tietty työmäärä. Kun kerätään tietoa kuinka paljon esimerkiksi polttoainetta tarvitaan yhden hehtaarin työhön, saadaan selvät suuruusluokat. Tähän voi tutustua esimerkiksi Energia-akatemia hankkeen sivustolta [Energia-akatemia]. Polttoaineen kulutuksessa ja päästöissä hehtaaria kohti käytettyä polttoainemäärää tai hehtaaria kohti tuotettua päästömäärää voidaan käyttää vertaillaessa esimerkiksi työmenetelmiä tai laskehtaessa päästömääriä.

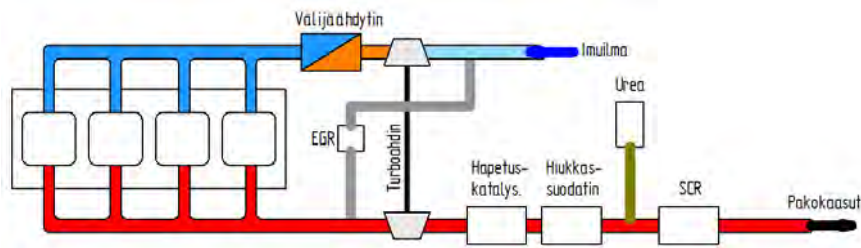
1.6.4 Päästöttekniikka

Dieselmoottori toimii ilmaylijäämällä, jolloin palamatomat hiilivedyt ja häkä eivät ole ongelmana, kuten on ottomoottorissa. Ongelmana on typen oksidit. Ilmaylimäärä ja korkea lämpötila antavat hyvät olosuhteet typen oksidien syntymiseen. Typen oksidien lisäksi dieselmoottorin ongelmana on hiukkaset. Kuvassa 1.21 on esitetty yksinkertaistettuna dieselmoottorin päästönvähennystekniikoita.

- Välijäähdytin (intercooler) alentaa ahdetun imuilman lämpötilaa, jolloin saadaan suurempi täytös sylinteriin ja myös matalampi palamislämpötila.
- EGR (Exhaust Gas Recirculation, pakokaasujen takaisin kierrätys) kierrättää osan pakokaasusta takaisin imuilmaan. Laitteistoon voi kuulua myös kierrätetyn pakokaasun jäähdytys (cEGR External Cooled Exhaust Gas Recirculation). Pakokaasujen ominaislämpökapasiteetti on suuri ja kierrätetty ja jäähdytetty pakokaasu sitoo lämpöä ja alentaa palamislämpötilaa. Alentunut lämpötila pienentää typen oksidien muodostumista.

Taulukko 1.5: EU 97/68/EC traktoridieselmoottoireiden päästörajat , stage V, voimaantulo 2019. CO=hiilimonoksidi, HC=hiilivety, NO_x=typen oksidit, PM=hiukkaspäästö, PN=hiukkasmäärä

Moottori- teho kW	CO g/kWh	HC g/kWh	NO _x g/kWh	PM g/kWh	PN 1/kWh
130 ... 560	3,5	0,19	0,4	0,015	10 ¹²
56 ... 130	5,0	0,19	0,4	0,015	10 ¹²



Kuva 1.21: Yksinkertaistettu periaate dieselmoottoreiden päästötieteestä

- Dieselhapetus-katalysaattori (DOC Diesel Oxidation catalyst) aikaansaa pakokaasujen palamattomien yhdisteiden ja hiukkasten hapettumista. Se myös hapettaa typpioksidin (NO) typpidioksidiksi (NO₂), joka tehostaa hiukkassuodattimen ja NO_x katalysaattorin toimintaa.
- Dieselhiukkassuodatin (DPF Diesel Particulate Filter) vähentää nokihiukkasten määrää. Suodatin regeneroidaan polttamalla hiukkaset. Moottorin ohjausjärjestelmä huolehtii regeneroinnista.
- NO_x vähentävä katalysaattori SCR (Selective Catalytic Reduction) pelkistää typen oksidit typeksi ja vedeksi. Pelkistyminen saadaan aikaiseksi ammoniakiliuoksen avulla (AdBlue), $2NH_3 + NO + NO_2 \rightarrow 2N_2 + 3H_2O$.

Päästörajoista riippuen edellä olevista tekniikoista käytetään niitä, millä vaatimukset täytetään. Esimerkiksi vuoden 2011 Stage 3 päästörajat voitiin saavuttaa joko pakokaasujen takaisin kierrätyksellä (EGR, cEGR) tai NO_x vähentävällä katalysaattorilla (SCR). Jälkimmäinen oli kalliimpi, mutta sen ansiosta polttoainetalous oli parempi. EGR tekniikassa palamislämpötiloja alennettiin samalla heikentämällä moottorin toimintaa, jolloin typen oksideja muodostui vähemmän. EU-alueella on samat vaatimukset, mutta sen ulkopuolella olevissa maissa voi olla erilaiset vaatimukset.

Luku 2

Vaihtoehtoisia voimanlähteitä ja polttoaineita

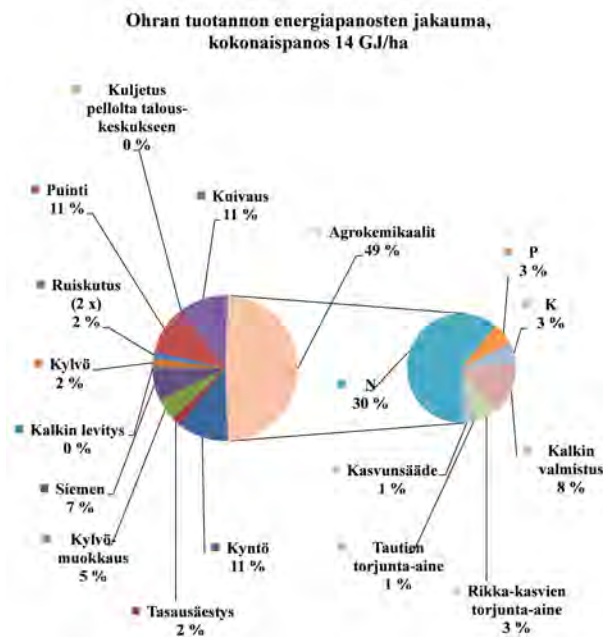
Fossiiliset polttoaineet aiheuttavat ilmaston lämpenemisen ja niiden käytöstä pitäisi luopua. Raskaan kaluston ja työkoneiden osalta tämä ei ole yhtä helppoa kuin esimerkiksi henkilöautojen osalta. Raskaan kaluston kuormitus on suurta, jolloin riittävään ajomatkaan tai työrupeamaan tarvittava energiamäärä on suuri. Työkoneiden osalta niiden käyttöpaikat asettavat ongelmia. Maastossa olevaa konetta on vaikea tehdä sähkökäyttöiseksi, koska latauspaikkaa ei ole.

Fossiilisista polttoaineista voidaan luopua siirtymällä ei fossiilisiin polttoaineisiin (biopolttoaineet, vety) tai sähkökäyttöön. Maataloustraktorien ja työkoneiden osalta siirtymä on hidasta, koska koneiden käyttöaika on tyypillisesti useita kymmeniä vuosia. Energiaa voidaan säästää muuttamalla viljelymenetelmiä ja tehostamalla energiansäästötoimenpiteitä. Kuvassa 2.1 on esitetty ohranviljelyn energiapanosten jakauma. Liki-main puolet viljelyn energiasta käytetään tilan ulkopuolella agrokemikaalien valmistamiseen. Työkoneiden käyttämä energia on kolmasosa kokonaisenergiasta.

Maatalouden energiaoppaita ja julkaisuja on saatavissa mm Energia-akatemia tutkimushankkeen raporteista [Energia-akatemia].

Helpoin tapa vähentää hiilidioksidipäästöjä on käyttää uusiutuvia polttoaineita. Polttoaineen muutos ei vaadi uuden kaluston hankintaa tai muutoksia olemassa oleviin moottoreihin. Liikenteen osalta nämä on määritelty biopolttoaineiden jakeluvuorot käsittelevässä laissa ja ohjeistuksissa (Kestävyys ja liikenne-polttoaineiden päästöjen vähentäminen). Se määrittelee kuinka suuri biopolttoaineen osuus myytävissä polttoaineissa pitäisi olla. Työkoneiden ja myös lämmityksen polttoöljyn jakeluvuoroite on esitetty laissa biopolttoöljyn käytön edistämisestä [Laki 2019/418]. Sen mukaan biopolttoöljyn energiasisällön osuus jakelijan toimittamasta kevyen polttoöljyn ja biopolttoöljyn energiasisällön kokonaismäärästä (jakeluvuoroite) tulee olla vähintään 3,0% vuonna 2021. Tämän jälkeen vuoroite kiristyy yhden prosenttiyksikön vuodessa ja vuonna 2028 ja sen jälkeen vuoroite on 10%.

Uusiutuvien polttoaineiden käytölle on myös annettu oma direktiivi, jota kutsutaan RED II direktiiviksi [EU 2018/2001]. Sen mukaan 2021 aloittavan jalostuslaitoksen liikenteen biopolttoaineen päästövähennuksen on oltava 65% pienemmät kuin korvaavan fossiilisen



Kuva 2.1: Ohranviljelyn energiapanokset [Ahokas J. 2013]

polttoaineen kasvihuonekaasupäästöt. Tämä voidaan todeta käyttämällä direktiivin oletusarvoja eri biopolttoaineille tai laskemalla päästövähennys direktiivin ohjeiden mukaisesti. Kuvassa 2.2 on esitetty direktiivin mukaisia oletusarvoja muutamalle biopolttoaineelle. Punainen viiva on 65% vähennysvaatimus. Viljasta ja sokerijuurikkaasta valmistetun etanolin osalta on esitetty eri valmistusmenetelmien aiheuttama vaihtelu. Jätteestä tai tähteestä valmistetun biopolttoaineen vähennys on aina edullinen, esimerkiksi St1 valmistaman Etanolixin vähennys on 90% [St1 Etanolix], samoin Nesteen My dieselin päästövähennys on 90%. Kuvan mukaan rapsista tai rypsiä valmistetun biodieselin ja viljasta valmistetun etanolin vaadittu kasvihuonekaasuvähennys on hankala saavuttaa.

Nylund ym [Nylund ym 2016] ym mukaan uuden teknologian parafiiniset biopolttoaineet vähentävät hiukkas- ja hiilivetyypäästöjä 25 - 30% ja parhaimmat jäte- ja tähdephojaiset biopolttoaineet vähentävät kasvihuonekaasupäästöjä 80-90%.

Hyvän ja kattavan katsauksen erilaisiin polttoainevaihtoehtoihin ja moottoritekniikoihin saa Nylundin ja Aakko-Saksan raportista [Nylund ja Aakko-Saksa 2007]. Polttoaineet, moottoritekniikka ja lainsäädäntö muuttuvat jatkuvasti ja ilmastomuutoksen aiheuttama paine on aiheuttamassa jatkuvia toimenpiteitä. Esimerkiksi henkilöautoissa EU:n vaatimukset autonvalmistajille ovat pakottaneet ne valmistamaan hybridi- ja sähköautoja. Vuodesta 2020 hiilidioksidipäästön raja-arvo on ollut 95 g/km. Päästö lasketaan valmistajan valmistamille autoille keskiarvona [MOTIVA henkilöautojen päästö määräykset]. Jos rajan ylittää, tästä joutuu maksamaan huomattavat sakot.

2.1 Biodiesel

Biopolttoaineilla voidaan korvata osittain tai kokonaan fossiilisia polttoaineita. Yksinkertaisimmillaan polttoaine voidaan saada omalta pellolta öljykasvien öljystä. Tällaisen polttoaineen laatu ei kuitenkaan ole hyvä ja se voi helposti aiheuttaa moottorivaurioita. Lisäksi se jähmettyy pakkasella. Rapsista valmistetun biodieselin on myös vaikea saavuttaa kasvihuonekaasujen vähennysvelvoitetta, kuva 2.2.

Kasviöljyä ja eläinrasvoja voidaan jalostaa esteröimällä ne esimerkiksi metyyllillä, jolloin saadaan laadukkaampi polttoaine FAME (Fatty Acid Methyl Ester). Tämän laatuvaatimukset on määritelty standardissa [SFS-EN 14214]. FAME biopolttoainetta voidaan sekoittaa fossiilisen polttoaineen sekaan ja sekoitusuhde on ollut 5% luokkaa. FAMEn käytössä on kuitenkin ilmennyt ongelmia (Biodiesel ongelmia) ja näiden takia esimerkiksi Neste on kehittänyt enemmän jalostetun biodieselin NesteMY.

2.2 Kaasumaiset polttoaineet

Kaasumaiset polttoaineet mahdollistavat pienemmät hiilidioksidipäästöt, koska niissä on hiiltä vähemmän

kuin dieselpolttoaineissa. Esimerkiksi maakaasun hiilidioksidipäästöt ovat 25% dieseliä pienemmät. Kaasun käyttö moottoreissa on tuttua, kuorma-autoja ja traktoreita on saatavissa kaasukäyttöisinä ja traktoreissa on kokeiltu kaasukäyttöä.

Maa- ja biokaasu ovat koostumukseltaan lähes pelkästään metaania ja niitä voidaan varastoida tehokkaasti kahdessa eri muodossa, paineistettuna tai nesteytettynä. Kaasuista käytetään seuraavia nimityksiä.

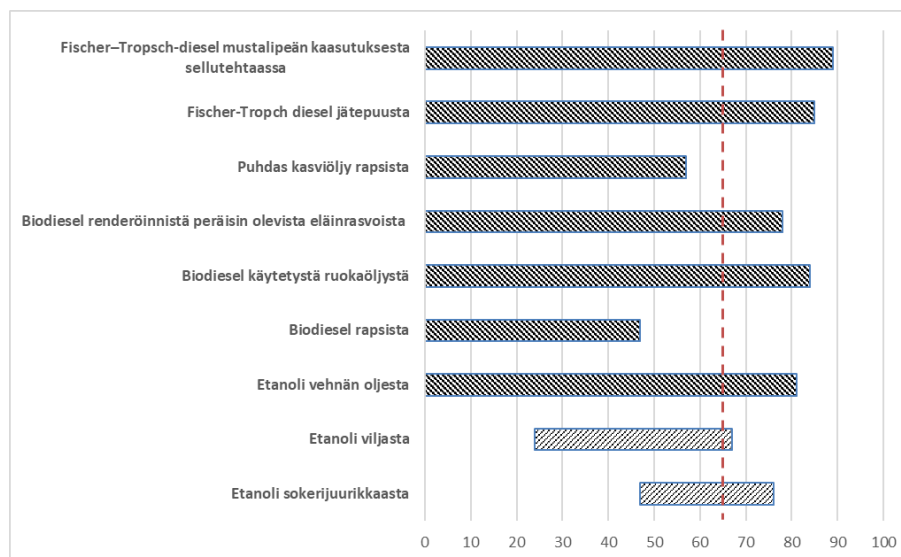
Lyhenne	Eng. nimi	Suom. nimi
CNG	Compressed Natural Gas	Paineistettu maakaasu
CBG	Compressed Biogas	Paineistettu biokaasu
LNG	Liquefied Natural Gas	Nesteytetty maakaasu
LBG	Liquefied Biogas	Nesteytetty biokaasu
LPG	Liquefied Petroleum Gas	Nestekaasu

Nestekaasu on propaanin ja butaanin seos, joka nesteytyy helposti alle 10 bar paineessa. Se vastaa ominaisuuksiltaan melkolailla metaania (maakaasu ja biokaasu).

Painetuksessa kaasu säilötään 200 - 250 bar paineessa. Paineistetun maakaasun energiatiheys (MJ/l) on 20 - 25% dieselin energiatihydestä, jolloin samaan energiamäärään tarvitaan 4 - 5 kertaa suurempi polttoainesaaliö [Söderena 2017]. Traktorissa polttoainesäiliön sijoitus tulee ongelmalliseksi, koska näkyvyys eteen pitää pysyä hyvänä ja takana työkonet tarvitsevat oman tilansa. Maavaraa ei myöskään voida paljoa madaltaa. Gasumin kaasuasemilla on saatavissa painestettua maa- ja biokaasua.

Nesteytetty maa- tai biokaasu saadaan aikaiseksi jäädyttämällä kaasu -160 C lämpötilaan, jolloin sen energiatiheys on 60% dieselin energiatihydestä ja polttoainesäiliön pitäisi olla 1,7ertainen dieseliin verrattuna, jos halutaan samaa täyttövälä [Söderena 2017]. Nesteytetty maa- tai biokaasu vaativat hyvin eristetyt polttoainesäiliöt, jotta kaasu pysyisi nestemäisenä. Ajoneuvot toimivat vain jatkuvassa käytössä, sillä jos kone seisoo yhtäjaksoisesti useita päiviä, neste kaasuuntuu ja se on päästettävä säiliöstä.

Biokaasu ei sovellu sellaisenaan liikennevälineiden polttoaineiksi. Biokaasun metaanipitoisuus on 50 - 70% ja loppu on hiilidioksidia sekä pienissä määrin myös esimerkiksi rikkivetyä. Biokaasua käytetään suoraan sähköntuotantoon kaasumoottorin ja generaattorin avulla. Sitä voitaisiin käyttää suoraan myös traktorin polttoaineena, kunhan se puhdistetaan, koska esimerkiksi rikkivety aiheuttaa korroosiota. Suuri hiilidioksidipitoisuus estää sen paineistuksen kondensoitumisen takia [Owczuk ym 2019]. Jos biokaasua käytetään suoraan vaikka traktorin polttoaineena sen määrä jää pieneksi ja tankkausväli on lyhyt. Biokaasun metaanipitoisuus pitää tämän takia saada yli 90% ja se pitää puhdistaa, jotta sitä voidaan käyttää ajoneuvoissa. Uusiutuva biokaasu vähentää kasvihuonekaasupäästöjä jopa 90%



Kuva 2.2: Direktiivin EU 18/2001 mukaisia biopolttoaineiden kasvihuonekaasupäästöjen vähennyksen oletusarvoja.

[Gasum]. Valio on aloittanut biokaasun käytön maidonkeräysautoissa (VALIO). Biokaasulaitosten ongelmana on ollut suuret investointikustannukset.

Kaasuja voidaan käyttää helpommin ottomoottoreissa. Dieselmoottori on joko muutettava kipinäsytytteiseksi tai kaksoispolttoainemoottoriksi (DDF Diesel Dual Fuel), jossa voidaan käyttää yhtäaikaan dieselöljyä ja kaasua. Kuvassa 2.3 on esimerkki kaksoispolttoainemoottorin laitteistosta. Maakaasu sekoitetaan moottorin imuilmaan. Dieselin polttoainelaitteiston lisäksi tarvitaan oma laitteistonsa kaasun määrän säätöön ja moottorin toiminnan ohjaamiseen. Kaasu johdetaan imusarjaan ja dieselpolttoainetta käytetään vähintään seoksen sytyttämiseen tarvittava määrä. Dieselin korvausaste on ollut näissä moottoreissa 40 - 70% ja hyötysuhde on ollut lähes dieselmoottorin luokkaa [Söderena 2017]. Kaksoispolttoainemoottorien ongelmana on useasti korkeat metaanipäästöt, metaani palaa suhteellisen hitaasti ja dieselille optimoidussa moottorissa palamatonta metaania virtaa moottorin läpi.

Ruotsalaisessa MEKA hankkeessa [Einarson ym 2015] Valtra asensi kolmeen traktoriin kaksoispolttoainelaitteet. Laitteet toimivat hyvin ja käytössä saatiin käytettäessä ruotsalaista liikennekaasua 20 - 25% pienemmät päästöt ja käytettäessä biokaasua 35 - 40% vähennys. Lannasta tuotetulla biokaasulla vähennys olisi ollut 50-60%. Ongelmaksi muodostui metaanipäästöt ja moottorin ohjausta ja metaanikatalyysaattoria piti muokata. Tämän jälkeen metaanipäästöt saatiin alhaisiksi. Typen oksidien päästöt pysyivät lähes samana, mutta partikkeli ja hiilivetyypäästöt lisääntyivät. Kaasun osuus oli 30 - 40%, lopun ollessa dieselpolttoainetta. Hankkeen loppupäätelmiä oli, että kaksoispolttoainemuutokset vaativat moottoritehtaan mukana olon, muutoin päästöt eivät ole välttämättä hallinnassa.

Suomessa ajoneuvojen kaasulaitteiston jälkiasennus vaatii muutostarkastuksen. EU:n päästölainsäädännön

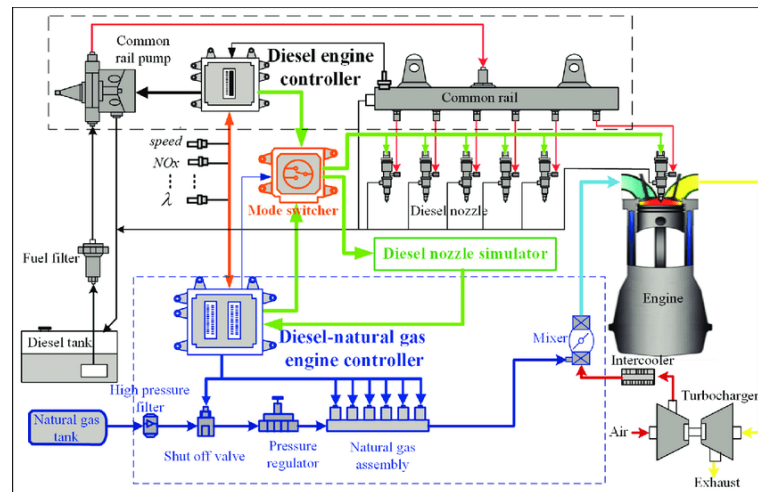
V vaiheessa on mukana myös rajoja kaasumoottoreiden päästöille.

Söderenan [Söderena 2017] mukaan kaasu soveltuu työkonien polttoaineeksi taulukon 2.1 mukaisesti. Kaasun käytön ongelmana on polttoainesäiliön koko ja myös tankkausmahdollisuudet. Suuria tehoja vaativissa töissä koneet pitäisi pystyä kaasukäytössä tankkaamaan useasti työpäivän aikana tai niihin pitäisi saada suuret polttoainesäiliöt. Osa töistä joudutaan tekemään metsässä tai maastossa kaukana asutuksesta, jolloin tankkausmahdollisuuksia ei ole.

2.3 Sähkökäyttö

Sähkö on energian lähteenä liikenne- ja työkonikäytössä päästötön. Tosiasiassa sähkön tuotanto aiheuttaa päästöjä, mutta ne rekisteröidään energiasektorin päästöiksi. Sähköntuotannon ominaishiilidioksidipäästö oli vuonna 2019 viiden vuoden keskiarvona 135 g CO₂/kWh [Energiavuosi 2019]. Sähköä voidaan käyttää traktoreissa ja työkonieissa joko suoraan verkosta, akkujen kautta tai hybridinä. Traktorinvalmistajat ovat kokeilleet erilaisia vaihtoehtoja, kuten polttokenoa, dieselsähköistä voimansiirtoa, verkkosähköä ja hybriditeknikkaa.

Sähkökäytön etuna on helppo ja monipuolinen automatisointi ja hyvä hyötysuhde. Huonona puolena on esimerkiksi hydraulikkaan verrattaessa suurempi paino ja suora jäähdystarve. Hydraulikassa hydraulioöljy toimii myös jäähdityksenä ja siirtää lämmön komponenteista pois. Sähkökäytössä pitää rakentaa komponenteille erillinen jäähditys. Hydraulisen voimansiirron ongelmana on huono hyötysuhde ja sähköistä heikompi automatisointimahdollisuus. Traktorin sähköistäminen avaa uusia mahdollisuuksia voimansiirron järjestämiselle ja mekaanisesta voimansiirrosta voidaan siirtyä osittain tai kokonaan sähköiseen voimansiirtoon. Lisäksi työkonien hallinta ja käyttö monipuolis-



Kuva 2.3: Esimerkki kaksoispolttoainemoottorin laitteistosta [Fu ja Xiao 2017]

Taulukko 2.1: Kaasukäytön soveltuvuus työkonien käyttöön [Söderena 2017]

Työkone	Teho kW	Käyttö	Ympäristö	Soveltuvuus
Maataloustraktori	> 100	Maan muokkaus	Pelto	Ei sovellu
	56 ... 100	Maatilan yleistyöt, siirto, niitto, ruiskutus, kuljetus yms	Piha, pelto ja tilustiet	Vaihteleva/ voisi soveltua
	< 56	Kevyet maatilan työt, siirto, niitto, ruiskutus, kuljetus yms	Piha, pelto ja tilustiet	Voisi soveltua
Leikkuupuimuri	Kaikki	Puinti	Pelto	Ei sovellu
Kurottaja	< 100	Kuormaus, siirto	Piha, tuotantorakennukset	Voisi soveltua
Metsätyökoneet	Kaikki	Puun korjuu	Metsä	Ei sovellu
Maansiirtokoneet	< 560	Maan kaivuu, siirto ja kuormaus	Maasto, taajama	Ei sovellu
Kaivoskoneet	> 560	Kuljetus	Kaivos, 24/7	Soveltuu (LNG)
Traktorikaivurit	> 100	Kuormaus ja kaivuu	Maasto, taajama	Ei sovellu
	< 100	Kuormaus ja kaivuu	Maasto, taajama	Vaihteleva
Kiinteistötraktorit	> 100	Katujen ja pihojen kunnossapito	Taajama	Vaihteleva
	56 ... 100	Katujen ja pihojen kunnossapito	Taajama	Voisi soveltua
	< 56	Katujen ja pihojen kunnossapito	Taajama	Voisi soveltua
Haarukkatrukit	< 75	Tavaran kuormaus ja siirto	Rakennettu ympäristö	Soveltuu

tuu, kun voimansiirto työkoneseen vidaan tehdä sähköisesti. Sähköiset traktorit ovat 2-3 kertaa perinteisiä kalliimpia. Huoltotarve on kuitenkin vähäisempi kuin perinteisessä traktorissa.

2.3.1 Verkkosähkö

Verkkosähkön suoraa käyttöä kokeiltiin ensimmäisen kerran vuonna 1894 [Electric tractor power]. John Deere on esitellyt äskettäin uuden täyssähköisen traktori-konseptin (JD GridCON, JD GridCON). Traktori saa käyttövoimansa sähköverkosta 1 km pituisen kelattavan kaapelin avulla. Traktorin voimansiirto on täysin sähköinen ja käyttö on robotisoitu siten, että traktorissa ei ole kuljettajaa.

2.3.2 Akkukäyttö

Samalla lailla kuin sähköautot, myös traktorit voisivat toimia akuilla. Ongelmaksi tässä tulee kuitenkin akkujen kapasiteetti ja lataaminen. Otetaan esimerkiksi kyntö, joka tarvitsee polttoainetta 20 l/ha. Tämä vastaa 200 kWh/ha polttoaine-energiaa. Oletetaan, että traktorin moottorin hyötysuhde on 30 % (280 g/kWh ominaiskulutus) ja sähkökäytön hyötysuhde on 90%. Polttoaineen energiasta saadaan kyntöön hyödyksi 6 l/ha, 14 l/ha on häviöitä. Kyntötyö vastaa 60 kWh/ha energian tarvetta. Jos kynnettäisiin sähkön avulla, tarvittaisiin 60 kWh/0,9 = 67 kWh sähköenergiaa. Tämän mukaan saadaan yhtälö

$$E_s = \frac{q[l/ha] \cdot 10 \cdot \eta_m}{\eta_s} \quad (2.1)$$

E_s	sähköenergian tarve kWh/ha
q	polttoaineen kulutus l/ha
10	dieselöljyn lämpöarvo kWh/l
η_m	dieselmoottorin hyötysuhde, desim.
η_s	sähkömoottorin hyötysuhde, desim.

Autojen Litiumioni akkujen energiatihedyydet ovat 100 ... 250 Wh/kg [Iclodean ym 2012]. Vertailun vuoksi dieselöljyn energiatiheys on 10 kWh/l (12 000 Wh/kg). Energiatihedyyden perusteella voidaan laskea tarvittava akkujen massa, yhtälö 2.2.

$$m = \frac{E_s}{E_r} \quad (2.2)$$

E_s	sähköenergian tarve
E_r	akun enrgiatiheys

Esimerkki. Päivässä halutaan kyntää 10 ha ala. Kuinka suuri on siihen tarvittava akun massa? Oletetaan polttoaineen kulutukseksi 20 l/ha ja dieselmoottorin hyötysuhteeksi 33 %. Sähköenergian tarve on tällöin $E_s = \frac{20 \cdot 10 \cdot 0,33}{0,9} = 73$ kWh/ha ja kymmenen hehtaarin kyntöön tarvitaan 730 kWh. Otetaan akun energiatihedyyksi 250 Wh/kg, jolloin akun massaksi saadaan $m = \frac{730000}{250} = 2920$ kg. Jos akun energiatiheys olisi huonompi, esimerkiksi 100 Wh/kg, akun massa olisi 7300 kg.

Reniuksen mukaan [Renius 1999] polttoainetankin tilavuuden suositus moottoritehoa kohden oli kevyessä työssä 1,5 l/kW, keskiraskaassa työssä 2,0 l/kW ja raskaassa työssä 2,5 l/kW. Jos käytetään kevyille töille 300 g/kWh ominaiskulutusta, keskiraskaille 275 g/kWh ja raskaille 250 g/kWh, saadaan kun käytetään akulle 200 Wh/kg energiatihyyttä seuraavat suositukset:

- Kevyt työ 5 kWh/kW
- Keskiraskas työ 7 kWh/kW
- Raskas työ 9 kWh/kW

Esimerkki. Traktorin moottoriteho on 65 kW. Traktoria käytetään kevyisiin ja keskiraskaisiin töihin. Kuinka suuri akku traktorissa pitäisi olla? Keskiraskas työ määrittää akun koon, akun kapasiteetin pitäisi olla 7 kWh/kg, jolloin tarvitaan $65 \text{ kW} \cdot 7 \text{ kWh/kg} = 455$ kWh. 200 Wh/kg energiatihyydellä akun massaksi tulisi $\frac{455000}{200} = 2275$ kg.

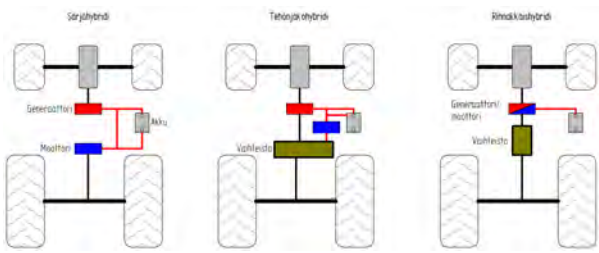
Akun käyttö tällä hetkellä on mahdollista lähinnä kevyissä töissä. Raskaimmissa töissä akun massa tulee liian suureksi. Sähköisiä traktoreita on kehitetty ja kehitetään jatkuvasti. Esimerkiksi Fendt (Fendt eVario, Top Agarar Fendt) ja John Deere (John Deere SE-SAM) ovat esittäneet omia sähköisiä mallejaan.

Akkukäyttö tarvitsee myös latauksen. Akkuja ladataan tasajännitteellä ja sen takia sähköajoneuvoihin on rakennettu sisään kiinteät laturit. Näille syötetään latausvirta normaalista sähköverkosta. Ajoneuvon laturin ominaisuuksista riippuu kuinka tehokasta lataus voi olla. Lataaminen voi olla peruslatausta, hidasta latausta tai tehollatausta. Peruslatausta varten on oma pistorasiansa ja latausvirta voi olla 3x63 A ja latausteho voi olla 43 kW. Hidas lataus tapahtuu normaalista yksi- tai kolmivaihepistorasiasta. Yksivaiheisen latauksen virta on usein rajoitettu 8 A virtaan, koska pistorasiat eivät kestä monesti suurempia jatkuvia virtoja. Tehollataukselle on oma pistorasiansa ja silloin akkuja syötetään ajoneuvon ulkopuolella olevasta tasasähkölaturista. Latausteho on silloin tyypillisesti 50 - 350 kW. [Sesko]

2.3.3 Hybridikäyttö

Hybridikäytössä teho voidaan tuottaa joko mekaanisesti, sähköisesti tai yhdistettynä. Polttomoottori on käyttövoimana ja akun avulla sähkö on apuvoimana. Akku voi olla ladattavissa verkkovirralla, jolloin puhutaan ladattavasta hybridistä. Hybridikäytössä, kun koko moottorin tehoa ei tarvita, voidaan ladata akkuja ja kun tarvitaan ylimääräistä tehoa, sähköllä voidaan avustaa.

Voimanottoakselikäyttöisissä työkonneissa voimansiirto on joko mekaaninen tai hydraulinen. Hydraulista voimansiirtoa käytetään, jos tarvitaan nopeussäätöä. Sen huonona puolena on melko huono hyötysuhde. Sähköisellä voimansiirrolla voitaisiin parantaa hyötysuhdetta.



Kuva 2.4: Traktorin hybridikäyttö [Karner ym 2013]

Hybridikäyttö voidaan toteuttaa kuvan 2.4 mukaisesti. Sarjahybridissä (series hybrid) generaattori käyttää sähkömoottoria ja lataa akkuja. Tehonjakokäytössä (power-split tai series-parallel hybrid) moottorin teho jaetaan mekaanista ja sähköistä tietä ja ladataan akkua. Rinnakkaisahybridissä (parallel hybrid) samalla voimansiirtolinjalla on mekaaninen ja sähköinen voimansiirto. Kuormituksen mukaan joko ladataan akkua tai avustetaan mekaanista voimansiirtoa. Akku mahdollistaa hybridikäytössä osan työn teosta pelkästään sähkön avulla, tälle on käyttöä esimerkiksi rakennuksissa tai taajamissa.

Esimerkiksi Steyr on kokeillut hybridikäyttöä Steyr Konzept traktorillaan [Steyr Konzept]. Traktorissa on sähkömoottorit joka pyörässä ja myös voimanottoakselia ja hydraulikkaa käytetään sähköllä.

2.3.4 Polttokenno

Polttokennoissa käytetään polttoaineen vetyä, jonka avulla saadaan aikaiseksi sähköä. Polttokennon hyötysuhde on dieselmoottoria korkeampi. Ongelmana on vedyn jakelujärjestelmän puute ja varastointi. Polttokennotekniikkaa pitää myös kehittää, ongelmia on ollut kestoikässä ja hinnassa. Polttoainetalous on hyvä ja dieseliin verrattuna kulutus on vähentynyt lähes kolmasosan.

Vedyn tuotanto kuluttaa energiaa ja jos se tuotetaan sähköllä polttokennon kokonaishyötysuhde jää akkukäyttöä heikommaksi. Vety voidaan tuottaa tuuli- tai aurinkoenergialla silloin, kun 'ylimääräistä' sähköä on tarjolla.

Kirjallisuutta

- [Ahokas J. 2013] Ahokas j: (toim.) Polttoaineen kulutus peltotöissä. Helsingin yliopisto Maataloustieteiden laitoksen julkaisusarja nro 26. 2013. Saatavissa <https://www.energia.agrotekno.fi/julkaisut/>
- [Ahokas ym] Ahokas J., Esala J., Kataja J. Energia-analyysit ja -kulutuksen seuranta. Energia-akatemia, <https://www.energia.agrotekno.fi/oppaat/>. 20.9.2021
- [ASAE D497] ASAE D497.7 Agricultural Machinery Management Data. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- [Einarson ym 2015] Einarson E. (editor), Törnqvist S., Enghag O., Lundström E. Biogas Operation in Non-Road Machinery, Transport styrelsen Rapport 2015:23E, 2015.
- [Energia-akatemia] Maaseudun Energia Akatemia. www.energia.agrotekno.fi
- [Energia-akademian tilastokeskus 2019] Tilastokeskus Energiavuosi 2019, https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2020/html/suom0011.htm. 20.9.2021
- [St1 Etanolix] Creating New Business from Waste-Based Advanced Ethanol, <https://content.st1.fi/sites/default/files/2018-08/90dbc62d-0197-4dee-a0d3-c0c24e32107a.pdf>, 20.9.2021
- [EU 97/68/EC] DIRECTIVE 97/68/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL
- [EU 2018/2001] EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON DIREKTIIVI (EU) 2018/2001, uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä
- [Fu ja Xiao 2017] Fu, Youyao & Xiao, Bing. (2017). Online prediction of the piston maximum temperature in dual-fuel engine. Advances in Mechanical Engineering. 9. 168781401769269. 10.1177/1687814017692692.
- [Gasum] Uusiutuvalla biokaasulla voidaan tehokkaasti vähentää päästöjä, <https://www.gasum.com/kaasusta/biokaasu/biokaasunpaastot/>, 18.9.2021
- [Handler ja Nadlinger 2012] Handler F., Nadlinger M. Strategies for saving fuel with tractors Trainer handbook. Intelligent Energy Europe. 2012
- [Janulevicius ym 2010] Janulevičius A., Juostas A., Pupinis G. Engine working modes during tractors operational period. MECHANIKA. 2010. Nr.3(83)
- [MOTIVA henkilöautojen päästömääräykset] Henkilöautojen päästömääräykset, Motiva, https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liik. 22.9.2021
- [Iclodean ym 2012] Iclodean C., Varga B., Burnete N., Cimerdean D., Jurchiş B. Comparison of Different Battery Types for Electric Vehicles. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 252 (2017)

- [IPCC 2006] 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Intergovernmental Panel on Climate Change, <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>.
- [ISO 8178] ISO 8178 standardisarja, Reciprocating internal combustion engines — Exhaust emission measurement
- [ISO 14396] ISO 14396 Reciprocating internal combustion engines -- Determination and method for the measurement of engine power -- Additional requirements for exhaust emission tests in accordance with ISO 8178
- [JD GridCON] John Deere continues robot testing, Profi, <https://www.profi.co.uk/news/john-deere-continues-robot-testing>. 20.9.2021
- [Jokiniemi ym 2016] Jokiniemi T., Suokannas A. ja Ahokas J. Energy consumption in agriculture transportation operations. Engineering in Agriculture, Environment and Food, Volume 9, Issue 2, April 2016, Pages 171–178.
- [Karner ym 2013] Karner J., Baldinger M., Schober P., Reichl B., Prankl H. Hybrid systems for Agricultural Engineering. Landtechnik 68(1), 2013.
- [Karvonen J.] Karvonen J., Traktorin sitkeys. Diplomityö Teknillinen Korkeakoulu
- [Laki 2019/418] Laki biopolttoöljyn käytön edistämisestä 2019/418. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2019/20190418>. 21.9.2021
- [Leeuwen 2020] Leeuwen L. Hydrogen or battery tractors: what potential for sustainable grape growing? <https://ives-technicalreviews.eu/article/view/4381>, 21.9.2021
- [Neste RenewableDiesel Handbook] Neste RenewableDiesel Handbook, https://www.neste.com/sites/neste.com/files/attachments/neste_renewable_20.9.2021
- [Electric tractor power] Machinery Milestones: Electric tractor power, Farmers Weekly, <https://www.fwi.co.uk/machinery/technology/machinery-milestones-electric-tractor-power>. 20.9.2021
- [Nylund ym 2016] Työkoneiden CO₂ päästöt ja niihin vaikuttaminen. Tutkimusraportti VTT-R-04745-16. Teknologian tutkimuskeskus VTT. 2016.
- [Nylund ja Aakko-Saksa 2007] Nils-Olof Nylund, Päivi Aakko-Saksa. Liikenteen polttoainevaihtoehdot. Kehitystilanneraportti. TEC TransEnergy Consulting Oy 2007. <https://www.motiva.fi/files/954/liikenteen-polttoainevaihtoehdot----kehitystilanneraportti.pdf>, 22.9.2021
- [Owczuk ym 2019] Owczuk, M.; Matuszewska, A.; Kruczyński, S.; Kamela, W. Evaluation of Using Biogas to Supply the Dual Fuel Diesel Engine of an Agricultural Tractor. Energies 2019, 12, 1071. <https://doi.org/10.3390/en12061071>
- [Polttoaineluokitus 2021] Tilastokeskus, polttoaineluokitus 2021. https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html, 13.9.2021
- [Polk E] Eric Polk, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1295506>, https://fi.wikipedia.org/wiki/Yhteispaineruiskutus#/media/Tiedosto:Commons:Eric_Polk
- [Sesko] Sähköajoneuvojen lataussuositus 2021. https://www.sesko.fi/files/1210/SESKO_lataussuositus_2021-02-17.pdf, 13.12.2021

- [Söderena 2017] Söderena P., S., Kehityspolut työkoneiden biokaasutekniikkaan. VTT Asiakasraportti No. VTT-CR-01044-17, 2017
- [Renius 1999] Tractors: Two Axle Tractors. In: CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Vol III. American Society of Agricultural Engineers 1999.
- [SFS-EN 14214] SFS-EN 14214:2013 + A2:2019. Liquid petroleum products. Fatty acid methyl esters (FAME) for use in diesel engines and heating applications. Requirements and test methods.
- [Srivastava ym] A.K. Srivastava, C.E. Goering & R.P. Rohrbach. Engineering Principles of Agricultural Machinery.
- [Steyr Konzept] Steyr Konzept, <https://www.steyr-traktoren.com/en-distributor/agriculture/technologie/steyr-konzept>. 21.9.2021
- [Turbocharger] Turbocharger, <https://en.wikipedia.org/wiki/Turbocharger> ja <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Turbocharger.jpg#/media/File:Turbocharger.jpg> ja <https://en.wikipedia.org/wiki/Turbocharger#/media/File:TurbochargedGarage.jpg>
- [TYKO 2020] Suomen työkoneiden päästömalli TYKO 2020. <http://lipasto.vtt.fi/tyko/index.htm>, 14.12.2021
- [Vakola koetusselostus] Vakolan koetusselostus. <https://jukuri.luke.fi/handle/10024/519273>. 17.11.2021
- [Witney 1988] Witney B. Choosing and using farm machines. Longman Scientific & Technical, England 1988.