



Nuutti Salo

# Metanolin tuotanto ja polttokennot rakennusten energiantuotannossa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

24.4.2025

# Tiivistelmä

Tekijä:	Nuutti Salo
Otsikko:	Metanolin tuotanto ja polttokennot rakennusten energiantuotannossa
Sivumäärä:	30 sivua
Aika:	24.4.2025
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine:	Energiantuotantomenetelmät
Ohjaaja:	Lehtori Kari Salmi

---

Työssä tarkasteltiin metanolia ja sen käyttötarkoituksia. Tarkemmin syvennyttiin metanolin lähtöaineisiin ja tuotantotapoihin. Työssä tutkitaan myös polttokennoja ja niiden hyödyntämistä rakennusten energiantuotantoon sekä opetuskäyttöön. Metanolia pidetään ilmastoystävällisenä ja helppona polttoaineena. Polttokennot ovat ennestään tutumpia autokäytössä ja kannettavissa laitteissa, mutta potentiaalia nähdään myös sähkön ja lämmön yhteistuotannossa. Työn tavoitteena oli syventyä metanolin tuotantoon sekä polttokennojen toimintaan ja potentiaaliin rakennusten energiantuotannossa ja opetuskäytössä. Aiheesta oleellisen ja ajankohtaisen teki muuttuva energiatalous ja ilmastotavoitteet. Polttokennoissa nähdään suuri potentiaali nousta energiamarkkinoilla korkealle. Opinnäytetyö toteutettiin kirjallisuuskatsauksena.

Opinnäytetyössä käytettiin lähteinä alan tieteellisiä julkaisuja, kuten tutkimuksia ja artikkeleita, sekä aiheeseen liittyviä energia- ja ilmastoyritysten ja organisaatioiden aineistoja. Lisäksi viitattiin Yhdysvaltain energiaministeriön julkaisuihin.

Työssä huomattiin, että metanolia pystyy tuottamaan monesta eri lähteestä, monella eri tapaa. Vihreän metanolin valmistus voisi jopa vähentää ilmaston hiilidioksidipäästöjä. Polttokennoilla on suuri potentiaali toimia puhtaasti sekä tehokkaasti rakennusten sähkö- ja lämpöenergian tuotannossa. Järjestelmiä täytyy kuitenkin vielä kehittää lisää ja teknologian käytöstä täytyy tehdä rahallisesti sen arvoista. Tässä voisi kuitenkin olla ympäristöystävällinen energiantuotantotapa.

Avainsanat: metanoli, polttokenno, polttoaine

---

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

## Abstract

Author: Nuutti Salo  
Title: Methanol Production and Fuel Cells in buildings Energy Production  
Number of Pages: 30 pages  
Date: 24 April 2025

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Energy and Environmental Engineering  
Professional Major: Energy production methods  
Supervisor: Kari Salmi, Senior Lecturer

---

The thesis explores methanol and its various applications, with a particular focus on its raw materials and production processes. It also investigates fuel cells and their use in buildings energy production and educational applications. Methanol is considered a climate-friendly and easily handled fuel. Fuel cells are more commonly known for their use in vehicles and portable devices, but they also show promise in combined heat and power generation. The objective of this thesis was to delve into methanol production and the operation and potential of fuel cells in buildings energy systems and for educational use. The topic is timely and relevant due to the evolving energy economy and climate goals. Fuel cells are seen as having significant potential to gain a strong position in the energy market. The thesis was conducted as a literature review.

The sources used in this thesis include scientific publications such as research papers and articles, as well as materials from energy and climate organizations. Publications from the U.S. Department of Energy and the Finnish healthcare sector were also referenced.

The thesis found that methanol can be produced from a wide range of sources using various methods. The production of green methanol could even contribute to reducing global carbon dioxide emissions. Fuel cells have significant potential to provide clean and efficient electricity and heat for buildings. However, these systems still require further development, and the use of this technology must become economically viable. Nevertheless, this approach could represent an environmentally friendly method of energy production.

Keywords: methanol, fuel cell, fuel

---

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Metanolin tuotanto	1
2.1	Ominaisuudet ja käyttö	2
2.2	Lähtöaineet ja tuotantomenetelmät	4
2.2.1	Maakaasu	4
2.2.2	Kivihiihi	6
2.2.3	Biokaasu ja -massa	7
2.2.4	Hiilidioksidi ja vety	9
3	Erilaiset polttokennotyypit	11
3.1	Metanolipolttokenno	12
3.2	Protoninvaihtopolttokenno	15
3.3	Alkalinen polttokenno	16
3.4	Sulakarbonaattipolttokenno	16
3.5	Kiinteä oksidipolttokenno	17
3.6	Fosforihappopolttokenno	18
4	Polttokennokäyttö	19
4.1	Polttokennokäyttö sähkön ja lämmön yhteistuotantoon	19
4.2	Polttokennokäyttö laboratoriossa ja opetuskäyttöön	23
5	Taloudellinen ja ympäristöllinen tarkastelu	25
6	Yhteenveto	25
	Lähteet	27

## Lyhenteet

AFC:	Alkaline Fuel Cell, alkalinen polttokenno
CCT:	Coal Coking Technology, kivihiilen koksaus
CGT:	Coal Gasification Technology, kivihiilen kaasutus
CHP:	Combined Heat and Power, sähkön ja lämmön yhteistuotanto
DMFC:	Direct Methanol Fuel Cell, suorametanolipolttokenno
FC-CHP:	Fuel Cell Combined Heat and Power, sähkön ja lämmön yhteistuotannon polttokenno
HT-PEMFC:	High-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell, korkean lämpötilan protoninvaihtopolttokenno
LHV:	Lower Heat Value, alempi lämpöarvo
MCFC:	Molten Carbonate Fuel Cell, sulakarbonaattipolttokenno
PAFC:	Phosphoric Acid Fuel Cell, fosforihappopolttokenno
PEMFC:	Proton Exchange Membrane Fuel Cell, protoninvaihtopolttokenno
SOFC:	Solid Oxide Fuel Cell, kiinteäoksidipolttokenno

## 1 Johdanto

Ilmastonmuutos ja kiristyvät päästötavoitteet ajavat kohti puhtaampia energiaratkaisuja. Energiantuotanto ja polttoaineiden käyttö ovat suuressa osassa tässä. Polttaminen ja fossiiliset polttoaineet ovat suurin päästöjen aiheuttaja. Päästötöntä energiaa tutkitaan valtavasti ja teknologiat kehittyvät koko ajan. Energiantuotanto ilman polttamista ja puhtaammat polttoaineet vähentäisivät päästöjä huomattavasti.

Metanoli ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) on yksinkertainen alkoholi, joka on tunnettu polttoaineena, kemikaalina ja raaka-aineena eri prosesseissa. Lähtöaineita ja tuotantotapoja metanolille on erilaisia. Metanolin hyödyntäminen polttoaineena ja varsinkin polttokennoissa sisältää suuren potentiaalín sähkön- ja lämmöntuotantoon rakennuksille. Metanolilla on mahdollisuus kasvaa merkittäväksi osaksi kestävämpää polttoainekantaa.

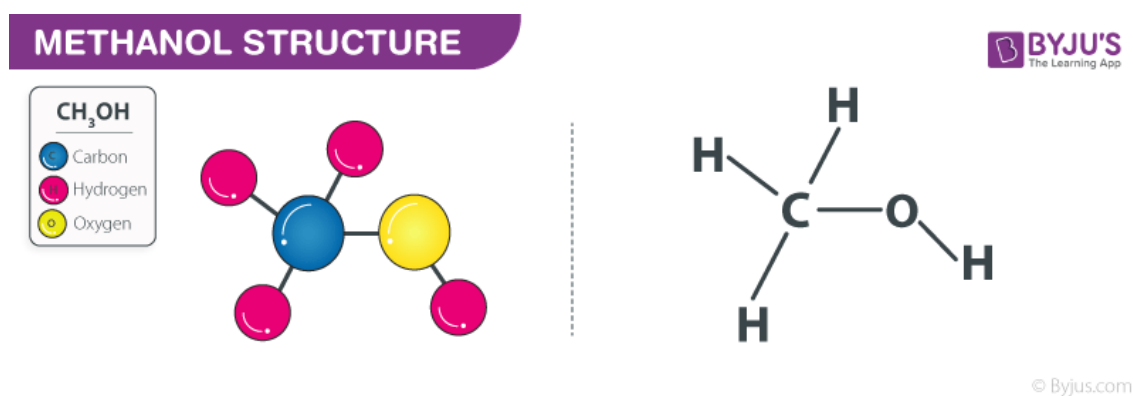
Työn tarkoituksena oli tutustua metanolin tuotantotapoihin sekä polttokennoihin ja niiden hyödyntämiseen sähkön ja lämmöntuotannossa. Tavoitteena oli tutkia, mistä ja miten metanolia voidaan tuottaa. Toinen tavoite oli saada selville, miten metanolilla toimivia polttokennoja voitaisiin hyödyntää rakennusten sähkön ja lämmön tuotannossa. Lisäksi työssä käydään läpi metanolin ominaisuuksia, käyttökohteita sekä lyhyesti eri polttokennotyyppejä läpi.

## 2 Metanolin tuotanto

Metanolia valmistetaan ja käytetään ympäri maailmaa, ja sen suosio on jatkuvassa nousussa. Metanolitehtaita löytyy lähes joka maasta. Vuosittain metanolia tuotetaan yli 100 miljoonaa tonnia, josta noin 30 % käytetään polttoaineisiin ja kaksi kolmasosaa muiden kemikaalien valmistukseen. [1, s. 1.] Metanoli tai toiselta nimeltään metyylialkoholi on yksinkertainen alkoholi. Se on väritön

neeste, jolla on erottuva haju. Metanolia pidetään erittäin hyödyllisenä kemikaalisenä yhdisteenä, ja se on tärkeä rakennuspalikka moniin kemiallisiin rakenteisiin polttoaineissa, erilaisissa tuotteissa sekä lääketieteessä. Metanolia pidetään myös hyvänä polttoaineena puhtaan palamisensa ansiosta. [2.]

Metanolin kemiallinen kaava on  $\text{CH}_3\text{OH}$ , ja tästä voidaan päätellä, että sen rakenne sisältää yhden atomin hiiltä, yhden atomin happea ja neljä atomia vetyä. Metanolin rakenne on keskittynyt hiiliatomin ympärille, kuten nähdään kuvasta 1. Molekyylistä löytyy kolme hiili-vetysidosta, yksi hiili-happisidos ja yksi happi-vetysidos. Happiatomista löytyy myös kaksi yksinäistä elektroniparia. [3.]



Kuva 1. Metanolin rakenne  $\text{CH}_3\text{OH}$  [4].

## 2.1 Ominaisuudet ja käyttö

Metanolilla on suhteellisen korkea kiehumispiste (noin  $65\text{ }^\circ\text{C}$ ) muihin polttoaineisiin verrattuna. Metanoli on helposti syttyvä neste, ja aine voi syttyä herkästi lämmön, kipinöiden, staattisen sähkön ja liekkien vaikutuksesta. Reaktio voimakkaiden hapettimien kanssa aiheuttaa palo- ja räjähdysvaaran. [5.]

Metanoli on erittäin myrkyllinen kemikaali, ja suun kautta joutuminen kehoon voi jo pienissä määrin aiheuttaa kuolemanriskin. 40-prosenttisessa metanolissa tappava annos on 80–150 ml, mutta joissain tapauksissa jo 15 ml:n annos

kehossa on aiheuttanut kuoleman. Kuitenkin jo todella pienet annokset, kuten 4 ml voi aiheuttaa sokeuden. Pitkäaikainen altistuminen hengitysteiden kautta aiheuttaa haittavaikutuksia, kuten päänsärkyä, näköhäiriöitä ja huomiokyvyn heikkenemistä. Pienten lasten ja raskaana olevien naisten tulisi välttää pitkäaikaista altistumista. [6.] Metanolin roiskeet iholla ärsyttävät ihoa ja metanoli imeytyy ihon kautta, mikä aiheuttaa suuren riskin myrkytysoireille [5].

Metanolia hyödynnetään polttoaineena polttomoottoreissa ja metanolipolttokeinoissa. Esimerkiksi metanolia käytetään bensiinimoottoreissa ja laivapolttoaineena. Sitä käytetään puhtaassa muodossa tai sekoituskomponenttina. Metanolia on mahdollista tuottaa monesta eri lähteestä, mikä tekee siitä kestävä polttoaineen. Metanolin päästöt ovat esimerkiksi bensiiniin rinnalla huomattavasti pienemmät, vaikka hiilivety päästöt ovatkin samat. Palamisominaisuudet ja yksihilimolekyylinen luonne tarkoittavat huomattavasti vähemmän typen oksidien ja hiukkasten päästöjä verrattuna monimutkaisiin hiilivety polttoaineisiin.

Polttomoottoreiden polttoaineeksi metanoli sopii hyvin mm. seuraavien seikkojen ansiosta: korkea höyrystymislämpö, korkea ominaisenergiasuhte, matala stoikiometrinen ilma-polttainesuhde, korkea molaarinen laajentumissuhde, suuri palamisnopeus, matala palamislämpötila, nestemäinen normaalilämpötilassa ja -paineessa sekä korkea vety-hiilisuhde. [7, s. 1.]

Metanolia voidaan hyödyntää myös sähkön- ja lämmöntuotantoon sekä lämpimän veden tuotantoon. Tämä tapahtuu metanolipolttokeinojen avulla. Sähkökemiallinen reaktio tuottaa sähköenergiaa ilman palamista. Polttokennoja on erilaisia, ja niitä käytetään erilaisiin sovelluksiin, kuten virtalähteenä kannettaviin ja pienitehoisiin sähkölaitteisiin, varavirtalähteenä ja sähköautoihin. [8, s. 1.]

Metanoli on erittäin tärkeä raaka-aine kemianteollisuudessa. Sitä käytetään monien kemikaalien valmistukseen ja sillä valmistetaan monia eri tuotteita. Metanoli toimii lähtöaineena esimerkiksi formaldehydin valmistukseen, jota käytetään muoveissa, liimoissa, vanereissa ja maali-teollisuudessa. Myös etikkahappo on

lähtöisin metanolista ja sitä käytetään esimerkiksi liimoissa, muoveissa ja elintarvikepakkauksissa. [9.]

Metanolia käytetään myös lääkkeiden valmistuksessa liuottimena ja on erittäin tärkeässä roolissa prosessissa. Ainutlaatuiset ominaisuudet, kuten korkea haihtuvuus ja sekoittuvuus veteen, tekevät metanolista todella hyödyllisen farmaceuttisissa prosesseissa. Metanolin avulla pystytään liuottamaan monenlaisia yhdisteitä ja lääketeollisuudessa käytettäviä ainesosia, mikä tekee homogeenisten ja stabiilien lääkevalmisteiden luomisesta helpompaa. Käytettävä metanoli käy läpi tiukat laatutarkastukset, jotta sen käytöstä ja turvallisuudesta voidaan olla varmoja. [10.]

## 2.2 Lähtöaineet ja tuotantomenetelmät

### 2.2.1 Maakaasu

Maakaasun muuttaminen metanoliksi on ympäristön ja kestävän kehityksen kannalta hyödyllistä. Maakaasu koostuu pääasiassa metaanista, jota tuotetaan suuria määriä raakaöljyn kanssa. Tyypillisessä maakaasussa on noin 70–90 painoprosenttia metaania. [11.] Maakaasuun perustuva metanolilaitos kuluttaa noin 29–37 MJ (LHV, Lower Heating Value) maakaasua yhtä kilogrammaa metanolia kohden [12]. Maakaasun jalostus erilaisiksi lisäarvoa tuottaviksi polttoaineiksi tarjoaa valtavan hiilivetyjen arvoketjun. Metanolin tuotanto on näistä polttoaineista kannattavin tuotevaihtoehto. Erilaisia teknologiavaihtoehtoja maakaasun muuntamiseen metanoliksi voidaan käyttää joko pienimuotoisina tai suuressa mittakaavassa.

Tällä hetkellä metanolia tuotetaan maakaasusta metaanin epäsuoralla osittaisella hapetuksella metanoliksi reformoimalla maakaasu synteesisikaasuksi ja hydraamalla synteesisikaasu metanoliksi heterogeenisten

metallioksidikatalysaattoreiden avulla. Tämä on ensimmäinen menetelmä, joka löydettiin metaanin muuttamiseksi metanoliksi 1920-luvulla. [11, s. 1–2.]

Epäsuora menetelmä sisältää kaksi vaihetta. Ensimmäinen vaihe on höyryreformointireaktio synteetikaasun tuottamiseksi nikkelikatalyytillä. Tähän liittyvät reaktiot on esitetty yhtälöissä 1 ja 2. Toinen vaihe on eksoterminen reaktio, jossa synteetikaasu muutetaan metanoliksi. Kupari-sinkki/alumiinipohjainen katalyytti toimii käyttöpainealueella 5–10 MPa ja lämpötila-alueella 220–300 °C. Kyseinen reaktio on esitetty yhtälössä 3. Yhtälön 3 mukaan metanoli syntyy synteetikaasusta pääasiassa CO<sub>2</sub>:n hydrausreaktiosta. Metanolin synteetireaktiossa tapahtuu kolme pääreaktiota, joista ensimmäinen on CO<sub>2</sub>:n hydraus yhtälössä 3, toinen on CO:n hydraus yhtälön 4 mukaisesti ja kolmas vesikaasun siirtoreaktio yhtälön 5 mukaisesti.



Metanolin muodostumiseen vaikuttaa kemiallinen tasapaino, jolloin matala lämpötila ja korkea paine suosii reaktiota. Ensimmäiset toteutukset suoritettiin paineissa 25–35 MPa. Tutkimuksissa kuitenkin havaittiin, että alhaisemmissa paineissa prosessi toimi optimaalisesi käyttäen koboltti-, kupari- ja alumiinipohjaisia katalyyttejä. On huomattu myös, että vaikka korkea paine lisää hiilidioksidien konversiota, mikä voi parantaa metaanin konversiota, se vähentää metanolin saantoa ja selektiivisyyttä. Tämä johtuu sekundaarisesta hydrausreaktiosta, mikä johtaa suurimolekyylipainoisten parafiinien tuotantoon. Tästä syystä nykyään prosessit suoritetaan alhaisimmissa paineissa noin 5–10 MPa.

Prosessin tärkein osa on metanolisynteesireaktori, jossa siis tuotetaan katalyytin avulla metanolia kemiallisessa reaktiossa. Eri reaktorityypit eroavat toisistaan reaktorin sisälämpötilan säätelyn perusteella. Suosituimmat reaktorityypit ovat kiinteäpetireaktorirakenteet, kuten Lurgi-putkireaktori, Mitsubishi Superconverter ja Multistage Radial Flow (MRF) -reaktori. [11, s. 3.]

### 2.2.2 Kivihiili

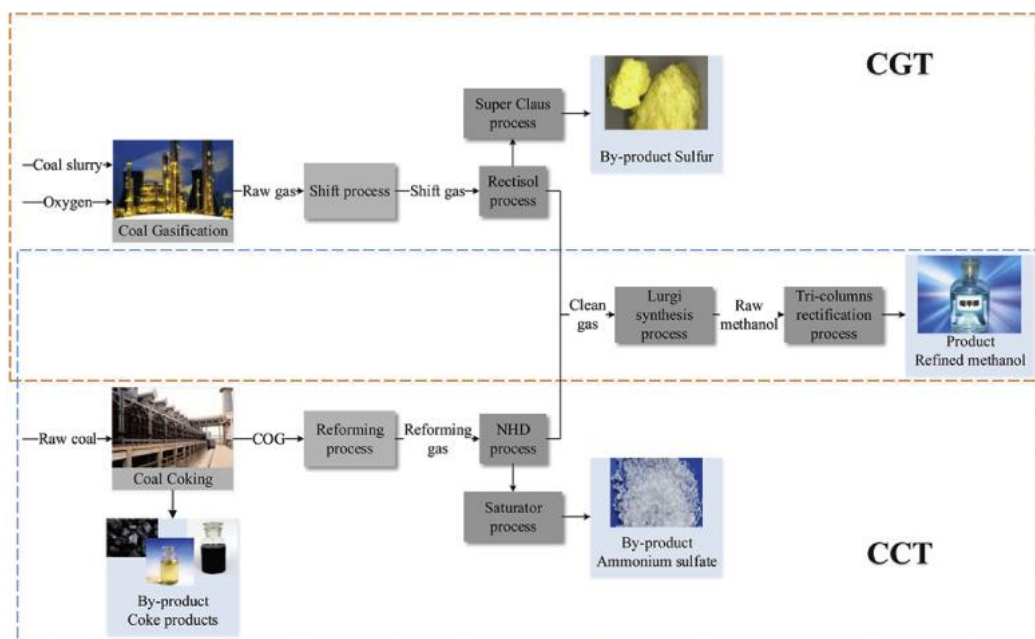
Kivihiili ja maakaasu ovat yleisimmät lähtöaineet metanolin tuotannolle koko maailmassa. Kiinassa tuotetaan metanolia kivihiilestä eniten ja kysyntä nousee koko ajan. Prosessin CO<sub>2</sub>-päästöt ovat kuitenkin korkeat, mikä ei palvele ympäristönäkökulmaa. Myös energiatehokkuus jää heikoksi raakahiilen ja tuotteiden H/C-suhteen epäsuhdan vuoksi. Konversio kivihiilestä metanoliksi on 2:1, eli kahdesta tonnista kivihiiltä saadaan noin yksi tonni metanolia. [13, s. 1.]

Metanolin tuotanto hiilipohjaisesti sisältää neljä eri vaihetta: synteesikaasun tuottaminen, synteesikaasun puhdistus, metanolin synteesi ja metanolin rektifiointi. Coal gasification technology (CGT) ja coal coking technology (CCT) eli kivihiilen kaasutus- ja koksaustekniikka ovat tuotannossa käytetyimmät teknologiat. Korkeassa paineessa syötetään hiillietettä ja happea, jotka reagoivat kaasuttimessa korkeassa lämpötilassa ja paineessa, jolloin syntyy synteesikaasua. Synteesikaasun tuottamisen prosessi on esitetty yhtälössä 6. Synteesikaasu johdetaan seuraavaksi puhdistusjärjestelmään, jossa poistetaan hiilidioksidi, rikkivety ja hiilioksisulfidi Rectisol-prosessilla. Rikki kierrätetään Super-Claus-prosessilla. Seuraavaksi kaasun siirtyä Lurgi-reaktoriin, jossa metanoli syntetisoidaan puhtaan kaasun ja vedyn seoksesta. Reaktiot Lurgi-reaktorissa esitetään yhtälöissä 7 ja 8. Sitten metanoli siirtyä kolmikolonniseen puhdistusprosessiin.





CCT ja CGT ovat lähes samanlaisia, mutta löytyy joitain pieniä eroja. Kuvassa 2 havainnollistettu molemmat teknologiat kaaviokuvalla. CCT-synteesikaasu tuotetaan koksauksen prosessissa ja on nimeltään koksikaasu, joka sisältää hiilimonoksidia, vetyä metaania ja muita kemikaaleja. Tämä koksikaasu puhdistetaan ja poltetaan epätäydellisesti reformointilaitteessa. CCT poikkeaa CGT:stä myös siten, että puhdistusjärjestelmässä käytetään polyetyleeniglykolin ja dimetyylieterin yhdistelmiin perustuvaa tekniikkaa. [14, s. 1005.]



Kuva 2. Kivihiilen kaasutuksen (coal gasification, CGT) ja koksauksen (coal coking, CCT) prosessit [14, s. 1006].

### 2.2.3 Biokaasu ja -massa

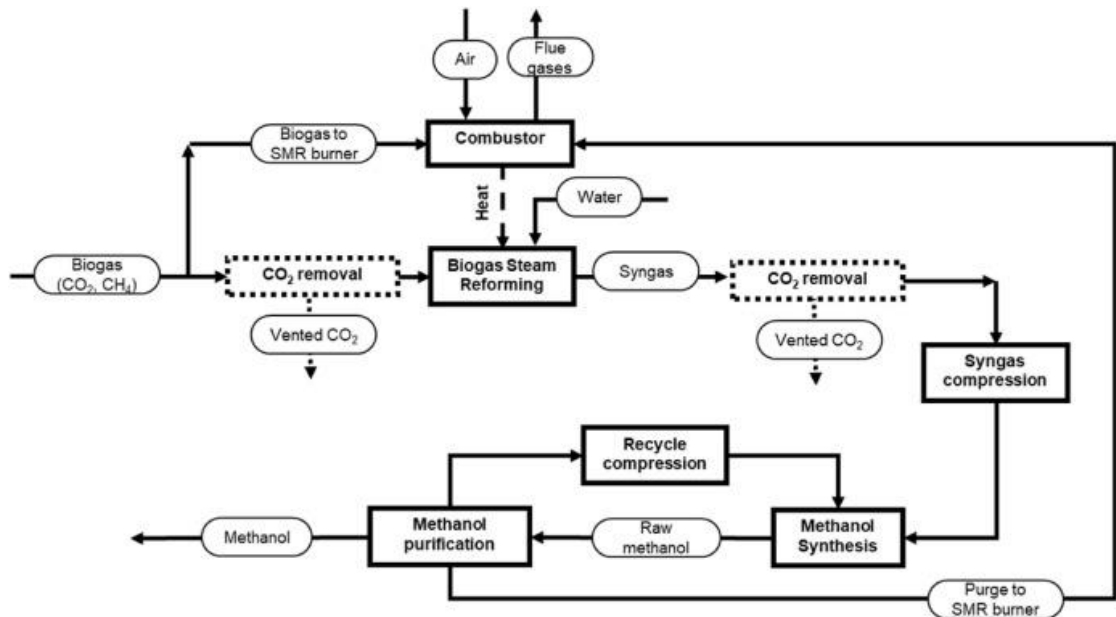
Biokaasu eli biogeeninen energiantekijä koostuu pääasiassa metaanista ( $\text{CH}_4$ ) ja hiilidioksidista ( $\text{CO}_2$ ). Sitä saadaan esimerkiksi maatalous- ja eläinjätteen sekä orgaanisten jätteen anaerobisessa hajoamisessa. Biopoltoaineet ovat vähähiilisiä, jotka tuottavat vähemmän kasvihuonepäästöjä perinteisiin

polttoaineisiin verrattuna ja täten ovat ympäristöystävällisempi vaihtoehto. Tulevaisuudessa biokaasulla voi olla suuri rooli esimerkiksi metanolin tuotannossa.

[15, s. 1.]

Biokaasu saadaan biomassasta, kuten jätevesi, ruokajäte, villieläinten uloste, pudonneet lehdet tai kompostoitu kalkkunanlanta. Jokainen biohajoava materiaali, joka katkeaa ilman happea, käy läpi kemiallisten reaktioiden ketjun, jota kutsutaan nimellä anaerobinen mädätys. Tässä prosessissa bakteerit muodostuvat ja alkavat hajottamaan materiaalia erilaisiksi kemiallisiksi yhdisteiksi. Mädätyksen ollessa valmis orgaanisesta aineesta vapautuu biokaasua. Yhdestä tonnista raaka-ainetta saadaan tuotettua noin 721 litraa metanolia. [16.]

Metanolin valmistus biokaasusta sisältää kolme pääosaa. Koko prosessikaavio on hahmoteltu kuvassa 3. Ensimmäinen vaihe on biokaasun esikäsitteily, jossa biokaasu puhdistetaan epäpuhtauksista, kuten CO<sub>2</sub>:sta. Toinen vaihe on biokaasun reformointi, ja viimeisenä on metanolin synteesi sekä puhdistus. [15.] Höyryreformointiprosessissa biokaasun metaani sekoittuu höyryn kanssa ja tapahtuu vuorovaikutus nikkelistä valmistetun katalyytin kanssa. Tämä reaktio synnyttää synteetikaasun. Myöhemmin synteetikaasu reagoi hiilimonoksidin kanssa, jolloin synteetikaasusta muuttuu metanolia ja vettä. [16.]



Kuva 3. Prosessikaavio biokaasusta metanoliksi -prosessista [15, s. 3].

## 2.2.4 Hiilidioksidi ja vety

Hiilidioksidi on kasvihuonekaasu, jota syntyy esimerkiksi hiilen, öljytuotteiden ja maakaasun polttamisesta. Hiilidioksidia vapautuu ilmakehään, mikä on suoraan yhteydessä ilmaston lämpenemiseen, ja meriveteen liukeneminen aiheuttaa veden happamoitumista. Hiilidioksidi on metanolin perusrakenne tuotannossa ja sen tuotanto on kannattavaa. Metanolin tuotanto  $\text{CO}_2$ :sta on erittäin hyödyllistä, koska sillä on monia käyttötarkoituksia ja se vähentää hiilidioksidia ilmakehässä. [17, s. 1.] Yhden metanolitonin tuottamiseen tarvitaan noin 1,38 tonnia  $\text{CO}_2$ :ta ja 0,19 tonnia vetyä (~1,7 tonnia vettä) [18].

Hiilidioksidin hydraus metanoliksi on eksotermisen prosessi, koska se tapahtuu veden läsnä ollessa. Synteisiin tarvitaan katalyytti, sillä muuten synteesi on vaikeaa ja voi syntyä ei-toivottuja sivutuotteita. Hydrausprosessi toimii parhaiten alle  $150\text{ °C}$ :n lämpötilassa ja  $5\text{--}10\text{ MPa}$ :n paineessa. Tällöin prosessista saadaan enemmän metanolia ja vältetään ei-toivottuja sivutuotteita. Korkea

lämpötila aiheuttaa vesikaasun siirtymäreaktion käänteisen kulumisen H<sub>2</sub>:n kulutuksen myötä, mikä vähentää metanolin saantoa.

Yhtälöissä 9, 10 ja 11 käydään läpi metanolin tuotannon kemiallinen reaktio hydruuksella. Kokonaisreaktiossa yksi mooli CO<sub>2</sub>:ta vaatii kolme moolia H<sub>2</sub>:ta tuottamaan metanolia ja vettä. Yksi mooli CO<sub>2</sub>:ta reagoi yhden moolin H<sub>2</sub>:n kanssa muodostaen CO:ta ja H<sub>2</sub>O:ta. Tämä tunnetaan myös nimellä vesikaasureaktio. Metanolin tuotannossa yksi mooli CO:ta reagoi kahden moolin H<sub>2</sub>:n kanssa, josta syntyy yksi mooli CH<sub>3</sub>OH:ta.



Kokonaisreaktiossa yksi mooli CO<sub>2</sub>:ta vaatii kolme moolia H<sub>2</sub>:ta tuottamaan metanolia ja vettä. Yksi mooli CO<sub>2</sub>:ta reagoi yhden moolin H<sub>2</sub>:n kanssa muodostaen CO:ta ja H<sub>2</sub>O:ta. Tämä tunnetaan myös nimellä vesikaasureaktio. Metanolin tuotannossa yksi mooli CO:ta reagoi kahden moolin H<sub>2</sub>:n kanssa, josta syntyy yksi mooli CH<sub>3</sub>OH:ta, eli metanolia.

Metanolin synteesissä on testattu homo- ja heterogeenisiä katalyysejä, josta on todettu heterogeenisen katalyytin olevan sopivampi. Heterogeeninen katalyytti tuo etuja, kuten kiinteän katalyytin helppo poistaminen nesteestä, helppo käsittely ja erilaisten reaktorien käyttö, kuten kiinteä-, leiju- ja liikkuvapeti. Kuparikatalyytti lisäaineiden ZnO:n ja ZnO<sub>2</sub> kanssa parantavat katalyytin tehokkuutta. Synteesikaasussa käytetty Cu-ZnO-katalyytti tuottaa H<sub>2</sub>:ta vesi-kaasusiirtymäreaktiossa ja taas metanolin synteesireaktio tuottaa metanolia. [17, s. 5.]

### 3 Erilaiset polttokennotyypit

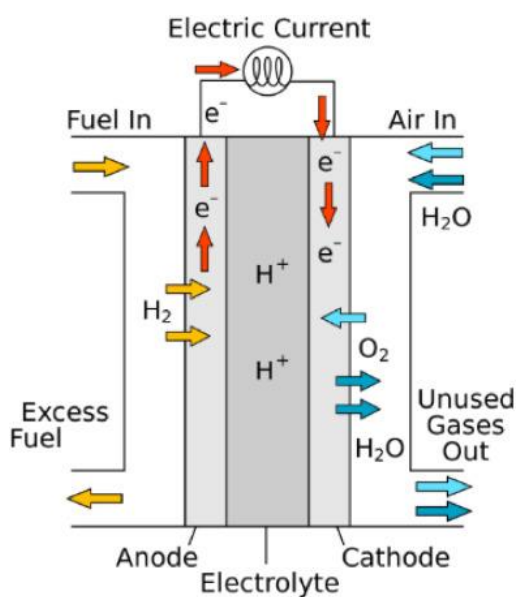
Vihreä siirtymä ja fossiilisten polttoaineiden polttamisesta luopuminen on aiheuttanut sen, että energiaa pitäisi tuottaa ympäristön kannalta kestävästi. Polttokennot ovat yksi lupaavimmista energian muunnostekniikoista. Polttokenno niimestään huolimatta ei ole perinteistä polttamista, vaan laite on sähkökemiallinen, jolloin kemiallinen energia muuttuu suoraan sähköenergiaksi.

Vuodesta 1839 lähtien on tiedetty, että hapen ja vedyn välinen sähkökemiallinen reaktio tuottaa sähkövirtaa. Ilmiön havaitsi walesilainen kemiaan perehtynyt fyysikko William Robert Grove, joka kehitti ensimmäisen polttokennon ns. kaasukun (gas voltaic battery), jossa sähkövirtaa (ja vettä) tuotettiin happikaasun ja vetykaasun välisellä reaktiolla. [19.]

Vuonna 1958 brittiläinen insinööri Francis Bacon toteutti ensimmäinen alkalisen polttokennon. Tätä käytettiin jo myöhemmin Apollo-avaruusaluksissa. Vuotta myöhemmin hän sai polttokennosta jo 5 kW:n järjestelmän, jota käytettiin kuitenkin 15 kW:n teholla maataloustraktorissa. NASA alkoi kehittämään polttokennoja avaruustehtäviin 1950-luvun lopulla. Polttokennojen käyttöä sähköajoneuvoissa lähdettiin tutkimaan ja viemään eteenpäin vuodesta 1970 lähtien ja vuodesta 2007 niitä alettiin kaupallistamaan. [20, s. 2.]

Polttokennojärjestelmässä on kaksi puolta (osastoa), jossa toisella puolella on anodi ja toisella katodi, näiden välissä sijaitsee elektrolyytti (kuva 4). Polttoainetta, kuten esimerkiksi metanoli ruiskutetaan anodiin ja happea katodiin. Anodin vetyatomi menettää elektroninsa, minkä jälkeen muuttuu vetyioniksi ( $H^+$ ). Elektrolyytin läpi kulkee vain vetyioneja. Elektronit eivät kulje elektrolyytin läpi, vaan ne saavuttavat katodin ulkoisen sähköpiirin kautta, minkä seurauksena syntyy sähkövirtaa. Elektrolyytin läpi kulkeneet vetyionit ( $H^+$ ) yhdistyvät happi-ionien ( $O^{2-}$ ) kanssa, jolloin syntyy tuotteena vettä (kaava 12). Lisäksi syntyy lämpöä. Vesi ja lämpö poistuvat laitteesta/kennosta. [21, s. 3.]





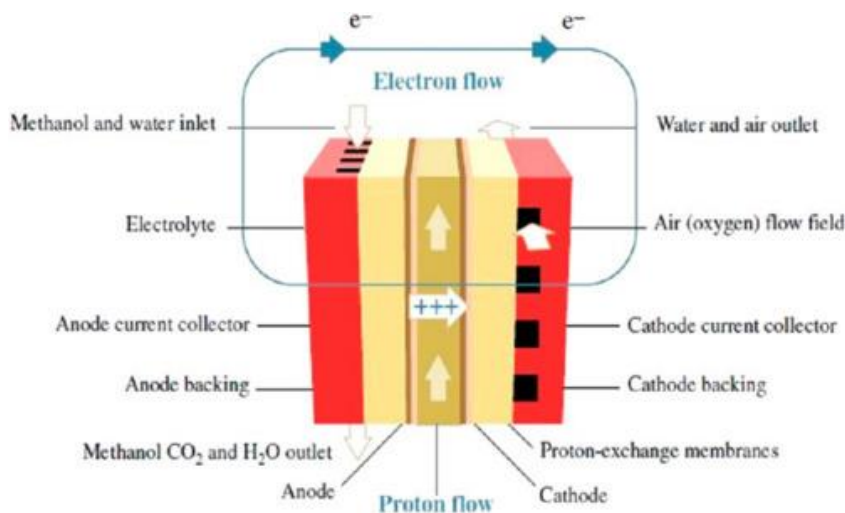
Kuva 4. Polttokennojärjestelmän toimintaperiaate [21, s. 3].

### 3.1 Metanolipolttokenno

Metanolipolttokennot muuttavat metanolin suoraan sähköksi. Suora metanolipolttokenno (DMFC) soveltuu käytettäväksi pienitehoisissa sähkölaitteissa, kuten puhelimen latureissa, ledeissä, antureissa sekä tietokoneissa. Polttokennoissa metanolia pidetään hyvänä polttoaineena, koska sitä on helppo ja turvallinen käsitellä, sillä on korkea energiatiheys ja se on ympäristöystävällisempi. Metanolia pystyy myös helposti varastoimaan ja sitä on helppo kuljettaa sekä tankata. Aktiivinen DMFC koostuu monesta ulkopuolisesta komponentista, kuten polttoainepumpusta, puhaltimesta, säiliöstä, lämmönvaihtimesta, kaasunerottimesta ja paineistetusta happisäiliöstä. [8, s. 19622.]

DMFC-järjestelmässä kenno on avaintekijä toimintaan. Energiantuotannon huono puoli on laitteen alhainen hyötysuhde, joka on alle 30 %. Tämä johtuu metanolin läpäisystä kalvon läpi, mikä rajoittaa laajaa käyttöä. Kuvasta 5 nähdään kaavio DMFC:n toimintaperiaatteesta, jossa kenno koostuu anodista, katodista ja protoninvaihtokalvosta. Anodiin syötetään metanolin vesiliuos ja

katodiin happea ilmasta. Katodissa tapahtuu metanolin hapetusreaktio ja hapen pelkistysreaktio. Yhtälöissä 13–15 esitetään anodinen, katodinen ja kokonaisreaktio eri väliaineissa.

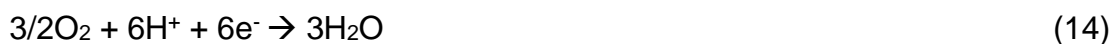


Kuva 5. DMFC:n toimintaperiaate [22, s. 1787].

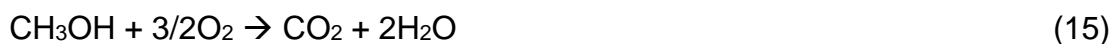
Anodinen reaktio:



Katodinen reaktio:



Kokonaisreaktio:

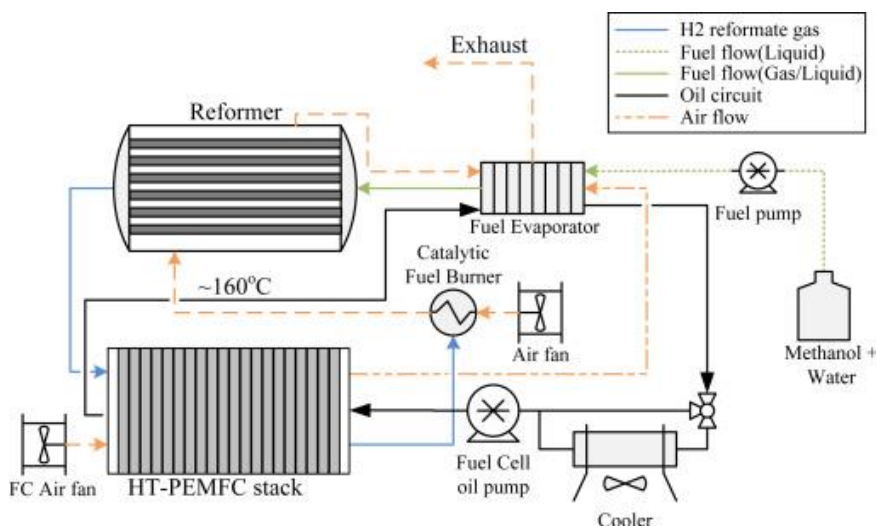


Anodisen metanolin sähköhapetuksen katalyytteinä käytetään usein platinaa (Pt). Pt-katalyyttien korkea hinta kuitenkin rajoittaa niiden käyttöä. Hiilimateriaaleille ja muille materiaaleille voidaan kuitenkin ladata tasaisesti Pt-nanohiukkasia, mikä parantaa Pt:n käyttöä ja sähkönjohtavuutta. Tämä taas parantaa Pt-pohjaisten katalyyttien suorituskykyä. Platinahiili (Pt/C) katalyyttejä on

kaupallistettu menestyksekkäästi metanolin hapetusreaktion katalysoimiseksi DMFC-yhdisteissä. [22, s. 1786.]

Metanolia voidaan käyttää myös epäsuorasti polttokennoissa metanolihöyryreformoinnin avulla, joka muuttuu vetytitoiseksi kaasuseokseksi. Korkean lämpötilan PEM-polttokenno (HT-PEMFC) on protoninvaihtokalvopolttokenno. HT-PEMFC-polttokenno eroaa DMFC-polttokennosta siten, että sen sähköinen kokonaishyötysuhde on jopa 50 % ja se toimii yli 100 °C:n lämpötiloissa, tyypillisesti 160–180 °C:ssa. [23, s. 21312.]

HT-PEMFC-polttokenno toimii siis vetytitoisella kaasulla. Reformoitu metanolipolttokennojärjestelmän (DMFC) kokoonpano on esitetty kuvassa 6. Vetytitoinen kaasu saadaan tuotettua metanolista. Yleisimmin käytetty prosessi on höyryreformointi, jossa metanoli ja vesi höyrystetään ja metanolin ja höyryn seos lähetetään reformeriin, joka muuntaa sen vetytitoiseksi kaasuksi. Vetytitoinen kaasu syötetään polttokennopinoon anodipuolelle. [24, s. 21319.] HT-PEMFC-polttokennoja voidaan käyttää monissa eri sovelluksissa, kuten tietoliikennesovellusten varavirtalähteenä, asuinrakennusten sähkön ja lämmön yhteistuotannossa (CHP), kannettavissa sähkölaitteissa, autoteollisuudessa sekä apuvoimayksiköinä veneissä ja maantieajoneuvoissa [23, s. 21312].



Kuva 6. Reformoitu polttokennojärjestelmä [24, s. 21320].

### 3.2 Protoninvaihtopolttokenno

Protoninvaihtopolttokennoissa (PEMFC) on suuri tehotiheys ja ne painavat vähän, sekä niissä on tilavuuden edut muihin polttokennoihin verrattuna. Polttokennoissa käytetään elektrolyytinä kiinteää polymeeriä ja huokoisia hiilielektrodeja, jotka sisältävät platina- tai platinaseoskatalyyttiä. PEMFC-polttokennot tarvitsevat toimiakseen vain puhdasta vetyä, happea ja vettä. [25.] Metanolia voidaan käyttää laitteistossa epäsuorasti reformoimalla se erillisellä laitteella [26, s. 2]. Polttokennon suhteellisen alhainen lämpötila (noin 60–80 °C) nopeuttaa sen käynnistämistä ja vähentää osien kulumista. Katalyytin aineena käytetään jalometallia, tyypillisesti platinaa. Se erottaa vedyn elektronit ja protonit toisistaan. Jalometallikatalyytti lisää kustannuksia. [25.] Yhtälöissä 16–18 on esitetty PEMFC-polttokennon anodinen, katodinen ja kokonaisreaktio [27, s. 446].

Anodinen:



Katodinen:



Kokonaisreaktio:



Hiilivetypolttoaineita käytettäessä on myös käytettävä lisäreaktoria polttokaasun hiilimonoksidin vähentämiseksi, koska platinakatalyytti on herkkä hiilimonoksidimyrkytykselle. Tämä lisää järjestelmään myös kustannuksia. PEMFC-polttokennoja käytetään pääasiassa kuljetussovelluksiin, kuten esimerkiksi autoihin, linja-autoihin ja raskaisiin kuorma-autoihin. [25.]

### 3.3 Alkalinen polttokenno

Alkaliset polttokennot (AFC) olivat ensimmäisiä polttokennotekniikoita, ja näitä käytettiin Yhdysvalloissa sähköenergian ja veden tuottamiseen avaruusaluksissa. Polttoaineena käytetään kaliumhydroksidin liuosta vedessä elektrolyytinä. [25.] Nykypäivän AFC-polttokennot toimivat lämpötiloissa 50–90 °C [28, s. 244]. Katalyyttinä anodilla ja katodilla voidaan käyttää erilaisia ei-jalometalleja ja yleisimmin käytetty on nikkeli. Ei-jalometallien käyttö lisää anodilla ja katodilla tapahtuvien reaktioiden nopeutta. Kemiallisten reaktioiden nopeus kennoissa saattaa tarjota joissakin sovelluksissa jopa 60 %:n hyötysuhde. [29.] AFC:ssä tapahtuvat kemialliset reaktiot on esitetty yhtälöissä 19–21 [30].

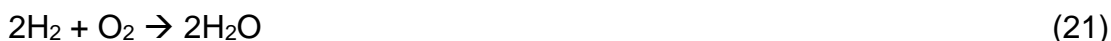
Anodinen reaktio:



Katodinen reaktio:



Kokonaisreaktio:



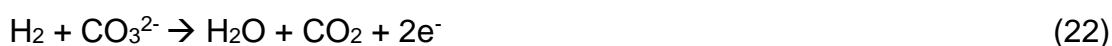
### 3.4 Sulakarbonaattipolttokenno

Sulakarbonaattipolttokennot (MCFC) ovat korkeassa lämpötilassa toimivia polttokennoja. Lämpötilat ovat noin 600–700 °C:ssa. Polttokennoissa käytetään elektrolyyttiä, joka koostuu sulasta karbonaattisuolaseoksesta, joka tarvitsee huokoisen, kemiallisesti inertin keraamisen litiumalumiinioksidimatriisin.

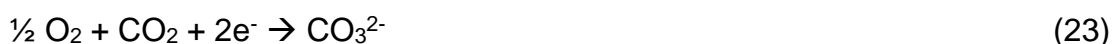
Katalyytteinä voidaan käyttää ei-jalometalleja korkeiden lämpötilojen vuoksi, tämä vähentää kustannuksia. MCFC-polttokennojen hyötysuhde voi olla jopa 65 % yhdistettynä turbiiniin. Jos järjestelmän hukkalämpö hyödynnetään käyttöön, kokonaishyötysuhde nousee jopa yli 85:iin %.

Polttokennoja hyödynnetään teollisuudessa ja sähkön ja lämmönyhteistuotantoon. Yksi haittapuoli järjestelmissä on sen kestävyys, sillä polttokennot toimivat korkeissa lämpötiloissa ja syövyttävä elektrolyytti nopeuttaa komponenttien hajoamista ja korroosiota. Järjestelmän etu on monipuolisuus polttoaineiden suhteen. Esimerkiksi metanolia voidaan käyttää reformoimalla. [25.] Yhtälöissä 22–24 on esitetty MCFC-polttokennon anodinen, katodinen ja kokonaisreaktio [31].

Anodinen:



Katodinen:



Kokonaisreaktio:



### 3.5 Kiinteä oksidipolttokenno

Kiinteissä oksidipolttokennoissa (SOFC) käytetään kovaa ei-huokoista keramiasta yhdistettä elektrolyyttinä. Polttokennon hyötysuhde polttoaineesta sähköksi on noin 60 % ja jos kyseessä on sovellus, joka ottaa talteen ja hyödyntää hukkalämmön, kokonaishyötysuhde on jopa 85 %. Järjestelmän lämpötila voi olla jopa 1 000 °C, jolloin jalometallikatalysaattoria ei tarvita, mikä pienentää kustannuksia. SOFC-polttokennot kestävät muihin kennotyyppeihin verrattuna

enemmän rikkiä. Polttoaineena voidaan käyttää jopa maakaasua, metanolia, biokaasua ja kivihiilestä valmistettuja kaasuja, sillä polttokennoja ei myrkyty hiili-monoksidista. Korkea lämpötila luo järjestelmälle kuitenkin vaikeuksia materiaa-  
likestävytyteen ja hitaaseen käynnistymiseen sekä lämpösuojaukseen lämmön säilyttämiseksi ja henkilöstön suojaamiseksi. [25.] Yhtälöissä 25–27 on esitetty SOFC-polttokennon anodinen-, katodinen- ja kokonaisreaktio [27, s. 445].

Anodinen:



Katodinen:



Kokonaisreaktio:



### 3.6 Fosforihappopolttokenno

Fosforihappopolttokenno (PAFC) on kypsä vety-happipolttokennojärjestelmä. Lämpötila järjestelmässä on 150–190 °C:sta. Katalyyttinä niin vety- että happielektrodeille käytetään pääasiassa platinaa. Käyttölämpötilan ansiosta vety voidaan ottaa suoraan vedyn lähteistä, kuten reformointikaasuista. Elektrolyytinä järjestelmässä käytetään väkevää fosforihappoa. Terminen stabiili väkevässä fosforihapossa on korkea, jolloin polttokenno voi toimia hapon lämpötila-alueen yläpäässä (100–220 °C). [32.] PAFC-polttokennojen hyötysuhde sähkön ja lämmön yhteistuotannossa on yli 85 %, mutta yksin sähköntuotantoon vain noin 37–42 %. Myös tässä laitteessa muut polttoaineet kuin vety tarvitsevat reformoinnin, kuten esimerkiksi metanoli. Tyypillisesti polttokennoa käytetään kiinteään sähköntuotantoon, mutta joitakin PAFC-järjestelmiä on käytetty suurten

ajoneuvojen, kuten kaupunkibussien voimanlähteenä. [25.] Yhtälöissä 28–30 on esitetty PAFC-polttokennon anodinen-, katodinen- ja kokonaisreaktio [33].

Anodinen:



Katodinen:



Kokonaisreaktio:



## 4 Polttokennokäyttö

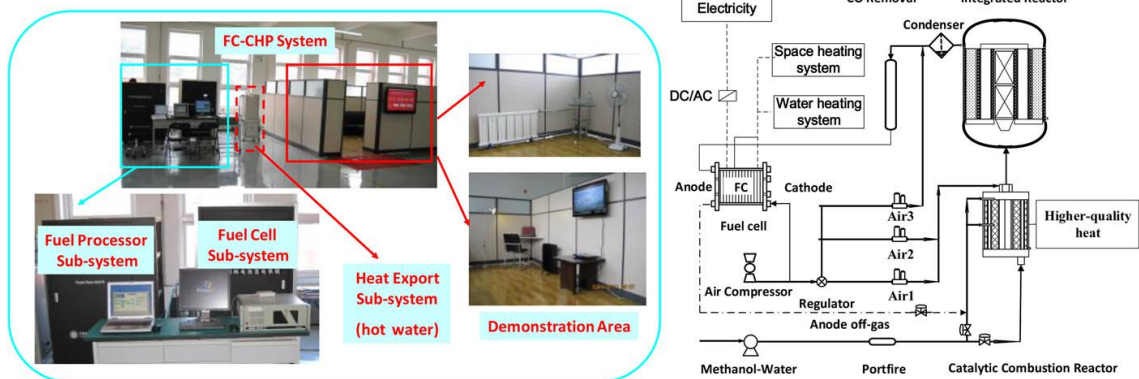
### 4.1 Polttokennokäyttö sähkön ja lämmön yhteistuotantoon

Polttokenno voidaan kytkeä yhdistettyyn lämmön ja sähkön tuotantojärjestelmään, joka sähköenergian lisäksi tuottaa lämpöenergiaa hyödyntäen kennon hukkalämpöä. Tällöin kokonaisenergiahyötysuhde voi olla jopa 80 %. Polttokennot tuottavat hyvin vähän melua, koska järjestelmä ei sisällä liikkuvia osia, jolloin järjestelmä ei tuota meluhaittaa asuinrakennuksille. [34.] Korkean lämpötilan polttokennot (HT-PEM) ovat kehittyneet viime vuosina CHP-sovelluksissa. Demonstraatiohankkeissa maakaasua on pääasiassa käytetty polttoaineena, mutta pienellä mukautuksella järjestelmät voivat toimia myös metanolilla. Suuri etu HT-PEM-polttokennoilla on se, että ne tuottavat korkealaatuista lämpöä, ja se vastaa asuinrakennusten sovellusten vaatimuksia. [23.]

Polttokennoihin perustuvaa sähkön ja lämmön yhteistuotantoa (FC-CHP) pidetään erittäin potentiaalisena lähitulevaisuuden suurimpana

polttokenomarkkinana. Tästä syystä monet tutkijat ovat kiinnittäneet huomiota FC-CHP-järjestelmiin viime vuosina. Yhdessä tutkimuksessa kehitettiin CHP-järjestelmä, joka koostuu protoninvaihtopolttokennosta ja integroidusta polttoaineen prosessorista. Polttoaineen käsittelyyn tarvitaan vain kolme reaktoriyksikköä: katalyyttinen poltto, uusi integroitu vedyn tuotantoreaktori ja CO:n poisto. H<sub>2</sub>:n tuotanto toteutettiin metanolista ja veden sekoituksesta reformoinnin avulla. Metanolin ja veden reformoinnista saatiin noin 8 Nm<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, jossa H<sub>2</sub>-pitoisuus oli noin 53–55 % ja CO:n alle 30 ppm. CHP-järjestelmä oli käytössä jatkuvasti yli 1 100 tuntia. Tehontarve vastasi asuinyksikön tavanomaista kuormitusta, eli noin 2–9 kW.

Tutkimuksessa käytetty järjestelmä näkyy kuvassa 7. Systemi koostuu polttokennosta ja polttoaineen prosessorista, ja osajärjestelmissä on sähköiset ohjaus- ja lämmönhallintayksiköt. Polttoaineen prosessori sisältää polttoaineen syöttöyksikön ja lämmönsiirtoyksikön korkealaatuisen käyttöveden tuottamiseksi. Tutkimukseen on järjestetty alue, jossa testataan järjestelmän energiantuotantoa tilojen lämmitykseen, veden lämmitykseen ja sähköntuotantoon. Kuvassa 7 on lisäksi FC-CHP:n prosessikaavio oikealla.

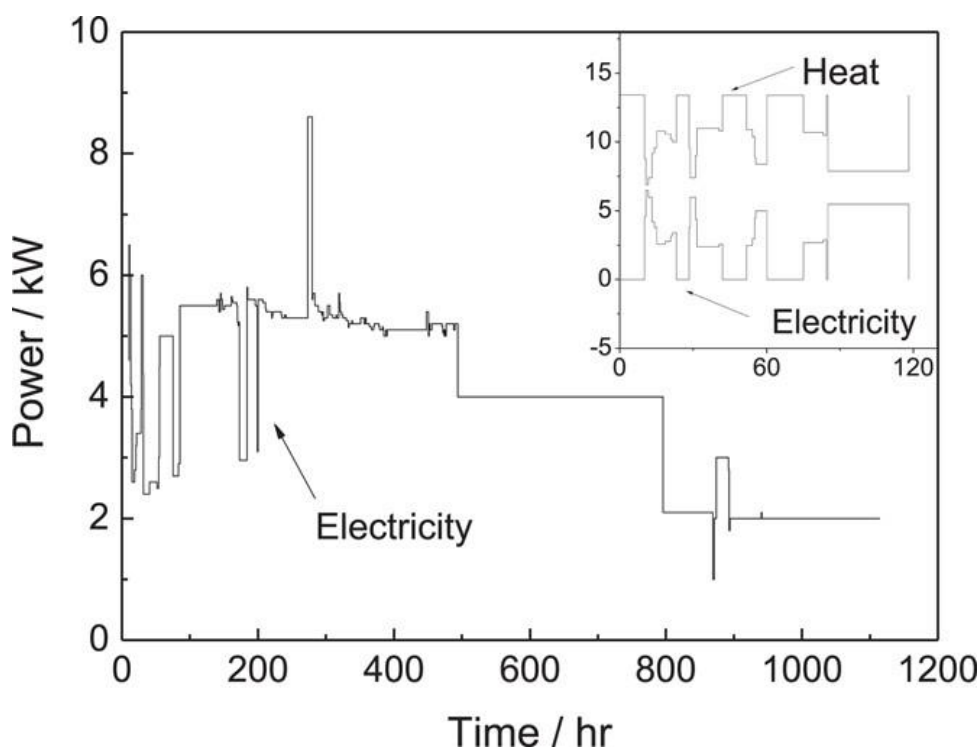


Kuva 7. Tutkimuksessa käytetty demonstraatioyksikkö ja prosessikaavio [35].

FC-CHP:ssä prosessiketjun syöttöinä käytettiin ainoastaan metanolia, ionivaihdettua vettä ja ilmaa. Metanoli ja ilma johdettiin huoneenlämmössä katalyyttiseen polttoreaktoriin. Metanoli syötettiin hammaspyöräpumpulla ja ilmavirtausta säädettiin massavirtaussäätimellä. Reaktorissa käytettiin Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-katalyyttiä

suorittamaan metanoli-ilmakatalyyttinen poltto. Katalyytin etuna on, että se pysytään käynnistämään nopeasti ilman ulkoista lämmitystä myös huoneenlämmössä. Reformointireaktioon saatiin riittävästi lämpöä prosessin suorittamiseksi. Esisekoitettu metanoli-vesiliuos (moolisuhde 1,2–1,4) syötettiin esilämmitys- ja haihdutusosiin, jossa liuos höyrystettiin ennen integroituun reformointireaktoriin siirtymistä. CO poistettiin CO PROX -tekniikalla, jotta se vaikuttaisi mahdollisimman vähän PEMFC-yhdisteiden elektrokatalyytteihin. Tuotettu kaasu syötettiin PEMFC-polttokennoon, joka tuottaa sähköä kuluttajille.

Tutkimuksen FC-CHP-järjestelmän suorituskyky on esitetty kuvassa 8 ja siitä nähdään, että sähköteho voi nousta enintään 9 kW:iin ja lämpöteho taas noin 13 kW:iin. Kuvan 8 tehojen perusteella laskettiin myös järjestelmän keskimääräinen hyötysuhde, joka oli 60,3 %. Jos anodilta poistuva kaasu hyödynnettäisiin lämpönä uudelleen katalyyttisessä polttolämmittimessä, hyötysuhde voi nousta 67 %:iin. Järjestelmän hyötysuhde jää hieman alhaiseksi, mutta sitä voisi luultavasti parantaa kehittämällä esilämmitintä. Maksimiteholla 9 kW ja metanolin syötöllä 80 ml/min sähkön hyötysuhde oli 40,5 %.



Kuva 8. FC-CHP-järjestelmän sähkö- ja lämpötehon suorituskyky [35].

Toimiva FC-CHP-järjestelmä, joka muuttaa metanolin sähkö- ja lämpöenergiaksi, onnistuttiin kokoamaan ja sitä käytettiin 1 100 tuntia. Polttoaineen prosessori onnistuttiin käynnistämään ilman ulkoisen lämmityksen tarvetta. Koko testauksen aikana CO-pitoisuus onnistuttiin pitämään alle 30 ppm:ssä. FC-CHP oli hyvin vakaa demonstraation aikana ja pystyi tuottamaan 2–9 kW sähkötehoa. Tällä tutkimuksella osoitettiin, että polttokennoja voidaan käyttää asuinrakennusten sähkön- ja lämmöntuotantoon. Tulevaisuudessa järjestelmät kehittyvät varmasti vielä paremmiksi, mikä nostaa polttokennokäytön suosiota. [35.]

Toisessa artikkelissa esitettiin uusi hajautettu energiajärjestelmä. Tutkijat rakensivat aurinkoenergialla toimivan metanolia reformoivan sulakarbonaattipolttokennon, joka on yhdistetty kaasun (GT)-höyryturbiini (ST)-sähköntuotanto- ja lämmitysjärjestelmään. Tässä järjestelmässä hyödynnetään tehokkaasti matalan lämpötilan aurinkoenergiaa sähköntuotannossa metanolin reformoinnin avulla. Polttokennon järjestelmään kuuluu sulakarbonaattipolttokenno, parabolinen kourukeräin sekä GT- ja ST-sähköntuotantosyklit. MCFC-polttokennon etuihin kuuluu sen korkea hyötysuhde ja alhaiset kustannukset. MCFC toimii suhteellisen alhaisissa lämpötiloissa, jolloin voidaan käyttää edullisia metallimateriaaleja. Tällä hetkellä MCFC-yhteistuotantojärjestelmän sähköntuotantotehokkuus voi olla jopa 47–60 % ja kokonaislämpötehokkuus 80–90 %. [36, s. 28671.]

Artikkelissa vertailtiin uuden MCFC-GT-ST-CHP-järjestelmän ja metanolia polttavan järjestelmän lämpötehokkuutta. Eri polttoainevirroilla uuden järjestelmän lämpötehokkuus on parempi kuin perinteisen järjestelmän. Tulokset osoittivat, että uuden järjestelmän hyötysuhde, sähköinen kokonaishyötysuhde ja lämpötehokkuus ovat 44,12 %, 58,62 % ja 90,36 %. [36, s. 28681.]

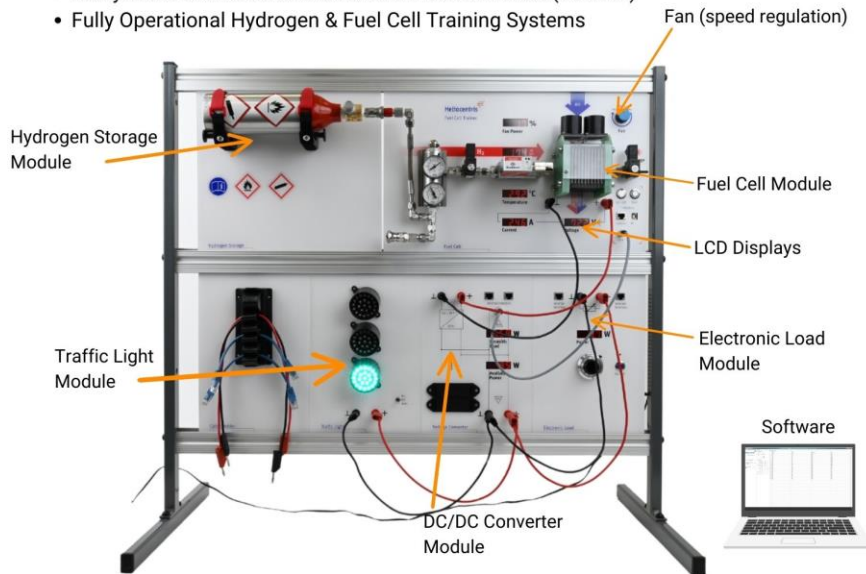
## 4.2 Polttokennot laboratoriossa ja opetuskäyttöön

Tieto ja osaaminen polttokennoista on tarpeellista energia-alan tulevaisuutta varten, sillä se on ympäristöystävällistä teknologiaa. Oppimisprosessin tulisi olla mielenkiintoista ja inspiroivaa, ja tästä syystä käytännönopetus on parempi vaihtoehto perinteiselle teorialuennolle. Se voisi edistää kognitiivista kasvua, oppimiskokemuksia, oppimiseen sitoutumista ja motivaatiota. Tästä syystä polttokenno-opetuksen tulisi olla jatkossa enemmän käytännöllistä, esimerkiksi laboratoriossa työskentelyä ja polttokennojärjestelmään tutustumista fyysisesti. Opiskelijoille voisi järjestää tehtäviä, kuten hyötysuhteen laskeminen.

Yritys, kuten esimerkiksi Heliocentris myy polttokennoja opetuskäyttöön. Polttokennojärjestelmät sopivat erinomaisesti perusperiaatteiden opettamiseen. Kaikki järjestelmän komponentit ovat täysin näkyvillä erikseen. Komponentit ja koko laite on esitetty kuvassa 9. Järjestelmä sisältää 50 W:n polttokennomoduulin, jossa on polttokenno-ohjain, vedyn virtausmittari, ilmansyöttö sekä led-näyttö, missä näkyy järjestelmäparametrit (virta, jännite, lämpötila, polttoaineen ja ilman syöttö). Tämän lisäksi järjestelmä sisältää elektronisen kuormamoduulin, DC/DC-muunninmoduulin, liikennevalomoduulin (sähkövirran esimerkkikuluttaja), H<sub>2</sub>-varastointimoduulin, H<sub>2</sub>-liitäntäsarjan sekä vetygeneraattorin. Yritys tekee myös järjestelmiä, jossa käytössä on metanolipolttokenno. Pakkaus sisältää myös varastosäiliöitä metanoliliuoksia varten. [37.]

## Fuel Cell Trainer - System Setup

- Analyze the characteristics of a 50W Fuel Cell Stack (10 cells)
- Fully Operational Hydrogen & Fuel Cell Training Systems



Kuva 9. Polttokennojärjestelmä opetuskäyttöön [37].

Polttokenno olisi erittäin monialainen laite opetuskäytössä. Yhdellä laitteella voisi ymmärtää kemiaa, kuten reaktioyhtälöitä, elektrolyysistä ja energiamuutoksista. Fysiikan kannalta taas polttokennoilla voisi tutkia termodynamiikkaa sekä sähkökemiallisia ilmiöitä. Energia-alalla polttokenno toisi näkökulmaa ei-polttamiseen perustuvaan teknologiaan. Opetuksessa voisi antaa erilaisia tehtäviä, kuten kennon tehokkuuden tutkimista tai häviöiden ja hyötysuhteen tarkastelua.

Konkreettinen polttokennojen tutkiminen voi tehdä aiheesta enemmän ymmärrettävän ja motivoivan. Polttokennot ovat kasvava ja kehittyvä teknologia, joten se voisi tuoda opiskelijoille osaamista, jolle on kysyntää tulevaisuudessa. Haasteina ovat polttokennojärjestelmien suuret kustannukset sekä polttoaineiden käsittelyn vaarallisuus.

## 5 Taloudellinen ja ympäristöllinen tarkastelu

FC-CHP-järjestelmien hinnat voivat vaihdella merkittävästi laitteiden laajuuden, maantieteellisen sijainnin ja muiden paikkakohtaisten olosuhteiden mukaan. Yhdysvaltain energiaministeriö (United States Department of Energy) on kuitenkin arvioinut asennuskustannuksien vaihtelevan 4 600 dollarista 10 000 dollariin kilowattia kohden. Järjestelmien kapasiteetin kasvaessa asennuskustannukset laskevat kilowattia kohden, kuten yleisesti muidenkin CHP-tekniologioiden kohdalla. Tässä arvioinnissa edustivat MCFC- ja PAFC-järjestelmät. [38.]

Polttokennojen kunnossapito- ja käyttökustannukset riippuvat erilaisista tekijöistä, kuten polttokennotyypistä, kapasiteetista ja laitteiden kypsyyssasteesta. Polttokennon huoltoa voi hoitaa joko oma henkilöstö tai palveluntarjoaja. Sopimushuollon kustannukset pyörivät noin 0,7–2,0 sentin välillä kilowattia kohden. Jos polttokennopinon vaihto tai kunnostaminen kuuluu mukaan, kustannukset vaihtelevat noin 3,6–4,5 sentin/kWh välillä.

Polttokennot muuttavat polttoaineen sähköksi sähkökemiallisella prosessilla. Tämä prosessi ei tuota hiilimonoksidia (CO), typen oksideja (NO<sub>x</sub>) tai haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC). Palamista tapahtuu vain polttokennoreformereissa ja päästöt ovat hyvin alhaiset. Anodin poistokaasu sisältää noin 8–15 % vetyä, ja tämä kaasu poltetaan reformerissa alle 980 °C:n lämpötiloissa, jolloin minimoidaan NO<sub>x</sub>:n muodostuminen. Lämpötila on kuitenkin tarpeeksi korkea haettamaan CO:n ja VOC-päästöt. [38.]

## 6 Yhteenveto

Ilmastotavoitteet ja niiden saavuttaminen edellyttää siirtymistä pois fossiilisista polttoaineista ja siirtymistä kohti vähäpäästöisiä ja uusiutuvia energiaratkaisuja. Tietyt metanolin tuotantotavat sekä polttokennojen hyödyntäminen tukevat siirtymää kohti vähähiilistä tulevaisuutta. Metanoli on monipuolinen

energiantakaja, ja sitä voidaan valmistaa useista eri lähtöaineista ja tavoilla. Erityisesti ilmakehän hiilidioksidista ja vedystä valmistettu metanoli eli ns. vihreä metanoli on ilmaston kannalta kestävä vaihtoehto. Haasteita kyseiselle teknologialle tuo kallis hinta. Metanoli polttoaineena on helppo varastoida ja kuljettaa, mikä tekee siitä paremman vaihtoehdon moniin muihin verrattuna.

Polttokennot ovat energiantuotantotekniikoita, joilla voidaan todistetusti tuottaa sähköä ja lämpöä korkealla hyötysuhteella. Lisäksi suuren edun antaa prosessin vähäpäästöisyys. PEMFC- ja MCFC-GT-ST-CHP-järjestelmä on osoittanut toimivan laadukkaasti ja melko hyvillä hyötysuhteilla niin sähkön- kuin lämmöntuotannossa. Pienimuotoiset CHP-järjestelmät sopivat hyvin erityisesti kiinteistöihin, toimistorakennuksiin ja syrjäseuduille. Polttokennojen hinnat ovat kuitenkin vielä suhteellisen korkeat, erityisesti pientuotannossa.

Polttokennoteknologia ja metanoli ovat potentiaalisia kilpailijoita tulevaisuudessa energiamarkkinoiden kärkipäässä. Myös ilmastotavoitteiden kannalta molemmat tarjoavat lupaavan polun. Polttokennon suuri etu on, että sen päästöt ovat erittäin alhaiset polttoon perustuvaan energiantuotantoon verrattuna. Teknologiat vaativat kuitenkin vielä lisää kehitystä ja tutkimista. Jotta käyttö yleistyisi, tarvittaisiin hyvän teknologian rinnalle vielä taloudellisia kannustimia.

## Lähteet

- 1 Tabibian, Seyed & Sharifzadeh, Mahdi. 2023. Statistical and analytical investigation of methanol applications, production technologies, value-chain and economy with a special focus on renewable methanol. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 179, 113281, s. 1–27.
- 2 Dalena, Francesco; Senatore, Alessandro; Marino, Alessia; Gordano, Amalia; Basile, Marco & Basile, Angelo. 2018. Chapter 1 – Methanol Production and Applications: An Overview. *Methanol Science and Engineering*. s. 3–28.
- 3 Solanki, Yash & Reid, Danielle. 2023. Methanol Structure, Density & Molar Mass. Verkkoaineisto. Study.com. <<https://study.com/academy/lesson/facts-about-methanol-density-molar-mass.html>>. Päivitetty 21.11.2023. Luettu 1.4.2025.
- 4 What is Methanol?. Verkkoaineisto. Byjus. <<https://byjus.com/chemistry/methanol/>>. Luettu 1.4.2025.
- 5 Metanoli. 2025. Verkkoaineisto. Työterveyslaitos. <<https://ova.ttl.fi/metanoli>>. Päivitetty 13.2.2025. Luettu 2.4.2025.
- 6 Tuomisto, Jouko. 2020. Metanolia juomallako sokeaksi vai henki pois? Verkkoaineisto. Terveyskirjasto. <<https://www.terveyskirjasto.fi/asy00208>>. 15.6.2020. Luettu 4.4.2025.
- 7 Verhelst, Sebastian; Turner, James; Sileghem, Louis & Vancoillie, Jeroen. 2019. Methanol as a fuel for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*. Vol. 70, s. 43–88.
- 8 Alias, M.S.; Kamarudin, S.K.; Zainoodin, A.M. & Masdar, M.S.. 2020. Active direct methanol fuel cell: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 45, s. 19620–19641.
- 9 Facts About Formaldehyde. Verkkoaineisto. EPA. <<https://www.epa.gov/formaldehyde/facts-about-formaldehyde#whatisformaldehyde>>. Luettu 5.4.2025.
- 10 METHANOL IN PHARMACEUTICAL MANUFACTURING: A COMPREHENSIVE EXPLORATION. Verkkoaineisto. Purosolv. <<https://purosolv.com/methanol-in-pharmaceutical-manufacturing-a-comprehensive-exploration/>>. 18.1.2024. Luettu 5.4.2025.

- 11 Salahudeen, N.; Rasheed, A.A.; Babalola, A. & Moses, A.U.. 2022. Review on technologies for conversion of natural gas to methanol. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. Vol 108, 104845, s. 1–16.
- 12 Methanol production. Verkkoaineisto. Ecoquery. <<https://ecoquery.ecoinvent.org/3.7/cutoff/dataset/9105/documentation>>. Luettu 7.4.2025.
- 13 Wang, Dongliang; Meng, Wenliang; Zhou, Huairong; Yang, Yong; Xie, Jiangpeng; Yang, Siyu & Li, Guixian. 2022. Novel coal-to-methanol process with near-zero carbon emission: Pulverized coal gasification-integrated green hydrogen process. *Journal of Cleaner Production*. Vol 339, 130500, s. 1–13.
- 14 Li, Changhang; Bai, Hongtao; Lu, Yuanye; Bian, Jinghong; Dong Yan & Xu, He. 2018. Life-cycle assessment for coal-based methanol production in China. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 188, s. 1004–1017.
- 15 Rinaldi, Riccardo; Lombardelli, Giorgia; Gatti, Manuele; Visconti, Carlo & Romano, Matteo. 2023. Techno-economic analysis of a biogas-to-methanol process: Study of different process configurations and conditions. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 393, 136259, s. 1–13.
- 16 Biogas Methanol. Verkkoaineisto. Gazpack. <<https://gazpack.nl/en/biogas-methanol/>>. Luettu 9.4.2025.
- 17 Biswal, Trinath; Shadangi, Krushna; Sarangi, Prakash & Srivastava, Rajesh. 2022. Conversion of carbon dioxide to methanol: A comprehensive review. *Chemosphere*. Vol 298, 134299, s. 1–20.
- 18 Alvarez, Nieves. 2023. Conversion of CO<sub>2</sub> to methanol. Verkkoaineisto. Decarbonisation Technology. <<https://decarbonisationtechnology.com/article/162/conversion-of-co2-to-methanol>>. Luettu 10.4.2025
- 19 Sir William Robert Grove. Verkkoaineisto. Britannica. <<https://www.britannica.com/technology/fuel-cell/Types-of-fuel-cells>>. Luettu 10.4.2025
- 20 Lucia, Umberto. 2014. Overview on fuel cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 30, s. 164–169.
- 21 Ali, Ali; Nemah, Ahmed; Bahadli, Yusra & Kianfar, Ehsan. 2024. Principles and performance and types, advantages and disadvantages of fuel cells: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. Vol. 10, 100920, s. 1–21.
- 22 Yu, Yunqi; Chen, Kangcheng; Wu, Qin; Zhang, Yaoyuan; Shi, Daxin & Li, Hansheng. 2023. Recent progress on reduced graphene oxide supported

- Pt-based catalysts and electrocatalytic oxidation performance of methanol. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol 48, s. 1785–1812.
- 23 Araya, Samuel; Liso, Vincenzo; Cui, Xiaoti; Li, Na; Zhu, Jimin; Sahlin, Simon; Jensen Soren; Nielsen, Mads & Kaer, Soren. 2020. A Review of The Methanol Economy: The Fuel Cell Route. *Verkkoaineisto*. MDPI. <<https://www.mdpi.com/1996-1073/13/3/596>>. Luettu 12.4.2025.
  - 24 Araya, Samuel; Zhou, Fan; Liso, Vincenzo; Sahlin, Simon; Vang, Jakob; Thomas, Sobi; Gao, Xin; Jeppensen, Christian & Kaer, Soren. 2016. A comprehensive review of PBI-based high temperature PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 41, s. 21310–21344.
  - 25 Types of Fuel Cells. *Verkkoaineisto*. U.S DEPARTMENT of ENERGY. <<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells>>. Luettu 13.4.2025.
  - 26 Li, Na; Cui, Xiaoti; Zhu, Jimin; Zhou, Mengfan; Liso, Vincenzo; Cinti, Giovanni; Sahlin, Simon & Araya, Samuel. 2023. A review of reformed methanol-high temperature proton exchange membrane fuel cell systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 182, 113395, s. 1–21.
  - 27 Kumar, S.Shiva & Himabindu, V.. 2019. Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies*. Vol. 2, s. 442–454.
  - 28 Kaur, Manmeet & Pal, Kaushik. 2019. Review on hydrogen storage materials and methods from an electrochemical viewpoint. *Journal of Energy Storage*. Vol. 23, s. 234–249.
  - 29 Alkaline Fuel Cell. *Verkkoaineisto*. FCW. <<https://fuelcellworks.com/knowledge/technologies/afc>>. Luettu 15.4.2025.
  - 30 AN INTRODUCTION TO ALKALINE FUEL CELLS. *Verkkoaineisto*. Fuel Cell Store. <<https://www.fuelcellstore.com/blog-section/fuel-cell-information/introduction-alkaline-fuel-cells>>. 12.1.2021. Luettu 15.4.2025.
  - 31 Molten carbonate fuel cell. *Verkkoaineisto*. Wikipedia. <[https://en.wikipedia.org/wiki/Molten\\_carbonate\\_fuel\\_cell](https://en.wikipedia.org/wiki/Molten_carbonate_fuel_cell)>. Luettu 15.4.2025.
  - 32 Choudhury, Suman. Phosphoric Acid Fuel Cell Technology. *Verkkoaineisto*. Springer Nature Link. <[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-387-68815-2\\_8](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-387-68815-2_8)>. Luettu 16.4.2025.
  - 33 Phosphoric acid fuel cell. *Verkkoaineisto*. Wikipedia. <[https://en.wikipedia.org/wiki/Phosphoric\\_acid\\_fuel\\_cell](https://en.wikipedia.org/wiki/Phosphoric_acid_fuel_cell)>. Luettu 15.4.2025.

- 34 Tohka, Antti & Salmi, Kari. 2025. SOLAR ENERGY, BATTERIES & FUEL CELLS. Opintomateriaali. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 35 Zhang, Jing; Li, Duo; Zhong, Hexiang; Li, Jinxiao; Chen, Shuhua; Song, Rensheng; Jin, Wenyao & Pan, Liwei. 2022. Improved performance of a residential combined heat and power system by integrating compact fuel processor and proton exchange membrane fuel cell. *SCI*. Vol. 10, s. 2732–2740.
- 36 Zhao, Hongbin & Hou, Qinlong. 2022. Study on thermal performance of solar methanol reforming MCFC-GT-ST-CHP system. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol 47, s. 28670–28683.
- 37 Fuel Cell Trainer. Verkkoaineisto. Heliocentris. <<https://www.heliocentrisacademia.com/fuel-cell-trainer/p1482>>. Luettu 20.4.2025.
- 38 Fuel Cells. Verkkoaineisto. U.S DEPARTMENT OF ENERGY. <[chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://betterbuildingssolutioncenter.energy.gov/sites/default/files/attachments/CHP\\_Fuel\\_Cells.pdf](chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://betterbuildingssolutioncenter.energy.gov/sites/default/files/attachments/CHP_Fuel_Cells.pdf)>. Luettu 20.4.2025.

