

BIOKAASUN ENERGIÄKÄYTTÖ

BIOKAMA-HANKE

Tapio Patrikainen, 21.12.2022

SISÄLLYS

1	Biokaasu	2
1.1	Biokaasun tuotannon vaiheet	2
1.2	Biokaasun ja biometaanin tuotantotilastoja	3
1.2.1	Laitosten lukumäärät.....	5
1.2.2	Biokaasun ja biometaanin hyödyntäminen	6
1.2.3	Energiantuotanto:.....	9
1.3	Biokaasun puhdistus ja paineistus.....	15
1.3.1	Vesiabsorptio	15
1.3.2	Aktiivihilliadsorptio ja amiinipesu	16
1.3.3	Kryotekniikka (kaasun jäähdytys)	17
1.3.4	Membraanitekniikka	18
1.3.5	PSA (Pressure Swing Adsorption)	19
1.4	Biokaasun varastointi.....	19
1.5	Biokaasun nesteytys	20
1.6	Kierrätysasteen edistämässä biojätteellä merkittävä rooli	21
2	Sähkön ja lämmöntuotanto:	22
2.1	Biokaasun käyttö sähkön tuotannossa	22
2.1.1	ECE- ja ECT-lämpövoimakoneet sekä kombivoimalat	25
2.1.2	ICE- ja ICT-lämpövoimakoneet.....	26
2.2	Tulevaisuuden näkymät	34
2.2.1	Biokaasutyöryhmän yhteenveto:.....	35
2.3	Polttokennotekniikan soveltaminen biokaasun avulla tapahtuvaan energiantuotantoon	36
2.3.1	Erilaisia polttokennoratkaisuja	37
2.4	Biokaasun käyttö lämmöntuotannossa.....	50
2.5	Biokaasun käyttö liikennepolttoaineena	53
2.6	Muu Biokaasun energiakäyttö	57
2.7	Sivutuotteet ja muut käyttösovellukset	60
3	Biokaasun hyödyntäminen teollisuuden raaka-aineena.....	62
4	YHTEENVETO	64

LÄHTEET

1 Biokaasu

Biokaasuksi kutsutaan kaasuseosta, joka syntyy, kun orgaaninen jäte mätänee hapettomissa eli anaerobisissa olosuhteissa. Mikrobien ruokailun yhteydessä syntyy biokaasua.

Biokaasu = 50-70 % CH₄ (metaani) + 25-30 % CO₂ (hiilidioksidi)

Biokaasu voi sisältää myös H₂O + N₂ + O₂ + H₂ + NH₃ + H₂S syötteestä riippuen.

Biometaanilla puolestaan tarkoitetaan biokaasua, josta on poistettu suurin osa muista kaasuista kuin metaanista. Tällaisen kaasun metaanipitoisuus on tyypillisesti 95-99 % metaania, lopun ollessa käytännössä hiilidioksidia.[1]

Biokaasu on 100-prosenttisen uusiutuva energiamuoto, sillä sitä voidaan valmistaa lähes mistä tahansa orgaanisesta eli eloperäisestä raaka-aineesta. Tällaisia raaka-aineita ovat muun muassa biojäte, jätevesiliete, lanta ja teollisuuden ylijäämäjäte. Puuperäinen aines ei sellaisenaan sovellu biokaasun tuotantoon. Suurin potentiaali on kuitenkin pelto- ja metsäbiomassassa, jota valmistetaan muun muassa viljelykasvien syömäkelvottomista osista.

Biokaasun tuotantoon tarvittavat raaka-aineet kuljetetaan lähimmälle biokaasulaitokselle, missä niistä valmistetaan ympäristöystävällistä ja täysin uusiutuvaa biokaasua. Biokaasu on osa kiertotaloutta, sillä sen tuotannossa syntyvää ravinnepääjätettä voidaan käyttää pelloilla lannoitteena. Tämä vähentää teollisesti tuotettujen lannoitteiden käyttöä. Jäännöslietteen lannoitekäytön hygieniavaivaa valvoo Suomessa Evira.[1]

1.1 BIOKAASUN TUOTANNON VAIHEET

Biokaasuteknologia on vakiintunutta ja tuotanto etenee usean vaiheen läpi. Biojäte murskataan ja valmistellaan mädätysprosessia varten liettämällä. Liettäminen tarkoittaa, että biojätteeseen lisätään nestettä, jotta siitä tulee helpommin käsiteltävää. Mikrobit tarvitsevat lämpöä, joten biojäte lämmitetään n. 37°C asteen lämpötilaan. Itse biokaasu tuotetaan mädättämällä biojätettä suurissa säiliöissä noin kolmen viikon ajan. Lopuksi kaasu puhdistetaan poistamalla siitä epäpuhtauksia ja hiilidioksidia. Tämän jälkeen biokaasu on valmiina yritysten sekä kuluttajien käyttöön esimerkiksi kaasuverkkoon syötettynä tai nesteytettynä kaasuna.

Biokaasun materiaaliksi kelpaavat muun muassa:

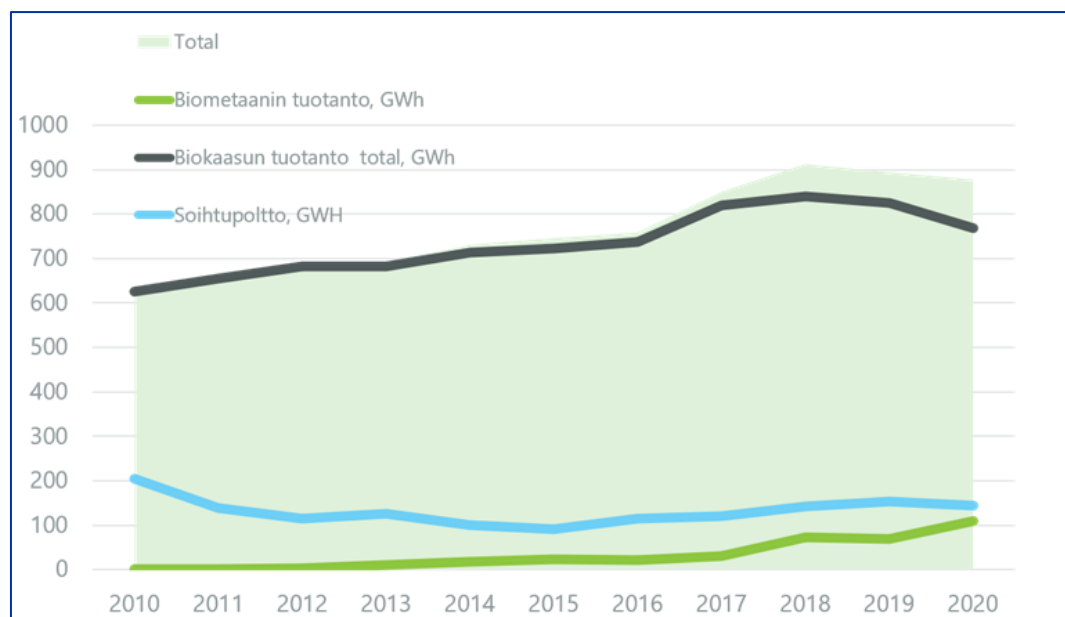
- yritysten ja teollisuuden biohajoavat jätteet, mm. laktoosittomien maitotuotteiden valmistuksessa ylijäävä laktoosi
- kaupan pilaantuneet elintarvikkeet
- kuluttajilta kertyneet biojätteet
- jätevedenpuhdistamoiden lietteet
- maatalouden lanta ja peltobiomassa

Jos kyseessä on kiinteä aines, kuten biojätteet, on materiaali ensin käsiteltävä murskaimessa, jossa aineesta pyritään tekemään koostumukseltaan tasaista. Aineksen joukkoon lisätään tässä vaiheessa myös myöhemmin tuotantoprosessissa syntyneitä ravinnepitoista vesiliuosta, kunnes kiinteää ainesta on enää noin kymmenes kokonaisvolyymista.

Samalla seoksesta erotetaan kaikki joukkoon kuulumaton, biohajoamaton jäte, kuten kauppojen vanhaksi jääneiden tuotteiden pakkausmuovit. Nämä jätteet viedään jätteenpolttolaitokseen, jossa niistä tuotetaan lämpöä ja sähköä. Lietetty biomassa ja valmiiksi lietteenä laitokselle saapuneet biomassat yhdistetään, ja pumpataan esimädätyssäiliöön, jossa biomassa entisestään liukoistuu hienojakoisempaan muotoon bakteerien erittämien entsyymien avulla. [2]

1.2 BIOKAASUN JA BIOMETAANIN TUOTANTOTILASTOJA

Vuonna 2020 biometaanin tuotanto oli noin 110 GWh ja biokaasun tuotanto noin 768 GWh. Biokaasun tuotanto on ollut tasaisessa kasvussa läpi 2010-luvun, mutta vuosina 2018 - 2020 tapahtui kehityksessä notkahdus. Tämä johtuu osin pienentyneistä kaatopaikkakaasujen volyyymeistä, osin tilastointimuutoksista. Biometaanin tuotanto lähti kasvuun vuonna 2018, ja kasvu on jatkunut myös vuosina 2019 ja 2020.



Kuva 1. Biokaasun ja biometaanin tuotannon kehitys vuosina 2010-2020 (GWh). [3]

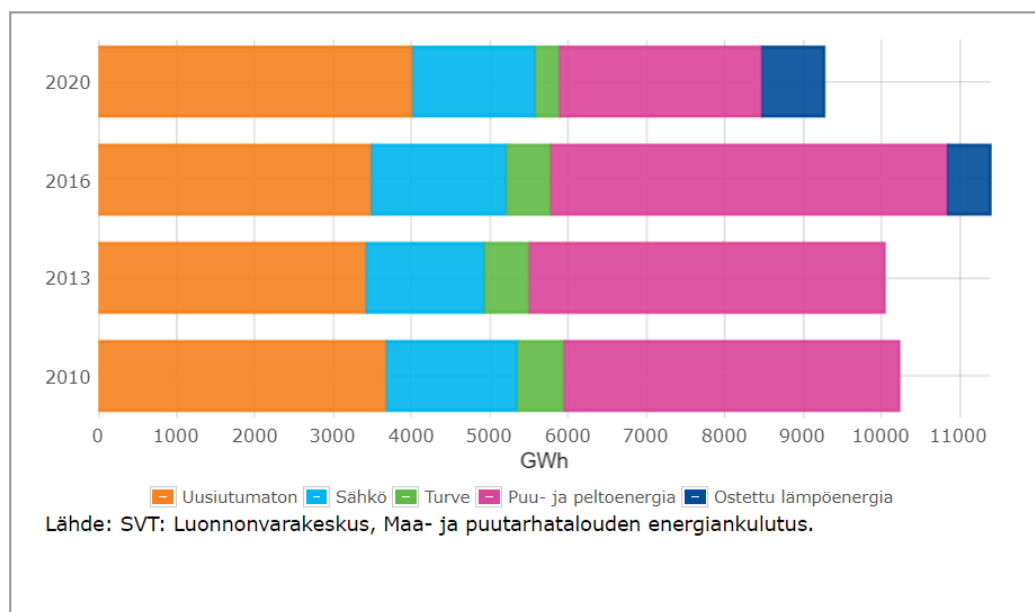
Vuonna 2020 suurin osa biokaasusta tuotettiin jätevesilietettä ja biojätettä käsittelevissä biokaasulaitoksissa sekä kerättiin kaatopaikkakaasuina vanhoilta kaatopaikoilta. Suurin osa biometaanista tuotettiin niin ikään biojätteen ja lietteiden yhteiskäsittelylaitoksissa.

Maatalouden ja puutarhatalouden energiankulutus oli vuonna 2020 noin 9200 GWh, josta mm. puu-japeltobiomassalla katettiin noin 2700 GWh:ia. Lämmön tuotannosta lähes 60 prosenttia on uusiutuvaa energiaa. Metsähake oli tärkein lämmityspolttoaine maa- ja puutarhataloudessa, sitä käytettiin reilut 3 000 gigawattituntia. Kiinteitä, puu-, pelto- ja turvepohjaisia, polttoaineita käyttävien laitosten määrä on kasvanut ja erityisesti suurissa yrityksissä lämmitykseen käytetyn raskaan polttoöljyn kulutus on vähentynyt selvästi. [4]

Suomessa peltobiomassaa käytetään energiantuotannossa toistaiseksi vähän. Peltobiomassoilla tarkoitetaan pelloilla kasvatettuja energiakasveja tai muiden peltokasvien jätteitä tai tähteitä. Peltobiomassoja ovat muun muassa olki, energiapaju, ruokohelmi, öljykasvit, nurmi ja kasvintuotannossa syntyvä lajittelujäte. Näitä massoja voidaan käyttää polttoaineena sinällään tai niistä voidaan jalostaa kiinteitä, nestemäisiä tai kaasumaisia polttoaineita.

Energia- ja ilmastostrategiaa varten tehtyjen selvitysten mukaan biokaasutuotannon suurimmat raaka-ainepotentiaalit ovat maatalouden biomassoissa kuten lannassa ja nurmessa. Kotieläinten lantaa syntyy Suomessa noin 20 miljoonaa tonnia vuodessa ja on arvioitu, että vuonna 2030 lantabiokaasua voisi tuottaa 1,75 TWh vuosittain sekä nurmen ja lannan yhteiskäsittelyssä vielä moninkertaisesti enemmän. [5]

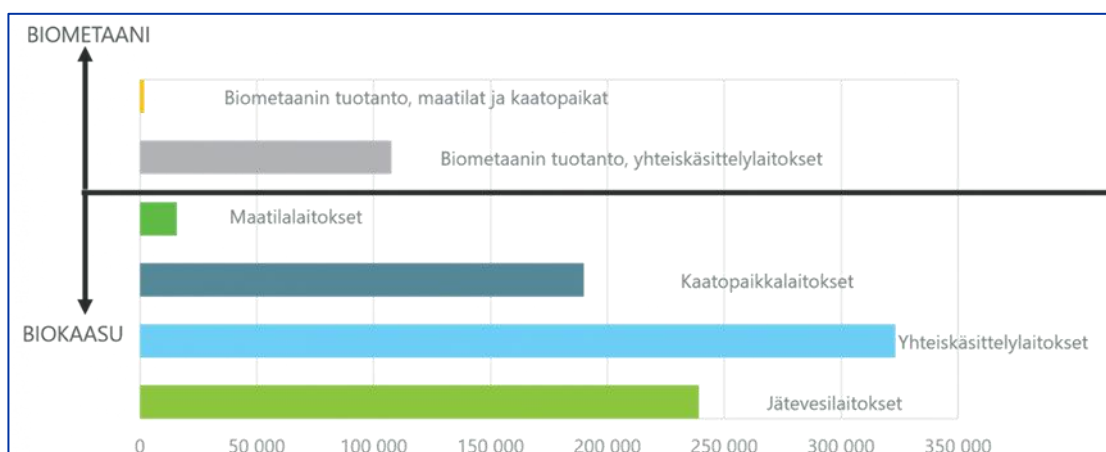
Maa- ja puutarhatalouden energiankulutus



Kuva 2. Maa- ja puutarhatalouden energiakulutus [3]

1.2.1 Laitosten lukumäärät

Vuoden 2021 alussa oli kaikkiaan 33 ja reaktorilaitoksia oli 79 (25 maatilamittakaavan laitosta, 9 teollisuuslaitosta, biojätteen ja lietteen yhteiskäsittelylaitoksia 26 ja lietemädättämiä 19). Biometaanin jalostettiin kaikkiaan 21 laitoksella. Myös reaktorilaitosten lukumäärät ovat olleet kasvussa.

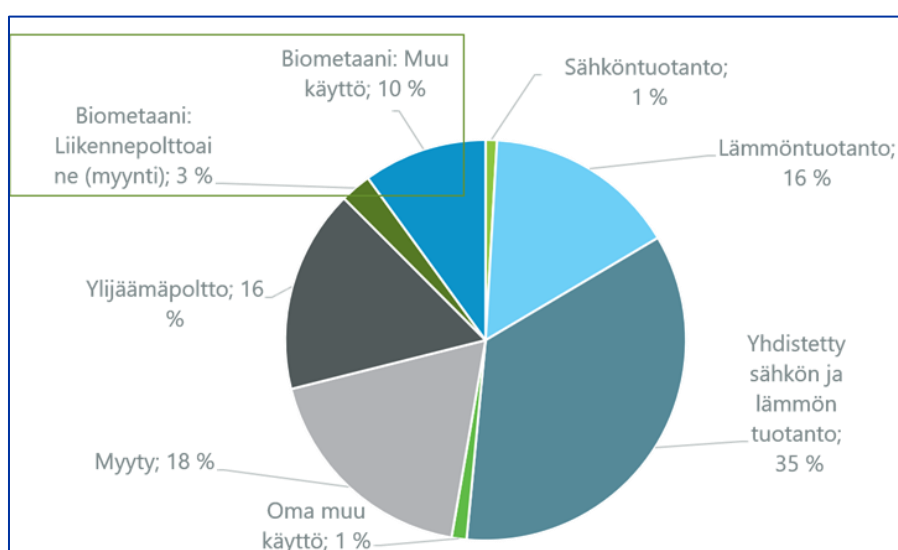


Kuva 3. Biokaasun tuotanto eri laitostyypeissä vuonna 2020 (GWh). [3]

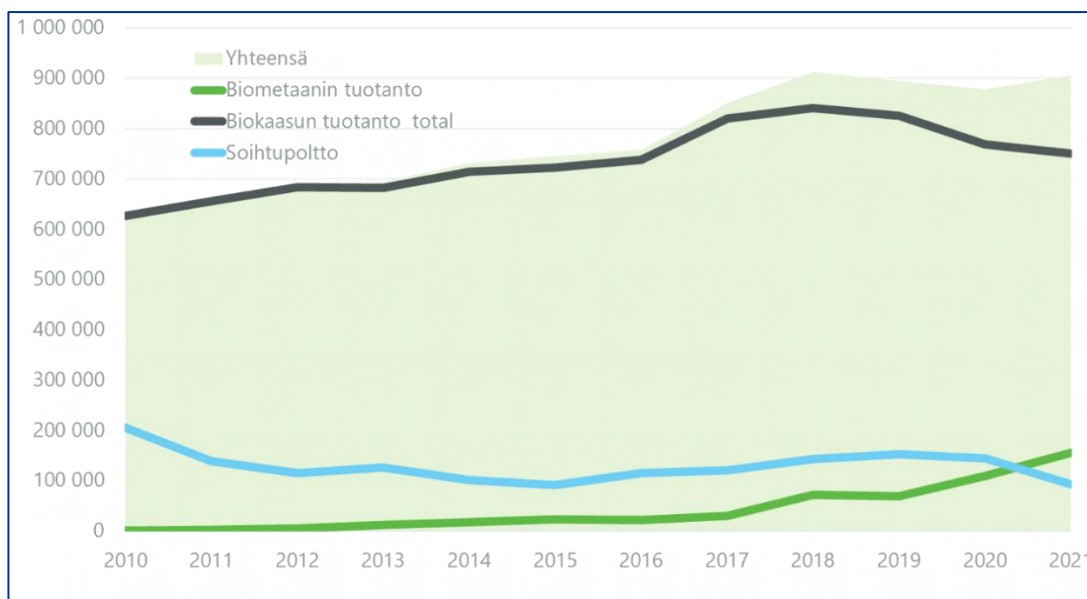
Isojen yhteiskäsittelylaitosten ja maatilakohtaisten laitosten lukumäärät ovat olleet kasvussa viime vuosina. Olemassa oleviin yhteiskäsittelylaitoksiin on tehty myös tuotantokapasiteetin laajennuksia. Biometaanin jalostusyksiköiden lukumäärä on myös kasvanut, ja kasvu on kiihtynyt viime vuosina.

1.2.2 Biokaasun ja biometaanin hyödyntäminen

Suurin osa biokaasusta hyödynnetään lämmön ja sähkötuotannossa, suurin osa biometaanista puolestaan liikenteestä. Liikennebiokaasun osuus oli reilu 10 prosenttia kaikesta biokaasun ja biometaanin käytöstä vuonna 2020. Edelleen suhteellisia suuria määriä biokaasua soihdutetaan, eli ylijäämäkaasu poltetaan hiilidioksidiksi.



Kuva 4. Biokaasun ja biometaanin hyödyntäminen vuonna 2021. Vuoden 2021 tieto on ennakkotieto. [3]



Kuva 5. Biokaasun ja biometaanin tuotannon kehitys vuosina 2010-2021 (MWh). Vuoden 2021 tieto on ennakkotieto. [3]

Halvin ja yksinkertainen tapa hyödyntää biokaasua on polttaa se lämpimän veden tuotantoon tarkoitettuun kaasukattilaan lämmitystarkoituksiin. Yhdistetylle lämmön- ja sähköntuotannolle (CHP, Combined Heat and Power) biokaasusta on olemassa useita erilaisia teknisiä ratkaisuja. Sähkön tuottaminen omaan käyttöön on kannattavaa, mutta verkkoon myytävän sähkön tuottamisessa maatilakokoluokan laitosten kannattavuus on heikko.

Biokaasulaitokset toimivat energiantuotannon lisäksi myös välineinä jätteiden käsittelyyn ja ravinteiden kierrättämiseen. Biokaasuprosessin läpikäynyttä biomassasta ja vedestä koostuvaa massaa kutsutaan käsittelyjäänökseksi. Siinä on kasveille käyttökelpoisemmassa muodossa ne ravinteet, jotka syötteessä oli ennen biokaasuprosessia. Se onkin tiloille arvokasta lannoitetta, jolla voidaan korvata ostolannoitteita. Mädätysjäänös voidaan myös käsitellä linkoamalla, jolloin kiinteä ja nestemäinen osa erottuvat toisistaan. Tärkeää on, että ravinteet kiertävät oikeaan paikkaan.[5]

Gasum tuottaa Turun biokaasulaitoksellaan ainoana toimijana Suomessa kotimaista nesteytettyä biokaasua. Nesteytyksen mahdollistaa laitoksen vasta valmistunut laajennus ja modernisointi, joka toteutettiin hallituksen kärkihankkeena. Samassa yhteydessä laitoksen tuotantokapasiteettia kasvatettiin ja sen energiankulutusta pienennettiin.



Kuva 6. Turun biokaasulaitos on nesteytetyn biokaasun edelläkävijä Suomessa [6]

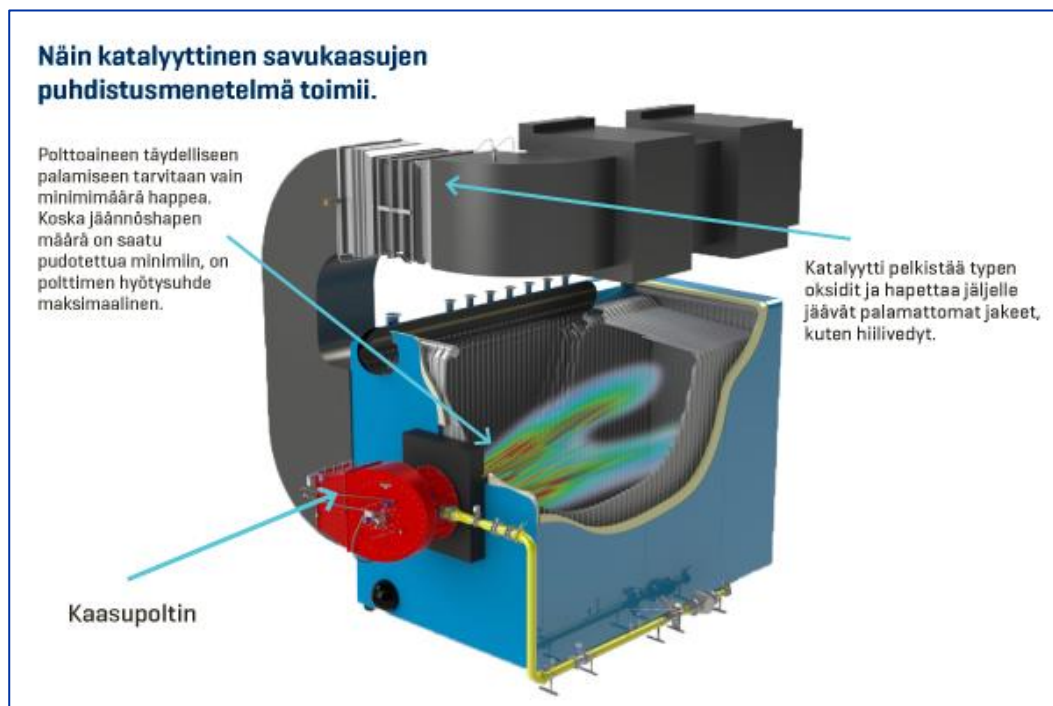
Turun biokaasulaitos on ollut Suomen ensimmäinen biokaasulaitos, jossa voidaan nesteyttää biokaasua. Nesteytetty biokaasu (LBG) sopii teollisuuteen, polttoaineeksi raskaalle liikenteelle ja meriliikenteeseen. Lisäksi Turun laitos on tuottanut paineistettua biokaasua henkilöautoliikenteen käyttöön. Molempia biokaasun olomuotoja voidaan käyttää myös energiantuotantoon teollisuudessa.

Laitoksen laajennus saatiin valmiiksi vuonna 2019. Sen yhteydessä otettiin laitoksella käyttöön nesteytysyksikkökin. Samalla tehostettiin laitoksen vedenkulutusta huomattavasti, minkä myötä pystytään hyödyntämään laitoksen rejektivettä teollisuuden käyttöön valmistettavassa lannoitteessa. Markkinoille saatiin siis laajennuksen myötä täysin uusi tuote.

Turun biokaasulaitoksen raaka-aineen käsittelykapasiteetti kasvoi 75 000 tonnista 130 000 tonniin ja kaasuntuotanto kaksinkertaistui 30 GWh:sta noin 60 GWh:iin vuodessa. Tämä vastaa 125 raskaan liikenteen ajoneuvon tai noin 5 000 henkilöauton vuotuista polttoainekulutusta. Vastaavasti laitoksen vedenkulutus laski 100 000 kuutiosta nolnaan ja viemäroidyn veden määrä 120 000 kuutiosta 0–50 000 kuutioon. Myös laitoksen lämmönkäyttö laski selvästi. Laitoksen tuotannossa ei tapahdu hukkaa, koska nyt pystytään kierrättämään sekä ravinteet että energiaa. [6]

1.2.3 Energiantuotanto:

Biokaasua voidaan käyttää lämmityskäytössä polttamalla se kaasupolttimella normaalissa öljykattilassa. Hyötysuhde on noin 90 %.



Kuva 7. Oilonin kymmenhenkinen työryhmä kehitti kaasupolttimen, joka on sekä erittäin vähäpäästöinen että tehokas. [7]

Yhdistetyssä sähkön ja lämmöntuotantossa (CHP) biokaasusta voidaan tehdä sähköä kaasugeneraattorilla. Kun pakokaasulämmöt otetaan talteen, kokonaishyötysuhde on noin 85 %. Tästä sähköä on 35-42% riippuen generaattorista.

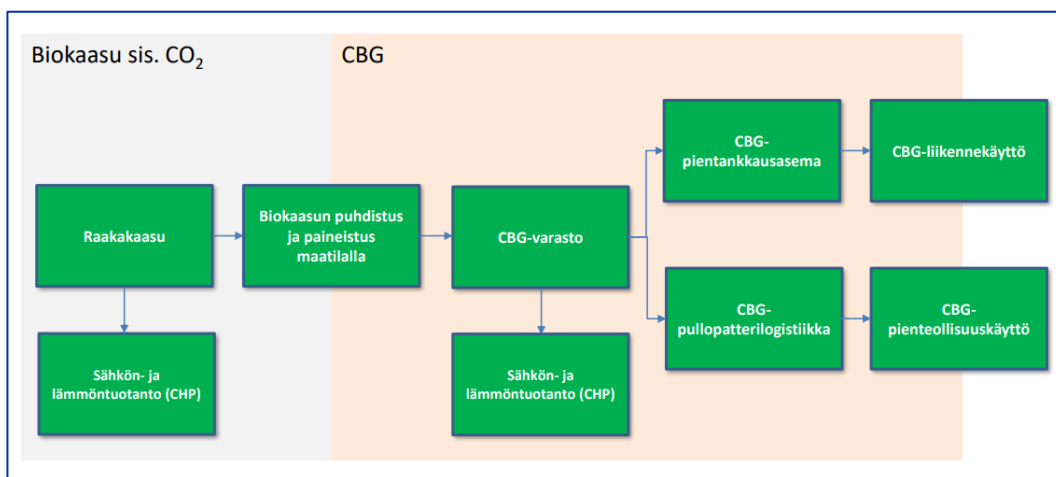
Kuva 8. Oilonin poltin
Tehoalue: 15 - 550 kW. BG
kaasupolttimet valmistetaan
EN 676 standardien
mukaisesti. [7]





Kuva 9. Biokaasun arvoketjuja. CBG= paineistettu biokaasu ja LBG= nesteytetty biokaasu [8]

Maatalouden tarpeisiin biokaasun tuotannosta energiaa saadaan lämmitykseen, logistiikkaan ja sähkön tuottamiseen



Kuva 10. Biokaasun tuotanto maatalouden tarpeisiin [8]



Kuva 11. Metener Oy:n visio peltobiomassojen hyödyntämiseksi biokaasutuotannossa [10]

Biokaasulaitoksen suunnittelussa ja rakentamisessa noudatetaan mm. seuraavia lakeja ja asetuksia:

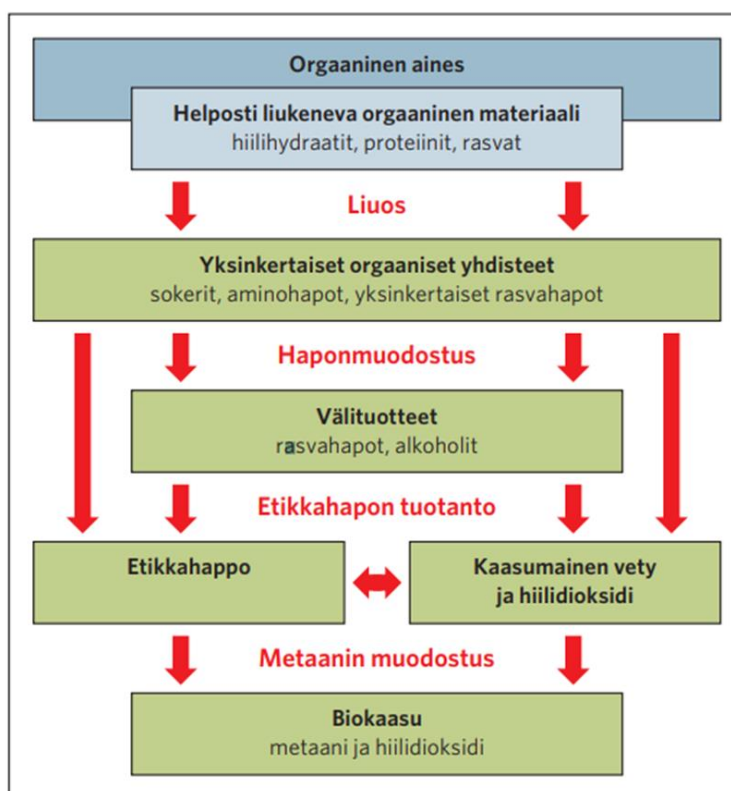
- Laki vaarallisten kemikaalien ja räjähteiden käsittelyn turvallisuudesta (390/2005)
- Valtioneuvoston asetus vaarallisten kemikaalien teollisen käsittelyn ja varastoinnin turvallisuusvaatimuksista (856/2012)



Kuva 12. Metener Oy:n perustaja biokaasukäyttöisen traktorin vierellä. (kuva Tapio Patrikainen)



Kuva 13. Biokaasureaktori Picnus Oy:llä Jalasjärvellä. (kuva Tapio Patrikainen)



Kuva 14. Biokaasun muodostuminen jaetaan neljään eri vaiheeseen, joissa eri pieneliöt ovat aktiivisia.[11]

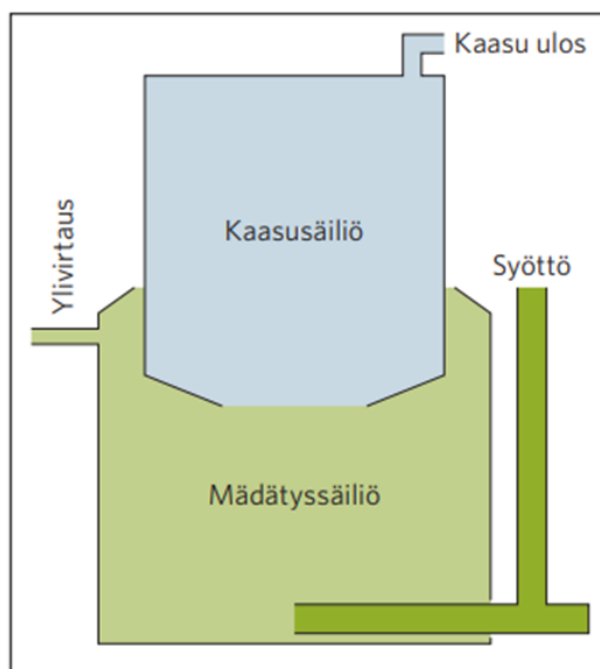
Biokaasun muodostuminen jaetaan neljään eri vaiheeseen:

1. Liukoistuminen eli hydrolyysi, jossa mädätettävän aineen kiinteät hiilihydraatit, valkuaisaineet ja rasvat pilkkoutuvat ja liukenevat veteen yksinkertaisemmiksi yhdisteiksi

kuten sokereiksi rasvahapoiksi ja aminohapoiksi. Pilkkoutuminen tapahtuu pieneliöiden erittämien solun ulkoisten entsyymien avulla.

2. Happokäymisessä (asidogeneesi) muodostuu liuenneista aineista yksinkertaisempia rasvahappoja kuten propioni-, voi- ja etikkahappoa.
3. Nämä edelleen hajoavat etikkahapoksi ja hiilidioksidiksi (asetogeneesi).
4. Metaani syntyy etikkahaposta sekä reaktion välituotteista syntyvistä vedystä ja hiilidioksidista (metanogeneesi). Käymisvaiheessa syntyvät rasvahapot ja vety ovat suurimpina pitoisuuksina haitallisia pieneliöille, joten on tärkeää että ne poistuvat metaanituotannosta samaa tahtia kuin niitä syntyy.

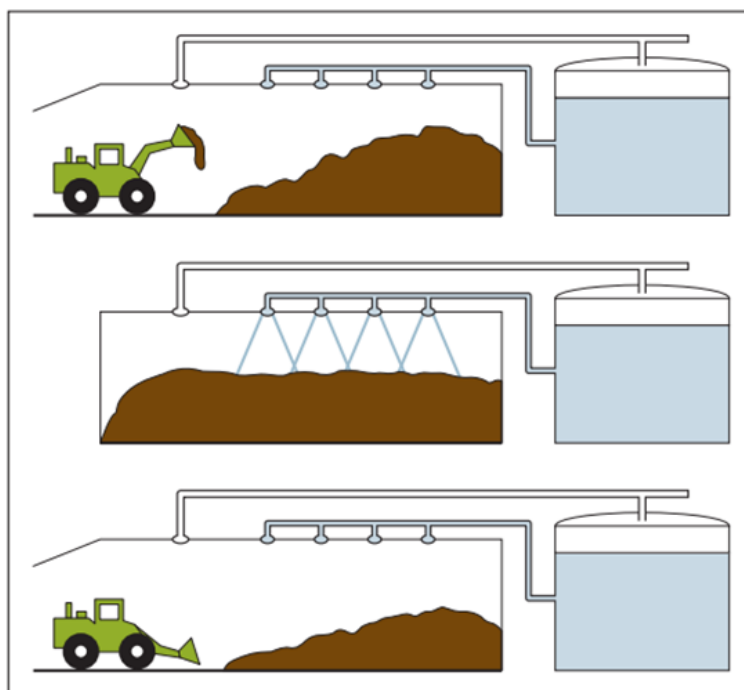
1.2.4. Biokaasulaitoksen toimintaperiaate



Kuva 15. Yksinkertainen biokaasulaitos nk. märkämädätyslaitos. [11]



Kuva 16. Jepuan biokaasutuotantolaitos (märkämädätys) ja biokaasun puhdistusyksikkö. (Kuvat Tapio Patrikainen)



Kuva 17. Kiinteä aine voidaan mädättää kuivämädätyksellä nk. kuivämädätyslaitoksessa. [11]

Kuivämädätyslaitoksessa mädätysssäiliö on ilmatiivis, autotallimainen tila, joka on varustettu nesteen kierrätyksellä ja lämmitysjärjestelmällä.



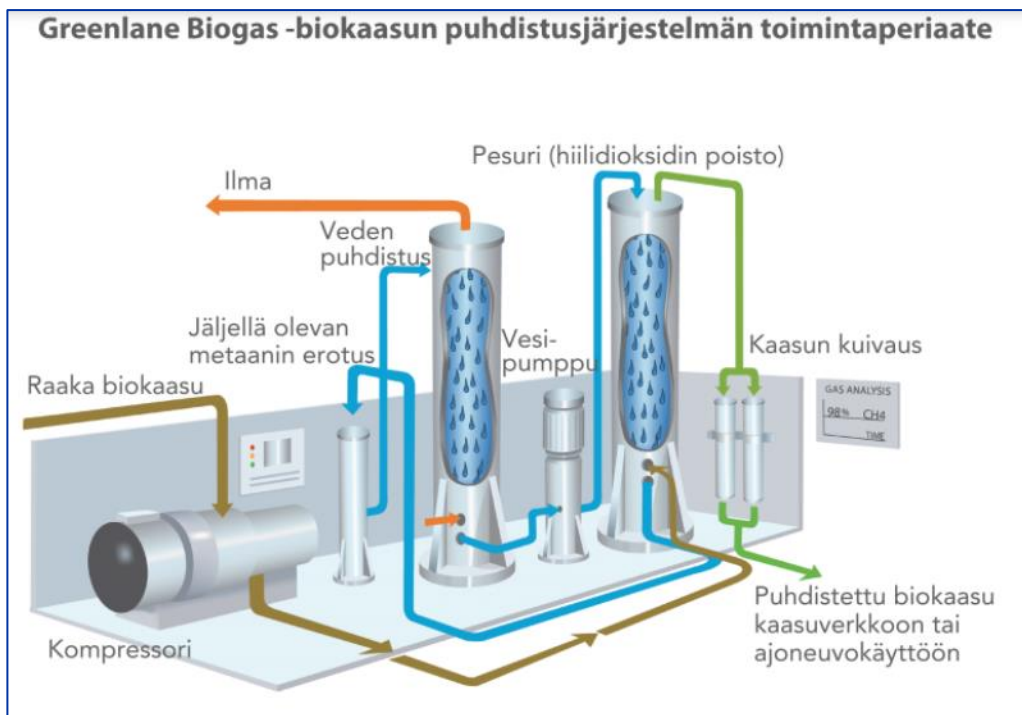
Kuva 18. Metener Oy:n kuivamädätyslaitos keltainen edessä näkyvä säiliö ja vasemmalla kostutusliuoksen pumppaamo ja kaasun keräys.(kuva Tapio Patrikainen)

1.3 BIOKAASUN PUHDISTUS JA PAINEISTUS

Biokaasu voidaan puhdistaa erillisellä puhdistusprosessilla. Biokaasu sisältää tyypillisesti 65 % metaania ja 35 % hiilidioksidia. Jotta biokaasua voitaisiin käyttää ajoneuvojen polttoaineena tai johtaa se maakaasuverkkoon, sen suhteellista metaanipitoisuutta tulee nostaa poistamalla raakabiokaasusta hiilidioksidia. Tähän on käytettävissä useita erilaisia menetelmiä. [9]

1.3.1 Vesiabsorptio

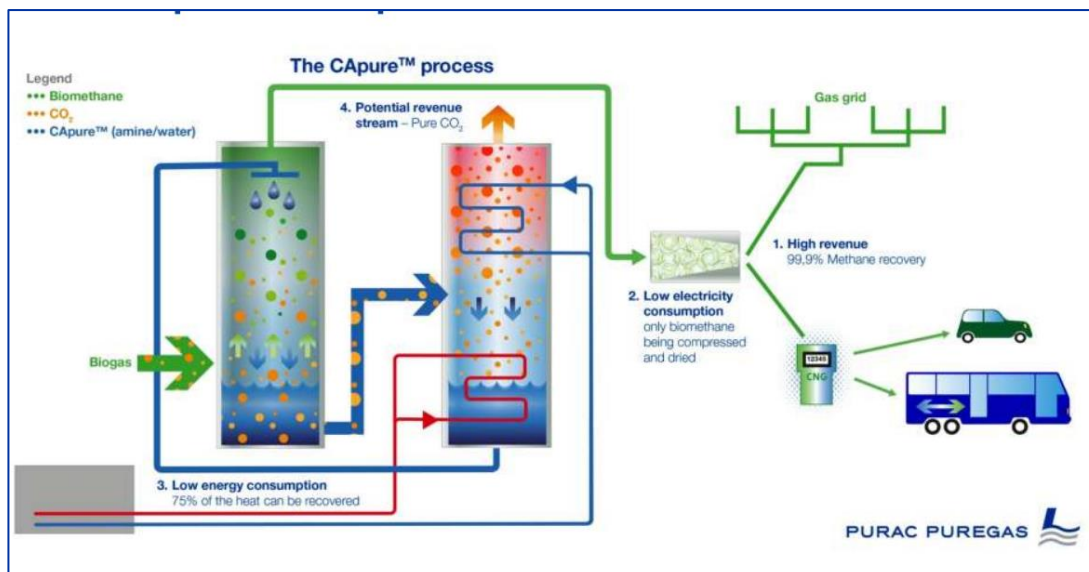
Sarlin Oy:n Greenlane puhdistusjärjestelmässä biokaasusta pestään vedellä tarpeettomia ja haitallisia CO₂, H₂S ja VOC yhdisteitä. Kaikki veteen liukenevat yhdisteet poistetaan ja jäljelle jää korkeatasoinen biometaani. Menetelmä perustuu korkeaan pystykolonniin ja siellä virtaavaan vesisuihkuun sekä korkeaan paineeseen. Paineen alaisina vesiliukoiset kaasut liukenevat vastavirtaan kulkevaan veteen paremmin ja tehokkaammin. [12]



Kuva 19. Greenlane Biogas on kolmannen sukupolven laitoksillaan alan tekninen edelläkävijä. Greenlane® CSFR (Compression-Scrubbing-Flash-Recovery) on edistyksellinen, energiatehokas biokaasun puhdistusjärjestelmä. Järjestelmässä käytetään teknologiaa, jossa biokaasu puhdistetaan tavallisella vedellä. Menetelmällä on vähemmän ympäristövaikutuksia kuin millään muulla puhdistusteknologialla.[12]

1.3.2 Aktiivihiiliadsorptio ja amiinipesu

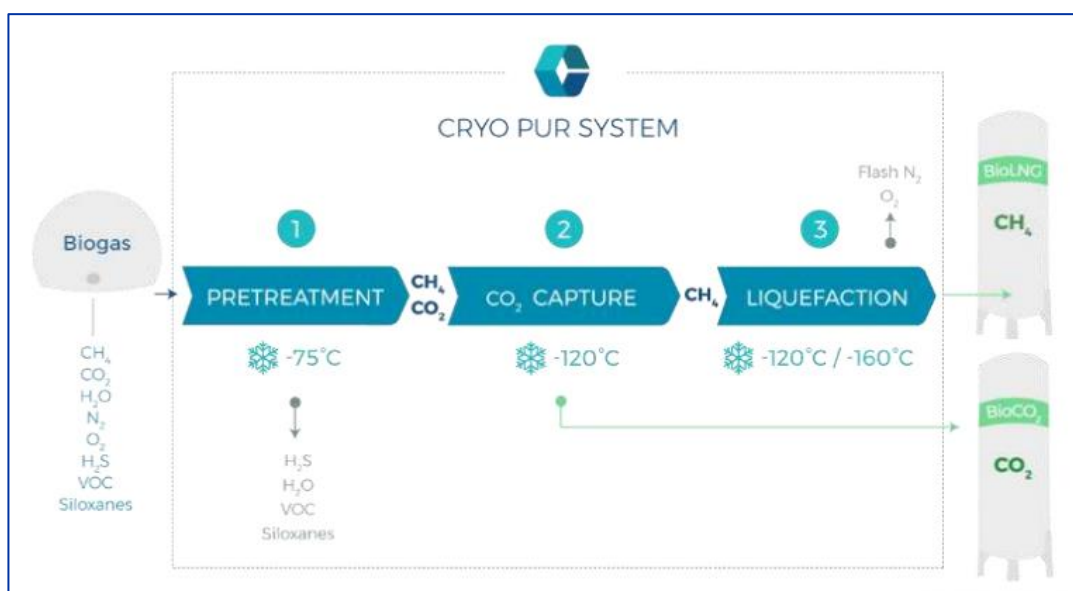
Biokaasun jalostuslaitteisto on yleensä koottu eristettyyn konttiin. Prosessi perustuu kaasun rikkivedyn poistoon aktiivihiilisuodatuksessa ja hiilidioksidin kemialliseen absorptioon absorptiotornissa (amiiniliuos) sekä hiilidioksidin strippaukseen. Prosessi poistaa myös siloksaanit ja rikkivedyn alle 0,5 ppm:n tasolle. Kaasusta erotettu hiilidioksidi voidaan myös hyödyntää. Prosessiin on myös mahdollisuus yhdistää lämmöntalteenotto, jota voidaan hyödyntää mm. mädätyslaitoksen jätemassan lämmitykseen. Lämmön hyödyntämisellä voidaan alentaa jonkin verran prosessin käyttökustannuksia. [9]



Kuva 20. Amiiniprosessiin perustuvan jalostuslaitoksen (Capure™ periaatekuva) [13]

1.3.3 Kryotekniikka (kaasun jäädytys)

Biokaasun jalostuslaitteisto perustuu kryotekniikkaan eli kaasun jäädytykseen. Prosessi perustuu käsiteltävän kaasun jäädyttämiseen useissa eri vaiheissa. Kussakin vaiheessa epäpuhtaudet poistuvat niille ominaisissa nesteytymislämpötiloissa. Prosessi on monimutkainen ja sisältää runsaasti jäädytettyjä tuotesäiliöitä. Lisäksi teknologialla on rajalliset referenssit. [9]



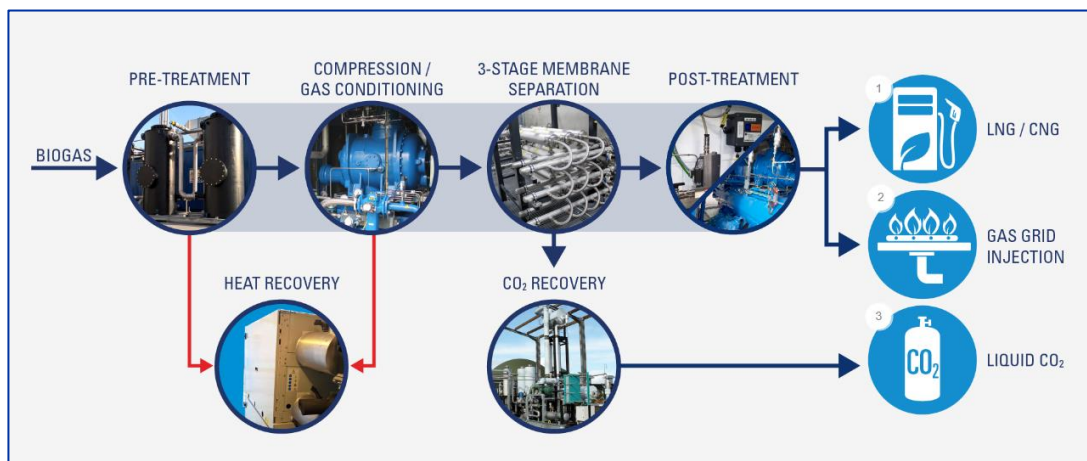
Kuva 21. Havainnollinen esitys kylmäkäsittelystä biokaasun puhdistamiseksi. [9]

1.3.4 Membraaniteknikka

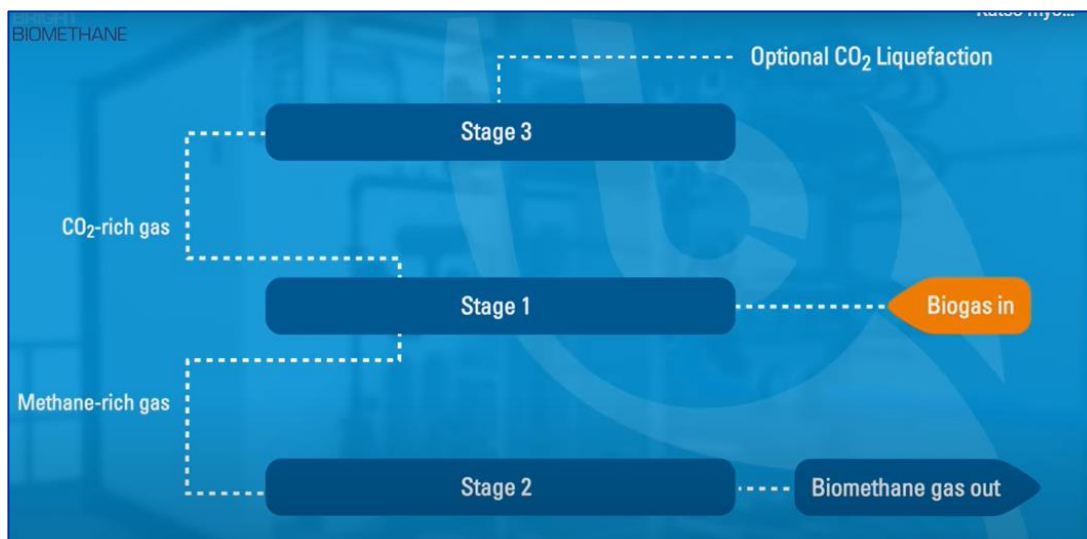
Teknologia perustuu paine-eroon membraanien välillä. Käyttämällä membraaneja saavutetaan korkein mahdollinen metanolisaanto. Membraani mahdollistaa hiilidioksidin talteenoton.

Ennen komprimointia biokaasusta täytyy poistaa rikkivety ja muut epäpuhtaudet, jotka voivat vahingoittaa membraania. Epäpuhtaudet poistetaan aktiivihiihikäsittelyllä. Kosteus poistetaan erillisellä jäädytyksellä, josta on mahdollisuus erilliseen lämmöntalteenottoon.

Lämmöntalteenotto parantaa laitteiston kannattavuutta. [9]



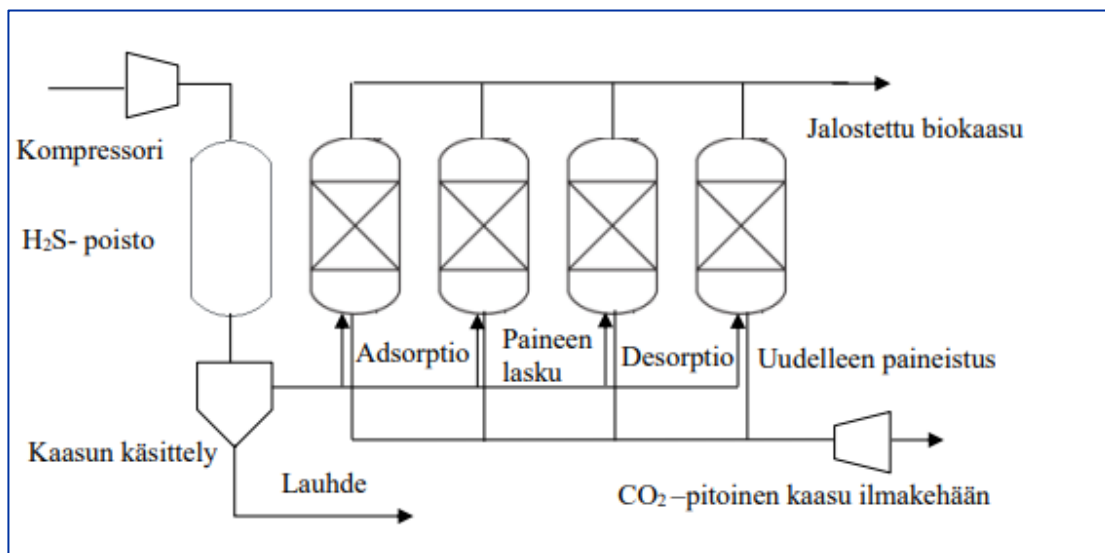
Kuva 22. Bright Biogas -yhtiön ratkaisu biokaasun puhdistamiseksi membraaniteknologialla.[14]



Kuva 23. Kolmivaiheinen membraanipuhdistus [15]

1.3.5 PSA (Pressure Swing Adsorption)

PSA – teknologiassa käytetään adsorptiomateriaalina yleensä aktiivihiihtä tai zeoliittejä, joihin epäpuhtaudet sidotaan korkeassa paineessa. Adsorptiomateriaali regeneroidaan painetta alentaen. PSA edellyttää rikkivedyn ja veden poistoa etukäteen, sillä niitä ei ole mahdollista regeneroida materiaalista. [16]



Kuva 24. Prosessikaavio PSA puhdistusprosessista [16]

1.4 BIOKAASUN VARASTOINTI

Sopivan biokaasun varastointijärjestelmän valinta edistää merkittävästi biokaasulaitoksen tehokkuutta ja turvallisuutta. Biokaasun varastointiin on kaksi perussyytä: varastointi myöhempää paikan päällä tapahtuvaa käyttöä varten ja varastointi ennen ja/tai sen jälkeen kuljetuksen ulkopuolella sijaitseviin jakelupisteisiin tai -järjestelmiin.

Biokaasun varastointijärjestelmä kompensoi myös biokaasun tuotannon ja kulutuksen vaihtelut sekä lämpötilaan liittyvät tilavuuden muutokset. Biokaasun varastointijärjestelmiä on kaksi luokkaa: Sisäiset biokaasun varastosäiliöt on integroitu anaerobiseen mädätysreaktoriin, kun taas ulkoiset biokaasuvarastot on erotettu reaktorista muodostaen biokaasulaitoksen autonomisia komponentteja. Yksinkertaisimmat ja edullisimmat varastointijärjestelmät paikan päällä ja biokaasun välivarastointiin ovat matalapainejärjestelmät. Keski- ja korkeapainevarastointijärjestelmien energia-, turvallisuus- ja puhdistusvaatimukset tekevät niistä kalliita ja vaativat huoltotoimenpiteitä. Tällaisia lisäkustannuksia voidaan perustella parhaiten biometaanilla eli CBG:llä, jolla on korkeampi energiasisältö ja siten arvokkaampi

polttoaine kuin raaka biokaasu. Biokaasuvarastojen koko voi vaihdella 20 m³ aina 10 000 m³ tilavuuteen. Biokaasuvarasto koostuu säänkestävästä ulkokalvosta, sekä kahdesta sisäkalvosta. Kaasu varastoidaan kahden sisämembraanin väliin.[9]



Kuva 25. Biokaasuvarastoja (Kuva Tapio Patrikainen)

1.5 BIOKAASUN NESTEYTYYS

Laitoksen toiminnan tarkoitus on biometaanin jatkuva nesteytys Bio-LNG:ksi. Stirlingin tekninen ratkaisu ei tarvitse jäähdytystä avoimen kierron nestemäisen typen nesteyttämistä käyttämällä. Mikronesteytys tarjoaa hyvän joustavuuden ja tehokkuuden. Stirling toimittaa ratkaisun, jossa ei käytetä nesteytettyjä teknisiä kaasuja ja jolla on alhaiset investointi- ja operointikustannukset. Nesteytysprosessi on yksinkertainen hallita ja soveltuu mikromittakaavaan nesteytykseen. Stirling Cryogenics on kehittänyt yhdessä italialaisen sisaryrityksensä Hysytech Srl:n kanssa sopivan menetelmän syötettävän biometaanin puhdistamiseen.

Puhdistusjärjestelmän tavoitteena on alentaa hiilidioksidi- ja vesipitoisuutta. Puhdistusvaihe tiputtaa CO₂- pitoisuuden < 0,5 tilavuusprosenttiin käyttämällä regeneroitavia molekyyliseuloja. Biometaani nesteytys tapahtuu virtauttamalla paineistettu biometaani yksikköön, jossa se nesteytetään lämmönvaihtimilla lämpötilan asteittaisella alentamisella. Nesteytyslämmönvaihtimet on eristetty riittävästi lämpöhäviöiden välttämiseksi. Muut kiinteät

epäpuhtaudet (esim. CO₂-kiteet) tai höyryt (esim. typpi) erotetaan nesteytyksen jälkeen kolmivaiheisella erottimella. Bio-LNG toimii < -146 ° C:ssa ja 2 bar paineessa.[9]

1.6 KIERRÄTYSASTEEN EDISTÄMISESSÄ BIOJÄTTEELLÄ MERKITTÄVÄ ROOLI

Yhdyskuntajätteen kierrätysasteen nostaminen on isossa kuvassa tärkeää. Biojätteen kierrätysasteen nostolla on siinä merkittävä rooli. Jätteenpolto ei ole kierrätystä, mutta ravinteiden talteenotto on sitä mitä suuremmassa määrin. Biokaasuntuotanto hyödyntää puolestaan biojätteen energiaa huomattavasti tehokkaammin hyötykäyttöön kuin polttolaitoksen uuni.

Kun neitseellisten raaka-aineiden hinnat nousevat ja saatavuus heikkenee, biojätteestä jalostettavien kiertotalouden tuotteiden kilpailukyky paranee. Muutosta voidaan ohjata veroilla. EU:n jätedirektiivin vaatimukset kirittävät parhaillaan meneillään olevaa kotimaista jätelain uudistusta. Yksi suurimpia kysymyksiä on se, miten Suomi vastaa direktiivin vaateisiin, että vuoteen 2025 mennessä kaikissa kotitalouksissa on biojätteen erilliskeräys.

Miten biokaasua käytetään Suomessa? Biokaasua käytetään niin lämmityksessä kuin sähköntuotannossa ja teollisuudessaakin. Kasvavana käyttökohteena on liikenne. Vuonna 2020 biokaasun ja biometaanin tuotanto oli Suomessa noin 900 GWh. Biokaasun tuotanto on ollut tasaisessa nousussa 2010-luvulla. Vuosina 2018–2020 tapahtui pieni notkahdus, joka johtui osin pienentyneistä kaatopaikkakaasujen volyyymeistä. [23]

2 Sähkön ja lämmöntuotanto:

2.1 BIOKAASUN KÄYTTÖ SÄHKÖN TUOTANNOSSA

Biokaasulaitoksessa tuotettu sähkö voidaan hyödyntää paikallisesti tai syöttää verkkoon. Itse käytetty sähkö on huomattavasti arvokkaampaa, sillä korvatesa ostosähköä säästetään sähkön markkinahinnan lisäksi siirtomaksu sekä pienessä mittakaavassa verot. Jos vuosituotanto ei ylitä 800 MWh vuodessa, tuotannosta ei makseta sähköveroä. Myytäessä sähkö verkkoon itse tuotetun sähkön arvo on alempi, tyypillisesti sähkön markkinahinta myyntipreemiolla vähennettynä. Erilaisilla osuuskunta- tai energiayhteisö-ratkaisuilla voidaan arvoa parantaa, mutta jos sähkö kulkee verkon kautta, joudutaan siitä maksamaan aina vähintään sähkön siirtomaksu. Usein etenkin mautiloilla tai muuten harvaanasuilla alueilla lämpöä syntyy yli oman tarpeen. Lämmönsiirtoverkot ovat kalliita rakentaa ja siten lämmönjakelu vain lähialueille on yleensä taloudellisesti kannattavaa. Myös lämpöä voidaan myydä ja jakaa energiayhteisön sisällä.

Jos biokaasulaitos sijaitsee kaasuverkon piirissä, biokaasu voidaan jalostaa biometaaniksi eli poistaa epäpuhtaudet ja hiilidioksidi sekä syöttää se kaasuverkkoon. Tällöin kaasu voidaan hyödyntää verkon piirissä olevissa sähkön- ja lämmön tuotantolaitoksissa tai jaella verkon piirissä olevilla tankkausasemilla liikennekäyttöön. Vastaavasti biokaasu voidaan puhdistaa ja paineistaa tuotantolaitoksella ja jaella suoraan omalta tankkausasemalta tai siirtää kaasu kaasukonteissa muille tankkausasemille. Biokaasu voidaan myös nesteyttää, jolloin sen tilavuus pienenee merkittävästi. Tällöin siirtäminen pitkienkin matkojen päähän kustannustehokkaasti on mahdollista. Nesteytettyä biometaanä voidaan jaella myös raskaan liikenteen käyttöön.

Biokaasulaitosten kannattavuuteen vaikuttaa oleellisesti se, kuinka suuri osa biokaasulla tuotetusta energiasta pystytään hyödyntämään. Lisäksi kannattavuuteen vaikuttaa se, miten biokaasu hyödynnetään. Biometaanin arvo liikennekäytössä on korkeampi kuin sähkön tai lämmön arvo. Myös päästövähennemä on tyypillisesti suurempi, sillä biometaani korvaa fossiilisia polttoaineita. Sähkön- ja lämmöntuotannossa biokaasun käyttö saattaa korvata myös muita uusiutuvia energialähteitä.

Sähkön ja lämmön osalta biokaasu kilpailee enenevässä määrin muita uusiutuvia energialähteitä vastaan. Aurinko- ja tuulivoimasta poiketen kaasua voidaan kuitenkin hyödyntää esimerkiksi säätövoimana ja sellaisina aikoina, kun muu tuotanto on vähäisempää. Liikennesektorilla biometaani kilpailee ensi sijassa bensiinin ja dieselin kanssa.

Metaanipolttoaineilla voidaan tuottaa sähköä kokoluokassa 1 kWe – 1000 MWe. Kaikki lämpövoimakonetyypit ja useat muut voimanlähteet soveltuvat tarkoitukseen, mutta vain osaa niistä hyödynnetään kaupallisesti. Monia tyyppejä löytyy myös Suomen markkinoilta, mutta otto-moottoreilla on ollut hallitseva asema siitä alkaen kun biokaasusähkön tuotanto Suomessa vuonna 1936 aloitettiin. Taulukossa 1 hyötysuhde tarkoittaa tuotantolaitteen hyötysuhdetta. Loppukulutukseen toimitetun sähkön kokonaishyötysuhde on noin 10 % alempi johtuen voimalan omakulutuksesta, siirron kulutuksesta sekä siirron häviöistä. Biokaasun tuotannossa käytettävien resurssien hajautetusta luonteesta seuraa, että biokaasuvoimalaitosten tehot ovat yleensä välillä 30 kWe–30 MWe , tuotantolaitteiden hyötysuhteet välillä 25–45 % ja loppukulutukseen saadaan sähköä 20 %–40 % hyötysuhteella. Voimanlähteiden vaatimukset raakakaasun puhdistukselle (Taulukko 1) vaihtelevat voimakkaasti. Jalostusta ei mikään voimanlähde edellytä, vaan kaikki toimivat sekä puhdistetulla reaktori- että kaatopaikkakaasulla. Kuitenkaan kaikki niistä eivät toimi sellaisilla kaatopaikkakaasuilla, joiden metaanipitoisuus on alle 40 %. [9]

Sähköntuotannon hyötysuhde on korkeimmillaan lauhdetuotannossa. Tällöin myös sähköstä saatava hinta on maksimoitavissa, koska se voidaan myydä korkean markkinahinnan aikoina eli kulutushuippuina. Sen mahdollistaa biokaasun varastoitavuus.

Yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotantolaitoksessa (CHP-voimalassa) sähköntuotannon hyötysuhde alentuu, koska lämpövoimakoneiden hyötysuhde riippuu lämpötilaerosta. Suurissa CHP-voimaloissa sähköntuotannon hyötysuhde voi pudota 10–20 %-yksikköä, koska lämpö otetaan talteen suuria kaukolämpöverkkoja varten korkeassa ja teollisuushöyryn tapauksessa erittäin korkeassa lämpötilassa pienentäen merkittävästi lämpövoimakoneiden toimintalämpötilaeroa. Tyypillisissä biokaasulaitosten CHP-sovelluksissa sähköntuotannon hyötysuhde ei lauhdetuotantoon verrattuna alene lainkaan tai alenee korkeintaan 5 %-yksikköä, koska niissä ei yleensä ole tehokkaita lauhduttimia. Lämpöä voidaan ottaa talteen sähkögeneraattoria pyörittävien moottorien jäähdytysjärjestelmistä ja pakokaasuista lämmönvaihtimien avulla.

Taulukko 1 Metaanipolttoaineiden sähköntuotantolaitteet. Hyötysuhde tarkoittaa tuotantolaitteen hyötysuhdetta lauhdetuotannossa.[9]

Tyyppi	Kuvaus	Lajeja	Teho [kWe]	Hyötysuhde η_e (HHV)	Metaanipitoisuus	Puhdistusvaatimus
ICE	Mäntämoottori: poltto sisäisesti	otto, diesel	3-100 000	10-45 %	> 30 %	keskin-kertainen
ICT	Turbiini: poltto sisäisesti	kaasuturbiini, mikroturbiini	30-300 000	20-35 %	> 30 %	korkea
ECE	Mäntämoottori: poltto ulkoisesti	stirling	1-300	15-50 %	> 20 %	alhainen
ECT	Turbiini: poltto ulkoisesti	höyryturbiini, ORC-turbiini	40-1 000 000	10-40 %	> 20 %	alhainen
FC	Polttokenno: sähkökemiallinen	SOFC, MCFC	1-10 000	25-60 %	> 40 %	erittäin korkea
CC	Kombivoimala: hukkalämpö	ICE/ICT/FC + ECT/ECE	1 000-1 000 000	50-70 %		

Kokonaishyötysuhde on CHP-tuotannossa selvästi lauhdetuotantoa korkeampi. Se on kaukolämpöjärjestelmissä välillä 55–80 % ja rakennuskohtaisissa jopa 95 %.

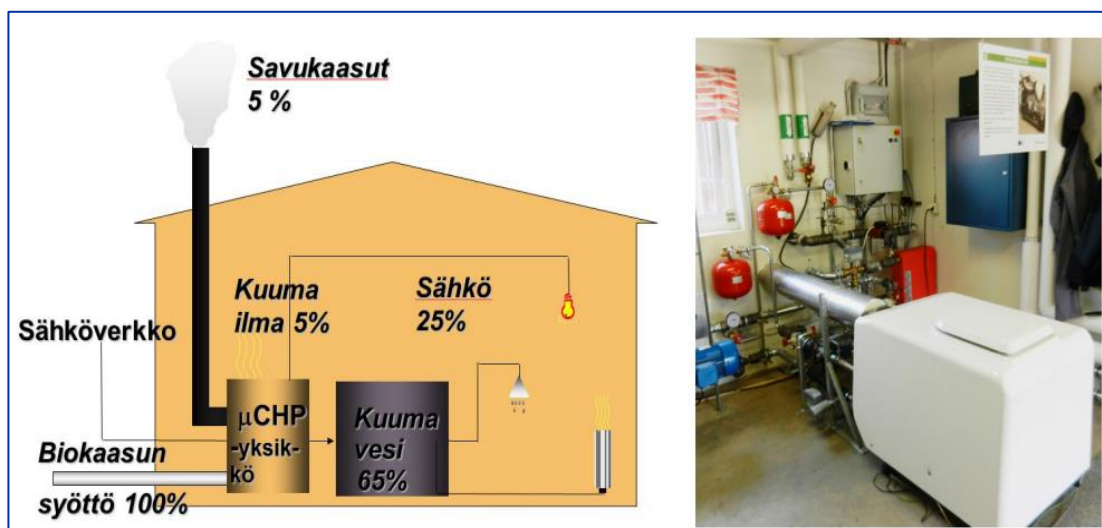
Biokaasulaitoksissa lämpöä tarvitaan reaktorin lämmittämiseen, joten niissä sähkön tuotanto toteutetaan lähes aina CHP-tekniikalla. Vaikka loppukulutukseen saatava lämpö reaktorin tarpeen verran vähenee ja loppuenergian tuotannon hyötysuhde alenee noin 10 %-yksikköä, sähkön tuotantomäärään vaikutus on vähäinen tai olematon. Mutta lämpökuorman alhaisuus voi vaikuttaa sähkön tuotantomäärään erittäin merkittävästi. CHP-laitoksissa sähkön tuotanto on yleensä sidottu lämmön kulutukseen ja koska biokaasulaitokset sijaitsevat usein kaukana asutuksesta ja kaukolämpöverkoista, lämmölle ei aina löydy riittävästi kulutusta. Se tarkoittaa, että myös sähkön tuotantoa joudutaan alentamaan ja jopa soihduttamaan biokaasua.[8]

2.1.1 ECE- ja ECT-lämpövoimakoneet sekä kombivoimalat

Väliaineiden avulla lämmitettävät mäntämootorit (ECE, external combustion engine, esimerkiksi stirling-moottori) ja turbiinit (ECT, external combustion turbine, esimerkiksi ORC-turbiini) mahdollistavat biokaasun polton täydellisen hallinnan, koska se tehdään sylinterin tai turbiinin ulkopuolella. Siksi se on toteutettavissa huonolaatuisimmillakin kaasuilla.

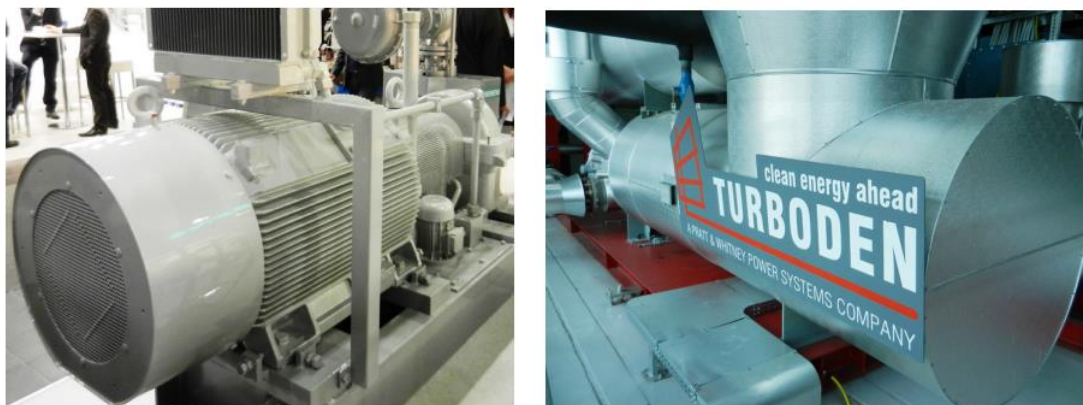
Ne toimivat myös hukkalämmöllä, joten niiden avulla voidaan toteuttaa kombivoimaloita (CC, combined cycle). Kombivoimaloissa lämpövoimakoneen tai polttokennon hukkalämpö hyödynnetään lisäsähkön tuotantoon.

Stirling-moottorit ovat teknisesti parhaiten biokaasusähkön tuotantoon soveltuva teknologia, koska ne sopivat pienimpään kokoluokkaan, edellyttävät vähiten kaasun puhdistusta, toimivat alhaisimmilla metaanipitoisuuksilla ja tarjoavat kaikista lämpövoimakoneista korkeimman hyötysuhteen. Ne soveltuvat myös rakennuskohtaiseen mikro-CHP-tuotantoon, jolloin on saavutettavissa jopa 95 % kokonaishyötysuhde (Kuva 26). Koska niiden melutaso on kaikista lämpövoimakoneista alhaisin, ne soveltuvat myös asumalähiöihin. Stirling-moottorit ovat kuitenkin harvinaisia johtuen otto-moottoreita korkeammista investointikustannuksista, varsinkin haluttaessa korkeaa hyötysuhdetta. Stirling-moottorin teoreettinen hyötysuhde on korkeampi kuin minkään muun lämpövoimakoneen ja myös kaupallisissa toteutuksissa niillä saavutetaan korkein hyötysuhde, korkeampi kuin diesel-moottoreilla. Se on kuitenkin teknisesti vaikeaa, joten sellaisten käyttö on toistaiseksi rajoittunut erikoissovelluksiin (kuten sukellusveneet). Edullisimmissa stirling-moottoreissa hyötysuhde on niihin verrattuna vain puolet tai alempi.[9]



Kuva 26 Rakennuskohtainen biokaasukäyttöinen stirling- μ CHP-järjestelmä: a) Periaate (Lampinen 2002), b) Toteutus (8 kWe , 24 kW) Plönningessä Ruotsissa. (Kuva: Ari Lampinen)[9]

Höyryturbiineilla tuotetaan puolet maailman sähköstä, yleensä suuressa kokoluokassa, mutta niitä on saatavissa myös pienessä kokoluokassa biokaasulaitoksiin (Kuva 27a). Höyryturbiini on myös maailman yleisin hukkalämmön hyödyntäjä kombivoimaloissa. Koska se vaatii hukkalämmön korkeassa lämpötilassa, sitä käytetään vain kaasuturbiinien kanssa. Kiertoainetta vaihtamalla turbiini saadaan toimimaan alemmilla hukkalämmön lämpötiloilla. Yleisimmin näissä turbiineissa on orgaaninen kiertoaine, jolloin ne ovat ORC-turbiineita (Organic Rankine Cycle, Kuva 27b).



Kuva 27 Biokaasulaitosten ECT-koneita: a) 75 kWe höyryturbiini Leipzigissa. b) 1,3 MWe ORCturbiini kombikäytössä Espoossa. (Kuvat: Ari Lampinen)[9]

2.1.2 ICE- ja ICT-lämpövoimakoneet

Lämpövoimakoneet, joissa polttoaine palaa koneen sisällä (Kuva 28), ovat joko mäntämoottoreita (ICE, internal combustion engine, esimerkiksi ottomoottori) tai turbiineita (ICT, internal combustion turbine, esimerkiksi kaasuturbiini). Sisäisen polton vuoksi polttoaineen laatuvaatimukset ovat tarkemmat kuin ECE- ja ECT-koneilla. Niitä valmistetaan myös huonolaatuisille kaasuille, joissa metaanipitoisuus on alhainen ja epäpuhtauspitoisuudet ovat korkeat. Epäpuhtauksien sietokykyä parannetaan materiaali- ja voiteluainevalinnoilla. Se on kuitenkin turbiineilla selvästi huonompi kuin mäntämoottoreilla.

Pienet otto-moottorit ovat alimman hyötysuhteen (15 %) koneita, joita biokaasusähkön tuotannossa käytetään, mutta korkeimmillaan otto-moottoreilla päästään 40 %:iin. Otto-moottoreiden tunnetusti alhainen hyötysuhde bensiinikäytössä johtuu bensiinin huonosta moottoriteknisestä laadusta (oktaaniluku alle 100). Biokaasulla on kaikista polttoaineista korkein oktaaniluku (yli 150), joten ottomoottorit voidaan toteuttaa yhtä korkealla hyötysuhteella kuin dieselmoottorit. Jalostus pudottaa biokaasun oktaaniluvun alle 140:n, mutta se on kuitenkin maakaasua korkeampi.

Otto-moottori on kaasujen käyttöä varten kehitetty moottori, kun taas diesel-moottori on kehitetty nestemäisten polttoaineiden käyttöön. Vaikka on olemassa kaasumaisia polttoaineita (erityisesti DME), joita dieselmoottorissa voidaan yksinkin käyttää, metaanipolttoaineiden syttymisherkkyys ei siihen riitä eli niiden setaaniluku on liian alhainen. Siksi niitä käytetään dualfuel-tekniikalla eli sytyttämällä pienellä määrällä dieselpolttoainetta ja tuomalla biokaasu sylinteriin yhdessä polttoilman kanssa.[9]



Kuva 28 Biokaasulaitosten IC-koneita: a) Sisun kotimainen 30 kWe otto-moottori Kalmarin maatilakohtaisella biokaasulaitoksella Laukaassa. b) 75 kWe diesel-moottori reaktorilaitoksella Leipzigissa. c) Kaksi 60 kWe mikroturbiinia kaatopaikalla Vaasassa. (Kuvat: Ari Lampinen)[9]

Yleisin sähköntuotantoperiaate biokaasulla perustuu biokaasun polttamiseen ottomoottorissa tai kaasukäyttöiseksi muunnetussa dieselmoottorissa. Moottori pyörittää sähköverkkoon invertterin kautta kytkettyä generaattoria vakiokierrosluvulla.

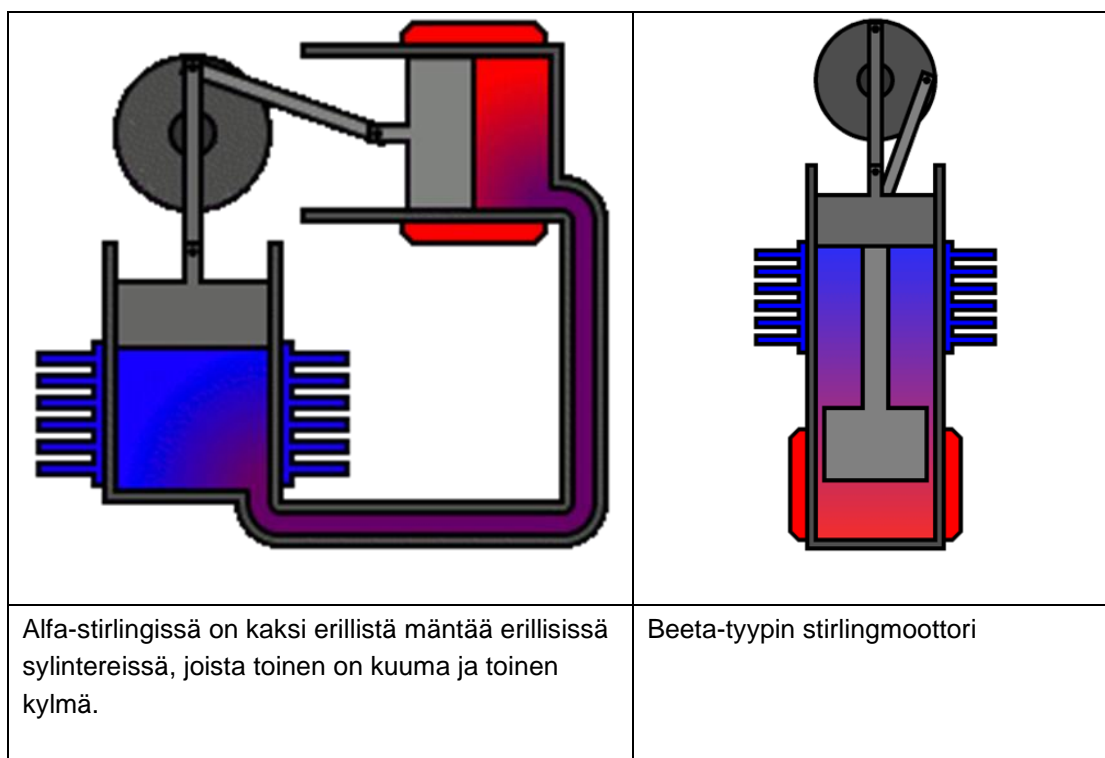
Kaasumoottoria käytettäessä kaasuseos sytytetään sytytystulpalla, kun taas dieselmoottorissa kaasuseos sytytetään pienellä dieselpolttoainemäärällä. Dieseliä siis kuluu tällöin vain 2-10% normaalista dieselmoottorin kulutuksesta.



Kuva 29. Sähköntuotanto Picnus Oy:n tilalla biokaasun avulla. Polttomoottorissa poltettu, puhdistettu biokaasu tuottaa voimaa, jolla saadaan sähkögeneraattori tuottamaan sähköä koko tilalle. (Kuva Tapio Patrikainen)

Biokaasun energiaosuus vaihtelee välillä 70–99 %. Korkeimpiin osuuksiin päästään nykyään vain MWe-kokoluokan moottoreissa, mutta biokaasulaitoksille tyypillisessä 100 kWe :n kokoluokassa parhaimmilla moottoreilla saavutetaan 95 % osuus.

.Toinen mahdollisuus on käyttää Stirling-moottoria. Stirlingmoottori on mäntämoottori ja siis lämpövoimakone, jonka käyttöaineena on kaasua. Palaminen niissä tapahtuu moottorin ulkopuolella. Stirlingmoottori tuottaa mekaanista energiaa lämpötilaerojen avulla. Yksinkertaistetusti moottorissa on lämmin ja kylmä ”pää”, joiden välillä moottorin sisällä olevaa kaasua (esimerkiksi ilma tai helium) liikkuu vuoron perään jäähtyen ja lämmiten. Kaasun lämpölaajenemisen ja moottorin tiivyyden johdosta syntyy paineen jaksoittainen vaihtelu. Painevaihtelu muutetaan mekaaniseksi työksi männän ja sylinterin avulla, mistä syntyvä liike samalla liikuttaa koneistoa, joka saa aikaan kaasun liikkumisen kylmän ja lämpimän pään välillä. [18]



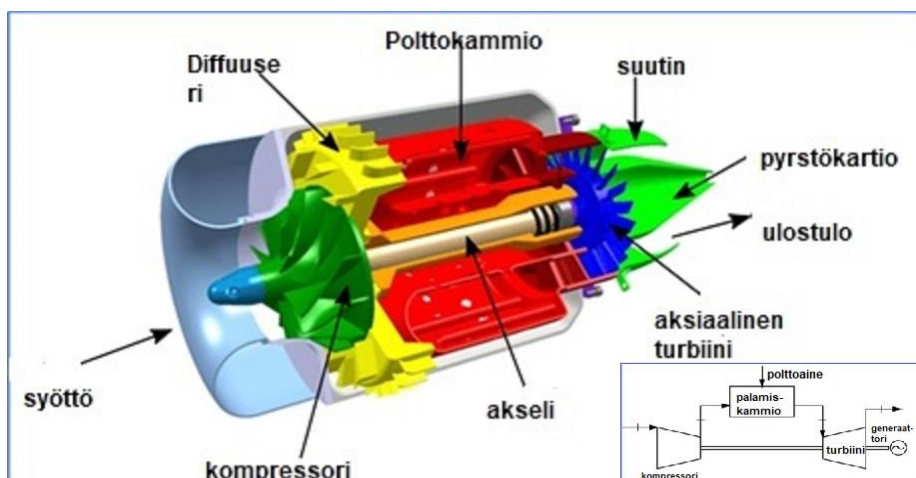
Kuva 30. Alfa- ja Beta -Stirlingmoottorityypit

Stirlingmoottorissa olevaa kaasua vuoroin jäähdytetään ja lämmitetään, mikä saa sen paineen vaihtelevaan. Tämä paineen vaihtelu muutetaan männän avulla voimaksi ja liikkeeksi. Stirlingmoottorit vievät yleensä paljon tilaa ja ovat kalliita, joten niiden käyttö ei ole yleistynyt.

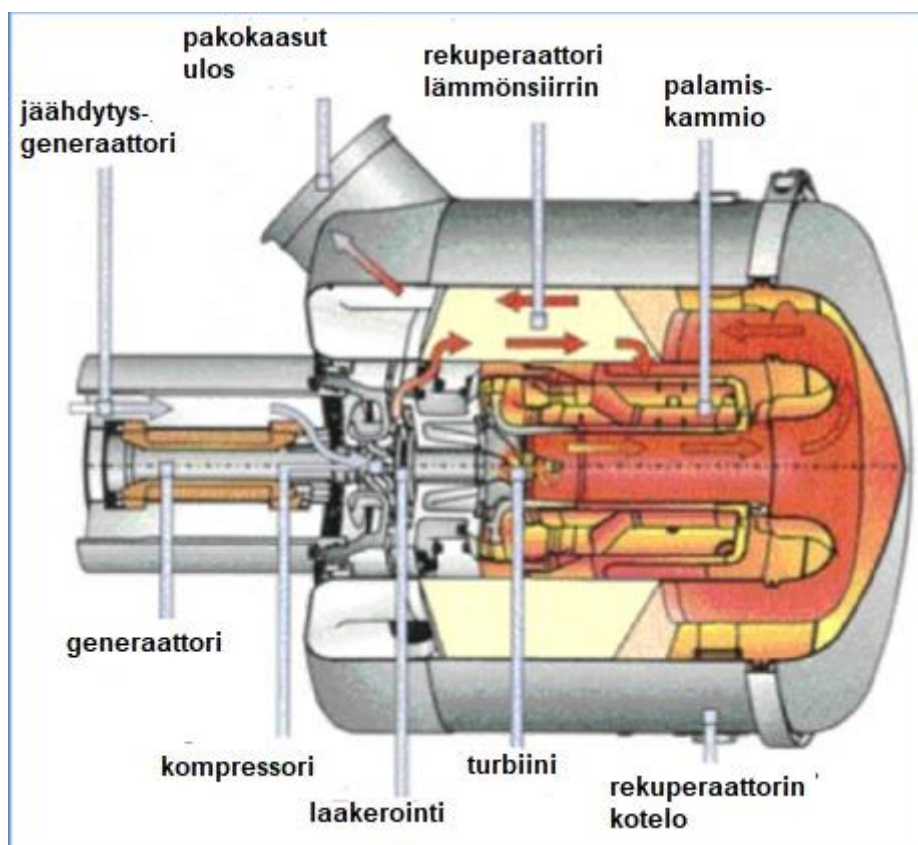
Mikrokaasuturbiini:

Kaasuturbiinien etuna on erittäin korkea teho/painosuhte, mutta niiden hyötysuhde on varsin alhainen. Koska ne tuottavat hukkalämpöä korkeassa lämpötilassa, niitä käytetään kombivoimalaitoksissa yhdessä höyryturbiinien kanssa. Pieniä kaasuturbiineita kutsutaan mikroturbiineiksi. Mikrokaasuturbiinia on käytetty jonkin verran biokaasulaitoksilla. Kaasuturbiinissa on yksi ainoa liikkuva osa, joten sen tulisi kestää pitkään ja vaatia vain vähän huoltoa. Mikrokaasuturbiinit ovat vielä kuitenkin suhteellisen kalliita ja mekaaninen hyötysuhde niillä on jonkin verran mäntämoottoreita huonompi.

Mikroturbiinit ovat toimintaperiaatteeltaan jalostettuja versioita turboahdistimesta, missä siinä ahdinpyörä työntää ilmaa, yleensä ahto-jäähdyttimen kautta palotilaan ja syntyneet palokaasut pyörittävät poistuessaan turbiinipyörää. Mikroturbiini muistuttaa toiminnaltaan tätä, sillä siinä ahdinpyörän tuottama ilma johdetaan esilämmittimen kautta palotilaan, missä siihen suihkutetaan polttoainetta, jonka palamisesta syntyvä energia pyörittää turbiinipyörää. Ahdin ja turbiini ovat samalla akselilla, johon on lisäksi kiinnitetty generaattorin ankkuri, joka pyöriessään käämin sisällä tuottaa sähköä.[17]



Kuva 31. Mikrokaasuturbiinin toimintakaavio ja komponentteja.

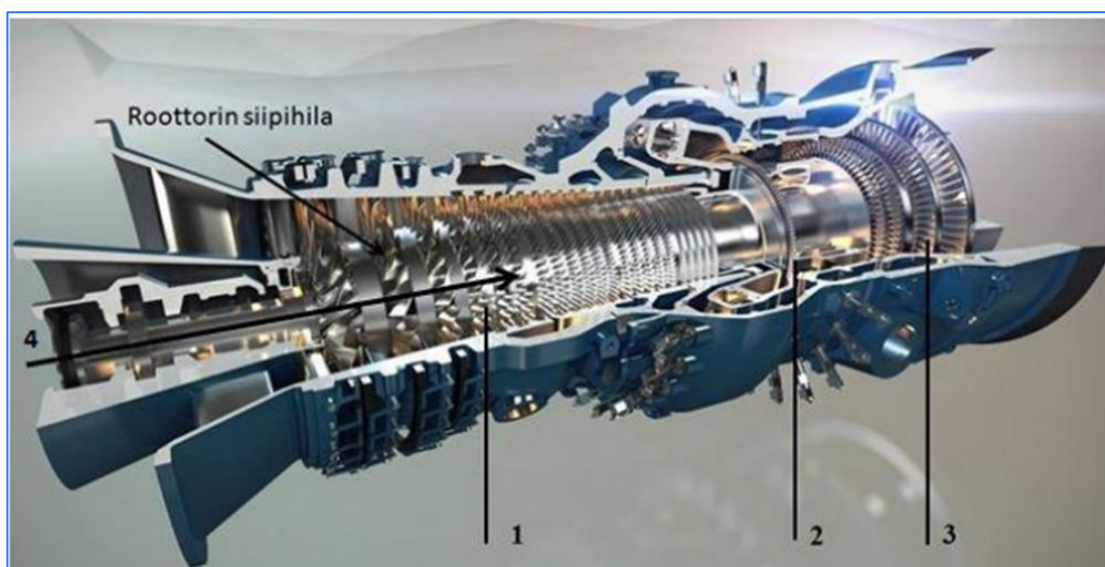


Kuva 32. Capstone mikroturbiinin osat.

Emissioiden minimoimiseksi kaikkein tehokkain polttoaine on joko maakaasu tai biokaasu. Tavallisesti maa- ja biokaasu edellyttävät kaasun kompressointia, jotta kaasu voidaan syöttää mikroturbiinin sisäänmenoyhteeseen. Kaasukompressorin ulostulopaine on noin 3-4 baaria.

Isoissa kaasuturbiineissa käytetään lähes poikkeuksetta aksiaalikompressoria ja pienissä radiaalikompressoria. Suuritehoinen radiaalikompressori olisi myös suurikokoinen, mikä aiheuttaisi rakentamisongelmia. Sen vuoksi on järkevämpää käyttää aksiaaliturbiinia suuritehoisissa kaasuturbiineissa. [19]

Polttokammion muoto vaihtelee eri kaasuturbiineissa käyttötarkoituksen mukaan. Joissakin ratkaisuissa polttimet ovat sijoitettuna rengasmaisesti polttokammion ympärille ja joissakin ratkaisuissa käytetään vain yhtä poltinta. Kuvassa 31 polttimet ovat sijoitettuna rengasmaisesti akselin ympärille ennen korkeapaineturbiinia. Polttoaine ja osa tuloilmasta sekoitetaan ja poltetaan polttokammiossa, josta kuuma savukaasu johdetaan turbiinille. Polttoaineena käytetään tyypillisesti kevytöljyä tai maakaasua. Muita energiantuotannossa käytettäviä kaasuja ovat nestekaasu, kaupunkikaasu, kaatopaikkakaasu ja erilaiset biokaasut.

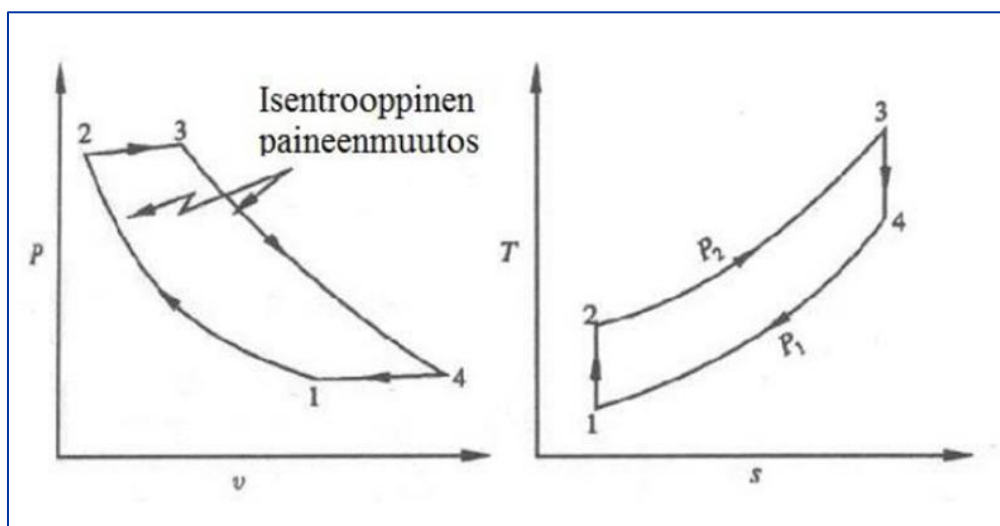


Kuva 33. 1: Kompressori. 2: Korkeapaineturbiini. 3: Matalapaineturbiini. 4: Virtaussuunta [19]

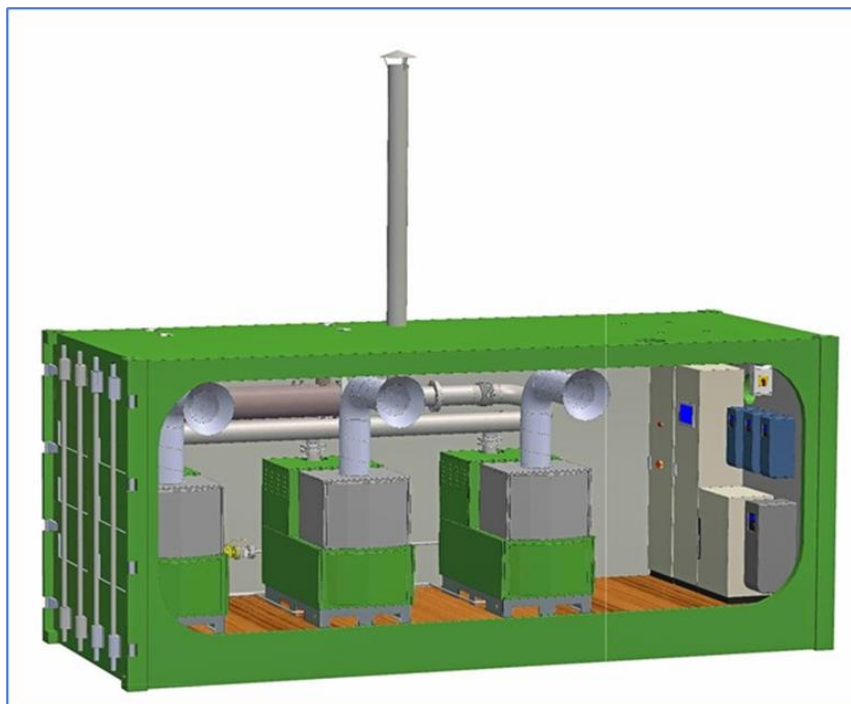
Turbiinissa polttokammion tulo savukaasu paisuu avoimessa prosessissa ympäristön paineeseen. Tyypillisesti isotehoisissa kaasuturbiineissa käytetään aksiaaliturbiineja. Turbiini koostuu kompressorin tavoin peräkkäisistä roottori- ja staattorihiloista eli vaiheista. Tavallisesti turbiinissa on vaiheita 1 - 15 peräkkäin, mutta vaiheita on kuitenkin aina vähemmän kuin kompressorissa. Näin turbiinin painesuhde vaiheen yli on suurempi kuin kompressorilla. Polttokammion tulo ilma tulee ensin vaippaan kiinnitettyyn staattoriin, joka kääntää virtauksen roottorille. Akseliin kiinnitetty roottori pyörii virtauksen vaikutuksesta. Roottorilta virtaus ohjautuu seuraavalle staattorille. Päinvastoin kuin kompressorissa, virtauksen paine laskee jokaisen vaiheen jälkeen. [19]

Turbiinin osat joutuvat todella kovan lämpörasituksen alle, sillä polttokammion tulevan kaasuseoksen lämpötila on jopa 1500 °C. Turbiinin siivet altistuvat kovalle rasitukselle myös korroosion ja hapettumisen vuoksi. Samoin kuin polttokammio, turbiini valmistetaan kuumalujasta metallista ja käsitellään lämmöltä ja kulumiselta suojaavalla päällysteellä.

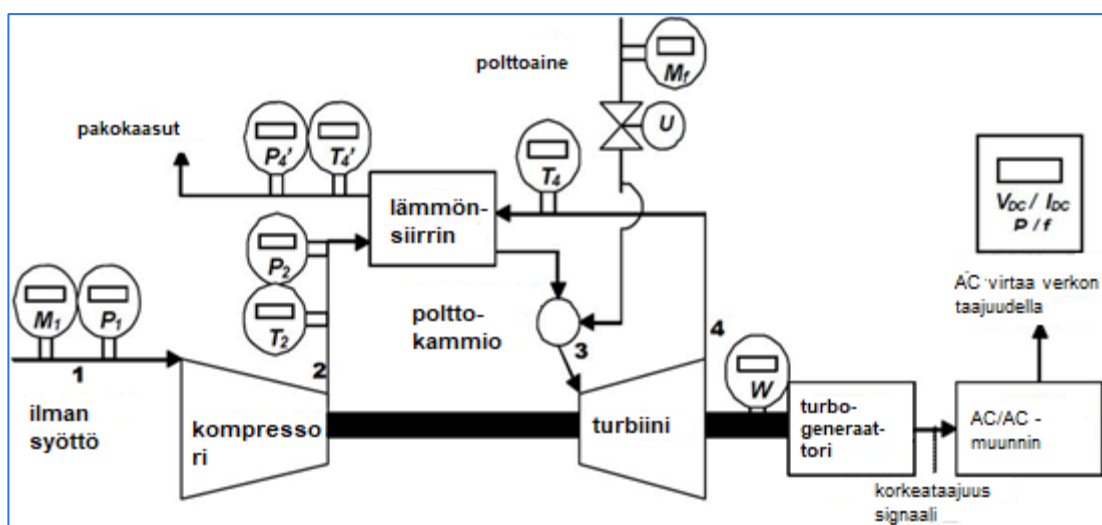
Ideaalinen ja yksinkertaistettu kaasuturbiini- eli Brayton-prosessi koostuu neljästä vaiheesta. Kiertoprosessi on esitetty kuvassa 32. Ensimmäisessä vaiheessa kompressorin imee ilmaa puristaen sen isentrooppisesti (eli puristusprosessissa systeemin entropia ei muutu) suurempaan paineeseen, toisin sanoen ilmaan tehdään työtä. Toisessa vaiheessa paineistettuun ilmaan tuodaan lämpöä polttokammiossa, jossa poltetaan vakioaineessa esimerkiksi maakaasua. Polttokammion jälkeen kuumentunut ilma ja syntyneet savukaasut johdetaan turbiiniin. Kolmannessa vaiheessa turbiinissa savukaasut paisuvat ympäristön paineeseen isentrooppisesti luovuttaen työtä. Lopuksi paisunut ja viilentynyt savukaasu johdetaan pakokanavaan. [19]



Kuva 34. Ideaalinen ja yksinkertaistettu Brayton-kiertoprosessi. [19]



Kuva 35. CAD-piirros kolmen turbiiniyksikön kontista, jolloin sähköä saadaan maksimissaan 90 kW, 30 kW kustakin yksiköstä. Kaikkia yksiköitä ohjataan samalla keskuksella.



Kuva 36. Kaasuturbiinin toimintaperiaate

Kaasuturbiinin edut ja haitat

Kaasuturbiinivoimalaitoksen etuja perinteiseen hiilivoimalaitokseen verrattuna ovat ympäristöystävällisyys pienempien rikki- ja typpipäästöjen takia, suoraviivainen prosessi, jäte- ja lämmön tehokas talteenotto, vähentyneet hiilidioksidipäästöt, pienempi investointikustannus, noin 35-50 % lyhyempi rakennusaika, matala värinätaaso, mahdollisuus

eri polttoaineiden käyttöön, luotettavuus, nopea käynnistyminen, vähäinen henkilöstötarve ja hyötysuhteen jatkuva paraneminen tekniikan kehittyessä

Kaasuturbiinin heikkous on sen huono hyötysuhde osakuormalla. Jos täydellä kuormalla toimiessaan kaaasuturbiinin hyötysuhde on 40 %, puolella teholla toimiessaan hyötysuhde on 30% ja 30 % kuormalla toimiessaan hyötysuhde on vain 20 %.[20]

2.2 TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT

Suomen Biokierto ja Biokaasu ry (SBB ry) arvioi, että biometaanin tuotannon kasvu jatkuu myös tulevina vuosina, biokaasun (ns. raakakaasu) tuotannossa on odotettavissa ainoastaan pientä kasvua. Liikennebiokaasun kysyntä on merkittävin tekijä biometaanin tuotannon kasvulle. Myös teollisuuden kysynnän uskotaan kasvavan lähivuosina, mutta vielä ei ole täysin selvää, että suuntautuuko kysyntä paineistettuun, nesteytettyyn vai raakakaasuun.

SBB:n arvion mukaan biojätteiden käsittelymäärät biokaasulaitoksissa tulevat kasvamaan tämän vuosikymmenen aikana, mutta puhdistamolietteiden käsittelymääriin ei ole odotettavissa suuria muutoksia. Kaatopaikkakaasujen määrät tulevat vähenemään.

Maataloussyötteiden käsittelymäärien odotetaan kasvavan biokaasulaitoksissa tämän vuosikymmenen aikana. Yleisesti tiedetään, että suurin biokaasun tuotantopotentiaali on maatalouden syötteissä, erityisesti lannassa ja erilaisissa nurmisyötteissä ja oljessa. [21]

Monikäyttöinen kaasu on erinomainen valinta kodin lämmitykseen, sillä se on ympäristöystävällinen, turvallinen, edullinen ja siisti. Kaasu on lämmityksessä toimitusvarma ja luotettava, sillä se tulee putkea pitkin suoraan kotiisi eikä lopu kesken. Lisäksi maa- tai biokaasupohjaisen lämmitysjärjestelmän teho riittää varmasti lämmittämään myös käyttöveden. Kaasu ei vaadi varastointia kuten öljy, joka vuotaessaan aiheuttaa myös ympäristölle haittaa. Kaasulla voi lämmittää kodin lisäksi myös grilliä, hellaa ja takkaa.

Kaasu on muihin energiamuotoihin verrattuna edullinen. Lisäksi esimerkiksi maakaasuliittymä on halvempi rakentaa kuin kaukolämpöliittymä – käyttöönottoinvestointi on huomattavasti edullisempi esim. maalämpöön verrattuna. Kaasu on on öljyä ja puuta vähäpäästöisempi, sen käyttö ei ole sottaavaa eikä vaadi nuohousta. Erityisesti biokaasu on ympäristöystävällistä, sillä sitä tuotetaan Suomessa kotitalouksien ja teollisuuden biohajoavista jätteistä, joten se on 100 % uusiutuvaa.

Kaasun käyttö ympäristöystävällisemmin

Kaasua käyttäjät voivat vaihtaa helposti ympäristöystävälliseen ja 100 % uusiutuvaan biokaasuun. Biokaasu ei eroa maakaasusta käyttöominaisuuksiltaan, joten se voidaan ottaa käyttöön kaikkialla, missä maakaasunkin. Useimpien kaasunjakeluverkon alueella sijaitsevien kotitalouksen on mahdollista siirtyä käyttämään biokaasua.

Biokaasun kulutusta mitataan etäluettavalla mittarilla, joka asennetaan käyttökohteeseen biokaasuun siirryttäessä, mikäli sellaista ei vielä kiinteistössä ole. Biokaasua voidaan käyttää kokkaamisessa ja kotien lämmittämisessä aivan kuten maakaasullakin, sillä biokaasu vastaa ominaisuuksiltaan maakaasua. [22]

2.2.1 Biokaasutyöryhmän yhteenvetoa:

Työryhmä pitää tärkeänä, että biokaasulaitosten tekniikkaa ja hallintaa pyritään optimoimaan ja vähentämään niiden vajaakäyttöä. Työryhmän näkemyksen mukaan tätä voidaan tehdä etenkin neuvontaa lisäämällä ja levittämällä tehokkaammin hyviä käytäntöjä.

Työryhmä toteaa, että päästöjä tulisi mitata erilaisissa laitoksissa eri syötteillä ja erilaisilla mädätteen varastoinnin ja käytön ratkaisuilla. Biokaasuun liittyviä asioita tulisi täsmentää myös kansallisessa kasvihuonekaasuinventaariossa. Asia liittyy myös ammoniakkipäästöihin.

Biokaasulaitosten perustaminen vaatii laaja-alaista osaamista teknisestä laitosoperoinnista lupamenettelyihin, omavalvontaan ja ravinteiden käytön kehittämiseen. Vakiintuneita toimijoita lukuun ottamatta harvalla, varsinkin pienellä, toimijalla on riittävästi resursseja ja osaamista koko laitoshankkeen ja siihen liittyvän arvoketjun hallintaan.

Työryhmä toteaa, että biokaasutoimijoiden lisäksi myös alalla toimivat viranomaiset tarvitsevat neuvontaa, oppaita ja koulutusta. Tämä pitää sisällään hyvien käytäntöjen jakamisen sekä laskuesimerkkien tai laskureiden tekemisen. Lupamenettelyiden selkeyttäminen ja yhtenäistäminen ovat oleellisia. Lisäksi toimijoiden yhteistyötä tulee lisätä.

Työryhmä suosittelee, että uusiutuvan energian direktiivin toimeenpanoon liittyvän lupamenettelykokonaisuuden toimeenpanossa huomioidaan erityisesti biokaasun tarpeet.

Työryhmä toteaa myös, että biokaasumarkkina ja sen kysyntä ovat vielä alkuvaiheessa. Siten tuotantolaitosten ja jakeluasemien toimintavarmuus ja yleisesti biokaasun maine ovat asioita, joista tulee huolehtia. Tämä tarkoittaa mm. sitä, että arvioitaessa hankkeita tukijärjestelmissä tulee uuden teknologian ja toimintavarmuuden olla tasapainossa. [23]

2.3 POLTTOKENNOTEKNIIKAN SOVELTAMINEN BIOKAASUN AVULLA TAPAHTUVAAN ENERGIANTUOTANTOON

Polttokennojen käyttäminen biokaasun muuntamiseen sähköksi on runsaan tutkimuksen kohteena tällä hetkellä. [24] Polttokennot muuntavat kemiallisen energian sähköenergiaksi suoraan ilman polttoprosessia. Polttokennon toimintaperiaate perustuu hapettumis-pelkistymisreaktioihin.[25] Energiaa vapautuu vedyn ja hapen välisissä reaktioissa. Tämän suoran prosessin hyötynä on sen yli 50 prosentin hyötysuhde, joka voi nousta jopa 85 prosenttiin, jos myös sivutuotteena syntyvä lämpöenergia otetaan talteen. Sähköntuotannossa millään polttoprosessilla ei päästä näin hyvään hyötysuhteeseen. Muita hyötyjä ovat päästöttömyys käyttöpaikalla sekä meluton toiminta.

Polttokennoissa sähkö tuotetaan sähkökemiallisesti eli polttamista ei tapahdu. Kaikilla polttokennoteknologioilla biokaasua ei ole mahdollista hyödyntää, mutta muutamilla on (Kuva 37). Niistä kaksi on nykyään kaupallisessa käytössä: SOFC (solid oxide fuel cell) ja MCFC (molten carbonate fuel cell). Lämpövoimakoneiden tavoin biokaasun inertit komponentit (CO_2 ja N_2) eivät haittaa niitä suurinakaan pitoisuuksina, joten jalostusta ei tarvita. Mutta kaikille polttokennoteknologioille on yhteistä, että epäpuhtauksien sietokyky on erittäin alhainen, joten puhdistusprosessilta vaaditaan enemmän kuin lämpövoimakoneita käytettäessä

Koska polttokennot eivät ole lämpövoimakoneita, ne eivät ole Carnot'n hyötysuhteen rajoittamia. Niillä voidaan saavuttaa selvästi korkeampi hyötysuhde kuin lämpövoimakoneilla, mutta kaupallisilla laitoksilla hyötysuhteet ovat selvästi demonstraatiolaitoksia alempia. Esimerkiksi Kuvan 37 mikro-CHP-laitteen hyötysuhde on 25 % eli sama kuin Kuvan 26 stirling-järjestelmällä. Näille kahdelle teknologialle on yhteistä sopivuus pieneen kokoon ja alhainen melutaso, joten ne soveltuvat asutusalueillekin.



Kuva 37 SOFC-polttockennoja: a) Wärtsilän 20 kWe:n polttokennojärjestelmä kaatopaikkakaasukäytössä Vaasassa. b) 1 kWe:n polttokenno μ CHP-järjestelmiä varten esittelyssä Berliinissä. Kuvat. Ari Lampinen [9]

2.3.1 Erilaisia polttokennoratkaisuja

Kullakin polttokennotekniikalla on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Kolme tärkeintä markkinoilla tällä hetkellä olevaa tekniikkaa eroavat toisistaan sen mukaan, käytetäänkö protoninsiirtoon

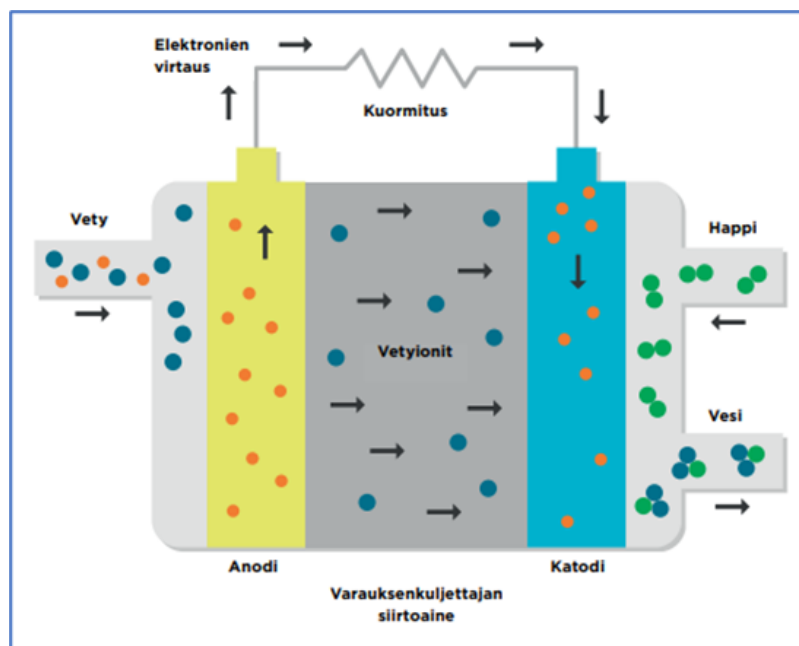
- 1) polymeerielektrolyyttikalvoa (Polymer Electrolyte Membrane, PEM),
- 2) kiinteää oksidia (Solid Oxide, SO) vai
- 3) sulaa karbonaattia (Molten Carbonate, MC).

1) PEM-tekniikka eli polymeerielektrolyyttikalvo

Näistä PEM-tekniikka on käyttökohteidensa suhteen monipuolisin, sillä matalan käyttölämpötilansa (<100 °C) ansiosta se sopii sekä pieniin että suuriin polttokennoihin. Kiinteään oksidiin perustuvissa polttokennoissa käytetään korkeita lämpötiloja, joten ne sopivat parhaiten laajamittaisiin sovelluksiin, kuten hajautettuun sähköntuotantoon [26]

PEM-polttockennot käyttävät puhdasta vetyä, kun taas SO-polttockennoissa voidaan käyttää maakaasua tai muita hiilivetyjä, joista vety erotetaan reformointiprosessissa. SO-

polttokennojen korkea käyttölämpötila helpottaa reformointivaiheen integrointia polttokennolaitteeseen.

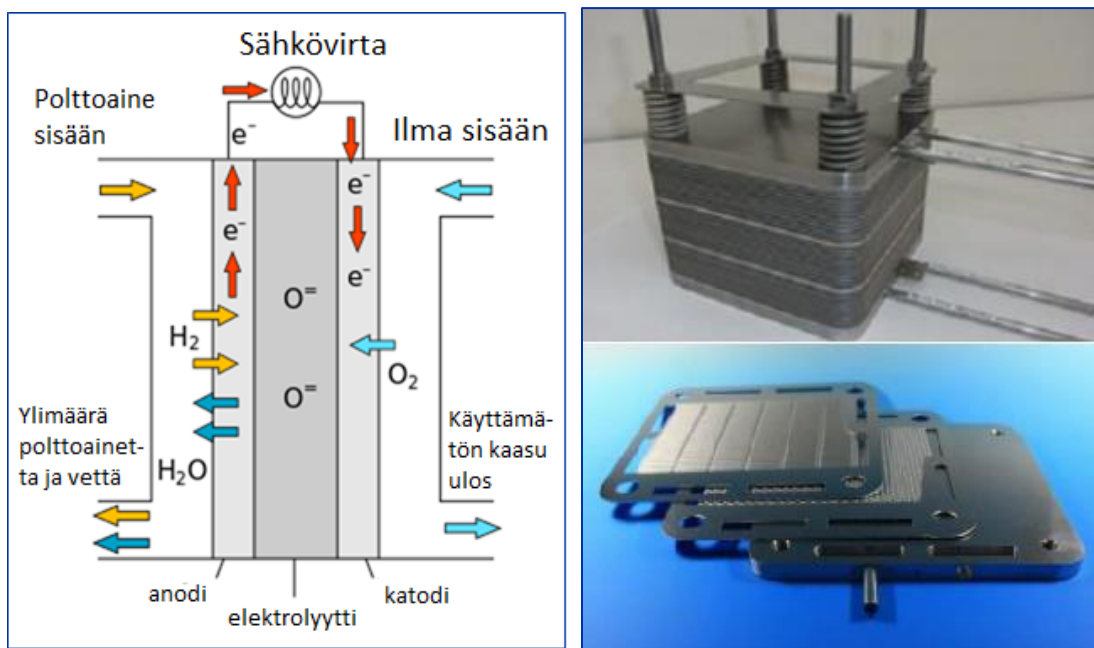


Kuva 38. PEM-polttokennon toimintaperiaate. Vetypolttoaine reagoi anodilla katalyytin vaikutuksesta muodostaen elektroneja ja vetyatomin ytimiä. Nämä ytimet siirretään katodille varauksenkuljetusaineen läpi. Siirron aikana ne reagoivat hapen kanssa muodostaen vettä. Elektronit kulkevat ulkoisen piirin kautta, jolloin syntyy sähkövirta. [26]

2) Kiinteän oksidin polttokennot (Solid Oxide, SO)

Kiinteän oksidin polttokennot (solid oxide fuel cell tai SOFC) ovat laitteita, joilla voidaan tuottaa sähköä sähkökemiallisesti hapettamalla suoraan polttoainetta. Polttokennot jaotellaan niiden elektrolyyttimateriaalien perusteella. Kiinteän oksidin polttokennossa SOFC:ssä on joko kiinteä oksidi tai keraaminen elektrolyytti.

Tällaisten polttokennojen etuina on korkea lämmön ja sähkön tuottoteho, pitkään kestävä stabiilisuus, polttoaineiden joustava käyttömahdollisuus, matalat päästöt ja suhteellisen matalat kustannukset. Koska SOFC-kenno pystyy korkean lämpötilansa ansiosta sisäiseen reformointiin, se on kaikkein polttoainejoustavin polttokennotyyppi. Siinä missä hääkäasu on monille polttokennoille katalyyttimyrkky, on se SOFC-kennoille polttoaine. SOFC-kenno toimii hyvin vedyllä, maakaasulla, biokaasulla, metanolilla tai dieselöljyllä. Rikki kuitenkin myrkyttää kennon, joten se on poistettava esikäsitteilyllä. Merkittävin haittapuoli SO-polttokennossa on sen korkea operointilämpötila, joka aiheuttaa pidemmän käynnistysajan sekä laitteen osien mekaanisten ja kemiallisten ominaisuuksien yhteensopivuushaasteet.



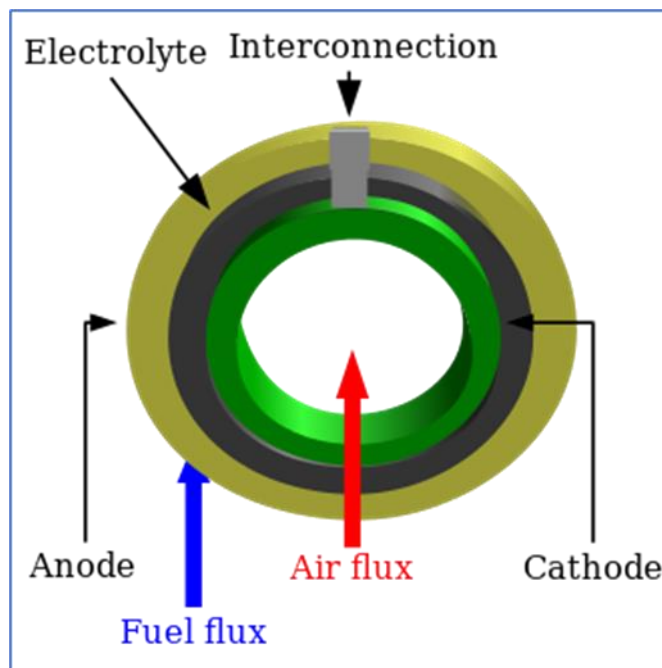
Kuva 39. Kiinteänoksidisen polttokennon toimintaperiaate ja SOFC-stack (ylempi) ja tiivistetyt MEA:t (alempi)

Kiinteän oksidin polttokenno on valmistettu neljästä kerroksesta, joista kolme on keraamisia, Yksittäinen polttokenno, jossa on nämä neljä kerrosta, on tyypillisesti muutamia millimetrejä paksu. Satoja tällaisia kennoja kytetään sarjaan, jota nimitetään SOFC piipuksi. SOFC:ssä käytetyt keraamit eivät tule elektrokemiallisesti tai ionisesti aktiivisiksi ennen kuin ne saavuttavat korkean lämpötilan. Tästä johtuen kennopiippuja joudutaan ajamaan 500 – 1000 °C lämpötiloissa. [27]

Happiatomien pelkistyminen oksidi-ioneiksi tapahtuu katodilla. Oksidi-ionit diffundoituvat kiinteän oksidielektrolyytin läpi anodille, jossa ne pystyvät sähkökemiallisesti hapettamaan polttoaineen. Hapetusreaktioissa sivutuotteena vapautuu vettä kuten myös kaksi elektronia. Elektronit virtaavat ulkoisen sähkövirtapiirin kautta tehden työtä. Tämä sykli toistuu, kun elektronit palaavat taas katodimateriaalille.

Kennon osien ominaisuuksia ja kennojen toiminnan haasteita on esitetty seuraavassa:

Anodi



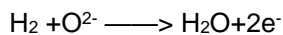
Kuva 40. Putkimaisen kiinteäoksidisen polttokennon (SOFC-kennon) poikkileikkaus, jossa näkyvät kolme keraamista kerrosta. Sisältä ulospäin kerrokset ovat: huokoinen katodi, tiivis elektrolyytti, huokoinen anodi. [28]

Keraamisen anodin tulee olla hyvin huokoinen, jotta polttoaine pystyy virtaamaan kohti elektrolyyttiä. Tästä johtuen anodin valmistusmateriaaliksi valitaan usein granulaarinen aines. Kuten katodinkin, anodin on pystyttävä johtamaan elektroneja ionien johtokyvyn määrättyillä ominaisuuksilla. Anodi on useimmiten paksuin ja vahvin kerros jokaisessa yksittäisessä kennossa, koska siinä häviöt ovat pienimmät ja samalla se toimii mekaanisena tukirakenteena kennolle. Sähkökemiallisesti anodiilla tulee käyttää oksidi-ionit, jotka diffundoituvat elektrolyytin läpi hapettamaan vetypolttainetta. Hapetusreaktio oksidi-ionin ja vetyatomien välillä tuottaa vettä, lämpöä ja sähköä. Jos polttoaine on kevyttä hiilivetyä, kuten esimerkiksi metaania, anodin toinen funktio on toimia katalyyttinä höyryreformoitumiselle, jossa muodostuu vetyä. [28]

Tämä on polttokennopiipun toinen toiminnallinen etu, sillä reformointi on endoterminen reaktio ja siten sen tapahtuminen viilentää polttokennoa sisäisesti. Yleisimmin käytetty materiaali on *cermet*, joka valmistetaan nikkelistä, joka on seostettu keraamiseen materiaaliin käytettäväksi elektrolyytinä tietyissä kennoissa, tyypillisesti YSZ (yttrium stabiloidussa zirkoniumoksidissa) Nämä katalyytit auttavat pysäyttämään nikkelin kidekoon kasvun. Suuremman nikkelikiteet pienentäisivät kontaktipinta-alaa, jolla ionit voivat johtua eteenpäin. Tämä puolestaan laskisi kennon tehokkuutta. Perovskiittimateriaalit (seostetut ionit/ sähköä johtavat keraamit) ovat

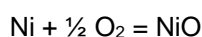
osoittaneet tuottavan tehoa n 0.6 W/cm^2 $0,7 \text{ V}$:lla lämpötilan ollessa $800 \text{ }^\circ\text{C}$. Tämä on mahdollista, koska niillä on kyky tuottaa suurempi aktivoitumisenergia. [28]

Sähköä tuottava kemiallinen reaktio kennossa on:



YSZ anodimateriaalilla on kuitenkin muutamia huonoja ominaisuuksia. Nikkelin kertyminen, hiilen pinnoittuminen, hapetuksen ja pelkistuksen epästabiilisuus sekä myrkyttyminen rikin vaikutuksesta. Nämä tekijät voivat rajoittaa Ni-YSZ materiaalin pitkän aikavälin stabiilisuutta. Nikkelin rakeistuminen liittyy YSZ -materiaaliin seostettujen Ni-partikkelien kiteiden kasvuun. Tällöin raekoko kasvaat, ja pinta-ala katalyyttiselle reaktiolle pienenee. Hiilen pinnoittumista tapahtuu, kun hiili atomit muodostuvat hiilivetyjen pyrolyysissä tai hiilimonoksidin CO hajotessa. Hiili siis muodostaa pinnoitteen Ni-katalyytin pinnalle.

Hiilen pinnoittumisen merkitys kasvaa erityisesti, kun käytetään polttoaineena hiilivetyjä kuten metaania tai synteettisiä hiilivetyjä. SOFC kennon korkea lämpötila ja hapettava olosuhde aiheuttavat Ni-katalyytin hapettumisen reaktiolla



Nikkelin hapettumisreaktio vähentää sähkökatalyyttistä aktiivisuutta ja johtavuutta. Lisäksi tiheys ero Ni ja NiO:n välillä aiheuttaa tilavuuden muutoksen anodin pinnalla, mikä voi johtaa mekaaniseen rikkoutumiseen.

Rikin aiheuttama myrkyttyminen voi tapahtua, kun käytetään polttoaineita kuten maakaasu, bensiini tai diesel. Jälleen rikkiyhdisteiden (H_2S , $(\text{CH}_3)_2\text{S}$) suuren kiinnittymiskyvyn eli affiniteetin ansiosta metalliseen katalyyttiin, jo pienetkin epäpuhtausmäärät rikkiyhdisteitä syöttövirrassa voivat deaktivoida Ni -katalyytin YSZ-materiaalin pinnalla. Nykyinen tutkimus keskittyy vähentämään tai korvaamaan Ni-sisältöä anodissa, jotta pitkän ajan kestävyys paranisi. Modifioitu YSZ- materiaali sisältää muita materiaaleja kuten CeO_2 , Y_2O_3 , La_2O_3 , MgO , TiO_2 , Ru , Co jne. Nämä sovellukset ovat vastustuskykyisempiä rikin aiheuttamalla katalyytin myrkyttymiselle, mutta keksinnöissä on havaittu suhteellisen nopeaa alkavaa materiaalin rapautumista.

Kuparipohjaisia *ceremet*-anodeja pidetään lupaavina materiaaleina hiilipinnoittumiselle, koska ne ovat inerttejä hiilelle ja stabiileja tyypillisissä SOFC:n hapen osapaineissa ($p\text{O}_2$). Cu-Co -bimetallianodit ovat erityisesti osoittaneet kestävyyttä hiilipinnoittumista vastaan, kun ne on altistettu puhtaalle metaanille CH_4 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ -asteen lämpötilassa.

Cu-CeO₂-YSZ materiaalilla on suurempi sähkökemiallinen hapetusnopeus verrattuna Ni-YSZ, kun materiaaliin ajetaan häkää (CO) ja tuotekaasua. Lisäksi se voi saavuttaa paremman tehon jopa käyttämällä häkää (CO) kuin vetyä (H₂), sen jälkeen kun siihen lisätään koboltti (Co)-katalyyttiä. Oksidiset anodit, kuten zirkoniapohjaiset fluoriitit ja perovskiiitit, ovat myös käytännössä korvaamassa Ni-kerami -anodimateriaaleja hiilipinnoittumisen estämiseksi. Kromiittia eli La_{0.8}Sr_{0.2}Cr_{0.5}Mn_{0.5}O₃ (LSCM) on käytetty anodimateriaalina ja se on osoittautunut suhteellisen vertailukelpoiseksi materiaaliksi verrattuna Ni-YSZ-cermet anodeihin. LSCM:tä on edelleen kehitelty imegroimalla kuparia (Cu:ia) ja sputteroimalla platinaa (Pt) virrankerääjäksi. [28]

Elektrolyytti

Elektrolyytti on tiivis kerros keraamia, joka johtaa oksidi-ioneja. Sen sähkönjohtokyvyn on pysyttävä mahdollisimman matalana, jotta vuotovirtojen määrä jäisi minimaaliseksi. SOFC:n korkea toimintalämpötila mahdollistaa oksidi-ionien liikkuvuuden kennon riittävän hyvän toiminnan takaamiseksi. Kun SOFC materiaali saavuttaa alemman raja-arvolämpötilan eli noin 600 °C, elektrolyytissä alkaa muodostua suurempi ionien liikkeen vastustuskyky, joka vaikuttaa materiaalin toimintaan. Yleisimmät elektrolyyttimateriaalit ovat

- yttrium stabiloitua zirkoniumoksidia (YSZ) (usein 8% muodossa 8YSZ),
- skandium stabiloitua zirkoniumoksidia (ScSZ) (tavallisesti 9 mol% Sc₂O₃ – 9ScSZ) ja
- gadolinium seostettuutta ceriumoksidia (GDC).

Elektrolyyttimateriaalilla on suuri merkitys vaikutus kennon toimintaan. Materiaalin toimintaa heikentävät reaktiot YSZ-elektrolyytin ja modernien katodimateriaalien, kuten lantaani strontium koboltti ferriittien, välillä ja on havaittu, että niitä voidaan ehkäistä ohuiden (<100 nm) ceriumdiffusiokerrosten avulla. [28]

Mikäli oksidi-ionien johtavuus SOFC -materiaalissa saadaan pidettyä korkeana jopa matalammissa lämpötiloissa (nykyinen tavoite on noin 500 °C), materiaalien valintamahdollisuudet SOFC -kennoihin laajenevat ja useita nykyisin esiintyviä ongelmia voidaan ratkaista. Tietyt prosessointitekniikat, kuten ohutfilmidepositio, voivat ratkaista näitä haasteita nykyisilläkin materiaaleilla, kun:

- pienennetään liikkumismatkaa oksidi-ioneilla sekä elektrolyytin vastuskykyä, sillä vastustukyky on suhteessa johtavuuden etäisyyteen.
- tuotetaan raerakenteita, jotka ovat vähemmän vastustuskkyisiä eli esimerkiksi pilarinmuotoisia kiderakenteita.

- kontrolloimalla mikrorakenteisia, nanokiteisiä hienoja rakeita, jotta saavutetaan sähköisten ominaisuuksien hienosäätöä;
- valmistetaan komposiittirakenne, jolla on erinomaiset sähköiset ominaisuudet. [28]

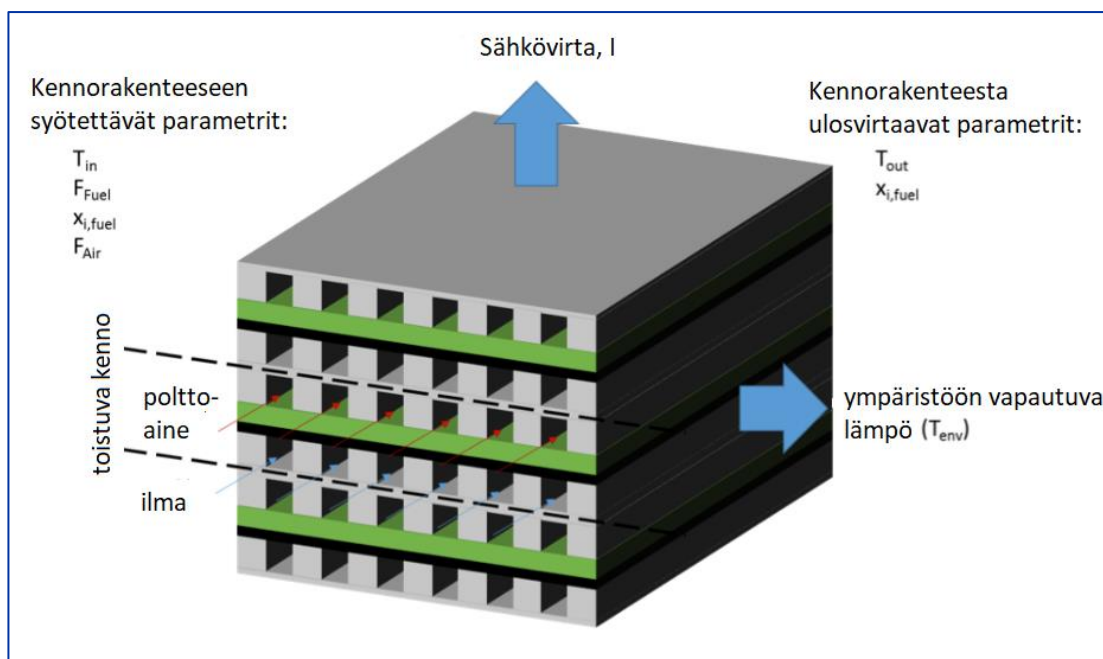
Katodi

Katodi on ohut, huokoinen kerros elektrolyytin pinnalla, missä hapen pelkistyminen tapahtuu. Katodimateriaalien tulee olla vähintään sähköisesti johtavia. Nykyisin lantaani strontium manganiitti (LSM, yleinen kaava $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$) on kaupallisesti hyödynnettävä vaihtoehto sen hyvän kilpailukyvyyn takia verrattaessa seostettuihin zirkonium elektrolyytteihin. Mekaanisesti sillä on samanlainen lämpölaajenemiskerroin kuin yttrium stabiloidulla zirkoniumoksidilla (YSZ), joten rakenteellisten murtumien muodostuminen vähenee. Myös LSM:lla on vähäinen kemiallinen reaktiivisuus YSZ:n kanssa, mikä puolestaan kasvattaa materiaalien käyttöikä. Valitettavasti lantaanistrontium manganiitti (LSM) on huono ionijohdin, mistä johtuen elektrokemialliset aktiiviset reaktiot rajoittuvat kolmoisfaasin rajapinnalle (TPB, triple phase boundary), jossa elektrolyytti, ilma ja elektronimateriaali kohtaavat. Lantaanistrontium manganiitti (LSM) toimii myös katodimateriaalina korkeissa lämpötiloissa, mutta sen toimintakyky laskee nopeasti, jos operointilämpötilaa lasketaan alle 800 °C:een.

Mikäli halutaan kasvattaa reaktioaluetta, potentiaalisen katodimateriaalin tulee pystyä johtamaan sekä elektroneja että happi-ioneja. Komposiittikatodimateriaaleja, jotka on valmistettu LSM:sta ja YSZ:sta, on käytetty kasvattamaan tämän kolmoisfaasipinnan laajuutta. Seostettuja ioneja/elektronisia johtavia keraameja (MIEC), kuten perovskiittia LSCF, on tutkittu erilaisissa lämpötiloissa SO-kennoissa, koska ne ovat aktiivisempia ja voivat kasvattaa reaktion aktivointienergiaa. [28]

Väliseinämateriaali

Väliseinämateriaali, joka on jokaisen kennon välissä, voi olla joko metallinen tai keraaminen. Sen tarkoituksena on yhdistää jokainen kenno sarjaksi, jotta jokaisen kennon tuottama sähkö voidaan yhdistää. Koska väliseinään kohdistuu korkeassa lämpötilassa sekä hapettava että pelkistävä puoli kennosta, sen tulee olla erittäin stabiilia materiaalia. Tästä syystä keraamit soveltuvat metalleja paremmin väliseinämateriaaliksi. Keraamimateriaalit ovat valitettavasti huomattavasti kalliimpia metalleihin verratuina. Nikkeli- ja teräspohjaiset seosmetallit ovat osoittautumassa lupaavammiksi väliseinämateriaaleiksi matalammissa kennolämpötiloissa (600 – 800 °C). Tällöin väliseinämateriaalina, joka on kontaktissa Y8SZ:n kanssa voidaan käyttää esimerkiksi metalliseosta 95Cr-5Fe. Keraami-metallikomposiitit, joita kutsutaan “Cermet”, on myös tutkittu, sillä niillä terminen stabiilisuus korkeissa lämpötiloissa on hyvä ja niiden sähkönjohtavuus on erinomainen. [28]



Kuva 41. SOFC polttokennopiipun rakenne.[29]

Polttokennojen häviöt

Häviöt polttokennossa ovat jännitteen menetyksiä, jotka johtuvat materiaalien epäpuhtauksista, mikrorakenteesta ja polttokennon rakenteen suunnittelusta. Häviö johtuu sähkövastuksesta, jonka aiheuttavat happi-ionit liikkuessaan elektrolyytin läpi ($iR\Omega$), sähkökemiallisista aktivoitumiskynnyksistä anodilla tai katodilla ja lopulta väkevyyden aiheuttamisesta häviöistä eli etteivät kaasut pääse kulkeutumaan huokoisen materiaalin läpi anodille ja katodille (merkitään η_A anodilla ja η_C katodilla). Kennojännite voidaan laskea seuraavan kaavan avulla:

$$V = E_0 - iR_w - \eta_{katodi} - \eta_{anodi}, \text{ missä}$$

E_0 = reaktanttien Nernstin potentiaalit

iR_w = Thévenin ekvivalentti vastusarvo sähköä kuljettaville osille kennossa

η_{katodi} = häviöt katodilla

η_{anodi} = häviöt anodilla

SO-kennoissa on usein tärkeää keskittyä sähköisiin ja konsentraatiohäviöihin, koska korkeissa lämpötiloissa ei tapahdu paljoakaan aktivoitumishäviötä. Joka tapauksessa, kun saavutetaan alempi raja SO-kennon operointilämpötilassa ($\sim 600^\circ\text{C}$), tulevat myös aktivoitumishäviöt merkityksellisiksi. [28]

Yllä esitettyä yhtälöä käytetään SO-kennon jännitteen määrittämiseksi (itse asiassa polttokennon jännitteen määrittämiseen yleisesti). Kaava pitää melko hyvin yhtä kokeellisten mittausten kanssa.

1) Ohmiset häviöt

Ohmiset häviöt SO-kennossa aiheutuvat ionien johtumisesta elektrolyytin läpi ja sähköisestä vastuksesta elektronien virratessa ylimääräisessä sähköisessä virtapiirissä eli sähkövirran vastusta elektrolyytin, GDL:n ja elektrodin yli.

Tämä on materiaalien kiderakenneominaisuudesta ja osallistuvien atomien ominaisuuksista johtuvaa. Ionisen johtuvuuden maksimoimiseksi voidaan käyttää useita keinoja. Ensiksi operointi korkeammassa lämpötilassa voi merkittävästi pienentää ohmisia menetyksiä. Ylimääräiset seostusmenetelmät kiderakenteen edelleen hienontamiseksi ja epäpuhtauksien konsentraation kontrollointi voivat olla merkityksellisiä ionisen johtuvuuden parantamisessa. Toinen keino pienentää ohmista vastusta on pienentää elektrolyyttikerroksen paksuutta. [30]

2) Konsentraatiohäviöt

Konsentraation eli väkevyyden aiheuttamat häviöt johtuvat käytännössä aineen siirtymisen rajoittumisesta kennossa, mikä näkyy jännitteen laskemisena, koska reaktanteilla on väkevyyseroista kemiallisesti aktiivisissa paikoissa. Konsentraatiohäviöt eli massan siirtämisestä aiheutuvat häviöt tulevat merkityksellisiksi, kun polttokennosta yritetään ottaa suuria virtoja.

Konsentraatiohäviöt johtuvat pääosin reaktiokaasun loppumisesta ja veden poiston ongelmista. Polttoaineen tarve on suorassa suhteessa jännitteeseen. Suuria virtoja otettaessa polttoainetta tarvitaan lisää. Ellei sitä ole saatavilla sen osapaine romahtaa, jolloin jännite putoaa yhtä nopeasti. Ellei reaktiotuotteena syntyvää vettä pysytä poistamaan kennosta, se tukkii aktivaatiopaikat estäen polttoaineen/hapettimen pääsyn niihin. [30]

Väkevyyden aiheuttamaa häviötä voi tapahtua sekä anodilla että katodilla. Anodilla tilanne on ongelmallisempi, koska siellä voi muodostua vedyn hapettuessa höyryä, joka laimentaa polttoainevirtausta sen kulkiessa kennon läpi. Tähän häviöön voidaan vaikuttaa pienentämällä reagoivien aineiden osuuksia tai kasvattamalla elektrodin huokoisuutta.

3) Aktivoitumishäviöt

Aktivoitumishäviöt johtuvat sähkökemiallisien reaktioiden kinetiikasta. Jokaisella reaktiolla on tietyn suuruisen aktivoitumiskynnys, joka tulee ylittää, jotta reaktio alkaa etenemään.

Aktivoitumiskynnys johtuu reaktiaskelten joukossa olevista kinetiikkaa rajoittavista reaktiovaiheista. Aktivoitumishäviöihin voidaan vaikuttaa mikrorakennetta optimoimalla.

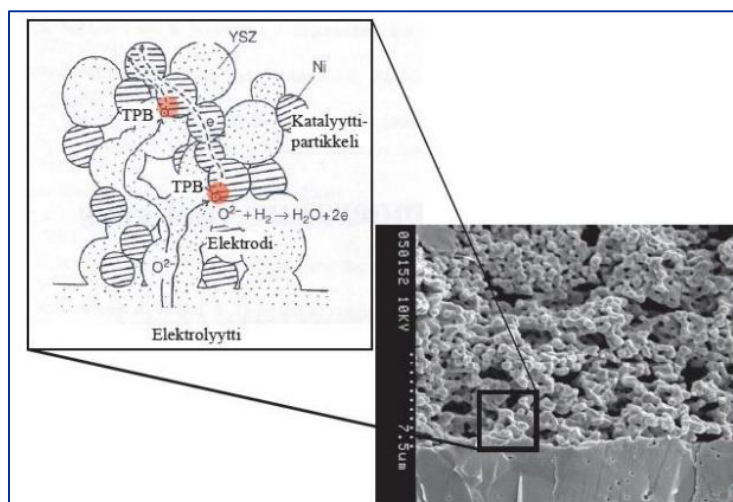
Sähkökemiallinen reaktio tapahtuu niin kutsutussa kolmifaasirajapinnassa.

Kolmifaasirajapinnan (TPB) eli rajapinnan, jossa huokoinen, ioninen ja sähköisesti johtava materiaali kohtaavat, määrä on suoraan suhteessa aktivoitumisrajapinnan pituuteen.

Elektrodin ja elektrolyytin välinen alue ei ole yhtä ainetta, joka vaihtuu seuraavaan.

Elektrolyytin pinta-alueeseen sekoitetaan samaa ainetta, josta elektrolyytti koostuu. Tätä molemmista aineista koostuvaa huokoista aluetta kutsutaan kaasudiffuusioerrokseksi (engl. Gas Diffusion Layer, GDL).

Katalyyttimateriaali kiinnitetään kantaja-aineen (yleisimmin hiilimustan) avulla mahdollisimman pieninä partikkeleina GDL:n pinnalle, jolloin saadaan aikaan mahdollisimman monta TPB:tä.



Kuva 42. Kolmifaasirajapinta [30]

Sähkökemiallinen reaktio, kuten polttokennoreaktio, tapahtuu elektrodin ja elektrolyytin rajapinnassa. Usein tämä ei kuitenkaan nopeuden puolesta riitä, vaan reaktiota kiihdyttämään tarvitaan katalyytti. Katalyytin tehtävä on pienentää aktivaatioenergiaa. Yleisin käytetty katalyyttimateriaali SOFC-kennoissa on nikkeli ja PEM polttokennoissa platina.

Mitä laajempi kennossa on TPB-pituus sitä enemmän reaktioita voi tapahtua ja syntyy vähemmän aktivoitumishäviöitä. Aktivaatiohäviöitä voidaan vähentää seuraavilla tavoilla: nostamalla kennon lämpötilaa, nostamalla reagoivan aineen konsentraatiota, nostamalla

toimintapainetta, nostamalla katalyytin aktiivisuutta sekä nostamalla elektrodin karkeutta (pinta-alaa). [28, 30]

Kiinteän oksidi polttokennojen (SOFC) ryhmittely

Erityyppiset kiinteän oksidin polttokennot (SOFC) voidaan ryhmittää putkimaisiin eli tubulaarisiin ja levymäisiin eli planaarisiiin rakenteisiin. Molemmissa tyypeissä on yksi tai useampia yksittäisiä kennoja käsittely-yksikköä kohden. Sovelluskohteesta riippuen, putkimaisissa SO-polttokennoissa kokoluokka voi olla neulasmaisista muodoista aina 1,5 – 2 m pituisiin rakenteisiin. Näillä käynnistymisaika voi olla nopea ja energiantuotto puolestaan suuri koosta riippuen. [28]

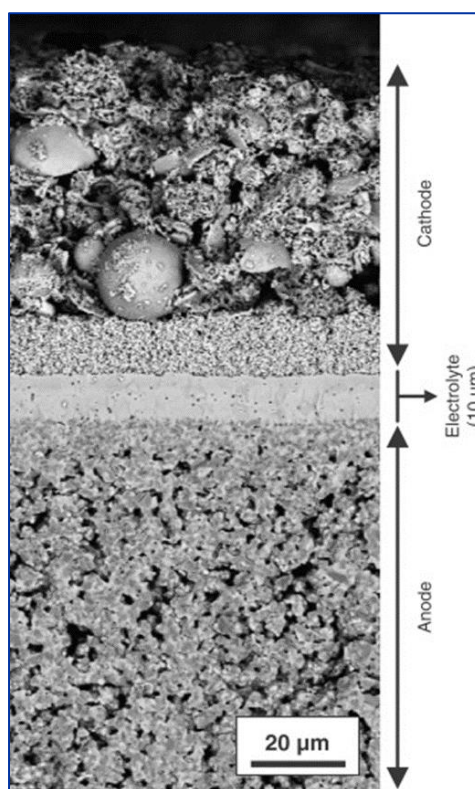
Levymäiset rakenteet voidaan jakaa yksiköihin, joissa on metallinen tai keraaminen välimateriaali tai kennoihin, joissa on joko paksut (elektrolyyttituettu) tai ohuet (elektrodituettu) membraanit. Niiden paksuudet ovat tavallisesti ohuessa 5 – 20 µm tai 150-250 µm. Teknillisesti käytökelpoisten levymäisten polttokennojen koko on 10×10cm² - 25×25cm².

Nykyisin pyrkimyksenä on rajoittaa operointilämpötilaa noin 1000°C:sta 500-800 °C:ssen, jolloin suositeltava kennorakenne olisi ohuet elektrolyyttirakenteet matalamman ohmisen vastuksen aikaansaamiseksi. Siten voitaisiin saavuttaa korkeampi energiantiheys. Tästä syystä useat kehittäjät ovat suosineet anodi-tuettua kennoa saadakseen SO-polttokennon toimimaan matalamassa lämpötila-alueessa.

Termi anodituettukkenno tarkoittaa sellaisia polttokennoja, joiden mekaaninen stabiilisuus pysyy, kun siirrytään paksusta, tiheän elektrolyyttikerroksen rakenteesta vielä paksumpaan, huokoiseen anodiin (0,5 – 1,5 mm). Viime vuosina on kehitetty SO-polttokennoja, joissa on mekaaninen tukirakenne anodin puolella, vaikkakaan se itsessään ei ole anodimateriaalia. Kaikissa näissä tapauksissa tukiaines on huokoista, jolloin kaasu pääsee siirtymään anodille ja sieltä pois.

Tukirakenteen materiaaleina on käytetty metallia ja metalliseoksia, komposiitteja kuten Ni/8YSZ -keraamimetalliseosta tai jopa kuumankestäviä keraameja. Eristävien aineiden tapauksessa, tukirakenne vain päästää kaasun anodille ja virran kulku on mahdollistettava substraatin pintaa pitkin sen sijaan, että virta kulkisi rakenteen kautta. Lämpömekaaninen soveltuvuus on hankalaa saada aikaan metallisilla tukiaineilla, koska niillä on usein suuremmat lämpölaajenemiskertoimet kuin muilla kennon komponenteilla. Lisäksi voi tapahtua merkittävää korrodoitumista, jolloin kennon toiminta kyky heikkenee.[28]

Anoditukirakenteen päälle on pinnoitettu muut polttokennon komponentit järjestyksessä anodi-elektrolyytti-katodi. Pinnoitteet valmistetaan tavallisesti sillkipainotekniikalla, lietepinnoituksella, märkäruiskutuspinnoituksella tai ilmanpaineisena plasmaruiskutuksella. Vaikka anoditukirakenne olisi valmistettu Ni/8YSZ -anodimateriaalista, on havaittu paremmin toimivaksi sähkökatalyyttisen kaasujen muuntokyvyn toiminnan kannalta, että valmistetaan erillinen anodikerros, joka on hienojakoisempi rakenteeltaan. Kerroksien paksuudet ovat tyypillisesti 5–20 μm anodille, 10–20 μm elektrolyytille ja 50–80 μm katodille. (kuva 43) Nykyisin katodi saattavat kootua myös kahdesta kerroksesta, sähkökemiallisesti hienojakoisesta elektrolyyttimateriaali komposiitista ja sähkökatalyyttistä (lantaanimanganiitista) sekä karkeampijakoisesta virrankeräyskerroksesta, joka päästää ilman ja elektronit komposiittikerrokseen. [31]



Kuva 43. Kerroksellinen rakenne SOFC -kennossa.

Biologisen käsittelyn yhteydessä tuotettu biokaasu sisältää useita erilaisia epäpuhtauksia (esim rikkiyhdisteitä, siloksaaneja, halogeeneja, tervayhdisteitä jne.) astukseen. Vetykloridi erityisesti rajoittaa sähkökemiallisia prosesseja. Nämä voivat vaikuttaa kiinteän oksidin polttokennojen toimintakykyyn. Muun muassa vetysulfidi vaikuttaa voimakkaasti häviöihin, koska se muodostaa nikkelisulfidia elektrodien pinnoille vaikuttaen massansiirtovastusta.

Oktametyyliisyklotetrasiloksaani vaikuttaa myös SOFC:n toimintakykyyn jo hyvin pienissä pitoisuuksissa. [32]

3) MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)

MCFC-kennon eli sulakarbonaattipolttokennon toiminta perustuu sen nestemäisenä olevan elektrolyytin kykyyn johtaa karbonaatti-ioneja. Elektrolyytin saavutettua 650 °C:n lämpötilan sen sisältämät suolat sulavat ja muuttuvat karbonaatti-ioneja johtaviksi. Katodille syötetty hiilidioksidi ja happi osallistuvat reaktioon elektronivirran avulla, jolloin syntyneet karbonaatti-ionit alkavat virrata katodilta anodille. Anodilla karbonaatti-ionit reagoivat vedyn kanssa muodostaen vesihöyryä, hiilidioksidia sekä elektroneja. Prosessissa syntyneet elektronit ja osa hiilidioksidista johdetaan takaisin katodille, jossa ne osallistuvat uuteen reaktioon. MCFC-kennon polttoaineen tulee sisältää hiiltä, mutta muutoin sen ominaisuudet vastaavat SOFC-kennon ominaisuuksia.[28]

Tehdaslaitoksen energiatase

Integroidut biokaasu-polttokennolaitokset jätevedenkäsittelylaitosten ja muiden bioenergian käsittelylaitosten yhteydessä ovat tulossa markkinoille varteenotettavaksi vaihtoehdoksi korkean lämpötilan polttokennojen avulla hajautettuun energiantuotantoon (voimantuotantoon muutamasta kW:sta aina MW tuotantotasolle)

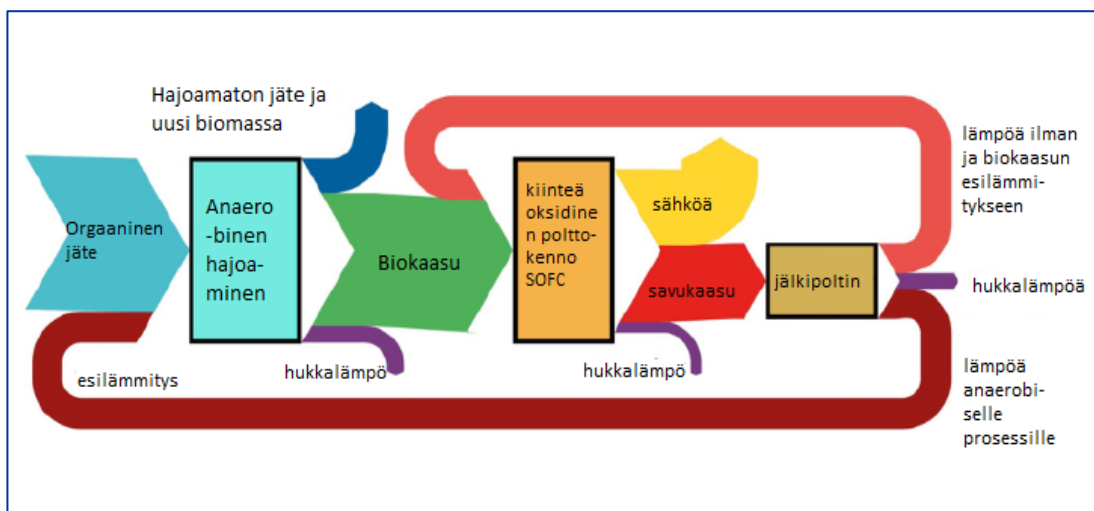
Korkean lämpötilan polttokennotekniikat, kuten sulan karbonaatin polttokennot (MCFC) ja kiinteää oksidia sisältävät polttokennot (SOFC) soveltuvat erittäin hyvin hiilipitoisten polttoaineiden kanssa, koska ne pystyvät joko suoraan tai epäsuorasti reformoimaan hiilen energiaksi. Erityisesti verrattaessa moottoreihin ja kaasuturbiineihin systeemit, jotka perustuvat SOFC -teknologiaan, omaavat korkeimman konversiotehokkuuden kaasumaisten, hiilipitoisten polttoaineiden (esim. maakaasu, haihdutinkasut, ja biomassasta valmistetuille kaasuille) muuntamiseksi sähköenergiaksi. Samalla päästöt kuten CO₂ ja hyvin matalat ilmakehää pilaavat yhdisteet (SO_x; CO, VOC ja erityisesti NO_x) ovat vähäisemmät tuotettua sähkönenergiayksikköä kohden.

Polttokennoon syötettävältä kaasulta kuitenkin vaaditaan tietty puhtausaste, sillä polttoaineen sisältämät epäpuhtaudet vaikuttavat kiinteän oksidin polttokennon toiminta-aikaan.[33]

Polttokenno muuntaa kemiallisesti varastoitua energiaa suoraan sähköenergiaksi suurella termodynaamisella teholla. Erilaisia polttokennotyyppejä ovat mm. entsyymaattiset polttokennot (EFC), emäkset polttokennot (AFC), polymeerielektrolyyttiset polttokennot (PEFC), metanolia muuttavat polttokennot (DMFC), etanolia muuttavat polttokennot (DEFC) ,

fosforihappopolttokennot (PAFC), sulaa karbonaattia sisältäviä polttokennot (MCFC), ja kiinteää oksidia sisältävät polttokennot (SOFC).[34]

Suurin osa kiinteäoksidisen polttokennolaitoksen tuotantokapasiteetin pienenemisestä johtuu laitoksen mekaanisesta energiatarpeesta, ilman esilämmityksestä, esireformerista, jälkipoltimesta, veden lämmönvaihtimesta, anodin jäämäkaasujen hapettimesta sekä laitoksen sähkötaseesta, sähkönsiirron elektroniikasta, vetysulfidisensoreista ja puhaltimista. Sisäinen reformointi laskee voimakkaasti laitoksen energiantuotannon hyötysuhdetta, kun suunnitellaan täyden mittakaavan laitoksia.



Kuva 44. Energiadiagrammi anaerobisen hajotuksella valmistetun biokaasun muuntamisesta sähköenergiaksi kiinteäoksidisella polttokennolla (SOFC) [35]

2.4 BIOKAASUN KÄYTTÖ LÄMMÖNTUOTANNOSSA

Lämmitys on biokaasun ensimmäinen ja yksinkertaisin hyödyntämistapa, jolla on useiden tuhansien vuosien historia. Se voidaan toteuttaa joko keskitetyllä tai laitekohtaisella järjestelmällä. Keskitetyssä järjestelmässä lämpö tuotetaan kattilassa ja siirretään väliaineen avulla loppukulutukseen. Väliaine on useimmiten vesi, mutta voi olla myös höyry, ilma tai erilaisia tarkoituksia (kuten talviolosuhteet) varten valmistettu lämmönsiirtoneste. Laitekohtaisissa järjestelmissä siirretään lämmön sijaan biokaasu, joka poltetaan loppukulutuslaitteessa. Teollisuusmaissa keskitetyt järjestelmät ovat hallitsevia, mutta kehitysmaissa laitekohtainen käyttö on yleisempää. Lämmityslaitteiden kokoluokka vaihtelee välillä 1 kW_{th}–100 MW_{th}. Korkeimmillaan loppukulutusenergian tuotannon hyötysuhde on 95 %, mikä on saavutettavissa laitekohtaisissa ja rakennuskohtaisissa järjestelmissä.

Alimmillaan suurissa kaukolämpöverkoissa ja höyryn siirtoverkoissa voidaan jäädä 70 %:n hyötysuhteeseen johtuen siirron lämpöhäviöistä.[9]

Biokaasu lämmötuotannossa tiloilla

Biokaasuun perustuvalla sähkön ja lämmöntuotannolla (CHP, Combined Heat and Power) on olemassa useita teknisiä ratkaisumahdollisuuksia.



Kuva 45. Biokaasun käyttö lämmöntuotantoon. Oilonin kaasupolttimella varustettu lämmityskattila Markkolan tilalla. (Kuva: Tapio Patrikainen)

Tyypillisesti biokaasu on hyödynnetty joko lämmöntuotannossa tai yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa. Pelkkä lämmöntuotanto on yksinkertaisin ja edullisin ratkaisu. Tällöin biokaasureaktorissa syntyvä metaani poltetaan kaasukattilassa ja hyödynnetään lämpimänä vetenä. Lämpöä voidaan hyödyntää itse biokaasureaktorissa sekä läheisissä rakennuksissa, tuotantotiloissa tai muissa lämmönkulutuskohteissa. Yleensä lämpöä kuitenkin syntyy enemmän kuin laitoksen yhteydessä tai lähellä tarvitaan ja siten yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto kaasumootoreissa, stirling-mootoreissa tai mikroturbiineissa muodostuu kiinnostavammaksi. Tuotantotavasta ja kokoluokasta riippuen sähköntuotanto vastaa noin 30-40 % biokaasun energiasisällöstä, lopusta tulee lämpöä. [22]

Lämpökattilat tuottavat useimmiten keskuslämpöä (Kuva 7.8a) tai kaukolämpöä pääsovelluksena tilalämmitys, mutta myös teollisuuden prosessilämpöä (Kuva 7.8b). Muihin sovelluksiin lukeutuvat veden lämmitys, viljan ja muiden tuotteiden kuivaus sekä veden puhdistus. Kattilapoltossa noin 75–85 % biokaasun sisältämästä energiasta voidaan hyödyntää lämpönä, mutta biokaasun potentiaali työn tekoon eli sen exergiasisältö menetetään. Siis vaikka energiahyötysuhde on korkea, exergiahyötysuhde on nolla. Kattilapolttoon soveltuu myös verraten heikkolaatuinen biokaasu, hätätapauksissa jopa

puhdistamaton, mutta laitteiden kestävyuden takia vesihöyry ja ainakin osa rikistä normaalisti poistetaan. Polttimista on saatavissa korkea rikkipitoisuutta kestäviä malleja, jolloin erilliseltä rikin puhdistamiselta vältytään eli biologinen pelkistys reaktorissa riittää.



Kuva 46. Biokaasukäyttöisiä kattiloita: a) Kaksi 90 kWt lämpökattilaa ammattiopisto Lappian Tervolan yksikön keskuslämmitysjärjestelmässä. b) 1,4 MWt :n kattila teollisen prosessilämmön tuotantoon. (Kuvat: Ari Lampinen) [9]

Laitekohtaisista lämmityssovelluksista yleisin on kehitysmaissa kotitalous- ja kyläkokoluokan reaktoreiden kaasua polttava keitin. Niitä on käytössä yli 100 miljoonaa, joten ne ovat selvästi yleisin biokaasun hyödyntämislaite globaalisti. Muita esimerkkejä ovat lämmittimet, liedet (Kuva 47), uunit ja grillit.[9]



Kuva 47 7.9 Laitekohtaisia biokaasun lämmityskäytön teknologioita Biokaasuliesi Haminan Energian paikallisessa metaanijakeluverkossa. (Kuva: Ari Lampinen) [9]

Lämpöä tuotetaan paitsi erillisesti myös CHP-järjestelmissä (Combined Heat and Power) yhdessä sähkön kanssa eli hyödynnetään sähköntuotannon hukkalämpöä. Tällöin lämpö pyritään hyödyntämään matalan lämpötilavaatimuksen sovelluksissa, sillä lämmön talteenotto korkeassa lämpötilassa alentaa sähköntuotannon hyötysuhdetta.

Biokaasulaitoksen lämmön tarve (Kuva 48), kuten reaktoreiden lämmitys ja hygienisointi, toteutetaan usein biokaasulla joko erillistuotantona tai CHP:nä. Se tuo laitoksiin lämpökuorman, joka helpottaa CHP-sähköntuotannon investointia, mutta vähentää myytävän energian määrää. Resurssitehokkuussyistä eräissä maissa biokaasulaitosten lämmitystarvetta pyritään kattamaan tarkoitukseen paremmin soveltuvalla aurinko- ja puuenergialla, jolloin kaikki tuotettu biokaasu voidaan myydä lämmitystä arvokkaampiin tarkoituksiin. Saksassa sellaisille toteutuksille myönnetään tukijärjestelmissä hyödynnettäviä teknologiabonuksia.[9]



Kuva 48 7.10 Biokaasureaktorin lämmitysputkistoa Biokympin laitoksella Kiteellä (vasemmalla ja keskellä) ja hygienisointiyksikön lämmönvaihtimia NSR:n biokaasulaitoksella Helsingborgissa (oikealla). (Kuvat: Ari Lampinen) [9]

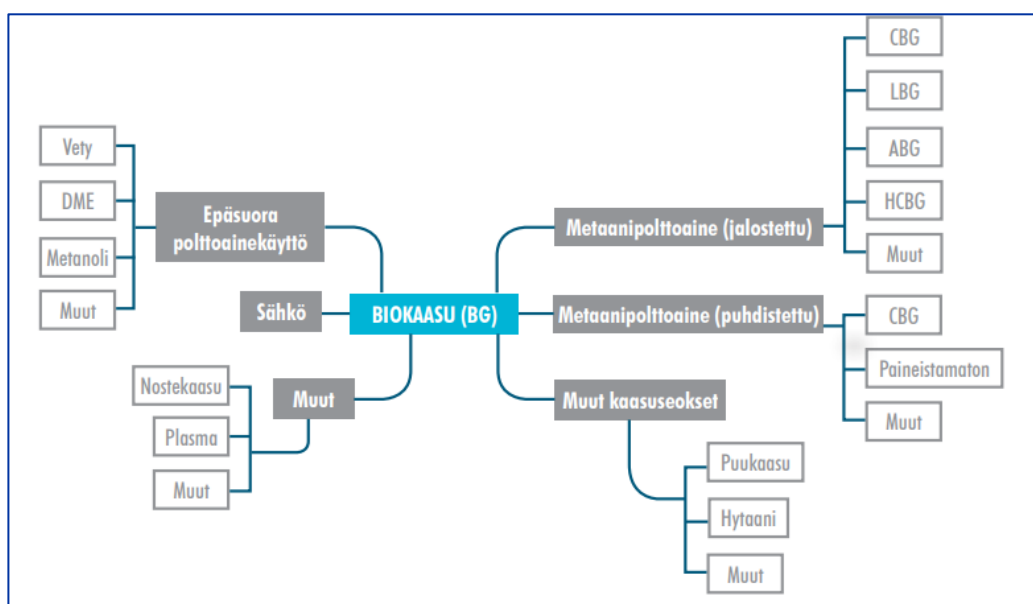
2.5 BIOKAASUN KÄYTTÖ LIIKENNepOLTTOAINEENA

Biokaasun käytöllä polttoaineena on kiistattoman positiiviset ympäristövaikutukset. Se on 100 % uusiutuva ja siten hiilineutraali polttoaine, sen poltosta ei synny ollenkaan hiukkaspäästöjä eikä se sisällä rikkiä tai raskasmetalleja.

Biokaasulla on erinomaiset ominaisuudet polttoaineena. Yksi kuutio metaania vastaa energiasisällöltään yhtä litraa dieselöljyä, ja sen tuottamiseen tarvitaan esimerkiksi noin 7-8 kg biojätettä.

Auton polttoaineena puhdistettu biokaasu voi vähentää elinkaaren aikaisia kasviuonekaasupäästöjä jopa 85-95 % fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna. Tämä luku huomioi polttoaineen koko elinkaaren raaka-aineiden keräyksestä, tuotannosta ja jakelusta aina käyttöön asti.[1]

Biokaasua voidaan käyttää liikenne- ja työkonepolttoaineena monella eri tavalla (Kuva 49). Sitä voidaan hyödyntää puhdistettuna, siis ilman jalostusta, mikäli ajoneuvot muunnetaan tarkoitusta varten. Ajoneuvoissa hyödynnetään samanlaisia moottoreita kuin sähköntuotannossa, jossa jalostettua biokaasua ei yleensä käytetä. Teknisiä esteitä puhdistetun biokaasun liikennekäyttöön ei siis ole. Se on kuitenkin harvinaista johtuen alhaisemmasta energiatiheydestä eli suuremmasta ajoneuvojen polttoainetankin tarpeesta jalostettuun biokaasuun verrattuna. Kaikki tehdasvalmisteiset metaaniajoneuvot on suunniteltu jalostettua biokaasua ja jalostettua maakaasua varten. Puhdistettua biokaasua tai puhdistettua maakaasua ei niissä voi käyttää, ellei niitä erikseen tarkoitusta varten säädetä.



Kuva 49 Biokaasun tekniset käyttömahdollisuudet liikennepolttoaineena.[9]

Metaani on ainut polttoaine, joka sopii kaikkiin liikenteessä käytettäviin moottorityyppeihin ja kaikkiin liikennemuotoihin (Kuva 50). Selvästi yleisin liikenteen moottorityyppi on otto-moottori. Biokaasun oktaaniluku on yli 130, joten se on moottoriteknisesti paras otto-moottoripolttoaine.

Metaaniajoneuvot eli MGV:t (methane gas vehicle) jaetaan Taulukon 2 mukaisiin tyyppisiin niiden polttoainekäyttömahdollisuuksien mukaan. Ajoneuvo voi kuulua useampaan kuin yhteen tyyppiin. Kaikki hybridit ovat lisäksi mono-, bifuel-, multifuel- tai dualfuel-ajoneuvoja. Dualfuel-ajoneuvo voi olla myös multifuel-ajoneuvo. Tehdasvalmisteisia metaaniajoneuvomalleja löytyy lähes 2000, suurin osa ottomoottorilla varustettuja, mutta

edustaen myös lukuisia muita moottorityyppejä. Jälkimuunnoksella mikä tahansa ajoneuvo saadaan kulkemaan metaanilla, yleensä alkuperäisen polttoaineen lisäksi. Metaani on kolmanneksi eniten käytetty liikennepolttoaine globaalisti bensiinin ja dieselöljyn jälkeen eli se on eniten käytetty vaihtoehtoinen polttoaine. [9]



Kuva 50 Esimerkkejä erilaisista metaanikäyttöisistä ajoneuvoista maantie-, raide-, vesi-, ilma- ja avaruusliikenteessä. Ne edustavat seuraavia moottorityyppejä: otto-, 2-tahti-, diesel-, suihku- ja rakettimoottori, höyry- ja kaasuturbiini sekä polttokenno. (Lampinen 2012) [9]

Yleisimmin biokaasu varastoidaan ajoneuvoissa paineistettuna (CBG = Compressed BioGas). Varastointipaineet 200 baria ja 250 baria on standardoitu maantieajoneuvoille siten, että 250 baria on tarkoitettu vain raskaille autoille. Muissa metaaniajoneuvoissa voidaan käyttää korkeampiakin paineita, esimerkiksi 700 baria, joka on standardoitu vetyautoille. Nesteytettyä biokaasua (LBG = Liquefied BioGas) käytetään yleensä vain raskaissa ajoneuvoissa. Adsorboitua tai absorboitua biokaasua (ABG = Adsorbed/Absorbed BioGas) käytetään nykyään demonstraatioina. Tämä tulossa oleva teknologiaa mahdollistaa kiinteän varastoinnin.

CBG-tankkausasemat ovat joko nopea- tai hidastankkausasemia. Kaikki julkiset ja osa yksityisistä asemista on nopeatankkausasemia, joissa tapahtuman kesto on minuutteja (Kuva 51). Nopeus johtuu siitä, että kaasu tulee suoraan korkeapaineisesta varastosta. Joissakin niistä päävarasto on LBG:nä, josta sitä höyrystetään CBG-väliavarastoon. Näitä kutsutaan LCBG-asemiksi. LBG-asemat ovat aina nopeatankkausasemia. Osa niistä sisältää myös CBG-tankkausmahdollisuuden (LBG+LCBG-asema).[9]

Taulukko 2 Metaaniajoneuvotyypit.[9]

MGV-tyyppi	Kuvaus	Eräitä voimanlähdevaihtoehtoja	Muita energianlähteitä
Monofuel	vain metaanipolttoaine: lämpövoimakone	otto, 2-tahti, wankel, stirling, kaasuturbiini, suihkumoottori, rakettimoottori	hytaani
FCEV	vain metaanipolttoaine: polttokenno	polttokenno + sähkömoottori	ei
Hybridi	vain metaanipolttoaine: lämpövoimakone + muu voimanlähde	HEV: otto/kaasuturbiini + sähkömoottori; CAV: otto + paineilmamoottori	hytaani
Bifuel	valinnaisesti 2 polttoainetta, 2 polttoainejärjestelmää	otto, höyryturbiini	bensiini, polttoöljy
Dualfuel	2 polttoainetta yhtä aikaa, 2 polttoainejärjestelmää	diesel	dieselpolttoaineet
FFV	vähintään 2 polttoainetta ja niiden sekoitukset, 1 polttoainejärjestelmä	otto	vety, propaani, puukaasu
Trifuel	3 polttoainetta	otto	etanoli, metanoli
Multifuel	vähintään 4 polttoainetta	otto, höyryturbiini	kaikki polttoaineet
Ladattava hybridi	metaanipolttoaine ja muu energianlähde	PHEV: otto + sähkömoottori; CAV: otto + paineilmamoottori	sähkö, paineilma
Kombi	moottorin hukkalämmöstä lisätehoa toisella lämpövoimakoneella	kaasuturbiini + höyryturbiini, otto + ORC-turbiini	



Kuva 51 Nopeatankkausasemia: a) Jepuan tankkausasema. b) LBG+LCBG-asema Göteborgissa (CBG vasemmalla, LBG keskellä). (Kuvat: Tapio Patrikainen ja Ari Lampinen) [9]

Hidastankkausasemissa tankkaus kestää tunteja ja suoritetaan tyypillisesti yön yli (Kuva 52). Niissä ei ole korkeapaineista välivarastoa, vaan paineistus tehdään tankkauksen yhteydessä. Ne voivat olla erittäin suuria, kuten bussivarikoiden asemat Ruotsissa, mutta pienimmät ovat omakotitaloihin tarkoitettuja kotitankkausasemia.



Kuva 52 a) Hidastankkausasema suurella bussivarikolla Linköpingissä. b) Kotitankkausasema Laukaassa. (Kuvat: Ari Lampinen ja Tapio Patrikainen) [9]

Suomessa oli vuoden 2014 lopussa 24 julkista biokaasun tankkausasemaa, jotka kaikki olivat CBG100-asemia eli myivät 100 % biokaasua (Lampinen 2014). Niiden lisäksi Suomessa oli kaksi suurta yksityistä asemaa sekä kotitankkausasemia ja mobiiliasemia, joten yhteensä biokaasua voitiin tankata yli 50 asemalta. Kaikki liikennebiokaasu oli jalostettua ja peräisin yhdeksästä jalostamosta.[9]

2.6 MUU BIOKAASUN ENERGIÄKÄYTTÖ

Biokaasun energiakäytön mahdollisuudet eivät rajoitu edellisissä alaluvuissa esiteltyihin lämmitykseen, sähkön tuotantoon ja ajoneuvomoottorikäyttöön. Muut tavat ovat nykyään harvinaisia, mutta osalla niistä on ollut suuri historiallinen rooli ja osa niistä voi tulevaisuudessa nousta merkittävään asemaan. Esimerkkejä ovat:

- valaistus
- jäähdytys
- mekaaninen energia
- kaasuseoskäyttö
- epäsuora energiakäyttö

Kaasulamppu on kaasumaisten polttoaineiden ensimmäinen laajamittainen moderni käyttösovellus. Sillä on erittäin suuri historiallinen merkitys, koska se johti kaasun tuotannon (kaasulaitokset) ja siirron (kaasuverkot) teollisen infrastruktuurin luomiseen. Ne luotiin alun perin 1800-luvun alusta alkaen kaupunkikaasua (josta osa on metaania) varten, mutta ne loivat pohjan myös metaanipolttoaineiden laajamittaiselle hyödyntämiselle 1880-luvulta alkaen. Valaistus oli ensimmäinen biokaasun hyödyntämistapa Suomessa. Helsingin jätevedenpuhdistamon yhteydessä olevan biokaasulaitoksen kaasua ryhdyttiin 1930-luvulla siirtämään Helsingin kaupunkikaasuverkossa erilaisiin käyttötarkoituksiin, joista kadunvarsien ja sisätilojen valaistus oli tärkein (Kuva 53). Nykyään pienet kaasulamput yhdistettynä suoraan kehitysmaiden kotitalouskokuoluokan tai kyläkokuoluokan biokaasureaktoreihin ovat tärkein biokaasun valaistussovellus.[9]



Kuva 53 Helsingin katuvalaistus oli biokaasun ensimmäinen hyötykäyttömuoto Suomessa 1930-luvulla. Tässä sovelluksessa biokaasua käytettiin sekoitettuna kaupunkikaasun kanssa. (Kuva: Ari Lampinen) [9]

Absorptiolämpöpumpputeknologialla jäähdytyksen energia saadaan lämmöstä. Biokaasulla voidaan tuottaa jäähdytysenergiaa joko suoraan absorptiolämpöpumppujärjestelmässä polttamalla (Kuva 54a) tai tuomalla sinne lämpöä esimerkiksi biokaasusähkön tuotannon hukkalämmöllä (Kuva 54b). Sähköntuotannon hukkalämmön viilennyskäytöllä on merkittävät tulevaisuuden mahdollisuudet, sillä absorptiolämpöpumput toimivat myös alhaisilla lämpötiloilla. Tämä teknologia soveltuu paitsi rakennuskohtaisesti myös taajamien kaukokylmäjärjestelmiin, jolloin ne tarjoavat CHP-laitoksille ympärivuotisen kuorman.[9]



Kuva 54 Biokaasukäyttöisiä absorptiokylmäkoneita: a) Biokaasua polttavia jääkaappeja Haminassa. b) Biokaasusähkön tuotannon hukkalämpöä tilojen viilennykseen hyödyntävä absorptiolämpöpumppu Kouvolan seudun ammattiopiston Biosampo-koulutuskeskuksessa Anjalassa. (Kuvat: Ari Lampinen) [9]

Biokaasua käytetään mekaanisen energian tuotantoon paitsi ajoneuvoissa myös esimerkiksi pumppuihin ja puhaltimiin suoraan kytkettyjen moottoreiden kautta. Se on nykyään harvinaista sähkömoottoreiden vallitsevan aseman takia. Suoran mekaanisen käytön etuna on riippumattomuus sähköstä eli se vähentää järjestelmän haavoittuvuutta ja soveltuu alueille ja tilanteisiin, joissa sähköä ei ole saatavilla. Toinen etu on sähkön tuotannon ja siirron häviöiden välttäminen. Biokaasun paineistettu varastointi luo epäsuoran mekaanisen energian käyttösovelluksen biokaasun siirrossa. Sekin vähentää riippuvuutta sähköjärjestelmistä ja niihin aina sisältyvää haavoittuvuutta.

Biokaasua voidaan sekoittaa muiden energiakaasujen kanssa monista syistä (Kuva 49). Hytaani eli metaanin ja vedyn seos antaa mahdollisuuden vedyn hyödyntämiseen olemassa metaanijoneuvoissa (Kuva 55). Biokaasua sekoitetaan maakaasun kanssa, kun sitä kuljetetaan metaaniverkoissa. Puukaasu ja propaani ovat muita esimerkkejä biokaasun kanssa sekoitettavista kaasuista.

Biokaasun epäsuoriin energiakäyttötapoihin sisältyy sähkön lisäksi siitä valmistetut polttoaineet (Kuva 49). Näitä ovat esimerkiksi vety (Kuva 55b), DME ja metanoli. Niiden valmistus ei edellytä jalostusta.[9]



Kuva 55 Kaksi erilaista biokaasun ja vedyn yhdistämistapaa: a) Hytaanin tankkauspaikka Ruotsissa. b) Kaatopaikkakaasusta höyryreformoinnilla valmistetun vedyn tankkausasema Norjassa. (Kuvat: Ari Lampinen) [9]

2.7 SIVUTUOTTEET JA MUUT KÄYTTÖSOVELLUKSET

Energiakäytön lisäksi biokaasua voidaan hyödyntää materiaalina, kemianteollisuuden raaka-aineena monenlaisten tuotteiden valmistuksessa. Biokaasua voidaan hyödyntää myös muiden kuin energiaominaisuuksiensa takia. Tällaisia ominaisuuksia ovat mm. keveys ja kylmäkestävyys.

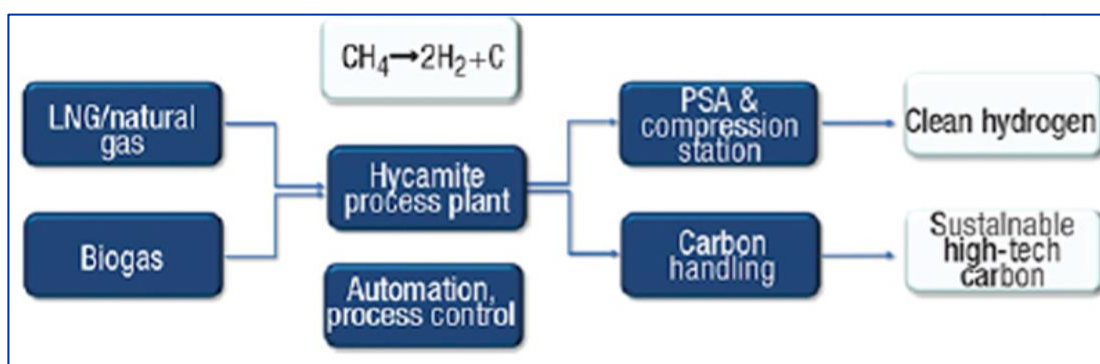
Biokaasun tuotannon ja käsittelyn yhteydessä on erotettavissa sivutuotteita. Näistä mädätysjäätös on olennaisen tärkeä osa biokaasuteknologian tarjoamaa resurssien kierrätystä. Sen lisäksi on erotettavissa muitakin sivutuotteita, kuten hiilidioksidia (CO_2), vetyä (H_2), rikkiä (S) ja typpeä (N_2). Kaatopaikkakaasu poikkeaa reaktorikaasusta sikäli, että se saattaa sisältää runsaasti erilaisia hyödynnettävissä olevia komponentteja. Hiilidioksidilla on erityisen paljon potentiaalisia sovelluksia, joista kasvihuonelannoitus on yksinkertaisin. Kryojalostamoista ja LBG-tuotantolaitoksista saatavalle nesteytetylle hiilidioksidille (LCO_2) on paljon potentiaalisia markkinoita: eräs Ruotsissa sovellettu esimerkki on LCO_2 :n kylmäainekäyttö kylmäkuljetusautoissa (Kuva 56a). Korkeateknisin esimerkki on puhdistetun biokaasun hiilidioksidin hyödyntäminen Sabatier-reaktorissa tuulimetaanin tuotantoon Saksassa. Siinä sovelluksessa jalostusta ei tarvita (Kuva 56b).[9]



Kuva 56 Biokaasun sisältämän hiilidioksidin kehittyneitä hyödyntämistapoja: a) Kylmäkuljetusautojen LCO₂ -tankkauspaikka Lidköpingissä Ruotsissa. Biokaasulaitos, joka tuottaa LBG:tä ja LCO₂ :ta, sijaitsee puolen kilometrin päässä. b) Biokaasulaitoksen hiilidioksidia tuulimetaanin valmistuksessa hyödyntävä Sabatier-reaktori Fraunhofer-instituutissa Bad Hersfeldissa. (Kuvat Ari Lampinen) [9]

3 Biokaasun hyödyntäminen teollisuuden raaka-aineena

Suomalainen Hycamite TCD Technologies tuottaa päästöttömästi vetyä ja puhdasta kiinteää hiiltä pilkkomalla maa- ja biokaasun metaanimolekyylejä. Patentoitu termokatalyyttinen teknologia mahdollistaa kestävän tuotannon hajautetusti asiakkaiden luona. Käytetyt katalyytit voidaan kierrättää ympäristöystävällisesti. Vedyn ja hiilen samanaikainen tuotanto alentaa tuotantokustannuksia. Tekniikka perustuu pitkäaikaiseen soveltavaan kemian tutkimukseen Oulun yliopistossa. [36]



Kuva 57. Hycamite Oy:n tuotantoprosessikaavio [36]

Biokaasu on kaasuseos, jota tuotetaan hajottamalla orgaanista materiaalia vähähappipitoisissa olosuhteissa. Biokaasun on suurimmaksi osaksi metaania ja hiilidioksidia. Biokaasua voidaan valmistaa maatalousjättemateriaalista, lannasta, yhdyskuntajätteestä, kasvimateriaaleista, jätevedestä, viherjätteestä ja ruokajätteestä..

Metaanin polttaminen tuottaa hiilidioksidipäästöjä. Hiilen sidontaa ja varastointia (CCS) tai hiilen sidontaa ja muuntamista voidaan soveltaa vähentämään näitä päästöjä. CCS prosessissa muodostuva CO₂ sidotaan yksittäisestä päästölähteestä kuten maakaasuvoimalasta. Tämä CCS-teknologia on kuitenkin vielä melko kustannustehotonta.

Käyttämällä puhdasta, nolla-emissiolla valmistettua vetyä, voidaan vähentää tehokkaasti yhdistetyn lämmön ja sähköntuotannon (CHP) päästöjä. CHP tuottaa höyryä erilaisille teollisuussektoreille ruoantuotannosta aina kemikaalien valmistusprosesseihin. Tänä päivänä tarvittavan vedyn tuotanto on lähes kokonaan valmistettu fossiilisista polttoaineista, jolloin ilmakehään vapautuu hiilidioksidia. Kansainvälisen Energijärjestön (IEA) mukaan maailmanlaajuisesti 6% maakaasusta ja 2% hiilestä käytetään vedyn tuotantoon.

Myös hiilidioksidin sidontaan ja pysyvään varastointiin esimerkiksi käytettyihin öljylähteisiin maankuoren sisälle on vain rajalliset mahdollisuudet. Hiilidioksidin pelkistäminen tulli- tai

aurinkoenergialla valmistetun vetyn kautta metaaniksi (CH₄), tuottaa raaka-ainetta hiilifraktioiden valmistamiselle. Hiili on hyvin turvallinen ja monipuolinen materiaali. Tutkijat löytävät uusia sovelluskohteita puhtaalle hiilelle. Useat merkittävät tekniset keksinnöt hyödyntävät puhdasta hiiltä, jolla on useita eri kiderakenteita eli allotrooppeja. Esimerkiksi grafiitti sekä timantti koostuvat pelkästään puhtaasta hiilestä. Grafiitti on eräs pehmeimmistä materiaaleista kun taas timantti on eräs kovimmista materiaaleista.[36]

Tämä ero johtuu näiden materiaalien erilaisesta kiderakenteesta. Hiilen laaja allotrooppien määrä antaa mahdollisuuden käyttää puhdasta hiiltä hyvin monenlaisissa kohteissa.

Muutamia hiilen muotoja ovat:

grafeeni
 hiilinanputket
 grafiitti
 timantti
 hiilimusta
 fulleriini
 aktiivihili

Tietyillä allotroopeilla on kasvavaa käyttöä akkutekniikassa. Tietyjä hiilen muotoja voidaan soveltaa tehokkaissa ja tarkkoissa sensoreissa, nopeammassa ja tehokkaammassa elektroniikassa, taipuisissa näytöissä, tehokkaissa aurinkopaneeleissa nopeammassa DNA-sekvenssoinnissa sekä lääkeaineiden komponentteina.

Puhdasta hiiltä voidaan käyttää myös tuotteissa kuten lastien kiinnitysliinoissa, rullien päällysteissä, putkissa, profiileissa, tiivisteissä, kaapeleissa, valuisissa ja katekalvoissa.

- metaanin ja vedyn varastoinnissa
- ilman puhdistamisessa
- liuotinten puhdistuksessa
- kofeiinin poistossa
- kullan puhdistuksessa
- metallien uuttamisessa
- vedenpuhdistuksessa
- lääkkeenä
- jäteveden puhdistuksessa

- kaasunaamareiden suodattimissa
- paineilmakompressoreiden suodattimissa
- hampaiden valkaisuissa
- suolahapon valmistuksessa
- useissa muissa sovelluskohteissa [36]

4 YHTEENVETO

Energiantuotanto biokaasun avulla on vakiinnuttanut jo asemansa. Hajautetussa energiantuotannossa sen merkitys tulee kasvamaan edelleen yhdessä muiden energiaratkaisujen kanssa. Maatilakokoluokan tuotantolaitoksilla pystytään hajautetusti tuottamaan yhdistetyllä lämmön ja sähköntuotantolaitoksilla tilojen tarvitsema energia sekä ylimäärin kaasua esimerkiksi liikennepolttoaineeksi. Keskitetyt suuremmat laitokset, joihin mädätettävä biomassa kerätään lähialueilta, voivat toimia nesteytetyn kaasun yksikköinä ja siten tuottaa raskaamman liikenteen tarvitsemaa energiaa. Biokaasutuotanto lisää kotimaisen energiantuotantoa ja siten omavaraisuutta energian saannissa.

Koska sähkön kulutus kasvaa ja energiantuotanto muuttuu vihreän siirtymän edistyessä enemmän sähköenergian suuntaan, on biokaasulla mahdollisuuksia toimia osana lisääntyvän sähkötarpeen tyydyttämisessä. Mikroturbiinit ja polttokennotekniikka kohottavat hyötysuhdetta ja sähköntuotantokapasiteettia, kun sovelletaan biokaasua raaka-aineena. Tällöin sähköntuotanto on osa vihreän sähkön tuotantoa, kuten tuulella, aurinkopaneelilla ja vesivoimalla valmistettu sähköenergiakin.

Eräs mahdollisuus varastoida sähköä tulevaisuudessa, kun kulutus on vähästä ja sähköntuotantomäärät suuria, tulee olemaan tuulella, aurinkoenergialla ja vesivoimalla tuotetun ylimääräisen sähkön muuntaminen elektrolyysereillä vedyksi. Koska vety on haastava aine varastoida ja kuljettaa, voidaan vety käyttää hiilidioksidin sitomiseen pelkistämällä sitä metaaniksi. Biokaasun varastointitekniikka ja nesteyttämisen teknologia on jo käytettävissä eikä metaanin säilyttämisessä ole vastaavia haasteita vetyyn verrattuna. Biokaasun infrastruktuuri on tällöin vetyteknologiankin hyödynnettävissä.

Biokaasun käyttäminen teollisuuden raaka-aineena tulee lisääntymään jo paremman saatavuuden ansiosta. Lisäksi tuotteet kuten erilaiset hiilifraktiot, soveltuvat useisiin erityyppisiin käytännön sovelluksiin puhdistusprosesseista aina lääkkeisiin.

Lähteet:

1. <https://biovoima.com/biokaasu>
2. <https://www.gasum.com/kaasusta/biokaasu/biokaasu/miten-biokaasua-tuotetaan/>
3. Lähde: Tilastokeskus ja Biokaasulaitosrekisterit 2010-2017, Itä-Suomen Yliopisto
4. <https://www.luke.fi/fi/uutiset/maa-ja-puutarhatilat-lampiavat-uusiutuvalle-energialla-tyokoneet-kulkevat-tuontienenergialla>
5. <https://mmm.fi/ruoka-ja-maatalous/biokaasu>
6. <https://www.gasum.com/ajassa/tulevaisuuden-energia/2020/turun-laajennettu-biokaasulaitos/>
7. <https://oilon.com/fi/documents/bioliikenne-biokaasu-ja-yhdistelmapolttimet/>
8. Biokaasun käytön tekniset vaihtoehdot ja kannattavuus, Mikko Ahokas, Macon Oy
9. BIOKAASUTEKNOLOGIA Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen; Kymäläinen, M. ja Pakarinen, O. (toim.) Suomen Biokaasuyhdistys ry, HAMKin julkaisuja 17/2015
10. <http://www.metener.fi/biokaasulaitokset/>
11. https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun_tuotanto_maatilalla.pdf
12. <https://www.sarlin.com/tuote/greenlane-biogas-jarjestelma-puhdistaa-jalostaa-biokaasun/>
13. https://www.valorgas.soton.ac.uk/Pub_docs/Delhi_Aug_2013/Open%20Session/n.b.%20majumdar.pdf
14. <https://www.bright-rng.com/en/upgrading-biogas-to-biomethane-how-does-it-work/>
15. <https://youtu.be/ftvdkvPGtEI>
16. Liljeblad, N.; BIOKAASUN JALOSTUS JA KÄYTTÖ, Kandidaatintyö, Tammikuu 2017, Oulun Yliopisto
17. Laurila, I.; Biokaasun hyödyntämismahdollisuudet Muhoksella, Opinnäytetyö, Kevät 2022, Energiatekniikan tutkinto-ohjelma, Oulun ammattikorkeakoulu
18. Dhananjay Thombare; Stirling Engine Micro-CHP System, January 2008, Rajarambapu Institute Of Technology, Article for Encyclopedia of Materials, Science and Technology
19. Koponen T.; 3 kW:n mikrokaasuturbiinin periaatesuunnittelu, Kandidaatintyö 2014, Lappeenrannan teknillinen yliopisto
20. Karjalainen, J. Pienet kaasuturbiinit hajautetussa energiantuotannossa, Kandidaatintyö 2019, Lappeenrannan teknillinen yliopisto
21. <https://biokierto.fi/tilastot/>
22. <https://suomenkaasuenergia.fi/tuotteet-ja-palvelut/lammita-kaasulla/>
23. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162032/TEM_2020_3_Biokaasuohjelmaa%20valmistelevalle%20tyoryhman%20loppur%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y
24. Heusala, T. suullinen tiedonanto 2022

25. <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/VIM-G-FuelCell-AppNote-B211405FI.pdf>
26. R. J. Gorte, S. Park, J. M. Vohs, C. Wang *Advanced Materials* 2000, Anodes for Direct Oxidation of Dry Hydrocarbons in a Solid-Oxide Fuel Cell, Volume 12, Issue 19 p. 1465-1469
27. https://en.wikipedia.org/wiki/Solid_oxide_fuel_cell
28. Matteo Lualdi, Building an App to Optimize the Design of an SOFC Stack, COMSOL Blog, August 23, 2016
29. Oksanen, M.; Maakaasua ja metanolia käyttävien kiinteäoksidipolttokennojen (SOFC) käyttö laivoissa, opinnäytetyö, 2011, Kymenlaakson Ammattikorkeakoulu
30. <https://convion.fi/>
31. F. Tietz, in *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 2008
32. Papurello D., Lanzini A.; *Waste Management*, Volume 72, February 2018, Pages 306-312
33. Lanzinia A., Madib H., Chiodoc V., Papurelloa D., Maisanoc S., Santarelliad M., Herleb J.; *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 61, July 2017, Pages 150-188
34. Sundmacher, K, *Ind. Eng. Chem. Res.* 2010, 49, 21, 10159–10182
35. S.A.Saadabadi et al.; *Renewable Energy* 134 (2019), 194-214
36. www.hycamite.com