



OULUN YLIOPISTO
UNIVERSITY of OULU

KONETEKNIIKAN OSASTO

BIOKAASUN KÄYTTÖ POLTTOMOOTTORISSA

Markus Hiitola

KANDIDAATINTYÖ
2016

Ohjaaja: Mauri Haataja

TIIVISTELMÄ

Biokaasun käyttö polttomoottorissa

Markus Hiitola

Oulun yliopisto, Konetekniikan osasto

Kandidaatintyö 2016, 33 s.

Työn ohjaaja: Mauri Haataja

Tässä työssä esitellään yleisimmät polttomoottorityypit ottomoottori ja dieselmoottori biokaasun käytön näkökulmasta. Lisäksi selvitetään biokaasun tuotantoa, ominaisuuksia ja puhdistamista aina biometaaniksi asti. Biokaasu on tärkeä fossiilisten polttoaineiden korvaaja. Biokaasua voidaan tuottaa mädättämällä jätteistä ja hyödyntämättömistä sivutuotteista.

Ottomoottorissa biokaasua voidaan käyttää sellaisenaan. Dieselmoottorissa, jossa palamisprosessi käynnistetään puristussytytysperiaatteella ilman sytytysavusteista sähkökipinää. Biokaasukäytössä palamisprosessi käynnistetään ruiskuttamalla puristetun biokaasun sekaan pieni määrä dieselöljyä.

Asiasanat: Polttomoottori, biokaasu, biometaani, polttoaine

ABSTRACT

The use of biogas in internal combustion engine

Markus Hiitola

University of Oulu, Department of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2016, 33 p.

Supervisor: Mauri Haataja

This thesis discusses about most common types of internal combustion engines. Two common types are Otto engine and diesel engine. Other topics are production, properties and cleaning of biogas. Biogas can be upgraded to biomethane. Biogas is important in replacing fossil fuels and biogas can be produced from wastes and unutilized side flows by anaerobic digestion.

Otto engine can use biogas with no problems. Diesel engine ignites fuel by compression. Gaseous fuel has to ignite by injecting small amount of diesel into cylinder.

Keywords: Internal combustion engine, biogas, biomethane, fuel

ALKUSANAT

Kandidaatintyön tarkoituksena on harjoitella tieteellistä kirjoittamista ja lähteiden käyttöä. Tässä työssä perehdyn biokaasuun ja sen käyttömahdollisuuksiin moottoripolttoaineena. Aiheessa on riittänyt opiskeltavaa monialaisesti ja se on haastanut minua kehittymään opiskelijana ja kirjoittajana.

Suuren kiitoksen avusta ansaitsee professori Mauri Haataja, joka on jaksanut kannustaa, neuvoa ja valaa uskoa työn valmistumiseen. Puolisoni Jaana on mahtavalla tavalla tukenut jokapäiväistä työtä ja lisäksi hän on oikolukenu tekstin. Vielä tahdon välittää suuren kiitoksen siskolleni Maarialle, joka työn loppuvaiheessa toimi kirjurina ja nopeutti työn valmistumista. Abstraktin tekstin tarkisti opiskelukaverini Harri, siitä hänelle suuri kiitos.

Työtä tehdessä olen oppinut paljon yhteistyön ja kannustuksen voimasta. Tämän työn tahdon omistaa Jumalalle, joka on minut luonut ja antanut kaikki edellytykset työn tekemiseen.

Merijärvi, 21.4.2016

Markus Hiitola

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	6
2 POLTTOMOOTTORI	7
2.1 Historia	8
2.1.1 Ottomoottori	9
2.1.2 Dieselmoottori	10
2.1.3 Polttoaineiden kehitys	11
2.2 Polttomoottoreiden luokittelu	12
2.3 Kipinäsytytteisen moottorin toiminta	14
2.3.1 Homogeeninen ja heterogeeninen seos	15
2.3.2 Sytyttäminen	16
2.3.3 Palamisprosessi	16
2.4 Puristussytytteisen moottorin toiminta	17
2.4.1 Seoksenmuodostus	18
3 BIOKAASU	19
3.1 Historia	19
3.2 Tuotanto ja raaka-aineet	20
3.2.1 Mikrobiologia ja mikrobien elinympäristö	21
3.2.2 Reaktori ja muut tuotantojärjestelmän osat	23
3.3 Koostumus ja ominaisuudet	23
3.4 Kuljetus ja varastointi	25
4 BIOKAASUN KÄYTTÖ POLTTOMOOTTORISSA	26
4.1 Raa'an biokaasun käyttö polttomoottorissa	26
4.1.1 Kaasun puhdistus sekä moottorin kunnossapito ja päästöt	26
4.2 Biometaanin käyttö polttomoottorissa	27
4.2.1 Kipinäsytytteinen FPT CNG/LNG kaasumoottori	27
4.2.2 Puristussytytteinen moottori	27
4.2.3 Valtran biokaasutraktori	28
4.2.4 Wärtsilä	28
4.3 Johtopäätökset	29
5 YHTEENVETO	31
6 LÄHDELUETTELO	33

1 JOHDANTO

Biokaasun käyttö polttomoottorissa on mielenkiintoinen aihe, koska polttomoottoreiden vallitsevan energianlähteen, raakaöljyn, uskotaan loppuvan lähitulevaisuudessa. Länsimaisen yhteiskunnan toiminnalle edullinen energia on välttämätöntä. Vaihtoehtoja raakaöljyn korvaamiseksi etsitään kuumeisesti, ja yksi vaihtoehto on biokaasu.

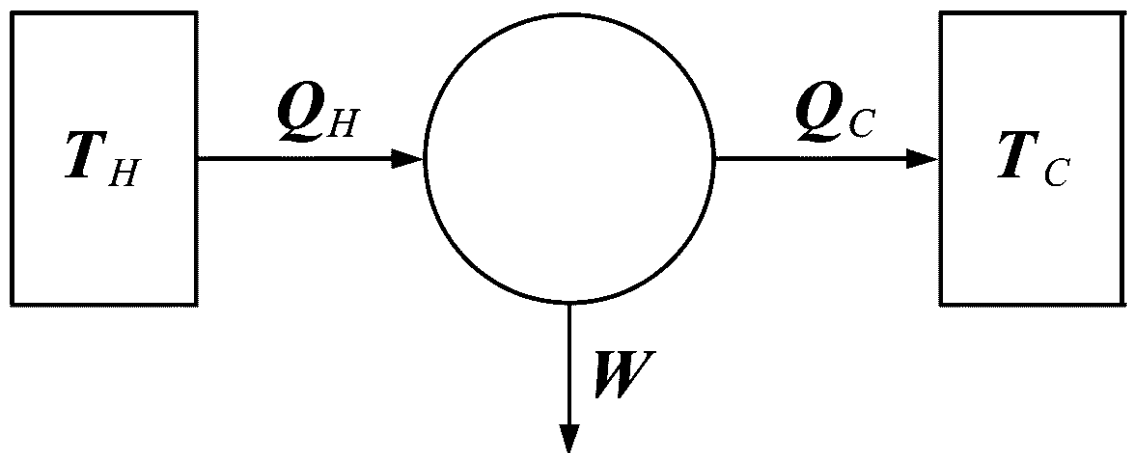
Tässä työssä tutustutaan kirjallisuuden avulla erilaisiin polttomoottorityyppeihin, biokaasuun ja biokaasun käyttöön polttomoottorissa. Biokaasusta tarkoituksena on selvittää, mitä se on sekä miten sitä tuotetaan ja kuljetetaan. Lisäksi selvitetään millaisia polttomoottoreita on olemassa, mitä vaatimuksia polttomoottori asettaa biokaasulle sekä miten biokaasu soveltuu erilaisten polttomoottorityyppien polttoaineeksi. Kysymysten avulla on tarkoitus selvittää, millaista polttomoottorikonstruktiota biokaasun kanssa kannattaisi käyttää. Tässä työssä käsitellään vain sisäisen palamisen moottoreita.

2 POLTTOMOOTTORI

Polttomoottori on kone, joka muuttaa polttoaineen kemiallisen energian mekaaniseksi energiaksi. Muutos energialajista toiseen tapahtuu polttamalla polttoainetta. Polttoaineen palotapahtuman sijainnin avulla polttomoottorit voidaan jakaa sisäisen palamisen moottoreihin ja ulkoisen palamisen moottoreihin. (Heywood 1988:1)

Tässä työssä keskitytään ainoastaan sisäisen palamisen moottoreihin, koska niiden yksinkertaisuus, vahva rakenne ja korkea tehopainosuhde ovat tehneet niistä suvereenisti yleisimmän moottorityypin. Sisäisen palamisen moottorit voidaan jakaa vielä sytytystyyppin perusteella kipinäsytytteisiin ja puristussytytteisiin moottoreihin. (Heywood 1988:1)

Polttomoottori toimii lämpövoimakoneen periaatteella. Lämpövoimakoneessa on lämmönlähde, mikä polttomoottorissa on polttoaineen kemiallisesta energiasta palamisen aikana vapautuva lämpö. Lämmönlähteestä (T_H) saadaan energiaa (Q_H), josta osa saadaan hyödylliseksi työksi (W). Kun kyseessä on polttomoottori, hyödyllistä työtä on kampaixelilta saatava työ. Loput energiasta (Q_C) luovutetaan lämpönieluun (T_C), joka polttomoottorin tapauksessa on ilmakehä. (Wikipedia 2015b)



Kuva 1. Lämpövoimakoneen toimintaperiaate. (Wikipedia 2015b)

Krannilan mukaan lämpövoimakone on lämpöä tuottava prosessi, jossa lämpö siirtyy varsinaiseen työaineeseen. Työaineen avulla lämpöenergia muutetaan mekaaniseksi työksi tai nostetaan ainetta korkeammalle energiatasolle. Mäntämoottorissa työaineena toimii sylinterissä oleva ilman ja polttoaineen seos. Polttoaine luovuttaa energiansa työaineelle, joka välittää energian mekaaniseksi työksi kampimekanismin kautta. (Krannila 1980:44–45)

Krannilan mukaan mäntäkone on ajoittain suljettu systeemi. Työkierto koostuu peräkkäisistä osaprosesseista ja työaine vaihtuu työkiertojen välillä. Osaprosessien työaineiden tilanmuutokset yhdistämällä saadaan tuotettua akselienergiaa. Polttomoottorin sisäiset tapahtumat ovat epästationäärisiä, mutta moottorin ulkoisia rajapintoja tarkasteltaessa toiminta lähestyy stationääristä. (Krannila 1980:44–45)

2.1 Historia

Ihmiset ovat hyödyntäneet lämpövoimakoneita mekaanisen energian tuottamisessa jo 1700-luvulta lähtien. Ensimmäiset 150 vuotta ainut lämpövoimakonetyyppi oli höyrykone. Lämmönlähteen avulla vettä kuumennettiin höyryksi ja paineennousu muunnettiin mekaaniseksi energiaksi sylinterin sisällä olevan männän liikkuaessa. (Heywood 1988:2)

Sisäisen palamisen moottoreista tuli todellisia vaihtoehtoja vasta 1860-luvulla, kun J. J. E. Lenoir (1822–1900) kehitti ensimmäisen markkinoille tulleen moottorin. Nämä ensimmäiset sisäisen palamisen moottorit käyttivät polttoaineenaan kivihiilikaasun ja ilman seosta. Moottorissa ei ollut esipuristusta, eli seos sytytettiin kipinällä ilmakehän paineessa. Kaasu-ilmaseos imettiin moottoriin männän liikkuaessa yläkuolokohdasta puolet iskunpituudesta alaspäin. Puolivälissä seos sytytettiin ja työtä saatiin iskun loppupuoliskon aikana. Palatessaan ylös mäntä poisti pakokaasut moottorista. Näissä moottoreissa oli enintään kuusi hevosvoimaa ja niitä valmistettiin noin 5000 kpl vuosina 1860–1865. Kokonaishyötysuhde oli viiden prosentin luokkaa. (Heywood 1988:2)

N. A. Otto (1832–1891) ja E. Langen (1833–1895) esittelivät vuonna 1867 hiukan edistyneemmän moottorin. Tämän moottorin heikkoutena oli matala terminen hyötysuhde ja suuri massa. (Heywood 1988:2)

2.1.1 Ottomoottori

Ominaisuuksien parantamiseksi Otto kehitti uuden nelitahtisen työkierron. Männän lähtiessä liikkeelle yläkuolokohdasta (YKK) alakuolokohtaan (AKK), sylinteri täyttyy ilman ja polttoaineen seoksesta. Ensimmäinen tahti on nimeltään imutahti. Männän liikkeessa AKK:sta takaisin YKK:n on vuorossa puristustahti. Sen aikana mäntä puristaa seoksen korkeampaan paineeseen. Työtahdin aikana polttoaine palaa ja muodostuva korkea paine työntää männän takaisin AKK:n. Viimeinen tahti on pakotahti, jolloin mäntä työntää pakokaasut pois sylinteristä. YKK:ssa työkierto alkaa jälleen alusta. Työkierron aikana kampiakseli pyöri kahdesti. (Heywood 1988:2)

Nelitahtisen moottorin ensimmäinen prototyyppi toimi vuonna 1876. Verrattuna Oton ja Langen aikaisempaan versioon tämän moottorin huomattavasti pienempi paino ja sylinteritilavuus antoivat edellytykset menestykseen. Moottori olikin läpilyönti ja loi perustan nykyiselle polttomoottoriteollisuudelle. Vuoteen 1890 mennessä Euroopassa ja Yhdysvalloissa näitä moottoreita oli myyty lähes 50 000 kappaletta. (Heywood 1988:2)

Vuonna 1984 löydettiin julkaisematon ranskalainen patentti, joka oli kirjattu vuonna 1862 henkilölle nimeltä A. B. de Rochas (1815–1893). Patentti sisälsi nelitahtisen työkierron periaatteet. Löydös asetti kyseenalaiseksi Oton oman aiheita koskevan patentin voimassaolon, ja Saksan viranomaiset asettivatkin Oton patentin mitätöidyksi. Vaikka de Rochasin patentti on aikaisempi kuin Oton, jäi Oton patentti voimaan suurimmassa osassa maita. De Rochas ei koskaan saattanut keksintöään täytäntöön, joten Otto on laajemmalla harkinnalla modernin sisäisen palamisen moottorin keksijä. (Heywood 1988:2-3)

De Rochasin patentissa kuvattiin nelitahtisen työkierron lisäksi olosuhteet sisäisen palamisen moottorin maksimaalisen hyötysuhteen saavuttamiseksi. Ne ovat:

1. Suurin mahdollinen sylinteritilavuus pienimmällä mahdollisella ulkopinta-alalla
2. Suurin mahdollinen moottorin nopeus

3. Suurin mahdollinen puristussuhde
4. Suurin mahdollinen paine työtahdin alkaessa (Heywood 1988:2-3)

Kaksi ensimmäistä ehtoa määrittelevät mahdollisimman pienen lämpöhäviön moottorin uuteen työaineeseen, eli moottoriin tuleva ilman ja polttoaineen seos pysyy mahdollisimman viileänä. Kolmas ehto kertoo, että työaineeseen sitoutunut energia muuttuu mahdollisimman suurelta osin teholliseksi mekaaniseksi työksi, kun se pääsee laajenemaan mahdollisimman suureksi tilavuudeksi. Neljäs ehto tunnistaa mahdollisimman suuren alkupaineen työtahdin alkaessa mahdollistaen suuremman männän liikepotentiaalin ja ennen kaikkea suuremman työn koko työtahdin aikana. (Heywood 1988:3)

Oton saavutettua menestystä keksinnöillään lähti polttomoottoreiden kehitys etenemään nopeasti. Muut kehittivät kaksitahtista sisäisen palamisen moottoria. Uutta moottoreissa oli työtahdin lopussa oleva pakokaasun poisto ja puristustahdin alussa oleva työaineen sisäänotto. J. Aktinson (1846–1914) kehitti moottorin, jossa mäntä liikkui työtahdin aikana pidemmän matkan kuin puristustahdin aikana. Moottorin kokonaishyötysuhde oli ajanjaksolle korkea, mutta siinä oli mekaanisia heikkouksia. (Heywood 1988:3)

Tutkimuksissa huomattiin, että hyötysuhde on suoraan riippuvainen puristussuhteesta, mutta sitä rajoittaa nakutusongelma. Siihen aikaan saatavilla olleilla polttoaineilla puristussuhde jäi alle neljään. Polttoaineen kaasuttimien ja sytytysjärjestelmien kehittyessä päästiin 1880-luvulla bensiinimoottoreissa sellaiselle kehitystasolle, jolla nopeakäyntisiä moottoreita voitiin käyttää autojen voimanlähteenä. (Heywood 1988:3)

2.1.2 Dieselmoottori

Vuonna 1892 saksalainen insinööri R. Diesel (1858–1913) hahmotteli patentissaan uudenlaisen sisäisen palamisen moottorin. Hänen tavoitteenaan oli saada aikaan palotapahtuma ruiskuttamalla nestemäistä polttoainetta ainoastaan puristamalla kuumennettuun ilmaan. Tällä tavalla kokonaishyötysuhde saatiin kaksinkertaistettua verrattuna muihin sen ajan sisäisen palamisen moottoreihin. Dieselin menetelmä mahdollisti paljon korkeammat puristussuhteet ilman vaaraa nakutuksesta. Toimivan

moottorin tekemiseen meni viisi vuotta, vaikka Dieselillä oli MAN.:in resurssit käytettävissään. (Heywood 1988:4)

2.1.3 Polttoaineiden kehitys

Polttoaineilla on ollut suuri merkitys moottoreiden kehityksessä. Ensimmäiset moottorit käyttivät polttoaineenaan kaasua. Bensiini ja kevyemmät raakaöljyn jakeet tulivat saataville 1800-luvun lopulla. Tuohon aikaan kehitettiin monenlaisia kaasuttimia, joiden avulla polttoaine saatiin sekoitettua ilmaan. Ennen vuotta 1905 bensiinin kanssa oli muutamia ongelmia. Puristussuhteet olivat matalia (alle 4) nakutuksen välttämiseksi. Toisaalta herkästi syttyvä polttoaine helpotti huomattavasti käsivoimin tehtäviä kylmäkäynnistyksiä. (Heywood 1988:4)

Vuosina 1907–1915 kehittyi polttoainepula, joka aiheutui raakaöljyn huonosta saantosuhteesta. W. Burton (1865–1954) kehitti ongelman ratkaisuksi lämpökrakkausprosessin. Siinä raskaat öljyalaadut jaetaan yksinkertaisempiin, herkemmin syttyviin komponentteihin kuumentamalla ja paineistamalla. Nämä polttoaineet tyydyttivät kysynnän, mutta kylmäkäynnistyvyys oli huonompi.

Ensimmäisen maailmansodan jälkeen saatiin selville useita tekijöitä polttoaineiden vaikutuksesta palamiseen ja erityisesti nakuttamiseen. Tällainen on muun muassa tetraetyylilyijyn nakutusta ehkäisevä vaikutus. Lisäksi polttoaineiden valmistus kehittyi, kun keksittiin katalyyttinen krakkaus. Tetraetyylilyijyn vaikutus havaittiin General Motorisin tutkimuksissa ja se saatiin markkinoille Yhdysvalloissa vuonna 1923. (Heywood 1988:4)

Polttoaineiden valmistus kehittyi, kun keksittiin katalyyttinen krakkaus. Katalyyttisen krakkauksen kehitti 1930-luvun lopulla Eugene Hoydry. Katalyyttisessä krakkauksessa raakaöljy höyrystetään ja höyry katalysoidaan 450–480 °C lämpötilassa. Hoydryn keksinnöllä saadaan paljon laadukkaampaa eli korkeaoktaanisempaa bensiiniä kuin lämpökrakkauksella, bensiinin saanto on suurempi ja lisäksi saadaan enemmän ja laadukkaampia oheistuotteita. Katalyyttinen krakkaus on laajalti käytössä vielä nykyäänkin. (Wikipedia 2015a).

1940-luvulla Los Angelesissa alkoi esiintyä savusumua. Sitä alettiin tutkia, ja vuonna 1952 professori A. J. Haagen-Smit osoitti savusumun syntyvän typpioksidien ja hiilivetykomponenttien reagoidessa auringonvalossa. Jo tuolloin autojen pakokaasut olivat pääasiallinen hiilivetyjen ja typpioksidien lähde. Pakokaasut lisäsivät myös kaupunkialueiden ilman häkäpitoisuuksia. Dieselmootoreiden merkittävimmät päästökomponentit ovat puolestaan pienet nokipartikkelit, hiilivedyt ja typen oksidit. Haittojen vähentämiseksi on laadittu päästönormeja, jotka tulivat voimaan ensimmäisenä Kalifornian osavaltiossa 1960-luvun alussa ja levisivät pian koko Yhdysvaltojen alueelle. Japaniin, Eurooppaan ja muualle maailmaan päästönormit ovat tulleet myöhemmin. Sitten ne ovat laajentuneet koskemaan autojen lisäksi myös muita polttomoottorisovelluksia. (Heywood 1988:5)

Toinen polttomoottoreiden kehitykseen vaikuttanut tekijä on polttoaineen kulutus. Laajemmin käsitettynä polttoaineen kulutus on osatekijä kokonaishyötysuhteessa. Tiukentuvat päästönormit ovat hankaloittaneet ja hidastaneet kokonaishyötysuhteen kehittämistä. Esimerkiksi lyijyn käytön rajoittaminen bensiinissä on pakottanut moottorivalmistajat alentamaan puristussuhteita nakutuksen ehkäisemiseksi. De Rochasin havainnon mukaan puristussuhteen laskeminen huonontaa kokonaishyötysuhdetta suoraan. (Heywood 1988:5)

2.2 Polttomoottoreiden luokittelu

Polttomoottoreita on kehitetty voimakkaasti jo kolmella eri vuosisadalla. Kehitys jatkuu materiaalien, polttoaineiden ja tekniikoiden kehittyessä. Erilaisia polttomoottoreita on paljon, ja niitä voidaan luokitella lukuisten ominaisuuksien avulla. Olemassa olevissa moottoreissa erilaiset ominaisuudet ja tekniset ratkaisut menevät ristiin, joten järkevä luokittelumenetelmä riippuu tilanteesta ja halutuista tuloksista.

Heywood on esittänyt kymmenen erilaista luokittelutekijää. Ne ovat:

1. *Käyttökohde*. Käyttökohde voi olla henkilöauto, kuorma-auto, veturi, kevyt lentokone, vesikulkuneuvo, siirrettävä energiantuottojärjestelmä tai kiinteä voimalaitos

2. *Moottorin perusrakenne.* Edestakaisen liikkeen moottorit (jaettu alalajeihin sylinterien sijoituksen mukaan, esim. rivi-, V-, säteittäis- ja vastaiskumoottori) ja kiertomäntämoottorit (Wankel ja muut geometriat)
3. *Työkierto.* Nelitahtinen: vapaasti hengittävä, ahdettu, turboahdettu. Kaksitahtinen: kampikammiohuuhdeltu, ahdettu ja turboahdettu
4. *Venttiilien tai aukkojen konstruktio ja sijainti.* Yläpuoliset (tai kansi-) venttiilit, sivuventtiilit (tai L-venttiilit), läpihuuhdeltu- (imu- ja pakoaukot sylinterin vastakkaisilla sivuilla samassa päässä sylinteriä), mutkahuuhdeltu- (imu- ja pakoaukot ovat sylinterin samalla sivulla ja samassa päässä) poikittaishuuhtelu (imu- ja pakoaukot eripäissä sylinteriä).
5. *Polttoaine.* Bensiini, polttoöljy (diesel), maakaasu, nesteytetty maakaasu, alkoholit (metanoli, etanoli), vety tai kaksipolttoainejärjestelmä
6. *Seoksenmuodostusmenetelmä.* Kaasutin, ruiskutus imusarjaan tai ruiskutus sylinteriin
7. *Sytytysmenetelmä.* Kipinäsytytteinen (homogeeninen ja heterogeeninen seos) tai puristussytytys (perinteisissä dieselmootoreissa ja kaasumootoreissa, jotka sytytetään pienellä polttonestemäärällä)
8. *Palokammion rakenne.* Avoin kammio, jaettu kammio
9. *Kuormituksenhallintamenetelmä.* Ilman ja polttoaineen säätäminen seossuhteen säilyessä vakiona, ainoastaan polttoaineen määrän hallinta tai näiden yhdistelmä
10. *Jäähdytysmenetelmä.* Nestejäähdytteinen, ilmajäähdytteinen tai jäähdyttämätön (muuten kuin luonnollisesti johtumalla tai säteilemällä). (Heywood 1988:7).

Tässä työssä pääasiallisena luokittelutekijänä käytetään polttoainetta.

Heywood on käyttänyt pääasiallisena luokittelumenetelmänä sytytysmenetelmää, koska teoksessa lähestytään sisäisen palamisen moottorin toimintaa ja päästöjen muodostumista perusasioista alkaen. Polttomootoreiden kaksi sytytysmenetelmää ovat kipinä- ja puristussytytys. (Heywood 1988:7-8).

2.3 Kipinäsytytteisen moottorin toiminta

Kipinäsytytteisen moottorin toiminnassa olennaisia tekijöitä ovat moottorin rakenne, seoksen muodostus ja sytytystapa. Moottorin rakenteessa ja seoksen muodostuksessa tärkeä muuttuja on seoksenmuodostuksen paikka, joka voi olla sylinterin sisä- tai ulkopuolella. Ulkopuolisessa seoksenmuodostuksessa saadaan yleensä homogeeninen seos, kun taas sisäpuolisessa seoksenmuodostuksessa seos yleensä on sytytyshetkellä heterogeeninen. (Bosch 2007: 496).

Kummassakin seoksenmuodostustavassa puristussuhde ϵ on 8–12 ja paine puristustahdin aikana nousee 20–30 baariin sekä lämpötila 400–500 °C. Sylinterin sisäiset olosuhteet ovat seoksen itsesyttymisolosuhteiden ulkopuolella, ja seos sytytetään kipinän avulla juuri ennen yläkuoloa (YKK). Heterogeenisen seoksen tasaisuuteen vaikuttavia tärkeitä tekijöitä ovat seoksenmuodostuksen ajankohta ja polttoaineen jakautuminen sylinterissä. (Bosch 2007: 496).

Homogeeninen ilman ja polttoaineen seos syttyy luotettavasti vain pienessä seossuhdeikkunassa ($\lambda=0,6-1,6$). Palorintaman etenemisnopeus laskee nopeasti ilmakertoimen noustessa yli 1,6:een. Kipinäsytytteisiä (SI) moottoreita voidaan käyttää, kun $\lambda=0,8-1,4$. Paras kokonaishyötysuhde (η) saavutetaan ilmakertoimen ollessa 1,2–1,4. Kolmitiekatalysaattoreita käyttävissä moottoreissa ilmakertoimen arvo on rajoitettu välille 0,98–1,02. (Bosch 2007: 496).

Kapea λ -ikkuna pakottaa käyttämään sylinteriin tulevan seosmäärän rajoittamista kuormituksen hallitsemiseksi osakuormilla. Moottorin kuristaminen aiheuttaa virtaushäviöitä ja heikentää kokonaishyötysuhdetta osakuormilla. Kokonaishyötysuhteen nostamiseksi on aloitettu käyttämään sylinterin sisällä muodostettavaa heterogeenistä seosta. Tällöin ilmavirtaa ei tarvitse kuristaa, ja lisäksi voidaan käyttää korkeampaa puristussuhdetta. (Bosch 2007: 496).

Homogeeninen ja heterogeeninen seossuhde käyttäytyvät siltä osin samoin, että kokonaishyötysuhde ja käsittelemättömät päästöt riippuvat sytytyksen jälkeisestä

palotapahtumasta. Palotapahtumaan voidaan vaikuttaa seoksen virtauksilla ja turbulenssilla. Näitä saadaan aikaan muotoilemalla ilmakanavia ja palotilaa. (Bosch 2007: 496).

2.3.1 Homogeeninen ja heterogeeninen seos

Polttoaineen ja ilman seos voi olla homogeeninen vain polttoaineen höyrystyessä kokonaan; vain kaasujen välinen tai kaasun ja höyryn välinen seos voi saavuttaa tasalaatuisuuden. Esimerkiksi kylmäkäynnistyksessä kaikki polttoaine ei höyrysty. Tällöin sylinterissä olevan polttoaineen määrää täytyy lisätä, jotta höyrystynyt ja helposti syttyvä polttoaine muodostaa tarpeeksi rikkaan ja hyvin syttyvän seoksen. Tätä kutsutaan rikastamiseksi. (Bosch 2007: 497).

Homogeeninen seoksenmuodostusjärjestelmä on vastuussa myös kuormituksen hallinnasta osakuormilla ja lisäksi järjestelmän tulisi kyetä pitämään seossuhde riittävän vakiona eri sylinterien välillä peräkkäisissä työkiertoissa. (Bosch 2007: 497).

Heterogeenisesti toimivan seoksenmuodostusjärjestelmän merkittävin etu on kuormituksenhallinta koko moottorin toiminta-alueella ilman kuristusta. Tämä pienentää virtaushäviöitä moottorissa. Polttoaineen ruiskutus suoraan sylinteriin viilentää sylinterissä olevaa seosta ja mahdollistaa kaiken lisäksi korkeamman puristussuhteen käyttämisen. Nämä hyödyt parantavat kokonaishyötysuhdetta verrattuna moottoreihin, joissa käytetään homogeenistä seossuhdetta. (Bosch 2007: 497).

Kun heterogeenisen seossuhteen hyödyt tulivat ilmi, kerroksellisten seosten tutkimus sai uutta vauhtia. Menetelmä löi itsensä läpi, kun löydettiin elektromagneettiset polttoainesuuttimet. Niiden avulla saavutettiin riittävästi joustavuutta ruiskutuksen aloitukseen ja tarpeeksi korkeat ruiskutuspainet. (Bosch 2007: 497).

Kun kipinäsytytteisessä moottorissa käytetään kaasumaista polttoainetta ja se ruiskutetaan imusarjaan, tulee seoksesta tämänhetkisissä sovellutuksissa homogeeninen.

2.3.2 Sytyttäminen

Sytytysjärjestelmän tulee kyetä sytyttämään puristettu seos luotettavasti ja tarkasti määritellyllä hetkellä. Moottorin toiminta on dynaamista ja seoksen virtauskuviot sekä seossuhde vaihtelevat sytytystulpan vaikutuspiirissä. Tämä ei saa kuitenkaan estää seoksen syttymistä. Syttymisen luotettavuutta voidaan kehittää valitsemalla sytytystulpan sijainti rikkaiden ja vakaiden seosvirtausten alueelta. Toinen mahdollisuus on erillisen sytytyskammion muotoileminen palotilaan. Sytytystulpan olosuhteisiin panostaminen on erityisen tärkeää käytettäessä laihaa seosta ja matalia kuormituksia. (Bosch 2007: 497).

Tarvittavan sytytysenergian suuruus bensiinin ja ilman seoksissa vaihtelee stoikiometrisen tilanteen mukaan 0,2 millijoulesta aina 3 millijouleen asti. Tarvittavan sytytysenergian suuruus kasvaa poiketessa stoikiometrisestä tilanteesta rikkaaseen tai laihaan suuntaan. Sylinterissä olevan seoksen paineen noustessa myös sytytysenergian tarve kasvaa. Sytytystulpan sytytysvälin kasvaessa sytytysvarmuuden lisäksi kasvaa myös tarvittava sytytysjännite ja elektrodin kuluminen. (Bosch 2007: 497).

2.3.3 Palamisprosessi

Jokaisessa syklistä tapahtuu sama lämpöreaktio polttoaine-ilmaseoksen sytytyksen ja eksotermisen palamisen alkamisen välillä. Tätä aikaa kutsutaan sytytysvaiheeksi ja sen kesto on lähes vakio ajan suhteen. Polttoaineen ja ilman seossuhde on ainut muuttuja sytytysvaiheen keston määrittelyssä. Tämän seurauksena sytytysennakon täytyy muuttua sylinterin aseman funktiona ($^{\circ}\text{CA}$) moottorin kierrosnopeuden ja seossuhteen muuttuessa. (Bosch 2007: 498).

Pyörimisnopeuden ja ilmakertoimen λ :n kasvaessa myös sytytysennakon tulee kasvaa. Sytytysennakkoa rajoittaa seoksen energiatiheys sytytystulpan ympärillä. Tarvittava sytytysenergia riippuu seoksen energiatiheydestä, esimerkiksi Tiheäenergisen seoksen sytyttämiseen tarvitaan vain vähän energiaa. Tarvittavaan sytytysenergiaan vaikuttaa seoksen virtausnopeus ja ilmakerroin. Seoksen virtausnopeus puolestaan riippuu männän liikenopeudesta, jonka suuruus riippuu suoraan verrannollisesti moottorin pyörimisnopeudesta, kampikoneiston asennosta ja palotilan muotoiluista. Mikäli sytytysennakko on rajoittava tekijä, voidaan käyttää kahta sytytystulppaa tai sytytyskammiota tilanteen parantamiseksi. (Bosch 2007: 498).

2.4 Puristussytytteisen moottorin toiminta

Puristussytytteinen moottori tunnetaan kansankielessä dieselmoottorina, koska diesel on yleisin tässä moottorityypissä käytetty polttoaine. Puristussytytteisessä moottorissa on edestakaisin liikkuva mäntä, joka pyörittää kampiakselia kampikoneiston avulla. Polttoaineen ja ilman välinen seos muodostetaan sylinterin sisällä, jolloin seoksenmuodostus on heterogeeninen. Seos sytytetään puristamalla se niin korkeaan paineeseen, että saavutetaan itsesyttymisen vaatimat olosuhteet. Puristustahdin aikana paine nousee vapaasti hengittävissä moottoreissa 30–55 baariin tai ahdetuissa moottoreissa 80–110 baariin. Puristuksen aikana lämpötila sylinterissä nousee 700–900 °C:een. Seos syttyy vähän ennen puristustahdin loppumista. (Bosch 2007: 500).

Seoksenmuodostumisen onnistuminen vaikuttaa määräävästi syttymistä seuraavan palamisen laatuun ja sitä kautta sylinterissä olevan ilman hyödyntämiseen. Mitä suurempi osa sylinterissä olevasta ilmasta voidaan hyödyntää, sitä korkeampi tehollinen keskipaine moottorista voidaan saada. Heterogeenisesti seoksen muodostavissa moottoreissa kuormituksen hallinta tapahtuu säätämällä ruiskutettavan polttoaineen massaa. Mitä suurempi osa sylinterin ilmasta voidaan hyödyntää, sitä enemmän polttoainetta sylinteriin voidaan ruiskuttaa ilman noen muodostumista pakokaasuun. (Bosch 2007: 500).

2.4.1 Seoksenmuodostus

Heterogeenisissä seoksissa ilmakerroin vaihtelee polttoainesuihkun ympäristön puhtaasta ilmasta ($\lambda = \infty$) polttoainesuihkun ytimen puhtaaseen polttoaineeseen ($\lambda = 0$). Polttoainesuihku koostuu pisaroista. Jokaisen pisaran pinnassa ilmakerroin on nolla, ja etäisyyden kasvaessa pisarasta poispäin ilmakerroin kasvaa kohti ääretöntä. Homogeenisissä seoksissa palaminen tapahtuu melko rajatulla alueella ilmakerroimen arvon ollessa $0,3 < \lambda < 1,5$. Jokaisen pisaran ympärillä palaminen tapahtuu alueella, jossa ilmakerroin on edellä mainitussa haarukassa. Ilma- ja polttoainemassojen täytyy liikkua sylinterissä, jotta palamiselle sopivia olosuhteita muodostuu. Massoja liikuttavia merkittäviä tekijöitä sylinterissä ovat diffuusio ja turbulenssi. Näitä muodostavia energialähteitä palamisprosessin itsensä lisäksi ovat polttoainesuihkun kineettinen energia, lämpöenergia, palokammion muoto, hallitut ilman virtausmuodot ja palaminen esikammiossa. (Bosch 2007: 500–501).

3 BIOKAASU

Biokaasua syntyy bakteerien mädättäessä biomassaa hapettomissa olosuhteissa. Erilaiset biomassat on luokiteltu kolmeen luokkaan alkuperän perusteella: maatalouden, kotien ja yhdyskuntien sekä teollisuuden biomassat. Biokaasun ja maakaasun energiasisältö määrittyy pääasiassa helposti syttyvän metaanin (CH₄) osuuden mukaan. Tavallisesti biokaasun metaanipitoisuus vaihtelee 50 ja 75 %:n välillä. Biokaasua voidaan jalostaa biometaaniksi (98 % CH₄) jolloin ominaisuudet vastaavat maakaasua. Tällöin se soveltuu myös liikennepolttoaineeksi. (Gomez 2013:1-2)

Biokaasua voidaan käyttää pelkän kuivauksen ja suodatuksen jälkeen lämmityskattilassa tai yhdistetyssä lämmön ja sähkön tuotannossa. Sähkön ja lämmön tuotannossa biokaasua käytetään polttoaineena polttomoottorissa, kaasuturbiinissa tai mikroturbiinissa, joka pyörittää generaattoria ja lämpöä saadaan ottamalla talteen hukkalämpöä. Biokaasua voidaan syöttää myös sähköä tuottavaan polttokennoon. (Gomez 2013: 1-2)

Yleisesti ottaen biokaasu ja siitä jalostettu biometaani ovat monikäyttöisiä ja uusiutuvia polttoaineita, joita voidaan varastoida. Niitä voidaan käyttää moottoripolttoaineina sekä lämmön ja sähkön tuotannossa. Tämä tekee biokaasusta tärkeän osan uusiutuvia polttoaineita. Kaiken lisäksi biokaasu voi korvata hiiliyhdisteitä muoveissa. (Gomez 2013: 1-2)

3.1 Historia

Biokaasun historia alkaa hapettoman mädättämisen hyödyntämisestä. Perinteisiä raaka-aineita ovat olleet eläinten jätökset ja jätevedenpuhdistamoiden kiintoaines. (Seadi et.al 2013: 19–20)

Ensimmäinen dokumentoitu mädätysreaktori oli Ranskassa vuonna 1891. Mourasin automaattinen huuhtelija oli ilmatiivis kammio, jossa biomassaa nesteytettiin. Vuonna 1895 Englannin Exeterissä Cameron keksi mädätyskammion. Sitä hyödynnettiin jätevesien puhdistamisessa, ja sen tuottamaa metaania hyödynnettiin jätevedenpuhdistamon lämmityksessä sekä valaistuksessa. Mädätyskammio kehittyi

ensin Travin tankiksi vuonna 1904 ja sitten Imhoffin tankiksi vuonna 1905. Imhoffin tankkia hyödynnettiin ensisijaisena sakanpoistoaltaana jätevedenpuhdistamolla. Allas toimi samalla kiintoaineksen varastoaltaana. Kiintoainesta varastoitiin altaassa kuukausia, ja anaerobiset bakteerit mädättivät sen. Tämän varastoinnin päätyttyä kiintoaineksen oli harmitonta ja helposti hävitettävissä. Vuonna 1927 Ruhverband asensi ensimmäisen lietteenlämmityslaitteen erilliseen mädätyskammioon. (Murphy et al. 2011).

1930-luvulla mädätysprosessin ymmärtämisessä otettiin kehitysaskel, kun Yhdysvalloissa Buswell ja Hatfield julkaisivat yksityiskohtaisen kuvauksen hapettomasta mädätysprosessista. Tämän seurauksena 1900-luvun jälkimmäisellä puoliskolla julkaistiin paljon kaupallisia sovellutuksia hapettoman mädätyksen hyödyntämisestä ravinteikkaiden jätevesien, jätevesilietteiden ja maatalouden lietteiden käsittelyssä. Tällä hetkellä hapetonta mädätystä pidetään ensisijaisena vaihtoehtona monenlaisten materiaalien, esimerkiksi jätevesien, lietteiden, liejujen ja yhteiskunnallisen kiinteän jätteen orgaanisten osien, käsittelyssä. Mädätyksen uusin sovellutus on uusiutuvan energian tuottaminen peltokasveja mädättämällä. (Murphy et al. 2011).

3.2 Tuotanto ja raaka-aineet

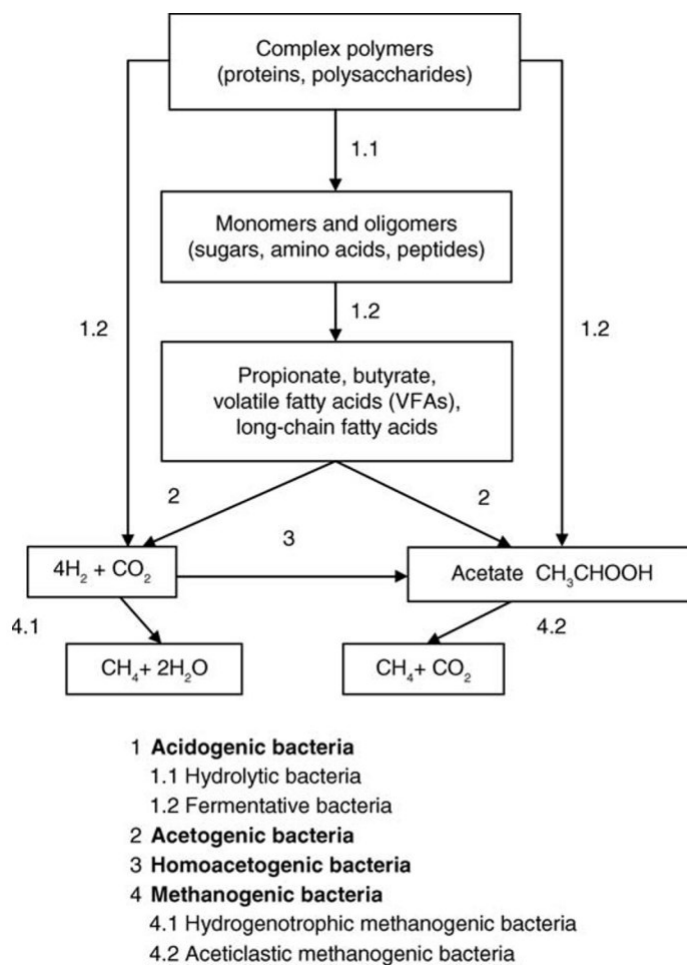
Biokaasun tuotanto on pohjimmiltaan hyvin yksinkertaista. Tarvitaan mädätettävää materiaalia, ilmatiivis kammio, kaasunkeräysletku kammioon ja työvälineet mädätysmassan käsittelyyn. Kun tuotantoa halutaan kasvattaa ja maksimoida raaka-aineen kaasuntuotto, niin lukuisat muuttujat täytyy ottaa huomioon ja prosessista tulee monimutkaisempi ja häiriöalttiimpi.

Biokaasua saadaan mädättämällä biomassaa. Biomassalla tarkoitetaan kaikenlaisia elävien organismien tuottamia materiaaleja ja aineita. Biomassaa käytetään laajasti energiantuotannossa, mutta mädätysprosessin avulla voidaan hyödyntää olemassa olevien prosessien jätteitä ja sivuvirtoja. (Seadi et al. 2013:19)

Biomassan lähteitä voidaan luokitella useilla tavoilla. Yksi tapa on jaotella biomassaa tuottavan sektorin mukaan. Biomassa voi olla peräisin maataloudesta, teollisuudesta tai

yhteiskunnallisista lähteistä. Maatalouden raaka-aineista potentiaalisimpia ovat eläinten ulosteet kiinteänä tai lietemäisenä, kasvintuotannon oheisjätteet ja energiakasvit. Esimerkiksi elintarviketeollisuudesta saadaan orgaanisia jätteitä, jätevesiä ja sivutuotteita. Yhteiskunnallisia biomassan lähteitä ovat lajitellut kotitalousjätteet, jätevesiliete, kaatopaikkajäte ja ruuantähteet. Kaikilla näillä sektoreilla jätteet, jäännökset ja sivutuotteet ovat kestävän kehityksen kannalta parhaita mädätyksen raaka-aineita. (Seadi et.al 2013:20)

3.2.1 Mikrobiologia ja mikrobien elinympäristö



Kuva 2. Neljä elioryhmää, jotka osallistuvat mädättämiseen. Kunkin elioryhmän osuus mädättämisestä on kuvattu nuolilla. (Colleran 1991).

Tällä hetkellä on tunnistettu neljä elioryhmää, jotka osallistuvat mädättämisprosessiin. Kuva 2 esittää elioryhmien nimet ja niiden osallistumisvaiheet mädättämisprosessissa.

Kaikkien ryhmien aktiivisuus kokonaisuudessaan varmistaa prosessin vakauden. (Murphy & Thamsiroj 2013:106)

Mädätys tapahtuu hapettomissa olosuhteissa. Yleensä happi toimii elektronien vastaanottajana. Koska mädätys tapahtuu hapettomissa olosuhteissa, siinä muiden aineiden on korvattava happi ja otettava elektroneita vastaan. Tavallisesti hiiliatomit ja muut orgaaniset yhdisteet ottavat vastaan elektroneita ja vähenevät, kun taas muut orgaaniset ainesosat hapettuvat hiilidioksidiksi ja haihtuviksi hapoiksi. (Murphy & Thamsiroj 2013:109)

Mädätysprosessi on herkkä ja siihen vaikuttavat monenlaiset tekijät. Pienikin happipitoisuus voi estää tärkeiden bakteerikantojen kasvun. Myös muut happea sisältävät materiaalit, jotka ottavat vastaan elektroneja, voivat estää metaanin muodostumisen. (Murphy & Thamsiroj 2013:109) Kts. (Pfeffer 1979) ja (Casey 1981)

Mädätysprosessin happamuutta säätelevät hiilihapot. Jos haihtuvien happojen kokonaisuus on pieni, bikarbonaatin alkaliteetti määrittelee systeemin kokonaisalkaliteetin. Systeemin haihtuvien happojen osuuden kasvaessa bikarbonaatin alkaliteetti neutraloi hapot. (Murphy & Thamsiroj 2013:110)

Ionisoimattomat, haihtuvat hapot ovat myrkyllisiä mädättäville bakteereille, jos pH on alle 6. Toisaalta ionisoimaton ja liuennut ammoniakki on myrkyllistä metaania tuottaville eliöille pH:n ollessa yli 8. Mikäli seoksessa on tarpeeksi bikarbonaattia, suurelta haihtuvien happojen pitoisuudet eivät kuitenkaan muuta happamuutta haitalliselle tasolle. (Murphy & Thamsiroj 2013:110 (Kts. Noone 1990))

Lämpötila on tärkeä muuttuja mädätysprosessissa. Matalassa lämpötilassa seoksen happamuus on vakaampi ja korkeassa lämpötilassa herkempi. Henryn lain mukaan matalassa lämpötilassa seokseen liukenee enemmän hiilidioksidia, jolloin bikarbonaatti-ioneja muodostuu enemmän. (Murphy & Thamsiroj 2013:110–111)

Rikki, kalium, kalsium, magnesium, kloori ja sulfaatti-ionit ovat mädätysprosessille välttämättömiä. Rikin vaikutus mädätysprosessiin on ongelmallinen, koska se saostaa muita tarpeellisia alkuaineita kuten rautaa, nikkeliä, kuparia ja molybdeenia

liukenemattomaan muotoon. Ionisessa muodossa olevat raskasmetallit, alkalit ja maa-alkalimetallit voivat olla mädätysysteemille myrkyllisiä. (Murphy & Thamsiroj 2013:112)

Kuva 2 havainnollistaa mädätysprosessin olevan sarja toisistaan riippuvia vaiheita. Tämän vuoksi mädätysprosessi on hyvin haavoittuva haitallisille tekijöille. Häiriintynyttä prosessia voidaan kuitenkin korjata, ja toisaalta ajan kuluessa systeemi voi kehittyä vastustuskykyiseksi joillekin haittatekijöille. (Murphy & Thamsiroj 2013:112)

3.2.2 Reaktori ja muut tuotantojärjestelmän osat

Optimaalisen reaktorin rakenne riippuu raaka-aineiden ominaisuuksista. Raaka-aineiden ominaisuuksista merkittäviä ovat kuiva-ainepitoisuus, kiinteiden osien hajoavuus, kaasua tuottavien ainesosien osuus, tiheys, tasalaatuisuus ja karkeus. Reaktori voi olla kuiva tai märkä, jatkuva tai erätoiminen, yksi- tai monivaiheinen tai yksi- tai monifaasinen. (Murphy & Thamsiroj 2013:115)

Käytäntö on muovannut yleiseen käyttöön kolme erilaista reaktorityyppiä. Ne ovat kuiva erätoiminen reaktori, jatkuvasti sekoitettu säiliöreaktori ja yleensä tulppaperiaatteella toimiva kuiva jatkuvatoiminen reaktori. Näistä ensimmäisenä mainittu on yksinkertainen, kun taas toiseksi mainittu on yleisin ja kaasuntuotannoltaan tehokkain reaktorityyppi. (Murphy & Thamsiroj 2013:116–118)

3.3 Koostumus ja ominaisuudet

Biokaasu sisältää metaanikaasun lisäksi hiilidioksidia ja vettä sekä pieniä määriä muita aineita. Vaikka epäpuhtauksien suhteellinen osuus on pieni, ne voivat haitata biokaasun hyödyntämistä. (Peterson 2013:329)

Yleisimmät epäpuhtaudet raaka-ainassa biokaasussa ovat rikkivety, ammoniakki, happi ja typpi. Niitä tulee biokaasuun eri syistä. Jotkut niistä tulevat raaka-aineiden mukana, toiset muodostuvat mädätysprosessissa ja esimerkiksi happi tai typpi voivat päästä reaktoriin hallitusti tai vuodon seurauksena. (Peterson 2013:329–330)

Hiilidioksidi pienentää biokaasun energiatiheyttä. Esimerkiksi tieliikennekäytössä se kannattaa poistaa biokaasusta energiatiheyden kasvattamiseksi. Lisäksi hiilidioksidi muodostaa veden kanssa hiilihappoa, joka voi syövyttää rakenteita. Hiilidioksidi liukenee veteen, joten sitä voidaan poistaa johtamalla kaasua veden läpi. (Peterson 2013:331)

Vesi on mukana mädätysprosessissa, joten reaktorista saatava biokaasu on aina hyvin kostea. Veden absoluuttinen määrä biokaasussa riippuu reaktorin sisällä olevasta paineesta ja lämpötilasta. Vesi yhdessä hiilidioksidin kanssa aiheuttaa korroosiota putkistoissa. Se myös laskee biokaasun energiasisältöä. Vaikka biokaasu kuivattaisiin ennen hyödyntämistä, vettä muodostuu kaasua poltettaessa. Jos kosteus pääsee tiivistymään vedeksi, lämmönvahtimissa ja pakokaasujärjestelmässä voi ilmetä ongelmia. (Peterson 2013:331)

Rikkivety on yleinen epäpuhtaus biokaasussa, mutta myös muita rikkiä sisältäviä epäpuhtauksia voi ilmetä. Rikkivety muodostaa yhdessä veden kanssa rikkihappoa, joka aiheuttaa korroosiota. Mikäli rikkivetyä sisältävää biokaasua poltetaan, syntyy rikkihappopäästöjä. Rikkivety on hyvin myrkyllistä ja aiheuttaa vakavia terveysriskejä. Sitä voidaan poistaa mädätyksen aikana lisäämällä reaktoriin ilmaa, imeyttämällä veteen tai samalla tavoin kuin hiilidioksidia. Ilman lisääminen reaktoriin täytyy tehdä harkiten, koska se haittaa mädätysprosessia, ja happi tekee biokaasusta herkästi syttyvää. Happi ja typpi voidaan poistaa biokaasusta aktiivihiilisuodatuksella. (Peterson 2013:331–332)

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet ovat erilaisia orgaanisia yhdisteitä, joita muodostuu biokaasuun vaihtelevasti. Niiden tyyppi ja määrä riippuu mädätyksen raaka-aineista. Siloksaanit ovat esimerkiksi palonestoaineissa, shampoissa ja deodoranteissa esiintyviä aineita. Palamisen aikana siloksaanit muodostavat siloksaanioksidia, joka voi vaurioittaa moottoria. Siloksaanioksidi on liukenematonta sakkaa, jota muodostuu haitallisiin paikkoihin palotilassa. Halogenoidut hiilivedyt sisältävät kromia, booria tai fluoria. Poltettaessa nämä yhdisteet aiheuttavat korroosiota. (Peterson 2013:332–333)

Raaka biokaasu sisältää usein kiinteitä hiukkasia. Ne kertyvät yleensä kondensoituneeseen veteen ja aiheuttavat mekaanista kulumista liikkuvissa osissa. (Peterson 2013:333)

Lämmön- ja sähköntuotannossa käytettävä polttomoottori voi sietää joitakin epäpuhtauksia biokaasussa. Pahimpia ongelmia aiheuttavat rikkivety ja siloksaanit. Liikennekäytössä biokaasun energiatiheyttä kannattaa nostaa, jotta ajoneuvot saavuttavat riittävän toimintasäteen. Vesi voi aiheuttaa ongelmia pakkasessa tai tukkia putkia paineenpudotuksissa. Hiilidioksidi ja rikkivety yhdessä veden kanssa ovat haitallisia. Biokaasun käyttöä liikennepolttoaineena säädellään standardeilla. (Peterson 2013:333–335)

3.4 Kuljetus ja varastointi

Puhdistamaton biokaasu käytetään yleensä tuotantopaikalla tai sen läheisyydessä. Tarvittaessa puhdistamatonta biokaasua voidaan siirtää putkia pitkin. Metaaniksi puhdistettu kaasu sopii monenlaiseen käyttöön, ja sitä kannattaa kuljettaa monilla eri tavoilla.

Olemassa olevien maakaasuputkien hyödyntäminen on edullisin tapa siirtää biometaania. Biometaani soveltuu maakaasuverkkoon sellaisenaan. Mikäli kaasuverkkoa ei ole olemassa, biometaania voidaan kuljettaa tieverkkoa pitkin paineistettuna tai nesteytettynä. Paineistettua biometaania (CNG) kannattaa kuljettaa noin 200 km säteellä. Tätä pidemmällä matkoilla nesteytetyn biometaanin (LNG) kuljettaminen on järkevämpää. Uuden kaasuverkon rakentamisen kannattavuus riippuu verkon kapasiteetista ja käyttöasteesta. (Svensson 2013:432–434)

Biokaasun varastointi on välttämätöntä tuotannon ja kulutuksen piikkien tasaamiseksi. Kaasua voidaan varastoida kiinteissä säiliöissä tai joustavissa kaasukelloissa. Yksinkertaisimmillaan kaasun välivarastona toimii biokaasureaktori. (Bachmann 2013:202–204)

4 BIOKAASUN KÄYTTÖ POLTTOMOOTTORISSA

4.1 Raa'an biokaasun käyttö polttomoottorissa

Raa'an biokaasun ominaisuudet riippuvat käytetystä mädätysprosessista ja raaka-aineista. Sitä käytetään polttomoottorissa ainoastaan yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa. Liikenneajoneuvojen ja työkoneiden päästörajoitukset estävät puhdistamattoman biokaasun käytön.

4.1.1 Kaasun puhdistus sekä moottorin kunnossapito ja päästöt

Polttomoottorissa ei kannata käyttää täysin puhdistamatonta biokaasua, sillä se saattaa lyhentää moottorin käyttöikää huomattavasti. Haasteena tällaisen polttoaineen käytössä onkin löytää optimaalinen puhdistustaso, joka riippuu raakakaasun laadusta ja polttomoottorin optimaalisesta elinkaaresta. (Kaparaju & Rintala 2013:404–407)

Kaparajun ja Rintalan mukaan mäntämoottorin kunnossapitokustannukset lisääntyvät rikkivetypitoisuuden kasvaessa, joten rikkivedyn poistaminen on välttämätöntä lähes aina. Rikkivedyn vaikutuksia on esitelty tarkemmin kappaleessa 3.3. (Kaparaju & Rintala 2013:407)

Biokaasussa olevat partikkelit poistetaan suodattimilla ja/tai sykloneilla. Kiinteät partikkelit ja öljymäiset aineet kerätään tavalliseen pölynkeräimeen, ja liejut sekä vaahtomaiset komponentit poistetaan sykloneilla. 2–5 mikronin verkkotiheys on yleensä riittävä. (Kaparaju & Rintala 2013:408)

Biokaasun sisältämä vesi pienentää polttoaineen lämpöarvoa, ja lisäksi kondensoituva vesi aiheuttaa ongelmia monilla eri tavoilla. Yleensä veden poistaminen on ensimmäisiä puhdistustoimenpiteitä. Riittävän kuivauksen jälkeen kaasun kastepiste on alle 5 °C ja suhteellinen kosteus normaalilämpötilassa alle 60 %. (Kaparaju & Rintala 2013:409)

4.2 Biometaanin käyttö polttomoottorissa

Biokaasusta tehdään biometaania poistamalla epäpuhtaudet, ennen kaikkea hiilidioksidia. Biometaaniksi luokitellaan kaasu, jonka metaanipitoisuus on yli 95 %. Käytännössä lähes kaikki hiilidioksidi pitää siis poistaa. Hiilidioksidia voidaan poistaa useilla eri menetelmillä, joita ovat muun muassa absorptio veteen, fysikaalinen ja kemikaalinen absorptio sekä absorptio paineen avulla. (Kaparaju & Rintala 2013:409)

4.2.1 Kipinäsytytteinen FPT CNG/LNG kaasumoottori

Fiat Power Trainin (FPT) CNG/LNG moottorissa on epäsuora jaksottainen monipisteruiskutus. Valmistajan mukaan tällä tavalla saavutetaan tarkka polttoaineen syöttö ja hyvin vakaa palotapahtuma. Polttoaine ruiskutetaan epäsuorasti imusarjaan. Moottori käyttää stoikiometristä seossuhdetta ja kolmitiekatalysaattoria päästöjen hallitsemiseksi. Seossuhdetta mitataan λ -anturin avulla, ja moottorin toimintaa säätää sähköinen moottorinohjausyksikkö. (FPT Industrial 2014)

Palotapahtuma on optimoitu männän kruunun muotoilulla. Moottorissa voidaan käyttää polttoaineena joko maakaasua tai biometaania ilman muutoksia. Valmistajan mukaan maakaasun käyttäminen vähentää päästöjen määrää 95 % verrattuna EEV:n ja Euro VI:n päästötasoihin. (FPT Industrial 2014)

4.2.2 Puristussytytteinen moottori

Puristussytytteisen moottorin perinteinen polttoaine on diesel. Siinä voidaan käyttää myös biometaania, mutta ei ilman dieseliä. Metaani syttyy huonosti puristettaessa, joten sylinterissä oleva biometaani sytytetään ruiskuttamalla dieseliä sylinteriin korkeassa paineessa. Tällöin diesel syttyy ja sytyttää samalla sylinterissä olevan biometaanin. Tällöin moottorissa täytyy olla kaksi rinnakkaista polttoainejärjestelmää. (Basshuysen & Schäfer 2004:639)

Biometaanin käyttäminen puristussytytteisessä moottorissa vaatii tavanomaisen dieselmoottorin, johon on lisätty erillinen polttoainejärjestelmä kaasun syöttämistä varten. Kaasu on varastoitu korkeassa paineessa yhteen tai useampaan säiliöön. Kaasusta mitataan paine ja lämpötila. Se suodatetaan ja johdetaan paineenalennusventtiilille, joka

säätää paineen sopivaksi moottorin syöttämistä varten ja säätää syötettävän kaasun määrää moottorinohjausjärjestelmän ohjaamana. Lähteenä käytetyssä esimerkissä kaasu syötetään imusarjaan ennen turboahdinta. Dieselin määrä sovitetaan kaasun määrään siten, että haluttu teho saavutetaan. (Kruczyński et.al. 2013:154)

4.2.3 Valtran biokaasutraktori

Valtra on suomalainen traktorivalmistaja. Se on osa kansainvälistä AGCO-konsernia. Konserniin kuuluu myös suomalainen moottorivalmistaja AGCO Power. Biokaasukäyttöinen moottori ja traktori ovat olleet suunnitteilla pitkään.

Valtra on valmistanut pienen koesarjan biokaasutraktoreita. Ne on valmistettu mallin N101 pohjalta. Käyttökohteiksi on suunniteltu maatiloja, urakoitsijoita ja kuntia. Traktori käyttää polttoaineenaan paineistettua biometaania ja dieseliä. Moottori on tavallinen dieselmoottori, johon on lisätty erillinen polttoainejärjestelmä kaasulle. Moottorin käyttämästä polttoaineesta noin 80 % on biometaania ja noin 20 % dieseliä. Kun käynnistetään kylmä moottori, käytetään pelkkää dieseliä. Normaalisissa käyttötilanteissa biometaani syötetään imuilman mukana sylinteriin. Männän liikkuessa sylinterin paine kasvaa, jolloin moottoriin ruiskutetaan dieseliä, joka syttyy korkean paineen ja lämpötilan vaikutuksesta. Dieselin palaminen sytyttää sylinterissä olevan biometaanin, joka ei syty puristettaessa samalla tavalla kuin diesel. (Kempainen 2014:9–17)

4.2.4 Wärtsilä

Wärtsilä on suomalainen moottorivalmistaja, joka on erikoistunut suuriin merisovellutuksissa ja sähköntuotannossa käytettäviin moottoreihin. Wärtsilän kaksoispolttoainemoottorit ovat nelitahtisia mäntämoottoreita. Polttoaineena voidaan käyttää meridieseliä (MDO) tai raskasta polttoöljyä (HFO). Moottorit voidaan kytkeä sujuvasti käynnin aikana öljytoimisista kaasutoimisiksi ja päinvastoin. Kaasumaisena polttoaineena voidaan käyttää maakaasua tai biometaania. (Wärtsilä 2015:1-2)

Kaasu syötetään moottoriin kaasuventtiiliyksikön kautta. Yksikkö suodattaa kaasun ja säätää sen painetta. Järjestelmä sisältää lisäksi sulku- ja tuuletusventtiilit turvallisen toiminnan varmistamiseksi. Moottorissa kaasu syötetään suureen moottorin kyljessä

sijaitsevaan jakoputkeen. Jokaiselle sylinterille on oma erillinen syöttöputki ja -venttiili sylinterin kannessa. (Wärtsilä 2015:2)

Käytettäessä kaasua polttoaineena ilman ja kaasun seos sytytetään ruiskuttamalla pieni määrä meridieseliä esiruiskutuksena. MDO:n määrä on alle 1 % täyden kuorman polttoainekulutuksesta, ja sen määrää säädetään optimaaliseksi palotapahtuman kannalta. Polttoaineiden määrää säättää sulautettu järjestelmä, joka säättää ja valvoo moottorin pyörimisnopeutta sekä kuormaa. (Wärtsilä 2015:2)

Järjestelmä toimii laihalla seossuhteella. Laiha seossuhde alentaa sylinterin korkeinta lämpötilaa ja samalla NO_x -päästöjä. Käytettäessä maakaasua polttoaineena SO_x- ja hiilidioksidipäästöt ovat pienemmät kuin nestemäisiä polttoaineita käytettäessä. (Wärtsilä 2015:2)

4.3 Johtopäätökset

Tämän työn tarkoitus on selvittää biokaasun vaatimuksia moottorille ja löytää biokaasun käyttöön hyvin soveltuvia moottorikonstruktioita. Ottomoottori soveltuu hyvin biokaasumoottoriksi; se voi käyttää polttoaineenaan pelkkää biokaasua. Sen polttoaineeksi soveltuu myös biometaani ja maakaasu. Ainoat välttämättömät muutokset verrattuna bensiiniä käyttävään moottoriin liittyvät polttoaineen syöttöjärjestelmään.

Kun polttoaineena käytetään maakaasua, päästöt ovat pienemmät kuin käytettäessä nestemäisiä polttoaineita. Biometaanin vaikutuksista päästöihin ei löytynyt mainintoja, mutta koska biometaani on uusiutuva polttoaine, hiilidioksidipäästö kompensoituu osittain tuotantokasvien kasvaessa.

Puhdistamattomassa tai vain vähän puhdistetussa biokaasussa olevat epäpuhtaudet voivat lisätä moottorin päästöjä verrattuna biometaanin tai maakaasun käyttöön. Lisäksi moottorin kulumisen voi olla nopeampaa. Puhdistamattomassa biokaasussa olevat vesi ja hiilidioksidi lisäävät polttoaineen kulutusta. Nämä estävät puhdistamattoman biokaasun käytön liikennepolttoaineena. Biokaasun tuotantopaikalla tehtävässä lämmön ja sähkön yhteistuotannossa tällä ei ole merkitystä. Siinä tärkeimpiä tekijöitä ovat biokaasun

puhdistamisen kustannukset ja toisaalta epäpuhtauksien aiheuttama moottorin ja muiden laitteiden enneaikainen kuluminen sekä huoltokustannukset.

Biokaasu soveltuu myös dieselmoottorin polttoaineeksi. Tässä tapauksessa muutoksia moottoriin tarvitaan enemmän, koska biokaasun käyttäminen vaatii kaksi rinnakkaista polttoainejärjestelmää, toinen kaasulle ja toinen dieselille. Biokaasu ei syty puristettaessa kuten dieselöljy. Siksi sylinterissä olevaan korkeapaineiseen biokaasun ja ilman seokseen ruiskutetaan dieseliä. Syttyessään dieselöljy sytyttää myös biokaasun. Dieselin kulutus suhteessa täyden tehon kokonaiskulutukseen vaihtelee 1–30 prosenttiyksikön välillä.

Dieseliä käytetään haitoista huolimatta, koska dieselmoottorilla saavutetaan korkea hyötysuhde korkean puristussuhteen, kehittyneiden ahtamismenetelmien ja dieselpolttoaineen kehityksen johdosta. Lisäksi dieselmoottorin käyttöominaisuudet soveltuvat ottomoottorin ominaisuuksia paremmin esimerkiksi traktoriin.

5 YHTEENVETO

Polttomoottori on lämpövoimakone, joka muuttaa polttoaineen kemiallisen energian mekaaniseksi energiaksi. Yleisin moottorityyppi on sisäisen palamisen moottori. Ne voidaan jakaa sytytystavan perusteella kipinäsytytteisiin ja puristussytytteisiin moottoreihin.

Lämpövoimakoneita on hyödynnetty 1700-luvulta lähtien. Sisäisen palamisen moottorit tulivat markkinoille 1800-luvulla. 1900-luvun koittaessa Oton ja Dieselin kehittämät nelitahtiset moottorit valloittivat markkinat ja ovat hallinneet niitä tähän päivään saakka.

Ensimmäiset moottorit käyttivät polttoaineenaan kivihiilikaasua. Bensiini ja muut raakaöljyn jakeet tulivat markkinoille 1800-luvun lopulla. 1930-luvulla kehitetty katalyyttinen krakkaus ratkaisi monia polttoaineisiin liittyviä ongelmia.

Polttomoottoreita voidaan luokitella lukuisilla erilaisilla tavoilla. Tässä työssä tärkeitä luokittelutapoja ovat sytytystapa ja polttoaine. Kipinäsytytteisessä moottorissa sylinterissä oleva ilman ja polttoaineen seos sytytetään kipinän avulla. Puristussytytteisessä moottorissa sylinterissä oleva ilma puristetaan korkeaan paineeseen ja sinne ruiskutetaan dieseliä, joka syttyy olosuhteiden vaikutuksesta.

Biokaasua saadaan mädättämällä kasvi- tai eläinperäistä biomassaa hapettomassa reaktorissa. Mädätysprosessissa erikoistuneet bakteerit pilkkovat orgaanisia yhdisteitä ja lopulta tuottavat metaania, josta biokaasu pääosin koostuu. Biokaasun tekee merkitykselliseksi se, että raaka-aineena voidaan käyttää jätteitä ja erilaisia sivutuotteita.

Pienillä muutoksilla biokaasua voidaan käyttää fossiilisten polttoaineiden käyttöön suunnitelluissa moottoreissa. Kipinäsytytteinen moottori tarvitsee muutoksia ainoastaan polttoaineensyöttöjärjestelmässä. Puristussytytteisessä moottorissa tarvitaan kaksi rinnakkaista polttoainejärjestelmää, koska biokaasu ei syty puristamalla, vaan se täytyy sytyttää pienellä määrällä dieseliä.

Biokaasussa voi olla epäpuhtauksia, jotka aiheuttavat haitallisia päästöjä ja ongelmia moottorin toimintaan. Lisäksi biokaasu sisältää hiilidioksidia ja vettä, jotka heikentävät

sen lämpöarvoa ja lisäävät kulutusta. Epäpuhtauksia voidaan poistaa, jolloin saadaan biometaania. Se soveltuu liikennepolttoaineeksi ja on yhteensopivaa maakaasun kanssa.

Useilla moottorivalmistajilla on biokaasulla toimivia moottoreita tai ajoneuvoja. Käytössä on sekä puristus- että kipinäsytytteisiä moottoreita. Tässä työssä esiteltyjä valmistajia ovat FPT, Valtra, ja Wärtsilä.

6 LÄHDELUETTELO

- Bachmann N (2013) Design and engineering of biogas plants. Wellinger A, Murphy J, Baxter D (toim.). The biogas handbook. Cambridge, UK, Woodhead Publishing Limited: 191-211.
- Basshuysen R & Schäfer F (toim.) Internal Combustion Engine Handbook. SAE International: Canada 2004
- Bosch R [2007] Automotive handbook. 7. painos. Plochingen, Saksa: Robert Bosch GmbH.
- Casey TJ (1981) Developments in Anaerobic Digestion. Lecture given to the Institute of Engineers of Ireland.
- Colleran E (1991) Application of Anaerobic Bacteria to Wastewater Treatment and Energy Recycling. Winter lecture series, the Institute of Engineers of Ireland, November 1991.
- FPT Industrial S.p.A. (2004) Menu, innovation, CNG, <http://www.fptindustrial.com/en-UK/innovation/cng/Pages/homepage.aspx> [6.4.2016]
- Gomez CDC (2013) Biogas as an energy option: an overview. Wellinger A, Murphy J, Baxter D (toim.). The biogas handbook. Cambridge, UK, Woodhead Publishing Limited: 1-16.
- Heywood, John B. (1988) Internal Combustion Engine Fundamentals. New York : McGraw-Hill Book Company, 1988.
- Kaparaju P & Rintala J (2013) Generation of heat and power from biogas for stationary applications: boilers, gas engines and turbines, combined heat and power (CHP) plants and fuel cells. Wellinger A, Murphy J, Baxter D (toim.). The biogas handbook. Cambridge, UK, Woodhead Publishing Limited: 404-426.
- Kemppainen J (2014) Biokaasulla toimiva traktori. Kuopio: Savonia AMK.
- Krannila M (1980) Termodynamiikka. 2. painos. Tampere: Tampereen Pikakopio Oy
- Kruczyński SW, Pawlak G, Wojs MK, Woloszyn R (2013) Biogas as a perspective fuel for agriculture tractors. Puola: Zeszyty naukowe instytutu pojazdów.
- Mikkonen S (2011) Mitä polttoaineita moottoreihin tulevaisuudessa? Luentokalvot, Helsingin yliopisto.
- Murphy JD, Braun R, Weiland P and Wellinger A (2011) Biogas from Crop Digestion, IEA Bioenergy Task 37.

- Murphy JD & Thamsiriroj T (2013) Fundamental science and engineering of the anaerobic digestion process for biogas production. Wellinger A, Murphy J, Baxter D (toim.). The biogas handbook. Cambridge, UK, Woodhead Publishing Limited: 104-130.
- Noone GP (1990) The treatment of domestic wastewaters. In: Anaerobic Digestion: A Waste Treatment Technology. Critical Reports on Applied Chemistry, Volume 31, edited by Andrew Wheatley. Amsterdam: Elsevier.
- Petersson A (2013) Biogas cleaning. Wellinger A, Murphy J, Baxter D (toim.). The biogas handbook. Cambridge, UK, Woodhead Publishing Limited: 329-341.
- Pfeffer JT (1979) Anaerobic digestion processes. Proceedings of First International Symposium on Anaerobic Digestion, University College Cardiff.
- Seadi T, Biosantech, Rutz D, Janssen R (2013) Biomass resources for biogas production. Wellinger A, Murphy J, Baxter D (toim.). The biogas handbook. Cambridge, UK, Woodhead Publishing Limited: 19-51.
- Svensson M (2013) Biomethane for transport applications. Wellinger A, Murphy J, Baxter D (toim.). The biogas handbook. Cambridge, UK, Woodhead Publishing Limited: 428-443.
- Wikipedia (2015a) Wikipedia, Fluid catalytic cracking. http://en.wikipedia.org/wiki/Fluid_catalytic_cracking. [19.5.2015].
- Wikipedia (2015b) Wikipedia, lämpövoimakone. <http://fi.wikipedia.org/wiki/Lämpövoimakone>. [30.4.2015].
- Wärtsilä (2015) Dual-fuel engines – Wärtsilä 20DF, 34DF, 46DF and 50DF. Tuotesite. Wärtsilä: Vaasa