



Pinja Salminen

Polttokennot tulevaisuuden energi- antuotannossa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

9.5.2022

Tiivistelmä

Tekijä: Pinja Salminen
Otsikko: Polttokennot tulevaisuuden energiantuotannossa
Sivumäärä: 75 sivua
Aika: 9.5.2022

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine: Energiantuotantomenetelmät
Ohjaajat: Lehtori Esa Toukoniitty
Projektipäällikkö Elina Koivisto

Tämän insinööriyön tarkoituksena on kartoittaa polttokennojen roolia tulevaisuuden energiantuotannossa. Tulevaisuuden energiantuotanto tulee pohjautumaan kasvamassa määrin muihin kuin fossiilisiin polttoaineisiin. Työn tavoitteena on tarkastella polttokennoja osana vaihtoehtoisia energiantuotantomenetelmiä. Työn tilaajana on Noatek Oy.

Polttokennoja hyödynnetään paikallisina ja kannettavina järjestelminä. Paikallisia järjestelmiä ovat muun muassa mikroverkot, yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto ja varavoimajärjestelmät. Kannettavia järjestelmiä ovat esimerkiksi kuluttaja-elektronikan akkujen korvaavat mikropolttokennot. Tulevaisuudessa polttokennojen rooli energiantuotannossa tulee kasvamaan. Erityisesti kiinnostuksen kohteena on polttokennojen hyödyntäminen yhteistuotannossa sekä varavoimajärjestelmissä.

Noatek Oy:n pilotointikokeen tarkoituksena oli mallintaa polttokenno-akku-hybridijärjestelmää, joka toimisi siirrettävänä varavoimayksikkönä. Tässä vaiheessa pilotointia haluttiin keskittyä polttokennon kuormituksen testaamiseen käyttöaikansa ylittäneellä polttokennolla. Pilotointitestillä saatiin alustavat tulokset järjestelmän toimivuudesta ja sitä pystytään hyödyntämään teoreettisiin laskennallisiin tuloksiin. Testistä saatiin myös tietoa käyttöikänsä ylittäneen kennon toiminnasta.

Työssä esitellään yleisimmät polttokennot sekä niiden toimintaperiaatteet. Tämän jälkeen vertaillaan vety- ja metanolikemien merkittävimpiä eroja ja haasteita sekä tarkastellaan Noatek Oy:n metanolipolttokennolle suorittamaa pilotointikoetta ja sen tuloksia. Vertailun jälkeen käsitellään eri tapoja hyödyntää polttokennotekniikkaa energiantuotannossa sekä niiden ympäristövaikutuksia. Lopuksi pohditaan polttokennojen nykytilannetta Suomessa ja maailmalla sekä polttokennojen tulevaisuuden käyttökohteita.

Avainsanat: polttokennot, energiantuotanto, tulevaisuus, vety, mikroverkot, yhteistuotanto

Abstract

Author: Pinja Salminen
Title: Fuel Cells in Future Energy Production
Number of Pages: 75 pages
Date: 9 May 2022

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Energy and Environmental Technology
Professional Major: Energy Production Methods
Supervisors: Esa Toukoniitty, Principal Lecturer
Elina Koivisto, Project Manager

The aim of this thesis was to investigate the importance fuel cells have in future energy production. Currently the energy production industry is shifting away from fossil fuels and basing production more heavily on alternative sources. The objective of this thesis was to examine fuel cells as a division of alternative energy production methods. This work was commissioned by Noatek Oy.

Fuel cells are generally categorised into two groups according to their use in stationary and portable applications. Stationary applications include microgrids, combined heat and power production and backup power systems. Among others, portable applications include micro fuel cells, which can be used to replace batteries in consumer electronics. In the future, the role of fuel cells in energy production will increase and cogeneration and backup power systems will be of particular interest

The purpose of the piloting experiment done by Noatek Oy is to model the functioning of fuel cell-battery hybrid system that would operate as a portable backup power system. In this early phase of the piloting experiment, the main focus was on testing the load durability of a fuel cell that has exceeded its lifetime. The piloting experiment succeeded in generating preliminary results of the functionality of the cell-battery hybrid system. And in addition, the system can also be used for calculating values. The piloting experiment also provided valuable information on how fuel cell operates when it is past its lifetime.

In this thesis the most common fuel cells and their operating principles are introduced. After that, the most significant differences between hydrogen and methanol fuel cells and the challenges associated with their use, are compared. Then, the results of the piloting experiment on methanol fuel cell done by Noatek Oy are examined. Next, the different ways to utilise fuel cell technology in future energy production and their environmental impact are addressed. Lastly, the current standing of fuel cells in Finland, as well as their position in energy production throughout the world and their different applications in the future are discussed.

Keywords: fuel cell, energy production, future, hydrogen, microgrid, combined heat and power

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Polttokennojen historia	2
3	Toimintaperiaate ja yleiskatsaus kennotyypeistä	4
3.1	Polttokennon toimintaperiaate	4
3.2	Polttokennon termodynamiikka	7
3.3	Kennotyypit	8
3.3.1	Alkalipolttokenno	9
3.3.2	Fosforihappopolttokenno	10
3.3.3	Kiinteäoksidikenno	11
3.3.4	Sulakarbonaattikenno	12
3.3.5	Protoninvaihtokalvopolttokenno	13
3.3.6	Suorametanolipolttokenno	14
4	Vety- ja metanolipolttokennojen vertailu	15
4.1	Tekniset ominaisuudet	16
4.2	Haasteet	20
4.3	Noatek Oy:n testi	23
5	Polttokennot energiantuotannossa	28
5.1	Mikroverkko	29
5.2	Paikalliset voimalaitokset	33
5.3	Kannettavat voimalähteet	39
6	Ympäristövaikutukset	41
6.1	Kiertotalous	41
6.2	Ilmasto	44
7	Polttokennot Suomessa ja maailmalla	46
8	Polttokennojen käyttö tulevaisuudessa	52
9	Yhteenveto	56

Lyhenteet

Roomalaiset

Cl_2	Kloori	
CO_3^{2-}	Karbonaatti	
CO_2	Hiilidioksidi	
e^-	Elektroni	
F	Faradayn vakio	[As/mol]
G	Gibbsin vapaa energia	[J, J/mol]
H	Entalpia	[J]
H	Vety	
n	Ainemäärä	[mol]
NaH	Natriumhydridi	
O	Happi	
OH^-	Hydroksyyli	
P	Paine	[bar, Pa]
Q	Lämpö	
S	Entropia	[J/K]
T	Lämpötila	[K, °C]

U	Sisäenergia	[J/mol]
U	Jännite	[V]
V	Tilavuus	[m ³ , L]
W	Työ	[J]

Kreikkalaiset

Σ	Summa	
Δ	Muutos	
μ	Mikro	[10 ⁻⁶]

Alaindeksit

el Sähköinen (eng. electrical)

Recycle Kierrätettävä

Lyhenteet

AC: Alternative Current, vaihtovirta

AFC: Alkaline Fuel Cell, alkalipolttockenno

Ah: Ampeeritunti

CHP: Combined Heat and Power, yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto

DC: Direct Current, tasavirta

DMFC: Direct Methanol Fuel Cell, suorametanolipolttockenno

EPS: Emergency Power System, varavoimajärjestelmä

GDL: Gas Diffusion Layer, kaasudiffuusiokerros

HT: High Temperature, korkea lämpötila

LT: Low Temperature, matala lämpötila

MCFC: Molten Carbonate Fuel Cell, sulakarbonaattipolttokenno

MEA: Membrane Electrode Assembly

PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cell, fosforihappopolttokenno

PCC: Post Combustion Capture, hiilidioksidin talteenotto savukaasuista

PEMFC: Proton Exchange Membrane Fuel Cell, protoninvaihtokalvopolttokenno

Power-to-X: Uusiutuvien energialähteiden avulla tuotetut synteettiset polttoaineet

RAPS: Remote Area Power Supply, syrjäisten alueiden energiantuotto

rSOC: Reversible Solid Oxide Cell, käänteinen kiinteäoksidikenno

SED: Selective Electrochemical Dissolution, valikoiva sähkökemiallinen liukeneminen

SOFC: Solid Oxide Fuel Cell, kiinteäoksidipolttokenno

TD: Transient Dissolution Through Potential Alteration, hetkittäinen liukeneminen jännitteen vaihtelun avulla

UPS: Unintterrupted Power Supply, keskeytymätön virransyöttö

W/kg Gravimetrinen tehotehiys

Wh/kg Gravimetrinen energiatehiys wattitunteina per kilogramma.

1 Johdanto

Fossiilisten polttoaineiden rajallisuuden sekä ympäristön hyvinvoinnin vuoksi tarve puhtaammille ja kestävimille energiamuodoille on kasvava. Energiantuotannon painopiste tulee siirtymään suurista keskitetyistä laitoksista kohti pienimuotoisempaa hajautettua tuotantoa sekä uusia polttoaineita. (Wilberforce ym. 2016: 1) Erityisesti vetytekniikoita ja polttokennoja pidetään yleisesti tulevaisuuden energiamuotoina (Felseghi ym. 2019: 2). Polttokennot ovat sähkökemiallisia laitteita, jotka pystyvät muuttamaan kemiallisen energian sähköenergiaksi yhdellä muunnoksella lähes päästöttömästi. Ennen kuin polttokennot voivat yleistyä kaupallisesti, tulee niiden hintaan ja käyttöikään liittyvät ongelmat ratkaista. (Sharaf & Orhan 2014: 811.)

Tässä työssä tullaan esittelemään yleisimpiä polttokennoja ja niiden toimintaperiaatetta, vertailemaan vety- ja metanolipolttokennojen merkittävimpiä eroja sekä käsittelemään polttokennojen potentiaalia energiantuotantomalleissa, niiden tilannetta maailmalla sekä tarkastelemaan polttokennojen tulevaisuuden käyttökohteita. Tarkoituksena on antaa lukijalle havainnollistava kuva polttokennoista, niiden nykytilanteesta ja käyttömahdollisuuksista pois lukien liikennekäyttöön tarkoitetut polttokennot.

Työssä esitellään Noatek Oy:n metanolipolttokennolle tekemän pilotointikokeen tuloksia. Opinnäytetyön toimeksianto perustuu Noatek Oy:n tuottamiin tutkimus- ja kehityspalveluihin.

Noatek Oy on vuonna 2010 perustettu turvallisuus- ja tietoliikennetekniikan alan yritys, joka tuottaa valvontaan ja turvallisuuteen liittyviä ratkaisuja, asiantuntija- sekä projektipalveluja. Yritys on erikoistunut energia-alan tuotannon ja jakelun valvontajärjestelmien toimittamiseen, tuotantoprosessien videovalvonta- ja käytönvalvontajärjestelmien integraatioihin, laitteiden ja tuotantokoneiden etävalvonta ja telemetriatietojen siirtoihin. Liiketoiminnan perustana on tuottaa

elinkaarihallinnan palveluja asiantuntevasti ja luotettavasti vastuullisuus huomioiden.

2 Polttokennojen historia

Jules Verne kuvaili kirjassaan *The Mysterious Island* (1875) veden ja sen rakenneosien, hapen ja vedyn, muodostavan loppumattoman lämmön ja valon lähteen, joka olisi intensiteetiltään hiiltäkin tehokkaampi. Hänen kuvauksensa tästä energianlähteestä voisi käsitellä polttokennoja. *The Mysterious Island* -kirjan kirjoittamisen aikoihin vuonna 1875 ensimmäinen raakaversio polttokennosta oli ehtinyt olla olemassa jo 37 vuotta. (Steele & Heinzl 2001: 345.)

Kunnia polttokennojen kehittämisestä annetaan Sir William Robert Groveille hänen kehittämästään ”kaasupatterista” (Gas Battery) (Andújar & Segura 2009: 2310). Tämän mahdollisti 1800-luvun alussa sir Humphrey Davyn tekemä keellinen tutkimustyö. Davy oli esitellyt polttokennon toiminnan kannalta tärkeitä periaatteita ja rakentanut alkeellisen version polttokennosta, jolla hän pystyi antamaan itselleen heikkoja sähköiskuja. (Fuel Cells Department of Chemical Engineering and Biotechnology 2022.) Tutkijat Baur ja Preis tekivät 1930-luvun lopulla testejä kiinteillä oksidielektrolyyteillä, kuten zirkoniumilla, mikä johti kiinteäoksidipolttokennotekniikan (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) kehittämiseen (Sharaf & Orhan 2014: 813). Varsinaisen käytännössä hyötyä tuottavan alkali-polttokennon (Alkaline Fuel Cell, AFC) kehitti Francis Bacon 1950-luvulla (Wilberforce ym. 2016: 2). Bacon oli kehitellyt toisen maailmansodan aikana sukellusveneisiin tarkoitettua, korkeassa paineessa toimivaa polttokennon, mutta vasta vuonna 1958 hänen esittelemänsä kennon katsottiin olevan tarpeeksi luotettava. Esittelyn jälkeen hänen kennonsa herättivät suuremman yleisön huomion. Vuotta myöhemmin Bacon esitteli suuremman viiden kilowatin alkalipolttokennon. (Andújar & Segura 2009: 2310.)

Vuonna 1958 Harry Ihrig muokkasi Baconin viiden kilowatin polttokennoa ja asensi kolme kertaa suuremman 15 kilowatin kennon Allis-Chalmers-traktooriinsa. Tämä johti yhteistyöhön Yhdysvaltain ilmavoimien ja Allis-Chalmersin

kanssa. Yhteistyöstä syntyi monia polttokennotoimisia ajoneuvoja, kuten trukkeja, golfkärryjä ja sukelluslaitteita. (History - FuelCellsWorks 2022)

Baconin vuonna 1958 esittelemän kennon patentti ostettiin käytettäväksi Nasan Apollo-avaruusohjelmassa (1961–1972). Ohjelmaan rakennettiin 1,5 kilowatin polttokenno tuottamaan sähköä ja juomavettä. Toimivan alkalikennon kehittämisen seurauksena erityyppisten polttokennojen kehitys nopeutui huomattavasti, sillä jo 1950-luvun lopussa GE Electrics oli kehittänyt Nasan Gemini-ohjelmaan (1963–1966) protoninvaihtokalvopolttokennon (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC). (Sharaf & Orhan 2014: 812.) Fosforihappokennon (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC) kehittivät tutkijat G.V Elmore ja H.A Tanner 1961 ja sulakarbonaattikennon (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) kehitettiin 1965 Yhdysvaltain armeijan rahoituksen ja sähköistymisen edesauttamana. (History – FuelCellWorks 2022; Andújar & Segura 2009: 2310–2311.)

Polttokennotoiminen siirreltävä tutka sekä moottoripyörä kehitettiin 1950–1960-luvuilla. Samaan aikaan suunniteltiin polttokennotoimisen merenalaisen tukikohdan rakentamista. Lähes jokaisella autoalan yrityksellä oli kokeilussa polttokennotoiminen auto 1960-luvulla. (History - FuelCellsWorks 2022)

Energiantuotannon tehokkuuden lisäämisen paine johti fosforihappopolttokennon nopeampaan kehittämiseen 1970-luvulla. Suuria fosforihappokennoja kehitettiin ensisijaisena verkonulkopuolisena voimanlähteenä. International Fuel Cell kehitti jopa 1 megawatin yksikön. (History – FuelCellsWorks 2022)

Seuraavan vuosikymmenen aikana 1980-luvulla polttokennoille oli suuria suunnitelmia niin paikallisina sovelluksina kuten myös siirrettävinä järjestelminä, kuten busseina. Kunnallisella tasolla suunniteltiin jopa 100 megawatin voimalaitoksia. Suuria fosforihappopolttokennolaitoksia rakennettiin muutamia, mutta ne eivät yleistyneet suurien lämpövoimalaitosten vuoksi. (History – FuelCellsWorks 2022)

NASAn hallinnoima Jet Propulsion Laboratory ja Etelä-Kalifornian yliopisto kehittivät 1992 suorametanolipolttokennon (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC)

(Sharaf & Orhan 2014: 813). Saman vuosikymmenen aikana huomio kääntyi jälleen kohti PEM-kennoja sekä kiinteäoksidikennoja, sillä polttokennoja haluttiin hyödyntää pienissä paikallisissa sovelluksissa, kuten telealan yritysten varavoi- mana ja asukkaiden lämpövoimalaitoksina (Akinyele ym. 2020: 7). Samalla suorametanolikemien kehitys kiihtyi, kun kannettaviin suorametanolikemien yhdistettiin PEM-tekniikkaa. Aikaisimmat sovellukset koskivat kannettavia tietokoneita ja matkapuhelimia. (Andújar & Segura 2009: 2320.)

3 Toimintaperiaate ja yleiskatsaus kennotyypeistä

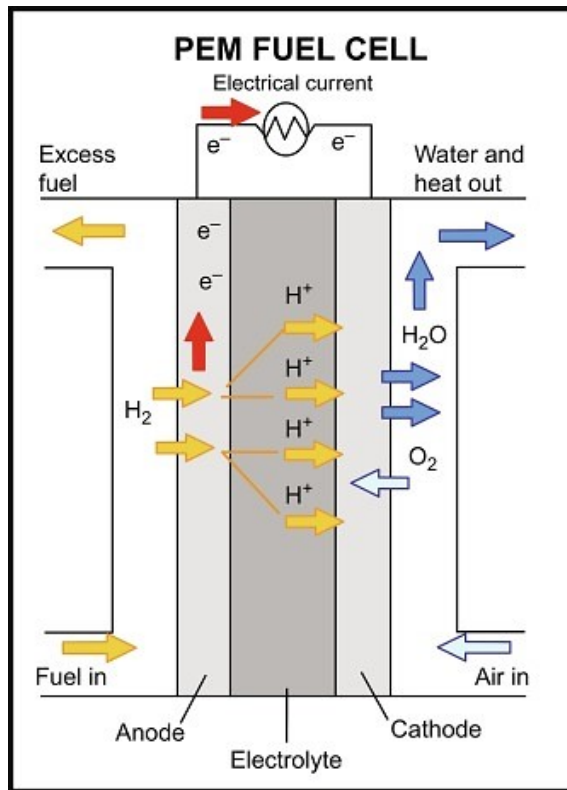
3.1 Polttokennon toimintaperiaate

Polttokennot ovat avoimia termodynaamisia systeemejä. Ne toimivat sähkökemiallisten reaktioiden pohjalta ja kuluttavat ulkoisesta lähteestä saatua reagenssia. (Mekhilef ym. 2012: 981.)

Polttokennossa sähköä ja lämpöä tuotetaan sähkökemiallisen reaktion avulla. Käytännössä reaktio on hapen ja vedyn välinen käänteinen elektrolyysi (Mekhilef ym. 2012: 982). Polttokenno rakentuu neljästä pääelementistä: katodista (positiivisesti varautunut elektrodi), anodista (negatiivisesti varautunut elektrodi), ne toisistaan erottavasta elektrolyytistä ja ulkoisesta piiristä (Sharaf & Orhan 2014: 811). Koska elektrolyytti on katodin ja anodin välissä, varsinaista näkyvää palamisreaktiota ei pääse syntymään. Yleensä polttokennot luokitellaan käytetyn elektrolyytin mukaan (Sazali ym. 2020: 4). Elektrolyytti voi olla nestemäinen, kiinteä tai kalvomainen. Käytetty elektrolyytti määrittää polttokennon rakenteen ja reaktiot. (Aarnio & Leiviskä 2008: 2.)

Polttokennon toimintaperiaate (kuva 1) perustuu anodille syötetyn polttoaineen, esimerkiksi vedyn, hajoamiseen ja ionisoitumiseen. Anodia pitkin elektronit siirtyvät ulkoiselle piirille, jossa elektronien virtaus eli sähkövirta hyödynnetään. Positiivisesti varautuneet vetyionit kulkeutuvat elektrolyytin läpi katodille pelkistäen syötetyn hapen. Kennosta riippuen myös negatiivinen ioni voi kulkeutua elektrolyytin läpi katodille. (Aarnio & Leiviskä 2008: 2.) Hapettuminen on hidas reaktio, minkä vuoksi polttokennoissa käytetään erilaisia katalyyttejä, kuten platinaa,

nopeuttamaan hapettumisreaktiota (Fuel Cells Works - Fuel Cells, Energy And Hydrogen News).



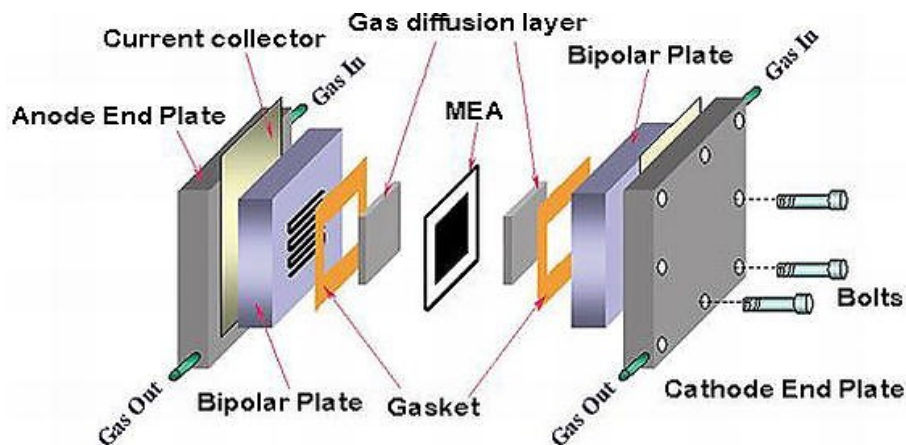
Kuva 1: PEM-kennon toimintaperiaate (Rafiee ym. 2019: 270)

Neljän pääelementin lisäksi polttokennot vaativat toimiakseen muita lisäosia (kuva 2), kuten päätylevyt, bipolaarilevyt ja tiivisteet. Anodin ja katodin ulkopinta on suojattu mekaanisesti muovisella päätylevyllä (End Plate), jonka tehtävä on suojata polttokennoa ja estää kaasujen vuotaminen. (Nafil & Majeed 2020: 3.)

Anodin ja katodin toisella pinnalla on bipolaarilevyt (Bipolar Plates), joissa on virroitin (Current Collector) ja erotin (Separator). Ne on valmistettu metallista tai hiilitäytteisestä komposiitista. Polttokennoja voidaan yhdistää kennopakoiiksi (Fuel Cell Stack), jolloin bipolaarilevyt johtavat virtaa vierekkäisten kennojen välillä. (Nafil & Majeed 2020: 3.) Bipolaarilevyjen jälkeen kennon on tiivisteet estävät reaktiokaasujen ja jäähdytysaineen vuotamisen. Tiivisteet on valittu tarkkaan kestäväksi kaasumaisten polttoaineiden ajoaineita, operointilämpötiloja ja

sietämään ilmankosteutta. Ne on valmistettu kumimaisista polymeeri-arkkeista. (Nafil & Majeed 2020: 4.)

Huokoisesti hiilikuiduista valmistetun kaasudiffuusiokerroksen (Gas Diffusion Layer, GDL) tehtävä on kuljettaa reaktioaineita bipolaarilevyjen ja katalyyttikerrosten välillä. Tämän lisäksi diffuusiokerros toimii syntyneen veden ja lämmön haihduttamisessa ja suojaa katalyyttiä korroosiolta. Membrane Electrode Assembly (MEA) on varsinainen osa, jossa on anodi, katodi ja elektrolyytti. (Nafil & Majeed 2020: 5.)



Kuva 2: Polttokennon osat (Nafil & Majeed 2020: 4)

Polttokennoja on erilaisia riippuen niiden toimintalämpötilasta, tehokkuudesta, käytetystä polttoaineesta, käyttötarkoituksesta ja hinnasta. Ne luokitellaan yleensä käytetyn polttoaineen tai elektrolyytin mukaan kuuteen suureen ryhmään (Aarnio & Leiviskä 2008: 1):

- alkalipolttokennot (AFC)
- fosforihappopolttokennot (PAFC)
- kiinteäoksidipolttokennot (SOFC)

- sulakarbonaattipolttookennot (MCFC)
- protoninvaihtokalvopolttookennot (PEMFC)
- suorametanolipolttookennot (DMFC).

3.2 Polttokennon termodynamiikka

Polttokenno muuttaa polttoaineen kemiallisen energian työksi eli sähköksi ja lämmöksi. Systemit, jotka tuottavat energiaa, noudattavat termodynamiikan lakeja. Suurin mahdollinen sähköenergiantuotto ja vastaavasti sähköinen potentiaaliero, eli jännite, anodin ja katodin välillä saavutetaan, kun polttokenno toimii termodynaamisesti käänteisten olosuhteiden alla. Osa energiasta kuitenkin muuttuu aina lämmöksi. (Khotseng 2019: 1.)

Termodynamiikan toisen lain mukaan muutos Gibbsin vapaassa energiassa (ΔG) tai suurin käytettävä työ W_{el} , saadaan, kun teoreettisesti täydellisesti toimiva irreversiibeli polttokenno on riippuvainen lämpötilasta (T) (Khotseng 2019: 3). Lämpötilan noustessa vapaan energian määrä lisääntyy, pienentäen Gibbsin vapaan energian numeerista arvoa. Gibbsin vapaa energia on ulkoisen työn tekemiseen käytettävissä oleva energia, joka ei huomioi paineen tai tilavuuden muutosten tekemää työtä. Polttokennojen tapauksessa ulkoinen työ käsittää elektronien liikuttamisen ulkoiseen piiriin. (Li ym. 2019: 3.) Gibbsin vapaa energia kuvastaa hapetus-pelkistys-reaktioista vapautunutta energiaa, joka on otettu talteen tietyssä lämpötilassa (Aarnio & Leiviskä 2008: 3). Täten W_{el} on

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S, \quad (1)$$

jossa ΔH on systeemin entalpian muutos ja ΔS systeemin entropian muutos tietyssä lämpötilassa. Entalpia on termodynaaminen suure, joka kuvastaa systeemin lämmön määrää. Entalpia on systeemin sisäenergian (U) sekä paineen (P) ja tilavuuden (V) tulon summa. Entalpian muutos on yhtä suuri kuin systeemin vapauttama tai absorboima lämmön määrä. (Khotseng 2019: 4.)

$$H = U + PV \quad (2)$$

Kokonaisentalpian muutos kemiallisessa reaktiossa saadaan lähtöaineiden muodostumislämmön ja reagenssin erotuksesta:

$$\Delta H = \sum Tuotteet - \sum Reagenssi \quad (3)$$

Minkä tahansa sähkökemiallisen laitteen jännite U on määritelty yhtälöllä:

$$U = \frac{-\Delta G}{nF} \quad (4)$$

Negatiivinen Gibbsin vapaan energian luku merkitsee, että reaktiosta vapautuu energiaa. Näin ollen maksimaalinen jännite saadaan laskettua Gibbsin energian muutoksen, moolia kohti vapautuvien elektronien (n) ja Faradayn vakion (F) avulla. (Aarnio & Leiviskä 2008: 3.)

3.3 Kennotyypit

Polttokennot toimivat eri lämpötiloissa ja tuottavat tasavirtaa. Käyttölämpötilan määrittää kennoon valittu elektrolyytti ja kennon käyttökohde. Kennot luokitellaan kolmeen luokkaan perustuen käyttölämpötilaan.

- matalan lämpötilan kennot: 20–100 °C (AFC, PEMFC-LT, DMFC)
- medium lämpötilan kennot: 200–300 °C (PEMFC-HT, DMFC, PAFC)
- korkean lämpötilan kennot: 600–1500 °C (SOFC, MCFC) (Felseghi ym. 2019: 10.)

Polttokennojen polttoaineilla on kaksi luokkaa: primääri- ja sekundääripolttoaineet. Primäärisiä polttoaineita ovat muun muassa maakaasu, metanoli, teollisuusbenssiini, raskaat polttoöljyt, hiili ja biomassa. Sekundääripolttoaineita ovat vety ja hiilimonoksidi. Primääripolttoaineet täytyy muuttaa sekundääripolttoaineiksi, jotta ne toimisivat tehokkaammin polttokennossa. Poikkeuksena on

metanolikemno, joka toimii metanoli-vesiseoksella. (Akinyele ym. 2020: 15.) Sekundääripolttoaineena toimii pääasiassa vety. Vedyn yleisin valmistustapa on maakaasun höyryreformointi (Vety - Motiva.). Tästä johtuen suurin osa kemnoista vaatii erillisen ulkoisen reformointilaitteiston, jolla käytetty vety tuotetaan ennen sen syöttöä kemnoon. Kuitenkin kiinteäoksidikemno toimii niin korkeassa lämpötilassa, että se pystyy sisäisesti reformoida valitusta polttoaineesta vetyä. Kiinteäoksidikemnoissa voidaan tämän vuoksi käyttää monia vaihtoehtoisia polttoaineita kuten hiilivetyjä, alkoholeja, kiinteää hiiltä ja ammoniakkia. (Xu ym. 2022: 1.)

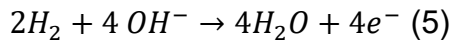
Koska vety reformoidaan maakaasusta, bensiinistä tai etanolista, se ei ole koskaan täysin puhdasta. Reformoidussa vetykaasussa esiintyy pieniä määriä hiilimonoksidia. Tullessaan kontaktiin katalyytin, esimerkiksi platinan, kanssa, hiilimonoksidi sitoutuu siihen estäen platinakatalyyttiä erottelemasta vetyioneita. Katalyytin tukkeutuminen estää polttokennon toiminnan ensimmäisen vaiheen toteutumisen. Tätä ilmiötä kutsutaan polttokennon myrkyttymiseksi. (Service 2010)

3.3.1 Alkalipolttokenno

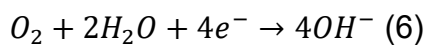
Alkalipolttokenno eli AFC-kemno (kuva 3) käyttää elektrolyytinä emäksistä liuosta, yleensä 30–40 massaprosentin kaliumhydroksyyliosuutta vesipohjaisessa liuoksessa (Petreanu ym. 2020: 2). Alkalikemnon toimintalämpötila vaihtelee alle nollasta celsiusasteesta 230 asteeseen. Kuitenkin yli sadan asteen lämpötilat ovat harvinaisia. Tyypillisesti kemno operoi 70 asteen lämpötilassa. (Sharaf & Orhan 2014: 817.) Uusimmissa malleissa alkalikemno on suunniteltu toimimaan jopa matalissa 23–70 asteen lämpötiloissa (Mekhilef ym. 2012: 983). Alkalikemnoissa ei vaadita kallista platinakatalyyttiä nopeuttamaan anodilla ja katodilla tapahtuvia reaktioita, vaan siihen soveltuu myös halvempi ei-jalometallinen katalyytti, kuten nikkeli, hopea ja mangaanidioksidi (Ferriday & Middleton, 2021).

Reaktiot

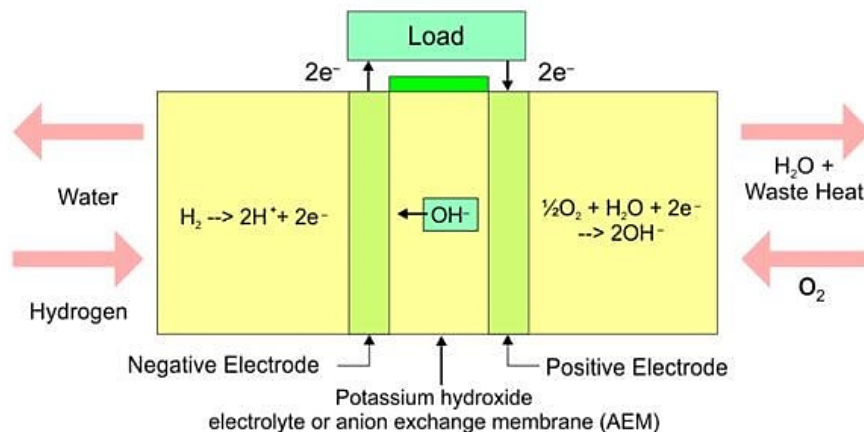
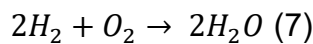
Anodilla vety hapettuu reaktiossa virrankuljettajana toimivien liikkuvien hydroksyyli-ionien kanssa. Reaktiossa vapautuu elektroneja ja muodostuu vettä. Reaktio on havainnollistettu yhtälössä 5:



Reaktiossa vapautuneet elektronit matkaavat katodille ulkoisen piirin kautta muodostaen sähkövirran. Käytetystä elektrolyytistä riippuen katodilla syötetty happi reagoi veden ja anodilta saapuvien elektronien kanssa muodostaen hydroksidia tai karbonaatti-ioneita. (Spiegel 2021)



Kokonaisreaktio on



Kuva 3: Alkalipolttokenno (Spiegel 2021.)

3.3.2 Fosforihappopolttokenno

Fosforihappopolttokennoissa eli PAFC-kennoissa käytetään elektrolyytinä 85–100-massaprosenttista fosforihappoa, joka pidetään paikallaan nestemäisessä muodossa hiili- ja silikonikarbidirakenteessa. Katalyyttinä kennossa käytetään platinaa. (Petreanu ym. 2020: 4.)

Fosforihappo elektrolyytinä mahdollistaa korkean toimintalämpötilan 150–220 asteessa, sillä polttokennoa ei rajoita veden kiehumispiste. Fosforihapon ionijohtavuus on myös alhainen matalissa lämpötiloissa. Korkean toimintalämpötilan myötä kenno ei ole altis hiilimonoksidimyrkyttymiselle kuten alkalikennot. (Strickland ym. 2018: 3833.) PAFC-kennot ovat muuttumassa nykyisestä silikonikarbidirakenteestaan imeytetyn fosforihappokalvon käyttöön. Yksi lupaavimmista uusista kalvomateriaaleista on polybentsimidatsoli. (Strickland ym. 2018: 3833.)

Polttoaineena fosforihappokennossa hyödynnetään vetyä ja virran kuljettajana toimii joko vetyioni tai protoni. Ne kulkeutuvat anodilta katodille elektrolyytin läpi ja irronneet elektronit ohjataan ulkoiseen piiriin. Katodilla muodostuu vettä elektronien, protonien ja hapen reaktion seurauksena. (Mekhilef ym. 2012: 983.)

Reaktiot:

Anodille saapuva vety hapettuu hajoamalla neljäksi protoniksi ja neljäksi elektroniksi (Mekhilef ym. 2012: 983).

Hapettuminen: $2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$ (8)

Pelkistyminen: $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$ (9)

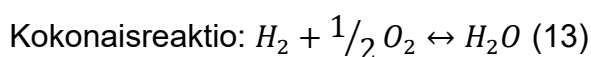
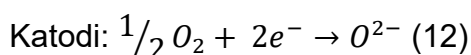
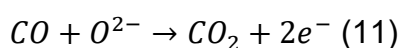
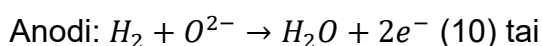
Fosforihappopolttokennot eivät ole yhtä tehokkaita sähköntuotannossa kuin muut kennotyypit, mutta niiden hyötysuhde voi olla jopa 80 %, mikäli suuresta toimintalämpötilasta syntynyt lämpö hyödynnetään yhteissähköntuotannossa. (Fuel Cells Works - Fuel Cells, Energy and Hydrogen News.) Ilman yhteistuotantoa polttokennon hyötysuhde jää 40–50 %: iin (Mekhilef ym. 2012: 983).

3.3.3 Kiinteäoksidikenno

Kiinteäoksidipolttokenno (SOFC) on korkeassa lämpötilassa (600–1000 °C) toimiva täysin kiinteistä materiaaleista valmistettu kenno. Elektrolyytinä näissä polttokennoissa toimii keraaminen zirkoniumoksidi, jonka lämmönkestävyyttä on

parannettu lisäämällä yttriumoksidia. Korkean lämpötilan ansiosta reaktiot tapahtuvat nopeasti, eikä tämän takia ole tarvetta reaktioita nopeuttavalle erilliselle katalyytille. (Petreanu ym. 2020: 5.) Korkea lämpötila mahdollistaa myös sen, ettei erillinen ulkoinen polttoaineen reformointi ole tarpeen, vaan kenno pystyy reformoimaan polttoaineet sisäisesti. Tämä mahdollistaa monien hiilivetypohjaisten polttoaineiden käytön. (Fuel Cells Works - Fuel Cells, Energy And Hydrogen News) Kennojen negatiivisena puolena pidetään suuresta toimintalämpötilasta johtuvaa hidasta käynnistymisaikaa. Tämän lisäksi kuumankestävien materiaalien valinta sekä lämmöneristys tuottavat haasteita. (Petreanu ym. 2020: 6.)

Kennossa tapahtuvat reaktiot (Petreanu ym. 2020: 5):



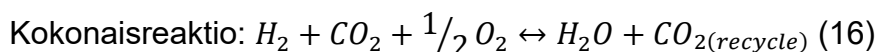
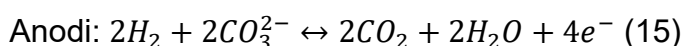
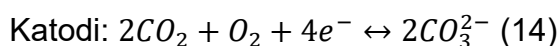
Kiinteäoksidipolttokennon hyötysuhde on yli 60 %, mutta hyötysuhde kasvaa jopa yli 80 %:iin, kun syntynyt lämpö hyödynnetään yhteistuotannossa (Fuel Cells Works - Fuel Cells, Energy And Hydrogen News.).

3.3.4 Sulakarbonaattikenno

Sulakarbonaattipolttokenno eli MCFC-kenno on korkean lämpötilan polttokenno, jossa elektrolyytinä käytetään erilaisia karbonaattisuoloja, kuten litiumkarbonaattia tai kalium- ja natriumkarbonaattia. Suolat ovat sulaneessa muodossaan 600–700 °C:ssa erittäin ioninjohtokykyisiä. (Petreanu ym. 2020: 4.) Kennon operoimislämpötila on tavallisesti 650°C ja hyötysuhde noin 60 %. Mikäli kennoa käytetään yhteistuotannossa, hyötysuhde nousee yli 80 %:iin. (Fuel Cells Works - Fuel Cells, Energy and Hydrogen News.)

Polttokennon korkea toimintalämpötila mahdollistaa SOFC-kennon tavoin hyvän ioninjohtokyvyn, minkä ansiosta kalliita jalometallikatalyyttejä ei tarvita (Tielinen. 2019). Virrankuljettajana sulakarbonaattikennossa toimii karbonaatti (CO_3^{2-}). Karbonaatin vuoksi kennon polttoaineen tulee sisältää hiiltä. Näin ollen se voi käyttää hiilivetyperusteisia polttoaineita, jotka voidaan reformoida kennon sisällä. (Petreanu ym. 2020: 4.)

Kennossa tapahtuvat reaktiot ovat seuraavat:



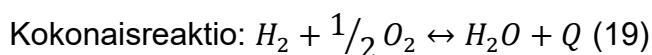
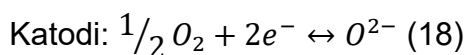
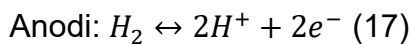
3.3.5 Protoninvaihtokalvopolttokenno

Protoninvaihtokalvopolttokennoissa eli PEM-kennoissa elektrolyytinä käytetään vesipohjaista, happopitoista polymeerikalvoa, yleensä Nafion-kalvoa (Fuel Cells Works - Fuel Cells, Energy And Hydrogen News.). PEM-kennot toimivat varsin matalissa lämpötiloissa 30–100°C:ssa, joten niissä on platinapohjaiset elektrodit tehostamassa reaktioita. Matalan toimintalämpötilan vuoksi polttokennoissa käytetään puhdasta vetyä polttoaineena, sillä polttoaineen sisäinen reformointi ei ole mahdollista. (Mekhilef ym. 2012: 985.) PEM-kennoista on kehitetty myös korkean lämpötilan kennoja. Elektrolyyttiä muuttamalla kiinteään komposiitti Nafion-kalvoon tai fosforihapolla kostutettuun polybentsimidatsoliin PEM-kennojen operoimislämpötiloja on pystytty nostamaan jopa 200 °C:een. Suuremman lämpötilan myötä polttoaineen ei tarvitse olla täysin puhdasta, vaan kenno kestää pienet määrät myös hiilimonoksidia. (Sharaf & Orhan 2014: 816.)

Polttoaineena käytetystä vetykaasusta erotellaan anodilla elektronit ja protonit. H^+ -ionit liikkuvat kalvon läpi katodille, kun elektronit ohjataan ulkoiseen piiriin. Katodilla platinaelektrodin ansiosta protonit ja elektronit yhdistyvät ja reagoivat

hapen kanssa muodostaen vettä, joka on lämmön lisäksi ainoa reaktiotuote. (Fuel Cells Works - Fuel Cells, Energy And Hydrogen News.)

PEM-kennossa tapahtuvat reaktiot ovat vastaavia kuin SOFC-kennossa.



Q ilmaisee reaktiossa syntyneen lämpöä.

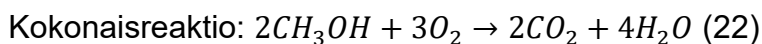
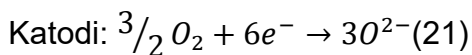
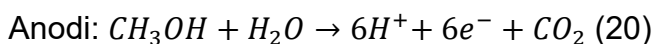
3.3.6 Suorametanolipolttokenno

Suorametanolipolttokennoissa (DMFC) käytetään PEM-kennon tavoin polymeerikalvoa elektrolyytinä (Petreanu ym. 2020: 3). Polttoaineena toimii metanoli, sillä kennon platina-rutenium-katalyytti kykenee erottamaan vedyn nestemäisestä metanolista (Fuel Cells Works - Fuel Cells, Energy And Hydrogen News.). Suorametanolipolttokenno on ainoa kenno, joka on nimetty polttoaineen eikä käytetyn elektrolyytin mukaan.

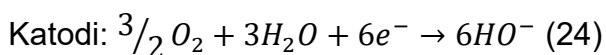
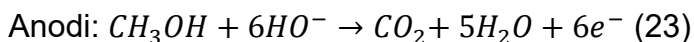
Metanolikennot toimivat 20–130 °C:n lämpötilassa ja ne luokitellaan aktiivisiin ja passiivisiin kennoihin. Aktiiviset systeemit ovat hyvin luotettavia ja koostuvat useista komponenteista, kuten pumpusta, tuulettimesta, tankista, lämmönvaihtimesta ja kaasun erottelijasta. Komponenttien lukumäärän vuoksi aktiivista suorametanolikennoa on hankala applikoida kannettavaan muotoon. (Alias ym. 2020: 19 636.) Passiivisissa systeemeissä erilliset pumput on eliminoitu ja ympäröivä ilma siirtyy passiivisesti katodilta kennoon (Mekhilef ym. 2012: 985).

Sekä happopohjaisiin että alkalikennoihin voidaan käyttää polttoaineena metanolia, mutta ne eroavat suorametanolikunnoista liikkuvien ionien ja elektrodien osalta. Elektrolyyttikalvon ollessa happopohjainen anodille syötetään metanoli-

vesi-seos, jolloin metanoli hapettuu. Katodilla tapahtuu hapen pelkistyminen. (Petreanu ym. 2020: 3.)



Kun alkalikemion syötetään metanolia, niin metanolin hapettuminen anodilla tapahtuu hydroksyyli-ionin läsnä ollessa. Katodilla happi pelkistyy veden ansiosta ja muodostaa hydroksyyli-ionin. (Petreanu ym. 2020: 3.)



Kokonaisreaktio on sama kuin happopohjaisilla kennoilla kuvattuna yhtälössä 22.

Kaikki tässä esitellyille kennotyypeille, pois lukien suorametanolipolttockennot, yhteistä on vedyn käyttö polttoaineena anodille joko puhtaana vetynä tai reformoituna. Tämän vuoksi vetyteknologiaan liittyvät kehitykset ovat polttokennojen tulevaisuuden osalta yhtä tärkeässä osassa kuin polttokennokehitys. (A Review of Fuel Cells and Their Military Applications 2019.)

4 Vety- ja metanolipolttockennojen vertailu

Tässä luvussa vertaillaan vety- ja metanolipolttockennoja sekä tuodaan esille Noatek Oy:n tekemä pilotointikoe (kuormituskoee) metanolipolttockennoille. Vertailussa käytetään protoninvaihtokalvo- ja suorametanolikennoja. Vertailu tapahtuu käyttöiän, hyötysuhteen, polttoaineen, toimintalämpötilan, tehon, hinnan ja soveltuvuuden mukaan (taulukko 1). On syytä huomioida, että

suorametanolipolttokenno luokitellaan protoninvaihtopolttokennon alakategoriaksi. Vaikka molemmat polttokennot hyödyntävät polttoaineenaan vetyä, ero niiden toiminnassa perustuu polttoaineen syöttömuotoon. PEM-kennolle syötetään puhdasta vetyä, mutta suorametanolipolttokennoon syötetään vedellä laimennettua metanolia, joka hajoaa prosessin aikana vedyksi ja hiilidioksidiksi.

4.1 Tekniset ominaisuudet

Sekä PEM- että suorametanolikennojen toimintalämpötilat ovat varsin alhaiset, niiden toiminnallisen maksimilämpötilan ollessa 200 astetta. Molemmissa kennoissa protoni kuljettaa virtaa elektrolyytissä. Kennoissa on eroa muun muassa polttoaineen sekä katalyytin osalta. PEM-kennoissa polttoaineena hyödynnetään joko puhdasta tai reformoitua vetyä, kun metanolikennoissa polttoaineena käytetään metanolia. Metanolin reagoidessa polttokennossa vapautuu vetyä käyttöön. PEM-kennoissa katalyyttinä käytetään hiileen tuettua platinaa, kun suorametanolikennoissa hyödynnetään platinaruteriumia. PEM-kennon suurimmat epäpuhtaudet aiheutuvat hiilimonoksidista ja rikkivedystä ja metanolikennoilla hiilimonoksidista.

Molemmissa kennotyypeissä käytetään elektrolyyttinä kiinteää polymeerikalvoa. Yleisimmin käytössä on Nafion-kalvo. Nafion on perfluorosulfoninen happopitoinen polymeerikalvo, jonka DuPont kehitti 1960-luvulla. Varhaisesta kehityksestään huolimatta Nafion on edelleen kalvotekniikan johtava malli. Kalvon toiminta on tehokkainta sen korkean sähkönjohtavuuden ja muiden kemiallisten ja mekaanisten ominaisuuksien osalta alle 90 °C:n lämpötilassa. Yli 90 °C:ssa kalvon protonijohtavuus heikkenee voimakkaasti. Muina haittapuolina voidaan pitää kalvon kallista valmistusprosessia. (Tellez-Cruz ym. 2021: 28.)

PEM-kennojen eduksi voidaan laskea sen korkea tehotehous, kompakti kennon koko, alhaisesta lämpötilasta johtuva nopea käynnistymisaika ja hyvä dynaaminen vaste. Suorametanolikemnojen etuina voidaan puolestaan pitää sen kompaktia kokoa ja järjestelmän yksinkertaisuutta, polttoaineen korkeaa volumetristä energiatiheyttä, yksinkertaista lämmönhallintaa sekä kuljettamisen ja varastoinen helpoutta. (Sharaf & Orhan 2014: 816.)

Haittapuolia tarkasteltaessa PEM-kennojen osalta haasteena voidaan nostaa esille sen monimutkainen veden- ja lämmönhallinta. Vaikka alhainen lämpötila nopeuttaa kennon käynnistymistä, sen vuoksi kuitenkin vaaditaan erillinen polttoaineen reformointi, mikä nostaa kustannuksia. Kenno on myös herkkä epäpuhtauksille. Katalyyttinä käytettävä platina on myös kallis käyttää. (Sharaf & Orhan 2014: 816.) Metanolikemnojen osalta haittapuoliksi voidaan laskea sen alhainen jännite ja tehokkuus. Metanolikemnolla verrattuna PEM-kennoihin on alhainen tehotehous. Metanolikemnoilla käytettävä katalyytti ei ole merkittävän tehokas ja siinä on korkea lataus. (Sharaf & Orhan 2014: 816.) Katalyytin latauksella (Catalyst Loading) tarkoitetaan useamman katalyyttikerroksen asentamista tehokkuuden parantamiseksi sekä metanolin ja veden sekoittumisen estämiseksi (Chang ym. 2021: 2). Usean katalyyttikerroksen asentaminen nostaa kennon kustannuksia, sillä platinaa käytetään enemmän. Katalyytin lisäksi metanolikemnoissa haasteita tuottaa metanolin sekoittuminen veteen (Methanol Crossover), kennon hankala vedenhallinta ja polttoaineen myrkyllisyys. (Zahari & Aziz 2012: 672; Venkateswarlu ym. 2015: 592.)

Suorametanolikemnossa reaktantit ja tuotteet jakautuvat epätasaisesti, minkä vuoksi reaktantin pitoisuus ja reaktionopeus on eri. Tämän vuoksi aktiivisella alueella syntyneessä virrantiheydessä havaitaan suurta epäyhdenmukaisuutta. Korkea paikallinen virrantiheys voi helposti kiihdyttää suorametanolikemnon ikääntymistä, jolloin seurauksena on käyttökulujen kasvaminen ja käyttöiän lyheneminen, mikä rajoittaa suorametanolikemnojen kaupallistamista. (Chang ym. 2021: 1.)

Chang ym. (2021: 2) havaitsivat suorametanolikennoihin liittyneessä kokeellisessa tutkimuksessaan, että anodin ja katodin katalyyttiä lataamalla voidaan parantaa elektrodilla tapahtuvaa reaktiota lähes 20 prosenttia. He latasivat katalyytin epätasaisesti siten, että ohuin kerros oli lähimpänä polttoaineen syöttöaukkoa ja paksuin kerros lähinnä ulostuloaukkoa. Katalyyttiä lataamalla voidaan vähentää kennon kustannuksia ja pidentää sen käyttöikä.

Kennoilla on yli 4000 tunnin käyttöikä (Akinyele ym. 2020: 13). Vertailtaessa kennojen hyötysuhteita PEM-kenno on hyötysuhteeltaan tehokkaampi. PEM-kennon hyötysuhde nousee jopa 60 prosenttiin, kun kennon polttoaineena käytetään puhdasta vetyä. Hyötysuhde laskee 40 prosenttiin, jos puhtaan vedyn tilalla käytetään reformoitua vetyä. Reformoidusta vedystä saadaan vähemmän puhdasta vetyä käyttöön, minkä vuoksi hyötysuhde laskee. Koska PEM-kennon toimintalämpötila on matala, ei niihin voida lisätä sisäistä reformointijärjestelmää. Tarvitaan siis erillinen polttoaineenkäsittelyjärjestelmä. (Luo ym. 2021: 41.)

Suorametanolikenno häviää tehokkuudessa PEM-kennolle. Suorametanolikennon hyötysuhde jää alhaiseksi (40 %) metanolin sekoittumisen takia. (Akinyele ym. 2020: 10.) Sekoittumisella tarkoitetaan metanolin siirtymistä kalvon läpi anodilta katodille. Tämä on suurin tunnistettu tekninen haaste, joka aiheuttaa tehohäviöitä suorametanolikennoissa. Sekoittuminen aiheutuu Nafion-kalvon luontaisesta veden diffuusio-ominaisuudesta ja metanolin liukenevuudesta veteen. (Samimi & Rahimpour 2018: 381.)

Vertailutaulukossa ei käytetä korkean lämpötilan (HT) PEM-kennoja.

Taulukko 1: PEM- ja metanolikenttien vertailutaulukko (Mekhilef ym. 2012: 985; Akinyele ym. 2020: 9–13; Ke ym. 2021: 2; Sharaf & Orhan 2014: 816-817)

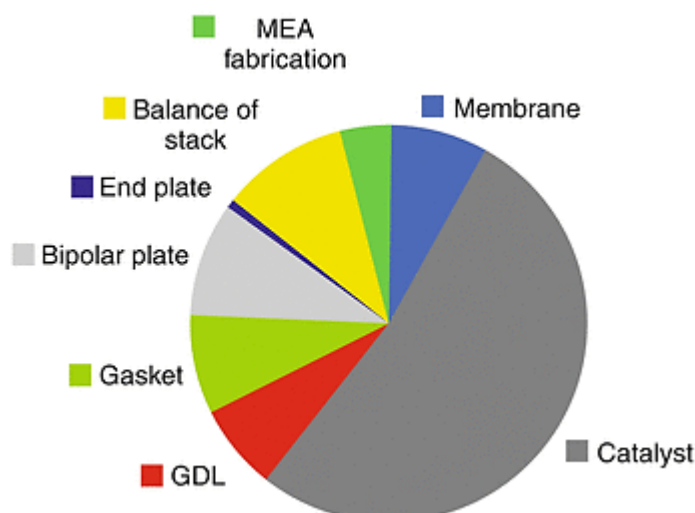
	PEM	DMFC
Elektrolyytti	Kiinteä polymeerikalvo (Nafion)	Kiinteä polymeerikalvo (Nafion)
Virrankuljettaja	H ⁺	H ⁺

Polttoaine	Puhdas H ₂	CH ₃ OH
Hapetin	O ₂ ilmassa	O ₂ ilmassa
Yhteistuotanto	Ei	Ei
Reformointi	Kyllä	Ei
Kennon jännite (V)	1,1	0,2–0,4
Sähköteho (%)	40–60	35–60
Tuotto (kW)	<1–250	0,001–100
CHP teho (%)	70–90	80
Toimintalämpötila (°C)	60–80 tai 110–180 (HT)	Ympäristön lämpötila–110
Elinikä (h)	>4000	>4500
Ominaisenergia (Wh/kg)	100–450	140,3–960
Ominaisteho (W/kg)	>1000	
Energiatiheys (kWh/m ³)	112,20–770	29,9–274
Tehotiheys (kW/m ³)	4,2–35	0,6
Epäpuhtaudet	CO, H ₂ S	CO
Energian hinta (\$/kWh)	70–130000	3067–3190
Tehon hinta (\$/kW)	jopa 10 200	15000–125000
Edut	<ul style="list-style-type: none"> • Korkea tehotiheys • Kompakti rakenne • Nopea käynnistyminen • Hyvä dynaaminen vaste 	<ul style="list-style-type: none"> • Kompakti koko • Yksinkertainen järjestelmä • Polttoaineen korkea volumetrinen energiatiheys • Polttoaineen helppo varastointi ja kuljetus • Nestemäisten metanoli-järjestelmien yksinkertainen lämmönhallinta

Haitat	<ul style="list-style-type: none"> • Monimutkainen vesi- ja lämmönhallinta • Matala lämpötila • Erittäin herkkä epäpuhauksille • Kallis katalyytti 	<ul style="list-style-type: none"> • Kennon alhainen jännite ja tehokkuus • Alhainen tehotiheys • Metanolin suoraan haettumiseen vaadittavan tehokkaan katalyytin puuttuminen • Polttoaineen ja veden sekoittuminen • Vaikea vedenhallinta • Korkea katalyytin laatus • Hiilidioksidin (CO₂) poistojärjestelmä • Polttoaineen myrkyllisyys
Sovellukset	<p>Varavoima</p> <p>Kannettavat</p> <p>Pieni hajatuotanto</p> <p>Ajoneuvot</p>	<p>Akkujen korvaus kannettavissa laitteissa</p>

4.2 Haasteet

Protoninvaihtokalvokennojen suurimmat haasteet liittyvät kennojen kestävyteen sekä korkeaan hintaan. Hinta on suoraan riippuvainen kennossa käytetystä katalyytistä. Koska hapen pelkistyminen on hidas reaktio, sitä pyritään nopeuttamaan käyttämällä platinakatalyyttiä. MEA-kokonaisuus (eng. Membrane Electrode Assembly) on yksittäinen polttokennojen kokonaishintaa eniten nostava kokonaisuus vastaten noin 70 % kennon kokonaiskustannuksista. MEA:n hintaosuudesta 91 % aiheutuu platinakatalyytistä sekä kalvomateriaaleista (kuva 4). (Habib ym. 2021: 218)



Kuva 4: Polttokennon osien osuus kokonaiskustannuksista (Bruijn & Janssen 2012)

Koska platina on kallis materiaali, merkittävimmät pyrkimykset liittyvät sen vähentämiseen. Platinan käyttöä PEM-kennoissa on vähennetty yli 50 prosenttia 10 vuoden aikana määrän pudotessa yli 1 g/kW:sta 0,5 g/kW:iin. Uusissa tekniikoissa keskitytään käyttämään platinattomia yhdisteitä, kuten epäjaloja metalleja, seostettuja siirtymämetalleja tai vaihtoehtoisia jalometalleja. (Valente ym. 2019: 20 966.)

Korkean hinnan lisäksi PEM-kennojen haasteena on niiden kestävyys pitkällä aikavälillä. Kennon elinkaaren pituuteen vaikuttavat käytetyt materiaalit, kuten katalyytti, elektrodit, kaasudiffuusiokerros ja tiivisteet. (Valente ym. 2019: 20 966.) Katalyytin valinta vaikuttaa merkittävästi kennon kestävyys. Katalyytti rappeutuu joko platinan liukenemisen vuoksi tai hiilirakenteen korroosion takia. (Luna ym. 2017: 1.) Lisäksi elinkaaren pituutta määrittää sähkökemiallinen eroosio, komponenttien eroosio ja lämpötila (Valente ym. 2019: 20 966).

PEM-kennojen toimintaa vaikeuttaa vesihuolto. Kennossa oleva kalvo edellyttää riittävää kosteutta kyetäkseen hyvään reaktiokykyyn ja protonin kuljettamiseen tehokkaasti. Riittämätön vedenmäärä johtaa suorituskyvyn heikkenemiseen, mikä nostaa lämmön määrää kennossa. Ylimääräinen lämpö kiihdyttää kennon rappeutumista lopulta johtaen kennon kuivumiseen. (Eikerling ym. 2007: 1.)

Liiallinen kosteus vuorostaan tukkii huokoisen katalyytin ja kaasudiffuusiokerroksen aiheuttaen kennon hukkumisen. (Guangul & Chala 2020: 188.) Jäätymlämpötiloissa kennon sisältämä kosteus saattaa jähmettyä muodostaen jäätä (Eikerling ym. 2007: 1). Jää tukkii elektrodien virtauskanavat ja rikkoo herkän MEA-kokonaisuuden johtaen suorituskyvyn heikkenemiseen. Tämän lisäksi matala lämpötila heikentää kalvon sähkönjohtavuutta ja kennon jännitettä. (Ma ym. 2021: 7.) Näin ollen toimiakseen kenno vaatii herkän tasapainon riittävän kosteuden ja liian kostean välille (Guangul & Chala 2020: 188).

Aktiivisten suorametanolikemien haasteena on metanolin sekoittumisen lisäksi kennon koko. Jotta suorametanolikemenoa voidaan hyödyntää kannettavana laitteena, tulee kennon sisältää kaikki tarvittavat osat kompaktissa koossa, mikä aiheuttaa haasteita tehokkuuteen. Jotta aktiivisia kemenoja voisi soveltaa kannettavina laitteina, tulisi ulkoisten komponenttien kokoa, hintaa ja painoa pienentää, tinkimättä energiatihydestä ja tehokkuudesta. Kutenkin osien koon pienentäminen heikentää laitteen toimintakykyä tehokkuuden ja metanolin syötön pienentyessä. (Alias ym. 2020: 19 636.)

Kuten protoninvaihtokalvopolttokennoissa myös suorametanolikemenoissa käytetään platinaa kennon katalyyttinä. Platina on kallis materiaali ja nostaa kennon hintaa. Lisäksi on havaittu, että platina aiheuttaa jännitekatoa siihen aiheutuvan hiilidioksidimyrkytyksen vuoksi. Valmistajat ovat pyrkineet vastaamaan näihin haasteisiin tutkimalla muita mahdollisia materiaaleja, kuten hopeaa, palladiumia ja nikkeliä mahdollisina platinan korvaajina kennon katalyyttinä. Uusien metallien toiminnasta metanolin hapettumisen katalyyttinä on saatu lupaavia tuloksia. Jos platina pystytään korvaamaan halvemmilla katalyyttimateriaaleilla, saadaan suorametanolikemien hintaa laskettua. (Mohamed ym. 2020: 1.)

Polttoaineita vertailtaessa on huomioitava polttoaineen kuljetus. Metanolia voidaan kuljettaa nestemäisessä muodossa, kun vedyn kuljettaminen vaatii paineistetut kaasupullot. (Fuel Cells Secure Critical Functions in Substations - Fingrid-Lehti.) Metanolin etuina on myös alhaisemmat tuotantokustannukset sekä

vetyä parempi paloturvallisuus (Alternative Fuels Data Center: Hydrogen Benefits and Considerations.).

Vedyn volumetrinen energiatiheys on alhainen. Tämän vuoksi vedyn varastoiminen kompaktisti on vaikeaa, sillä se vaatii korkeaa painetta, matalaa lämpötilaa tai erilaisia kemiallisia prosesseja, kuten metalliin sitomista. (Alternative Fuels Data Center: Hydrogen Benefits and Considerations.)

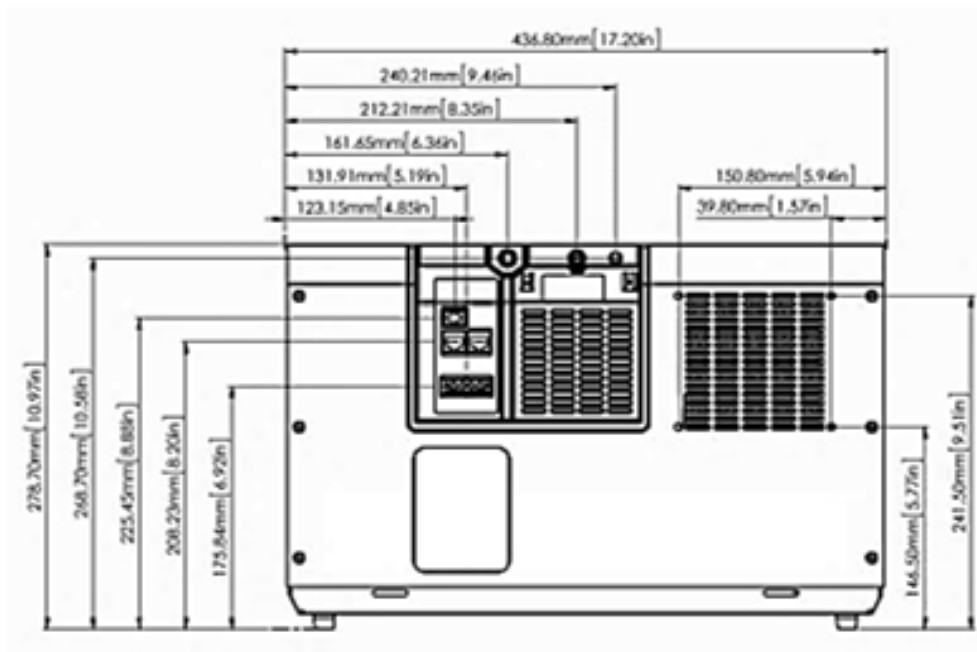
4.3 Noatek Oy:n testi

Noatek Oy suoritti metanolipolttokennolle pilotointikokeen. Pilotointikoe kesti viikon. Tässä pilotointivaiheessa pääpaino oli kuormituksen testaamisella. Kuormitustestissä tavoitteena oli tarkastella polttokennon toimintaa erityisolosuhteiden varavoimatuotantoa varten. Erityisolosuhteilla tarkoitetaan tilannetta, jolloin muuta sähköä ei ole saatavilla. Erityisiin olosuhteisiin varaudutaan esimerkiksi hajautetulla energiantuotannolla, jolla ylläpidetään muun muassa tietoliikenneverkkoa. Testi suoritettiin teholuokaltaan pienemmällä kennolla, kuin todellinen varavoimayksikkö vaatisi.

Kuormituskokeen tarkoituksena oli tarkastella polttokenno-akku-hybridijärjestelmää sekä järjestelmän kaukokäytön toimivuutta. Hybridijärjestelmässä akku toimii virtalähteenä, jota ladataan tarpeen mukaan polttokennolla. Noatek Oy:n kohteessa akkua kuormitettiin työmaavalaisimella ja kameravalvontajärjestelmällä. Kameravalvontajärjestelmä sisälsi tietoliikennelaitteiston eli palvelimen ja kaukokäytön siirtolaitteiston. Järjestelmä oli kokonaisuudessaan energiavaraston eli akun varassa.

Testiä varten yritys hankki käytetyn SFC Energyn valmistaman Efoy Pro 2400 Duo -polttokennon (kuva 5) vuodelta 2018. Hankittu kenno on neljä vuotta vanha, ja sille on kertynyt paljon käyttötunteja. Kenno hankittiin käytettynä, jotta kuormituskokeen yhteydessä saataisiin samalla tietoa käyttöikänsä ylittäneen polttokennon toiminnasta. Testissä käytetty akku on käyttämätön, 80

ampeeeritunnin (Ah) akku, joka on ennen paikalleen asentamista läpikäynyt vain tehdaslatauksen.



Kuva 5: Efoy Pro 2400 Duo -polttokennon tekninen piirros

SFC Energy ilmoittamat tiedot kyseiselle kennolle vuodelta 2018 ovat (taulukko 2):

Taulukko 2: Vuoden 2018 Efoy Pro 2400 Duo:n tiedot

Antoteho	110 W
Antoteho 4500 tunnin jälkeen	80 W
Nimellisjännite	12 V DC / 24 V DC

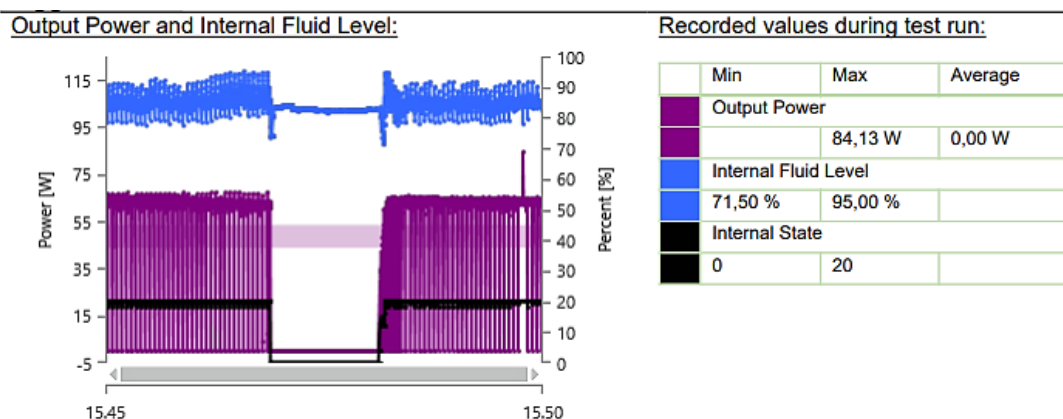
Latausvirta 12 V / 24V	9,17 A / 4,58 A
Latausvirta 12 V / 24 V 4500 tunnin jälkeen	6,67 A / 3,33 A
Paino	9,3 kg
Vaadittu käynnistysjännite 12 V / 24 V	>9 V / > 18,5 V
Akun enimmäisjännite 12 V / 24 V	<16 V / < 32 V
Nimelliskulutus	0,9 l/kWh
Toimintalämpötila	-20 °C – + 50 °C

Yritys testasi polttokennoa toimitiloissaan Ylöjärvellä 1.3.22–8.3.22. Testissä seurattiin polttokennon käynnistymistä ja sammumista akun jännitteen suhteen. Akun tyhjentäessä polttokenno käynnistyi lataamaan akkua ja sammui, kun akku oli täyttynyt. Polttokenno oli kello 17–05 välillä etäkäytössä, sekä ajoittain pois päältä.

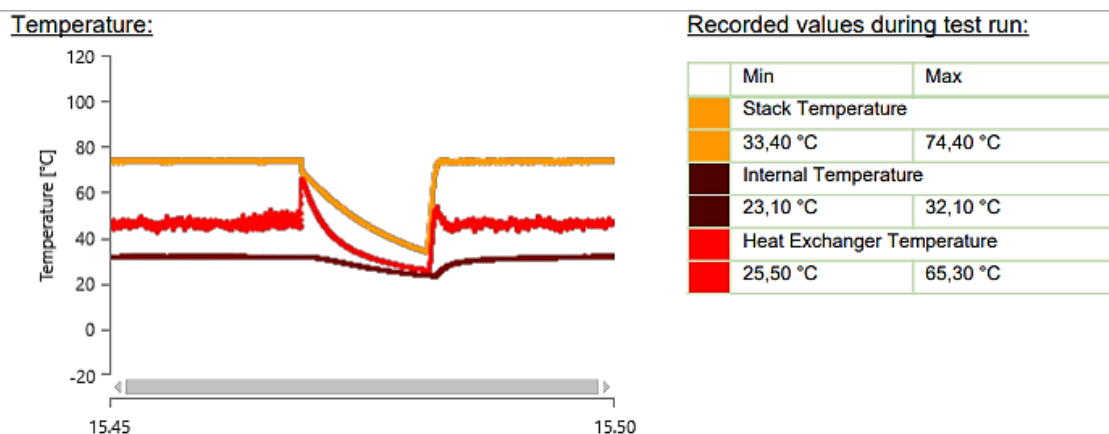
Noatek Oy:n tuottamasta testiraportista ilmenee, että kenno on käynnistynyt, kun akun varaustaso on laskenut 12,47 volttiin ja sammunut saavuttaessaan 14,26 volttia. Enimmillään latausaika on ollut 24 tuntia, kun akku ladattiin ensimmäistä kertaa täyteen kapasiteettiin. Pienimmillään latausaika on ollut 30 minuuttia, mikä on ollut käyttäjän tekemä valinta latausrajasta etäkäytön aikana. Enimmillään ulostuloteho on ollut 84,13 wattia, mikä ilmenee yksittäisenä

piikkinä (kuva 6). Kyseessä on todennäköisesti etäkäytön aiheuttama kuormituspiikki. Kaukokäytön tarkoituksena oli myös etänä ottaa ulos tietoa kennon toiminnasta ja samalla kuormittaa järjestelmää. Tehopiikin arvioitiin myös olevan eräänlainen mittauspulssi, jolla kennon ikää valvotaan. Eliniän vuoksi järjestelmälle on ominaista tuotantopiikit, jotka myös kuluttavat polttoainetta.

Akkua kuormitettiin keskimäärin 61,49 watin kuormalla. Maksimikuorma oli 76,09 wattia. Kuorma vaihteli 15–18 wattia keskiarvoon nähden. Vaihtelu aiheutui kamerajärjestelmästä, joka kuormittaa akkua epätasaisesti riippuen siitä, onko kamera lepotilassa vai prosessoimassa. Prosessoinnin aikana palvelinjärjestelmä on mukana, jolloin kuormitus kasvaa. Kuvatessaan kameran ottoteho on 10–13 wattia, riippuen asennusolosuhteista, mutta lepotilassa vain muutamia milliwatteja. Tässä testissä ympäristön olosuhteet ovat pysyneet tasaisina. Käynnissä ollessaan polttokenno lämpötila on ollut 74 °C, mikä on metanolikenoille ilmoitetun lämpötilavälin rajoissa. Kylmillään kenno oli 5,39 °C käynnistymishetkellä. Lämpötilakäyrästä (kuva 7) näkyy, milloin kenno on ollut käynnissä ja milloin sammunut.



Kuva 6: Ulostuloteho



Kuva 7: Kennon lämpötila

Testiin oli varattu metanolia 10 litraa viikon testauksen ajaksi. Testin päättyessä metanolia oli jäljellä 1,5 litraa eli metanolin kulutus viikon testauksen ajalta oli 8,5 litraa. Metanolin kulutusta ei seurattu päiväkohtaisesti. Kenno tuotti testauksen aikana noin litran verran vettä. Veden määrä ei ole suuri, ja siitä osa ehti haihtua testiviikon aikana. Testauksen aikana kenno rekisteröi tietoa sekunnin välein. Tiheä rekisteröintiväli oli testauksen kannalta tarkoituksella valittu. Vuorokaudessa dataa kertyi kuitenkin 86 400 sekunnilta. Kertyneen tietomäärän vuoksi datan analysoiminen on hankalaa. Mikäli vastaisuudessa on tarkoitus tarkastella kennoja, datan ajaminen muutaman minuutin välein lienee kannattavampaa.

Pilotointitesti osoitti kaksi asiaa: 1. Suurempaa kennoa ei ole tarvetta hankkia, sillä testatulla kennolla saatiin alustavia tuloksia 2. Kennon testillä saadaan laskenollisia tuloksia mallinnettua. Kuormitustesti onnistui eli, kenno ja kennon kaukokäyttö toimivat suunnitellusti. Ikäisekseen kenno toimi oletettua paremmin. Testin päättyttyä 8.3.2022 kennolle oli kertynyt 9 313,3 käyttötuntia, eli kenno on jo ylittänyt elinikänsä. Samalla testissä havaittiin kennon antotehon olevan 50 wattia. SFC Energyn tietojen mukaan 4 500 tunnin jälkeen antoteho laskee 110 watista 80 wattiin. Tästä voidaan päätellä kennon teoreettisesti menettävän 30 wattia jokaista 4 500:aa käyttötuntia kohden.

Noatek Oy:n hankkeen ideana on valmistaa varavoimaa varten siirrettävissä oleva polttokennojärjestelmä. Tällaisessa järjestelmässä polttokennon tulisi olla 5–10 kilowatin teholuokassa. Kennojen hinnat tässä teholuokassa alkavat viiden kilowatin kennoille 27 000 eurosta tullessaan Suomesta ja ulkomaalaiselle kennolle hinta alkaa 50 000 eurosta. Polttokennoille voidaan laskea noin 10 000 euroa jokaista kilowattia kohden. Mikäli halutaan viranomaissuositusten mukainen 72 tunnin varautuminen, eli varavoimajärjestelmän yhtäjaksoinen käyminen, niin polttoainetta kuluisi viiden kilowatin kennolla ja 48 voltin jännitteellä kolmen vuorokauden aikana noin 320 litraa kulutuksen ollessa 0,9 l/kWh.

Testissä käytetty kennon lisäksi muita SFC Energyn valmistamia metanolipolttokennoja ovat Efoy Pro 12 000 Duo, Jenny, Emily 3000 ja kannettava Jenny 600S. Yhdysvaltain puolustusministeriö käyttää Efoy Pro 12,000 Duo metanolikennoa harjoitustiloissaan, testiradoilla ja viestintäajoneuvojen harjoituksissa. Kyseinen polttokenno tuottaa 500 wattia 28 litralla metanolia ja on suunniteltu pitkiin operaatioihin. (Alias ym. 2020: 19634.) Jenny 1200 on 50 watin tehoinen, 3,3 kilogrammaa painava kannettava polttokenno, jolla voidaan tuottaa 1200 wattituntia päivässä. Emily 3000 on 12,5 kilogrammaa painava kennoyksikkö, jolla saadaan 3000 wattituntia päivässä ja 10 litralla metanolia 88 tuntia käyttöaika. Kannettava Jenny 600S on 25 watin kevyt 1,7 kilogrammaa painava polttokenno. Sillä saadaan 600 wattituntia päivässä ja se käyttää 350 millilitran polttoainepatruunoita, jolla voidaan saada jopa 72 tunnin käyttöaika. (SFC JENNY - SFC Defense.)

5 Polttokennot energiantuotannossa

Polttokennoja pidetään yhtenä avainteknologiana päästöttömän energian tuotannossa. Ne ovat tehokkaita, tuottavat vähän päästöjä ja ovat erittäin toimintavarmoja. (Cigolotti ym. 2021: 1.) Polttokennotekniikkaa sovelletaan monille teollisuuden aloille muun muassa mikroverkkoina voimaloiden hajautetun energiantuotannon sekä asuintalojen ja yritysten yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon muodossa. (Li ym. 2019: 7.) Mikroverkkojen lisäksi polttokennotekniikkaa sovelletaan liikennekäytössä, että kannettavien laitteiden virtalähteenä.

(Cigolotti ym. 2021: 2.) Fossiilisten polttoaineiden rajallinen määrä ja niiden käytöstä aiheutuvat ympäristöongelmat ovat suurin tekijä, joka ajaa maailmanlaajuisia yhteisöä omaksumaan uusia ympäristöystävällisiä ja kestäviä energialähteitä. (Akinyele ym. 2020: 26)

5.1 Mikroverkko

Mikroverkko on kantaverkkoa pienempi paikallinen sähköverkko. Ne voivat toimia kantaverkon yhteydessä tai irrallisina saarekkeina, jotka ovat sähköntuotannon suhteen omavaraisia. (Lounasheimo 2020: 1) Yhdysvaltain energiaministeriö määrittelee mikroverkot joukoksi toisiinsa kytkettyjä kuormia ja hajautettuja energiaresursseja selkeästi määritellyissä sähköisissä rajoissa, mikä toimii yhtenä ohjattavana kokonaisuutena suhteessa verkkoon. Mikroverkko voidaan liittää tai irrottaa kantaverkosta, jolloin se voi toimia verkkoon kytkettynä tai itsenäisesti. (Li ym. 2019: 7.)

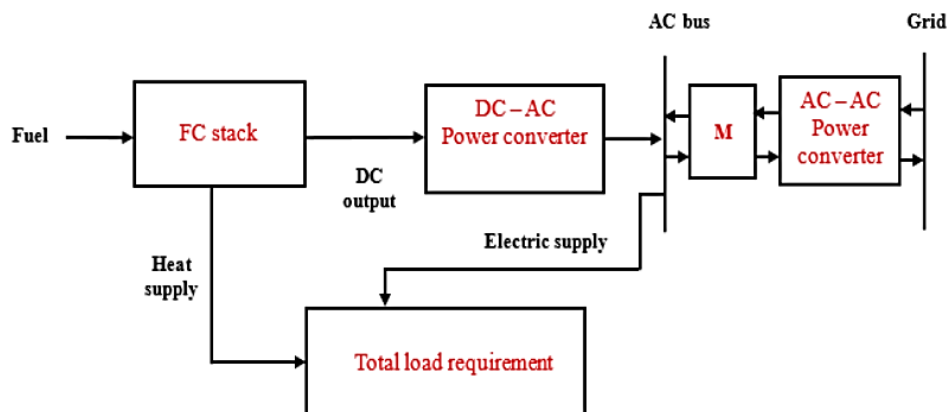
Mikroverkkosähköjärjestelmiä voidaan kuvailla joko sähköverkkoon integroiduiksi tai sähköverkosta itsenäisiksi järjestelmiksi. Polttokennopakka tuottaa tasavirtaa, mutta useimmat laitteet kotitalouksissa, kaupallisissa tai teollisuuden tiloissa toimivat vaihtovirralla. Tämän vuoksi polttokennopinnoon on yhdistettävä muuntaja muuttamaan tasavirta vaihtovirraksi. (Akinyele ym. 2020: 14.)

Mikroverkkojärjestelmiin painottuvat paikalliset sovellukset sisältävät (Akinyele ym. 2020: 16):

- verkkoon kytketyt
- verkon kanssa rinnakkain toimivat
- verkosta irrallaan olevat
- hätä- tai varavoima ja
- tasavirtamikroverkkojärjestelmät.

Verkkoon kytketyt järjestelmät

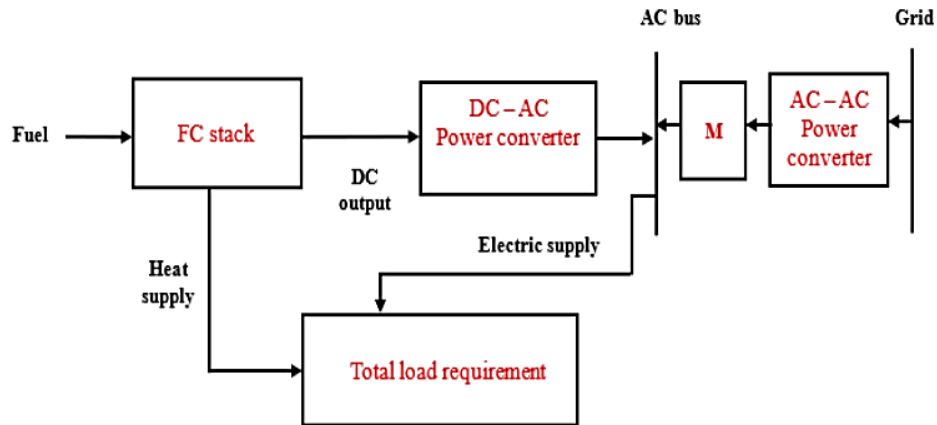
Verkkoon kytketyissä järjestelmissä energia virtaa kolmea mahdollista reittiä: 1. sähköverkosta käyttäjälle, 2. polttokennomikroverkosta käyttäjälle tai 3. polttokennomikroverkosta sähköverkkoon. Mikäli käytössä on kuormitusta seuraava strategia, mikroverkkojärjestelmä voidaan suunnitella jatkuvaksi energianlähteeksi käyttäjän maksimisähkönkulutuksen mukaan, jolloin ylimääräinen tuotettu energia voidaan ohjata kantaverkkoon. Näin verkkoon kytketyt järjestelmät ovat halvempia käyttää. (Akinyele ym. 2020: 16.) Kuva 8 havainnollistaa kantaverkkoon kytkettyä polttokennojärjestelmää.



Kuva 8: Verkkoon kytketty polttokennojärjestelmä kotitalouksille. M kuvaa sähkömittaria. (Akinyele ym. 2020: 17)

Sähköverkon kanssa rinnakkain toimivat järjestelmät

Rinnakkain toimivat järjestelmät (kuva 9) mahdollistavat kantaverkosta virran ottamisen kuluttajan tarpeen mukaan, mutta eivät mahdollista ylimääräisen sähkön syöttämistä takaisin verkkoon. Tällöin energialla on kaksi kulkureittiä, kantaverkosta kuluttajalle ja mikroverkosta kuluttajalle. Järjestelmä voidaan suunnitella niin, että pääasiallisesti virta otetaan kantaverkosta ja mikroverkkoa käytetään tasapainottamaan kuluttajan käyttöä tarpeen mukaan, mikäli kulutuksessa havaitaan kasvupiikki. (Akinyele ym. 2020: 17.)

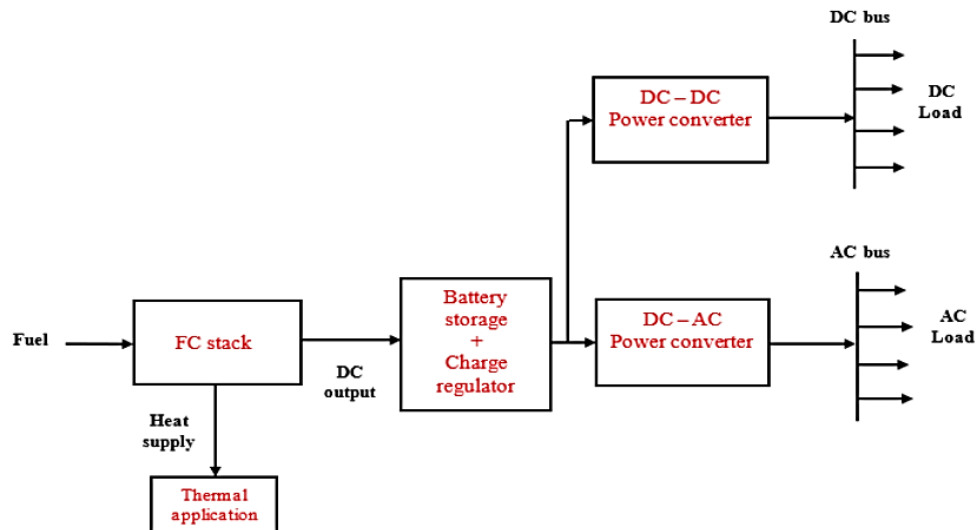


Kuva 9: Kantaverkon kanssa rinnakkain kytketty järjestelmä (Akinyele ym. 2020: 17)

Itsenäinen järjestelmä

Itsenäisissä järjestelmissä (kuva 10) kuluttajan kuormalla ja verkolla eikä polttokennomikroverkolla ja kantaverkolla ole liitántää. Tällöin energian ainoa kulureitti on paikan päällä olevasta järjestelmästä kuormalle. Paikan päällä oleva järjestelmä voi olla kokonaan polttokennotoiminen tai hybridimalli, jolloin järjestelmään on yhdistetty muita tekniikoita kuten akkuja. (Akinyele ym. 2020: 17.)

Itsenäisellä järjestelmällä tulee olla tekninen suorituskyky täyttää käynnistymisvaatimukset induktiivisen kuorman, kuten vesipumppujen, moottorin ja tuulettimien osalta. Tällöin itsenäinen järjestelmä tulee suunnitella jatkuvan enimmäiskuormituksen mukaan ollakseen luotettava. (Akinyele ym. 2020: 19.)



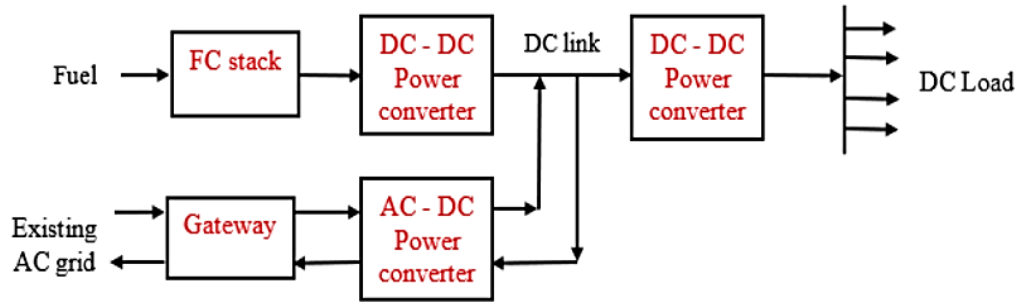
Kuva 10: Itsenäinen järjestelmä (Akinyele ym. 2020: 18)

Hätä- tai varavirta

Mikäli mikroverkkoa sovelletaan hätävirtajärjestelmänä, sen tulee olla teknisesti kykenevä käynnistymään nopeasti ja olla kytkettynä varavoimalaitokseen tai akkupankkiin. Akkupankit tarjoavat vähäistä varavirtaa lyhytkestoisesti (sekunneista muutamiin minuutteihin). Polttokennopinolla voidaan tarjota useamman kilowatin edestä varavoimaa pidempään. (Akinyele ym. 2020: 19.)

Tasavirtamikroverkkojärjestelmä

Polttokennopinon tuottama tasavirta voidaan hyödyntää tasavirtalaitteissa ilman tarvetta vaihtosuuntaajalle eli invertterille. Tasavirtajärjestelmissä (kuva 11) tulee olla tasavirtamuunnin eli DC-DC-muunnin, jotta jännitetasoa voidaan säätellä tarpeen mukaan. Tämän lisäksi vaaditaan toinen DC-DC-muunnin kuormalle, jotta kuormitus saadaan liitettyä tasavirtaväylään, joka säätelee väylän jännitettä käytettävän laitteen vaatimusten mukaiseksi. (Akinyele ym. 2020: 19–20.)



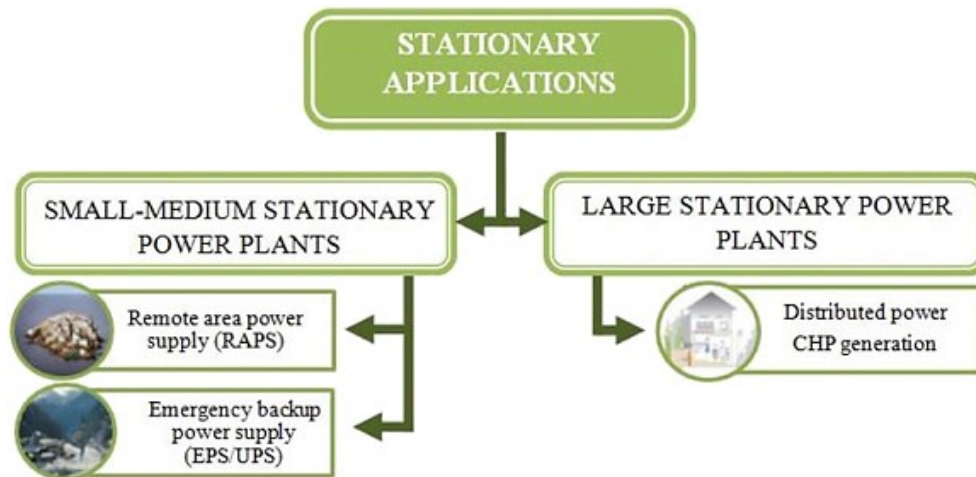
Kuva 11: Tasavirtajärjestelmä (Akinyele ym. 2020: 20)

5.2 Paikalliset voimalaitokset

Paikalliset voimalaitokset määritellään sähköä tuottaviksi kiinteiksi järjestelmiksi. Paikallisten laitosten päätoimintasektorit ovat a) yhdistetty sähkön- ja lämmön-tuotanto (Combined Heat and Power, CHP), b) keskeytymättömät virransyöttö-järjestelmät eli varavirta (Uninterruptable Power System, UPS) ja c) ensisijainen sähköntuotanto. (Fuel Cells Works - Fuel Cells, Energy and Hydrogen News.)

Paikallisten laitosten kennokoko riippuu vahvasti tarvittavasta kuormasta. Koska paikallisten laitosten toimintasektori vaihtelee yksinkertaisista varavirtajärjestel-mistä suuriin laitoksiin, markkinoilla on tarvetta alle muutaman kilowatin yksi-köistä usean megawatin laitoksiin. Polttokennot ovat pinottavissa, joten niitä voi-daan muokata tarpeenmukaisiksi. Paikalliset laitokset jaotellaan suuriin, pieniin- ja keskisuuriin laitoksiin seuraavasti (kuva 12) (Wilberforce ym. 2016: 7)

- suuret laitokset: 300 kW-20 MW
- keskisuuret laitokset: 10 kW-300 kW ja
- pienet laitokset: >1 W-10 kW (Wilberforce ym. 2016: 7)



Kuva 12: Paikallisten laitosten jaottelu (Wilberforce ym. 2016: 7)

Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto

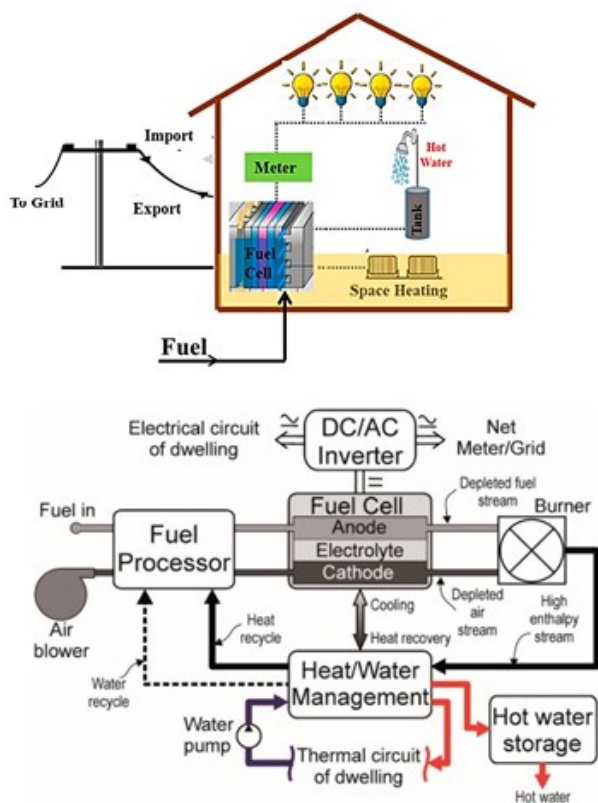
Polttokennot soveltuvat sähkön- ja lämmön yhteistuotantoon, sillä samasta polttoaineesta, vedystä, saadaan tuotettua sekä sähköä että lämpöä. Myös perinteiset polttoaineet kuten maakaasu, soveltuvat polttokennojärjestelmiin. (Felseghi ym. 2019: 17.)

CHP-yksiköitä asennetaan erityisesti rakennuksiin, joissa ne toimivat itsenäisinä järjestelminä. Ne on pääsääntöisesti suunniteltu tuottamaan sähköä ja lämpöä yksittäisille, erikokoisille rakennuksille, kuten mökeille, toimisto- ja hallintorakennuksille sekä sairaaloille. (Wilberforce ym. 2016: 8.)

CHP-tavoitteet ovat menossa kohti järjestelmiä, joilla tuetaan energian saantia suuremmille kokonaisuuksille, kuten kollektiivitalouksille, joissa on useita asuntoja. Tällaista yksittäisiin rakennuksiin asennettua CHP-yksikköä (kuva 13) kutsutaan mikroyhteistuotannoksi (mikro-CHP). Mikroyhteistuotantoon soveltuvat erityisesti protoninvaihtokalvopolttokennot, sillä PEM-kennoilla on nopea käynnistymisaika (alle 30 s), matala toimintalämpötila (60–80 °C), korkea energiantuotantotehokkuus sähköntuotannossa sekä nopea vaste. (Olabi ym. 2020: 2.) Kalvotoiminnon vuoksi syntyy myös suuret määrät lämpöenergiaa, noin 40–65 % vedyn kokonaisenergiasisällöstä. (Sazali ym. 2020: 7.) PEM-kennojen avulla

tarvittavan energian määrä voidaan taata kuluttajalle sekä öisin että päivien suurien virtapiikkien ajaksi. Mikroyhteistuotannossa käytetään PEM-kennojen lisäksi kiinteäoksidikennoja. (Felseghi ym. 2019: 17.) Yhteistuotannon suurin haaste on korkean alkupääoman tarve verrattuna muihin yhteistuotantotekniikoihin. Yhteistuotantotekniikoiden valikoima riippuu tuotantohinnasta ja järjestelmän saatavuudesta. Tällä hetkellä CHP-yksiköiden myynti on vähäistä. Kuitenkin erityisesti kannettaville polttokennojärjestelmille myönnetään merkittäviä määriä valtion tukia, joten polttokennot ovat valtion suosiossa verrattuna muihin yhteistuotantotekniikoihin. (Olabi ym. 2020: 14.)

Suuria CHP-yksiköitä asennetaan tukemaan suuria kaupallisia ja teollisia yksiköitä. Näihin suurempiin kokonaisuuksiin käytetään fosforihappo- ja sulakarbonaattikennoja sekä kiinteäoksidikennoja. (Felseghi ym. 2019: 17.)



Kuva 13: Kotitalouksen verkkoon kytketty yhteistuotanto (Olabi ym. 2020: 8)

Varavirtajärjestelmät ja syrjäisten alueiden energiantuotto

Varavoiman tarkoituksena on turvata sähkön saanti pidempien katkosten tai häiriöiden aikana. Katkeamaton sähkönsyöttö voidaan varmistaa UPS-laitteilla (Uninterrupted Power Supply). UPS takaa sähkönsyötön lyhyiden sähkökatkosten aikana, kunnes mahdolliset varavoimayksiköt käynnistyvät. (Emergency and Standby Power Systems for Buildings 2021)

Suomen varavoimakapasiteetti on 1 300 megawattia. Toimintavarmuudesta vastaa Fingrid. Fingridin varavoima koostuu 10 omasta laitoksesta ja seitsemästä vuokralaitoksesta. Näiden laitosten avulla Fingrid pystyy varautumaan 36 tunnin pituiseen sähköhäiriöön. Varavoimalta edellytetään 90 %:n käynnistymisvarmuutta. (Frantti, 2019) Varavoima tuotetaan varavoimalaitoksissa tai polttomootoreissa (kuten dieselkoneissa), joihin on yhdistetty generaattori. Kuluttajalle tutumpaa pienemmän mittakaavan varavoimaa kutsutaan aggregaatiksi. Dieselin ohella varavoimana käytetään erilaisia akkuja. (Varavoima & Varavoimakoneet Suomen Diesel Voima Osakeyhtiö)

Polttokennoja voidaan hyödyntää tehokkaasti erilaisissa varavoimajärjestelmissä, sillä varavoimajärjestelmältä vaaditaan korkeaa luotettavuutta, mutta niitä ei tarvitse hyödyntää pitkäaikaisesti. Tällaisia varavoimajärjestelmiä hyödynnetään esimerkiksi datakeskuksissa, pankeissa, sairaaloiden leikkausosastoilla, liikenteenohjausjärjestelmissä sekä hallituksen virastoissa. (Wilberforce ym. 2016: 8)

Varavirtajärjestelmissä käytetään pieniä tai keskisuuria kennoja, joita voidaan hyödyntää laajemmin kuin suuria laitoksia. Näitä pieniä ja keskisuuria laitoksia hyödynnetään sekä varavirtajärjestelmien tukena että syrjäalueiden energiantuotannossa. (Wilberforce ym. 2016: 7)

Dieselkoneita puolestaan käytetään yleisesti varavoimana. Koneita voidaan käyttää myös liikuteltavina yksiköinä. Dieselkoneiden eduksi voidaan laskea niiden edullinen hinta sekä standardisoitu status varavoimamarkkinoilla. Dieselkoneiden käyttöä voidaan kuitenkin rajoittaa päästöjen ja äänihaittojen vuoksi. Tämän lisäksi monet televiestintäjärjestelmät, kuten puhelinantennit, sijaitsevat

rakennusten katoilla, joihin dieselkoneille ei myönnetä asennuslupaa. (Ma ym. 2018: 2) Dieselkoneisiin verrattuna polttokennot ovat hiljaisia ja päästöt ovat matalammat polttokenno-akku-hybridijärjestelmällä kuin dieseloimisella varavoimalla. Polttokennoilla sekä polttokenno-akku-hybridijärjestelmällä, erityisesti käytettäessä kiinteäoksidikennoa, on teknistaloudellisen analyysin mukaan pienempi polttoainekustannus kuin dieselgeneraattoreilla. (Ma ym. 2021: 14.) Metanolikemien etuna dieselkoneisiin verrattuna on, että metanolin sisältämä vety ei häviä eikä polttoaine siten huonone, vaikka se seisoisi pitkiäkin aikoja. Diesel säilyy ideaaliloissa vain 6–12 kuukautta. Sisältäessään pienet määrät vettä diesel on myös altis mikrobeille eli dieselsienelle. (Dieselin Saastuminen | Dieselbakteeri)

Toinen yleisesti käytetty varavoima on akut (Ma ym. 2018: 2). Akkuja käytetään energiavarastona muun muassa paikkaamaan uusiutuvien energialähteiden tuotantokatkoksia (Akinyele ym. 2020: 26). Akkujen kapasiteetti on riippuvainen massasta, jolloin suuritehoiset akut ovat kookkaita ja painavia. Kokonsa vuoksi ne voivat kohdata paino- ja tilarajoitteita suljetuissa tiloissa ja katoilla (Ma ym. 2018: 2.) Polttokennoilla on korkea energiatiheys, pitkä toiminta-aika ja tasainen virrantuotto, minkä ansiosta ne soveltuvat akkuja paremmin varavirtalähteeksi. Polttokennot ovat modulaarisia sekä kompaktin kokoisia ja tuottavat varavoimaa akkuja kauemmin. (Akinyele ym. 2020: 26; Ma ym. 2018: 2.) Polttokennoilla voidaan tuottaa varavoimaa satoja tunteja, kun akkujen tuotanto jää kymmeneen tuntiin (Li ym. 2019: 7). Tämän lisäksi polttokennot soveltuvat akkuja paremmin energiatuotantoon, sillä ne voivat myös säädellä jännitettä ja taajuutta sekä tukea virran laatua (Akinyele ym. 2020: 26).

Syrjäisten alueiden energiantuotossa eli RAPS-järjestelmissä (Remote Area Power Supply) käytetään pääsääntöisesti pieniä yksiköitä. Ne sijaitsevat alueilla, jotka ovat sähköverkon ulkopuolella, kuten saarissa, aavikoilla, metsissä ja syrjässä olevissa tutkimuslaitoksilla. (Wilberforce ym. 2016: 8) Yleensä RAPS-järjestelmät tulevat taloudellisemmaksi vaihtoehdoksi kuin sähköverkon laajentaminen syrjäisille alueille. Syrjäisillä alueilla maasto on haastavampaa ja sähkölinjojen ulottaminen vuorten tai suurten metsäalueiden yli aiheuttaa suuremmat

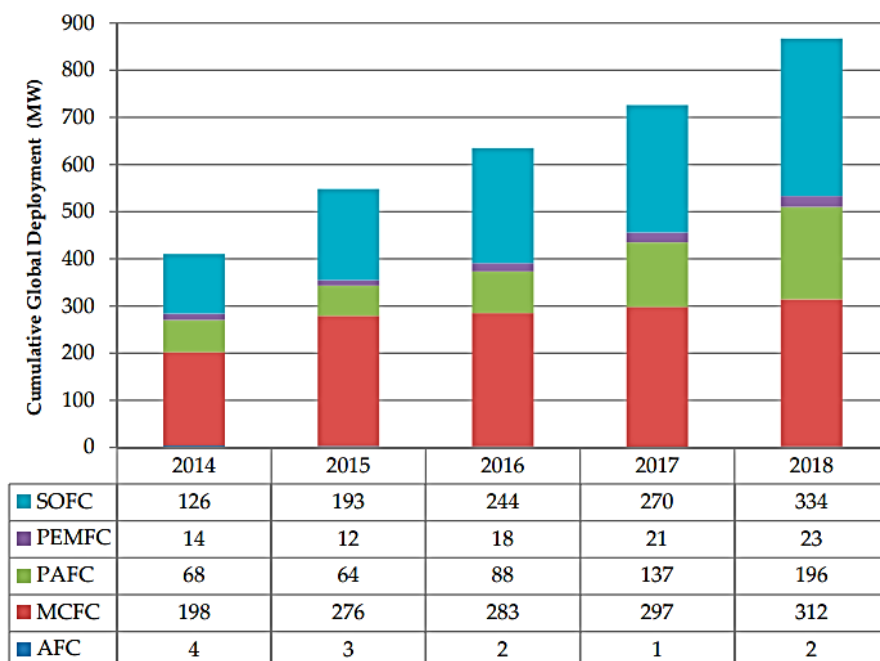
kulut alhaisen kuorman ja suurten siirtohäviöiden vuoksi. Erityisesti kehitysmaat voisivat hyötyä RAPS-järjestelmistä. RAPS-järjestelmät pohjautuvat joko hiiliveytyihin tai uusiutuviin polttoaineisiin tai molempiin. Myös RAPS:iin yhdistettyä yhteistuotantomahdollisuutta tutkitaan. (Sharaf & Orhan, 2014: 826)

Ensisijainen sähköntuotanto

Polttokennovoimalaitos on aina enemmän kuin pelkkä pinottu kenno, riippumatta siitä onko polttokennojärjestelmä verkon tukema tai verkon ulkopuolinen. (Akinyele ym. 2020: 14.) Suuret paikalliset voimalaitokset edesauttavat siirtymää suuresta keskitetystä energiantuotannosta hajautettuun tuotantoon. Erityisesti suurempiin asuinkortteleihin soveltuvat sähkön ja lämmön yhteistuotantoon sopivat polttokennot, kuten kiinteäoksidikennot. Nämä järjestelmät voitaisiin suunnitella kantaverkosta itsenäisiksi järjestelmiksi tai verkkoavusteisiksi. (Wilberforce ym. 2016: 7)

Suuria paikallisia laitoksia suunnitellaan korvaamaan sähköverkkoa sekä toimimaan alueilla, joissa on vähän tai ei lainkaan paikallista verkkoa, sekä tarjoamaan yhtymäkohtia sähköverkon laajennuksille. (Fuel Cells Works Fuel Cells, Energy And Hydrogen News.)

Maailmanlaajuisesti paikalliseen käyttöön tarkoitetussa hajautetussa energiantuotannossa käytetään useita eri kennotyyppejä (AFC, PAFC, MCFC, SCFC ja PEMFC), mutta primäärituotossa kolme kennoa dominoi markkinoita (kuva 15). Yleisimmin käytössä on kiinteäoksidikennot, joiden jälkeen seuraavaksi yleisimmät ovat sulakarbonaatti- ja fosforihappokennot. Vain muutamia alkalisia ja protoninvaihtokennoja on kehitetty suuriksi paikallisiksi laitoksiksi.



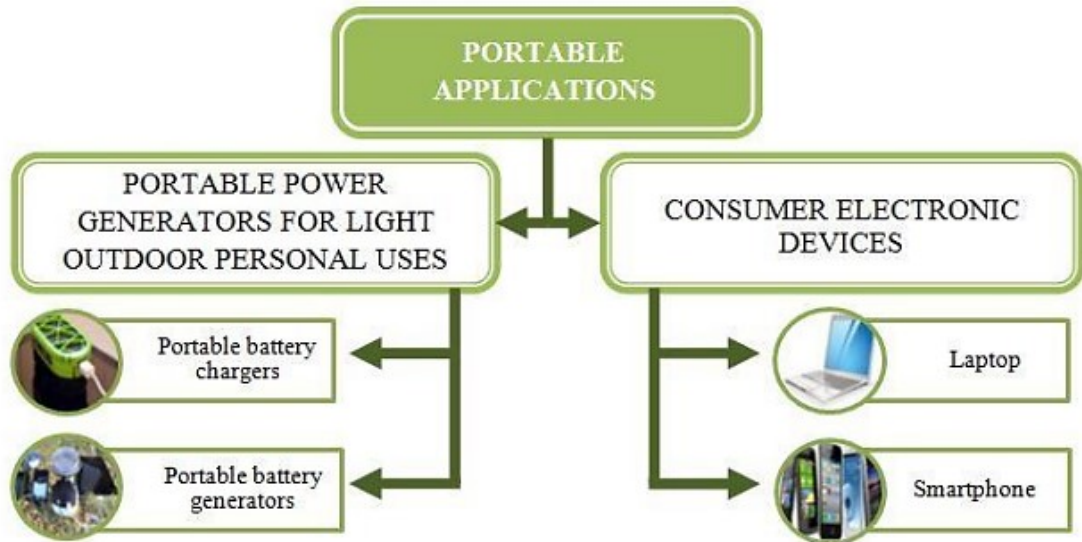
Kuva 14: Sähköntuottoon perustuvien suurien polttokennoyksiköiden kehitys vuosilta 2014–2018 (Felseghi ym. 2019: 19)

5.3 Kannettavat voimalähteet

Kasvava tarve laadulle ja virtalähteen kestävyydelle on kannettavien polttokennojen markkinoiden ajava voima. Tuotteiden tulee olla edullisempia, pienempiä, kevyempiä ja sisältää yhä enemmän toimintoja. Telekommunikaation, tietokoneiden, Internetin ja sosiaalisen verkoston tullessa ihmisille yhtä tärkeämmäksi niille vaaditaan varmaa ja luotettavaa virtalähdettä. Hyvän energiatiheyden, yksinkertaisen suunnittelun, kestävyuden ja edullisen hinnan ansiosta polttokennoilla olisi potentiaalia soveltua luotettavaksi virtalähteeksi. (Wilberforce ym. 2016: 3)

Fuel Cell Today määrittelee kannettavat polttokennot sisäänrakennetuiksi tai laadattaviksi laitteiksi, joita voidaan siirtää. Niiden pääkäyttökohde on armeijan varustuksessa, siirrettävissä apuvoimalaitteissa, kannettavissa työkaluissa kuten siimaleikkureissa, henkilökohtaisessa elektroniikassa (puhelimet, kannettavat tietokoneet) sekä koulutuksessa ja leluissa. (Fuel Cell Today, the Leading

Authority on Fuel Cells.) Kannettavat polttokennot lajitellaan karkeasti kahteen luokkaan: kevyessä henkilökohtaisessa ulkokäytössä olevat laitteet ja kuluttaja-elektroniikka.



Kuva 15: Kannettavien laitteiden luokittelu (Wilberforce et al., 2016)

Kannettavat voimalähteet vaihtelevat koollisesti hyvin paljon pienestä elektroniikasta suurempiin yksiköihin, joten myös laitteiden tehon on mukauduttava tarpeeseen. Tämän vuoksi kannettavien laitteiden teho vaihtelee viidestä watista 500 kilowattiin. Alle viiden watin kennoja kutsutaan mikropolttokennoiksi. (Fuel Cells Works - Fuel Cells, Energy and Hydrogen News)

Kannettavat polttokennot käyttävät joko protoninvaihto- tai suorametanolitekniikkaa. Wattimäärällisesti kannettavia polttokennoja käytetään apuvoimalaitteissa eniten. Kannettavat polttokennot tyypillisesti korvaavat akku- ja paristoteknologiaa. Tärkeimmät tekijät kannettavien polttokennojen yleistymisen kannalta ovat verkon ulkopuolinen toiminta, pidempikestoinen toiminta-aika kuin paristoilla ja akuilla, nopea uudelleenlataus, painon vähennys ja luotettavuus sekä helppokäyttöisyys. (Fuel Cells Works Fuel Cells, Energy and Hydrogen News.)

Erytisesti sotilaskäyttöön tarkoitetuille voimalähteille on kasvava kysyntä. Tämä tarkoittaa yhä enemmän kannettavia suorametanol- ja protoninvaihtotekniikkaa

käytettäviä polttokennoja, niiden hiljaisen toiminnan, suuren tehon ja keveyden vuoksi. Puolustusjärjestelmissä käytetään maailmanlaajuisesti suorametanolisovelluksia esimerkiksi integroituna ajoneuvoihin, kannettavina latausyksiköinä, viestijärjestelmissä ja tietysti henkilökohtaisissa suojarusteissa. (Alias ym. 2020: 19 633.)

6 Ympäristövaikutukset

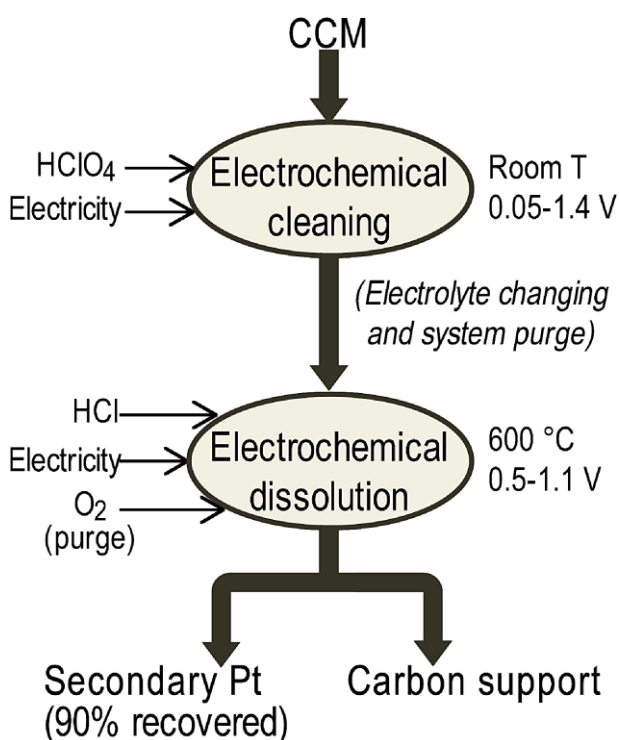
6.1 Kiertotalous

Euroopan unioni julkaisi ilmastotavoitteensa vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 80 % vuoteen 2050 mennessä. Tämän tavoitteen kannalta vetyteknologia tulee olemaan kriittisessä roolissa siirryttäessä vähähiiliseen talouteen. Jotta polttokennot ja vetyteknologiat yleistyisivät, niiden käyttöön liittyvät haasteet tulee ratkaista. Esimerkiksi vetytekniikoille ei ole riittävää jakeluinfrastruktuuria, hallitukset eivät edistä vetyteknologiaa eivätkä ne ole saavuttaneet sosiaalista hyväksyntää. Vetytekniikoiden täyttä käyttöönottoa on hidastanut myös se, ettei niille ole määritelty End-of-Life-tekniikoita (EoL) eli käyttöiän päättymisen jälkeisiä strategioita. (Valente ym. 2019: 20 974.) Euroopan unioni tutkii polttokennojen ja vetytekniikoiden kierrätystä HyTechCycling-projektissaan (Introduction - HyTechCycling).

EoL-tekniikoiden kohteena on platinaryhmään kuuluvat metallit kuten platina, iridium ja rutenium, jotka halutaan talteen elektrodeista käyttöiän lopussa. Tavanomaisina vaihtoehtoina pidetään hydrometallurgista tai pyro-hydrometallurgista käsittelyä. Näiden keinojen taloudellinen kannattavuus riippuu metallien talteenoton tehokkuudesta ja alkuperäisten jalometallien pitoisuudesta. (Valente ym. 2019: 20 967.)

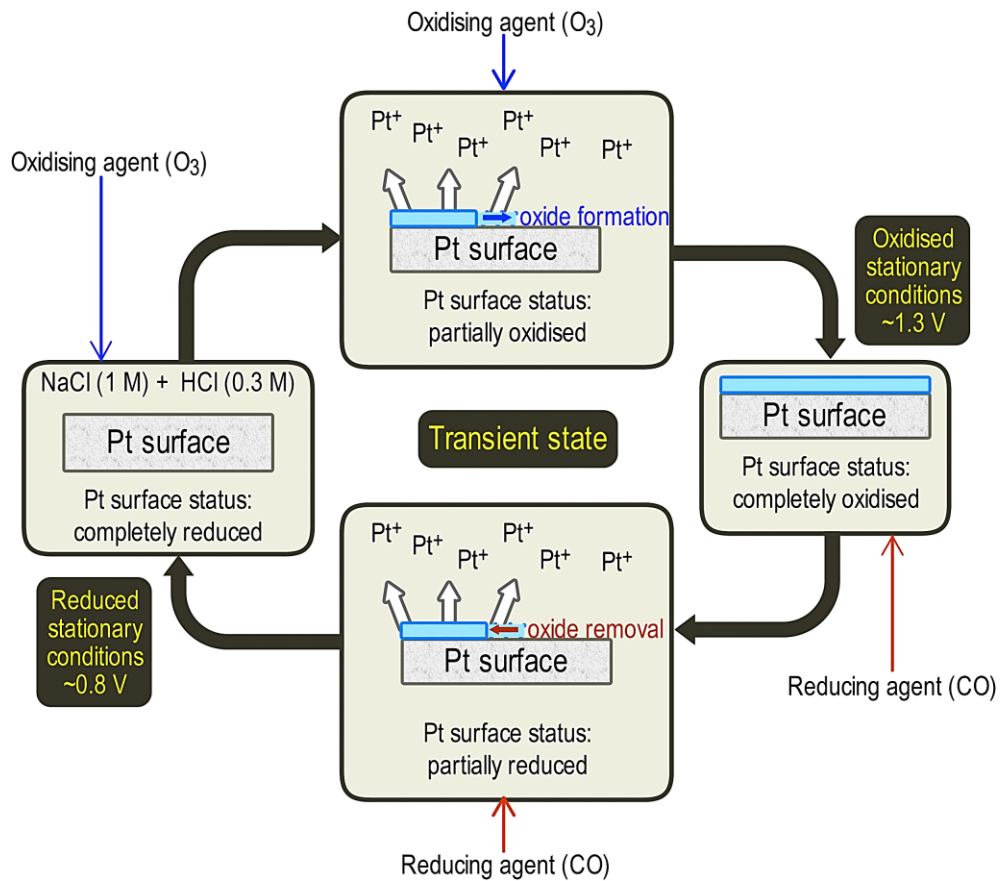
Uutena tekniikkana platinan talteenottoon pidetään valikoivaa sähkökemiallista liukenemista (Selective Electrochemical Dissolution, SED) (kuva 16), jolla saataisiin talteen sekä katalyytti että hiilirakenne, johon se on sidottu. Metodi

perustuu materiaalien sähkökemialliseen liukenemiseen eri jännite- ja pH-asteilla. (Valente ym. 2019: 20 969.)



Kuva 16: SED-tekniikka (Valente ym. 2019: 20 696)

Toisena vaihtoehtona pidetään hetkittäistä liukenemista jännitteen vaihtelun avulla (Transient Dissolution Through Potential Alteration, TD) (kuva 17), jota pidetään sähkökemiallisen liukenemisen varianttina. Metodi keskittyy siirtymätilaan, joka aiheutetaan toistuvasti vaihtelemalla platinapinnan hapettumistasoa. Siirtymätilan aikana kloridi vakauttaa platinaioneita, joita otsoni (O_3) ja hiilimonoksidi (CO) hapettavat ja pelkistävät. Tämä tekniikka ei tue muiden MEA-rakenneseosien, kuten kalvon tai katalyytin rakenteen, talteenottoa, mutta se soveltuu muiden metallien talteen ottamiseen. (Valente ym. 2019: 20 970.)



Kuva 17: TD-tekniikka (Valente ym. 2019: 20 970)

Näiden kahden esitellyn tekniikan lisäksi on kehitetty myös alkoholiin ja happoon perustuvia erottelumenetelmiä. Molempien menetelmien avulla saadaan platinoidit talteen, happoprosessissa luotua uusi kalvo uusille polttokennoille ja alkoholimenetelmässä kerättyä Nafioni. (Valente ym. 2019: 20 970.)

SED- ja TD-menetelmien etuina on matalat investointikustannukset, suuri talteenottopitoisuus ja nopea prosessi. Haittapuolena on, että niissä käytetään vaarallisia aineita. (Valente ym. 2019: 20 971.) TD-menetelmässä platinan liuottamiseen käytetään natriumkloridia sekä vetykloridia. Reagoidessaan ne muodostavat natriumhydridiä (NaH) ja kloorikaasua (Cl_2). Natriumhydridi on voimakkaasti ihoa syövyttävä yhdiste ja mahdollisesti tappava nieltynä tai joutuessaan hengityselimiin. Kloorikaasu puolestaan on tappavaa hengitettynä. (NaH Käyttöturvatieote, Sigma-Aldrich, 2021; Käyttöturvallisuustiedote Kloori, Linde, 2020.) EoL-tekniikoiden kehittymisen seurauksena polttokenno- ja

vetytekniikoiden läpimurto on todennäköisempää. Samalla tekniikat mahdollistavat vetytekniikoiden korkeampaa käyttöönottoa ja kysyntää vihreillä markkinoilla. EoL-tekniikoiden haasteena pidetään vaarallisten aineiden säännöstelyä, kasvavia sähkön hintoja sekä vetytekniikoiden poissulkemista hallinnollisissa päätöksissä. (Valente ym. 2019: 20 972.)

6.2 Ilmasto

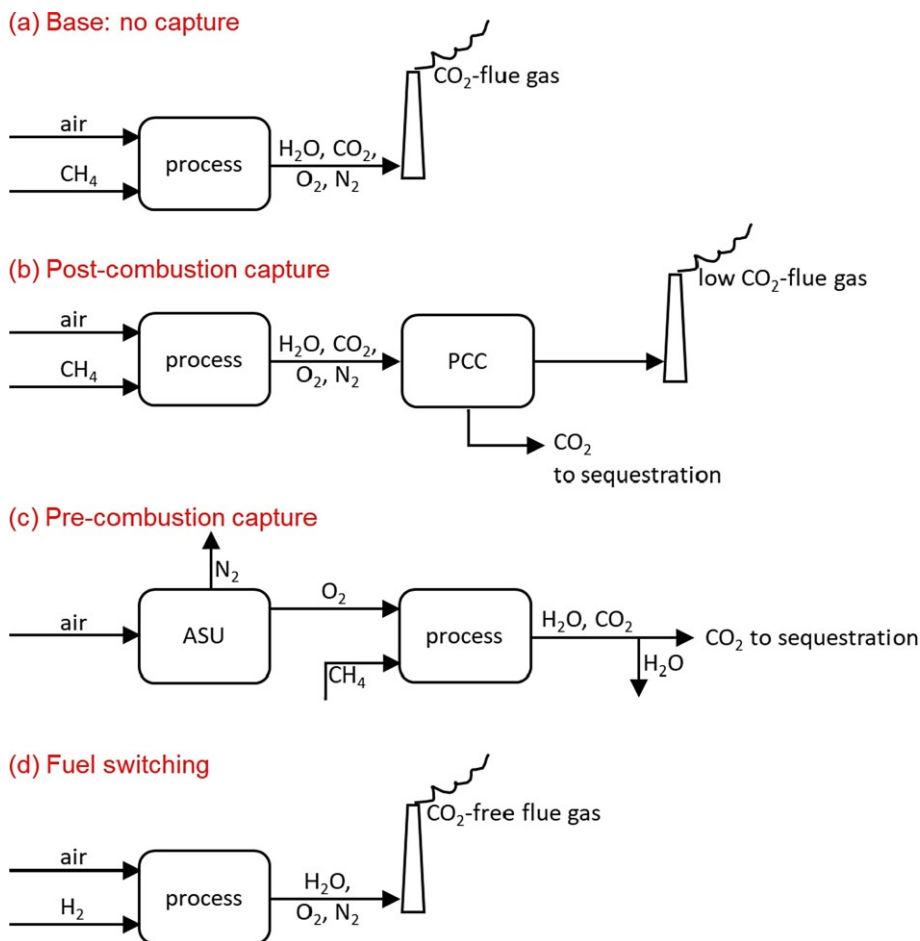
Ilmansaasteet ja niistä seuraavat terveysongelmat ovat suuri haaste hallituksille, teollisuudelle ja tiedeyhteisölle. Energiatehokkuuden parantaminen, vaihtoehtoisten energiantuotantotapojen löytäminen ja energiantuotannon ympäristövaikutusten pienentäminen sekä tuotannosta syntyvän jätteen vähentäminen ovat avainasemassa kestävän kehityksen tavoitteiden saavuttamisessa. (Cigolotti ym. 2021: 1.)

Polttokennoja pidetään parhaimpana tapana maailmanlaajuisesti vähentää hiilidioksidipäästöjä paikallisissa voimalaitoksissa (Cigolotti ym. 2021: 1). Suomen vuoden 2019 hallitusohjelman tavoitteena on, että Suomi on hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä ollen samalla ensimmäinen fossiilivapaa hyvinvointiyhteiskunta (Hiilineutraali Suomi 2035 – Ympäristöministeriö 2019: 1.). Suomen energia- ja ilmastostrategiassa polttokennot mainitaan kuitenkin vain liiketoimintamahdollisuutena vientialalle (Valtioneuvoston Selonteko Kansallisesta Energia- ja Ilmastostrategiasta Vuoteen 2030.).

Ilmaston kannalta haitallisena kaasuna pidetään hiilidioksidia (CO₂). Barckholtz ym. (2022) esittivät tutkimuksessaan, että sulakarbonaattikennoa voidaan hyödyntää hiilidioksidin talteenotossa (Carbon Capture and Sequestration) voimalaitosten savukaasuista. Nykymallissa (kuva 18) hiilidioksidi on pyritty keräämään savukaasuista palamisreaktion jälkeen (Post Combustion Capture, PCC). PCC-tekniikassa hiilidioksidia kerätään käyttämällä nestemäisiä amiineja. (Barckholtz ym. 2022: 3.)

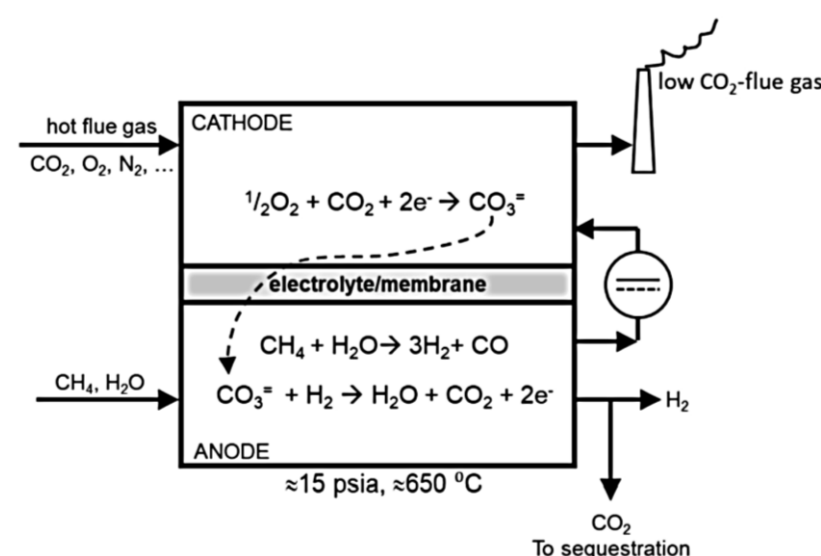
Toinen vaihtoehto on kerätä hiilidioksidi ennen polttoreaktiota. Menetelmässä ilmassa oleva happi erotellaan typestä (N_2) ja eroteltua puhdasta happea käytetään palamisprosessissa. Puhdaan hapen käytön ansiosta savukaasut koostuvat vedestä ja hiilidioksidista. Vesi voidaan kondensoida pois, jolloin jäljelle jäävä hiilidioksidi pystytään paineistamaan ja varastoimaan. (Barckholtz ym. 2022: 3.)

Kolmas tapa on polttoaineen siirto (Fuel Switching). Tekniikassa korkean hiilidioksidipitoisuuden polttoaine korvataan matalapitoisemmalla polttoaineella. Tällaisia siirtoja ovat esimerkiksi bensiinin korvaaminen bioetanolilla ja hiilen korvaaminen maakaasulla. (Barckholtz ym. 2022: 3)



Kuva 18: Hiilidioksidin talteenottomenetelmät. a) Ei talteenottoa, b) polton jälkeinen talteenotto, c) ennen polttoa tapahtuva talteenotto ja d) polttoaineen siirto (Barckholtz ym. 2022: 4)

Uusin hiilidioksidin talteenottotekniikka on hybridimalli, joka perustuu kolmeen aiempaan tekniikkaan. Tekniikassa (kuva 19) käytetään sulakarbonaattikennoa PCC-tekniikan tavoin keräämään hiilidioksidia perinteisestä polttoprosessista. Samalla kenno tuottaa vedyn sivutuotetta, jota voidaan käyttää polttoaineen siirtoon. Sulakarbonaattikenno tuottaa hiilidioksidin talteenoton ja vedyn tuoton ohella myös sähköä. (Barckholtz ym. 2022: 2–3.)



Kuva 19: Sulakarbonaattikenno hiilidioksidin talteenotossa (Barckholtz ym. 2022: 4)

7 Polttokennot Suomessa ja maailmalla

Aasia

Vuoden 2018 tilastojen mukaan Aasia on polttokennokehityksen kärjessä. Asennettuja polttokennoyksiköitä oli 55 500 kappaletta. (Felseghi ym. 2019: 12.) Aasian maista erityisesti Japani on hallinnut polttokennomarkkinoiden kasvua ja sen uskotaan jatkavan kehityksen kärjessä. Maalla on lukuisia polttokenno-sovelluksia vaihdellen datakeskusten varavirtajärjestelmistä yhdistettyyn sähkön- ja lämmöntuotantoon. Japani on kehittänyt yhden menestyneimmistä ohjelmista polttokennojen kaupallistamiseen, niin kutsutun Ene-farmin. (Asia-Pacific Fuel Cell Market 2022–27 Industry Share, Size, Growth.)

Ene-farmi on lempinimi ensimmäiselle kotikäyttöiselle polttokennojärjestelmälle. Se on kotitalouksien käyttöön valmistettu mikro-CHP-järjestelmä. Se hyödyntää nestekaasusta saatavaa vetyä ja ympäröivää ilmaa sähkön tuotannossa. Reaktiossa syntynyt lämpö hyödynnetään talousveden lämmityksessä. (Japan LP Gas Association.)

Vuoden 2020 tilastojen (kuva 20) mukaan, Aasiaan asennettujen polttokennoyksiköiden määrä on nousussa. Asennettuja yksiköitä ilmoitettiin olevan 58 800 kappaletta (viimeisen 2020 kvartaalin lukujen perusteella arvioituna). Kun Aasian kehitystä tarkastellaan megawattien kautta, kehitys on nopeampaa, sillä Aasiaan on vuoteen 2020 mennessä asennettu 912,4 megawatin edestä polttokennoyksiköitä. Näin ollen Aasia lähestyy yhden gigawatin rajaa. (Technology & Market Report 2021.)

Vuoden 2020 nousu on huomattava verrattuna vuoden 2018 kapasiteettiin, joka oli 337,9 megawattia. Nousua selittää se, että vuonna 2018 yksi polttokennoyksikkö oli keskimäärin 6,64 kilowattia, vuonna 2019 13,9 kW/yksikkö ja vuonna 2020 15,5 kilowattia. (Technology & Market Report 2021.)

MW	2016	2017	2018	2019	2020f*
Europe	27.4	38.9	41.2	113.0	148.6
N America	213.6	331.8	425.3	339.2	252.7
Asia	273.8	285.8	337.9	743.9	912.4
RoW	1.7	2.1	1.2	0.2	5.0
Total	516.5	658.6	805.8	1,196.3	1,318.7

Kuva 20: Asennettu kapasiteetti megawatteina 2016–2020 (Technology & Market Report 2021)

On huomioitava, että Aasian suuri osuus polttokennoissa johtuu pitkälti autovalmistajien, kuten Toyotan ja Hyundain, polttokennokehityksestä. Lukuun vaikuttaa myös Kiinan polttokennorekkojen ja linja-autojen lisääntyvä määrä.

Paikallisten polttokennoapplikaatioiden kapasiteetti on vuoden 2020 tilastojen mukaan 320 megawattia. Suurten, yli 100 kilowattia, CHP-laitosten ja primääri-laitosten osuus tästä on 85 %: a. Maailmanlaajuisesti paikallisten laitosten osuus on silti vain noin 400 yksikköä. (Technology & Market Report 2021.)

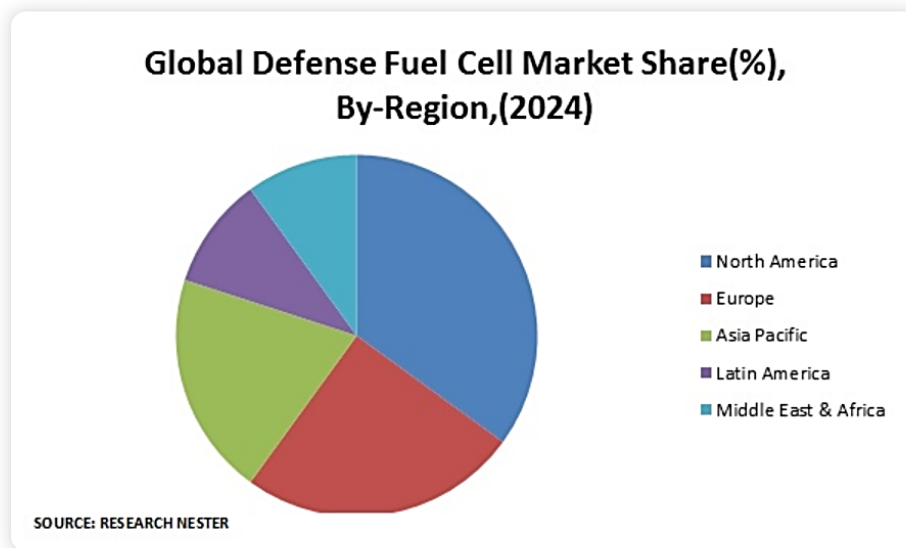
Pohjois-Amerikka

Aasian ulkopuolella Yhdysvallat on merkittävä polttokennojen valmistaja. Yhdysvalloissa on keskitytty paikallisiin polttokennosovelluksiin ja materiaalin käsittelyyn soveltuviin kennoihin. Yhdysvallat on polttokennojärjestelmien netto-maahantuoja, sillä huomattava osuus polttokennoyksiköiden lähettämisestä perustuu liikennekäyttöön eikä Yhdysvalloilla ole omaa polttokennoautoa. (Technology & Market Report 2021.) Pohjois-Amerikka on Aasian suurin kilpailija polttokennomarkkinoissa. Pohjois-Amerikassa on vuonna 2018 listattu 9 800 asennettua polttokennoyksikköä ja asennettua kapasiteettia 415 megawattia. (Felselghi ym. 2019: 12.) Vuoden 2021 lopussa on asennettu pelkästään 113 polttokennosähkögeneraattoria, joilla on 260 megawatin edestä sähköntuotantokapasiteettia (Use of Hydrogen - U.S. Energy Information Administration (EIA)).

Yhdysvaltain markkinoilla käyttöönotettujen kennoyksiköiden määrä on kasvanut vuosina 2015–2020. Vuonna 2020 käyttöönotettujen yksiköiden määrä nousi 32 prosenttia verrattuna vuoteen 2019. Yhdysvalloissa erityisesti pienen kapasiteetin polttokennoyksiköt ovat nousussa. Ne soveltuvat muun muassa materiaalin käsittelyyn, kuten trukkeihin. On odotettavaa, että pienen kapasiteetin yksiköt jatkavat menestystään Yhdysvalloissa. (Technology & Market Report 2021.)

Yhdysvallat on myös suurin markkina-alue, mitä tulee polttokennojen puolustus-käyttöön (kuva 21). Kokonaismarkkinoista Yhdysvallat hallitsee noin kolmas-osaa. Polttokennoja halutaan erityisesti ajoneuvoihin, ilma-aluksiin ja aluksiin päästöjen ja niiden haitallisten sivutuotteiden vähentämiseksi. Puolustussektorilla kansainvälisiä suurimpia toimijoita ovat Protonex, UltraCell, Neah Power

Systems, Ballard Power Systems, Plug Power, Bloom Energy, Nuvera Fuel Cells, Aisin Seiki Co. Ltd., Alteryg Systems.



Kuva 21: Maailmanlaajuinen osuus polttokennomarkkinoista puolustussektorilla (Defense Fuel Cell Market Size: Global Industry Demand, Growth, Share & Forecast 2024 2022)

Eurooppa

Vuonna 2018 Euroopassa ilmoitettiin asennetuksi 8 600 polttokennoyksikköä (Felseghi ym. 2019: 12). Aasian tavoin Euroopassa on siirrytty kohti kookkaampia kennoyksiköjä. Vuonna 2018 polttokennoyksikkö oli keskimäärin 5,35 kilowattia, vuonna 2019 kennokoko oli noussut keskimäärin 10,6 kilowattiin ja vuonna 2020 11,7 kilowattia per yksikkö. (Technology & Market Report 2021.)

Euroopassa arvioitiin olevan 12 700 polttokennoyksikköä vuonna 2020 (kuva 22), mikä olisi 18 % enemmän kuin edeltävänä vuonna. Asennetuissa megawatteissa se on 148,6 megawattia, noin 11 % maailman kokonaisasennetusta määrästä 1318,7 megawattia. (Technology & Market Report 2021.)

1,000s units	2015	2016	2017	2018	2019	2020f*
Europe	8.4	4.4	5.1	7.7	10.7	12.7
N America	6.9	7.7	9.4	9.3	8.1	10.7
Asia	44.6	50.6	55.3	50.9	53.5	58.8
RoW	1	0.5	0.8	0.6	0.2	0.2
Total	60.9	63.2	70.5	68.5	72.50	82.40

* 2020f is the data at end of 2020 using forecasted numbers for the last quarter

Kuva 22: Asennetut yksiköt 2015–2020 (Technology & Market Report 2021)

Yhdysvaltojen tavoin, myös Euroopan markkinoiden uskotaan kasvavan puolustussektorille tarkoitettujen polttokennojen suhteen. Maailman markkinoista noin neljäsosan povataan kuuluvan Euroopalle vuoteen 2024 mennessä. (“Defense Fuel Cell Market Size: Global Industry Demand, Growth, Share & Forecast 2024,” 2022)

Euroopan Unionilla on useita projekteja ja hankkeita liittyen polttokennoihin ja vetyyn. Euroopan komissio, Hydrogen Europe ja Hydrogen Europe Research yhdessä muodostavat Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) nimisen julkisen ja yksityisen puolen välisen kumppanuuden, jonka tarkoituksena on tukea tutkimusta, teknologista kehitystä ja polttokennotekniikoiden aktiivista testaamista Euroopassa. FCH JU on rakennettu kolmen pilarin varaan: 1. Liikenne – polttokennojen kokeilu ja käyttöönotto ja seuraavan sukupolven tuotteet. 2. Energia – polttokennojen kokeilu ja käyttöönotto, seuraavan sukupolven tuotteet ja vedyn integroiminen sektoreittain. 3. Poikkiteollinen – markkinoiden käsityskyvyn tukeminen. (Programme & Impact | Www.Fch.Europa.Eu.)

EU:n polttokennoja koskevia projekteja ovat muun muassa Remote, OxyGen, Grasshopper, EVERYWH2ERE, ComSos, qSOFC, INSIGHT, CH2P, SoSLem, HEATSTACK, Cell3Ditor, PACE, INNO-SOFC, DEMOSOFC, AutoRe, D2Service, MAMA-MEA, RORePower, WASTE2GRIDS, WASTE2WATTS, EMPOWER, NewSOC, RUBY, E2P2, SO-FREE. On huomattavaa, että EU:n

painopiste projektien perusteella näyttää olevan kiinteäoksidikenoissa.
(ENERGY | Www.Fch.Europa.Eu.)

Euroopan sisällä yksittäisissä maissa Saksa on vetämässä polttokennokehitystä. Japanin Ene-farmin tavoin Saksassa on Kfw 433 -aloite, jolla on merkittävä rooli yli 5 000 mikro-CHP-yksikön ja 47 000 paikallisen polttokennoyksikön käyttöönotossa, ollen näin yksi 400 yli 100 kilowatin paikallisesta laitoksesta.
(Technology & Market Report 2021.)

Suomi

Teknologian Tutkimuskeskus VTT

Suomessa Teknologian Tutkimuskeskus VTT on kehittänyt kaksisuuntaisen kiinteäoksiditeknologiaan (rSOC) perustuvan pienoisvoimalaitoksen, jota voi käyttää sähköenergian varastointiin. Kun sähköä on tarjolla runsaasti esimerkiksi aurinko- tai tuulivoimalla tuotettuna, voimala voi varastoida sen vedyksi. Vastavuoroisesti varastoitu vety voidaan syöttää polttoaineeksi, kun sähköstä on pulaa. VTT:n kehitystyö oli osa Euroopan Unionin BALANCE-EU-projektia, joka päättyi marraskuussa 2020 kestätyään kolme vuotta. (Rönqvist 2022)

Laitteella on kolme merkittävää etua verrattuna muihin tekniikoihin: 1. Potentiaalia hyvin korkeaan tehokkuuteen AC \leftrightarrow H₂ -järjestelmässä (80–90 %) ilman päästöjä, 2. Käänteisyys, mikä tarkoittaa, että järjestelmä voi toimia polttokennona, että elektrolyysilaitteena riippuen energiantuotannosta ja verkon tasapainottamisen tarpeesta ja 3. Joustavuus polttoaineen suhteen, polttokennotoiminen CHP ja kyky höyryn ja hiilidioksidin yhteiselektrolyysiin, kun sitä käytetään elektrolyysilaitteena, mikä mahdollistaa tehokkaan Power-to-X mahdollisuuden, kun rSOC integroidaan teollisuusprosesseihin. Lupaavasta tekniikastaan huolimatta rSOC vaatii kehittämistä pidemmän toiminta-ajan ja kustannuksien alentamisen suhteen saavuttaakseen täyden kaupallisen vaiheen. (Saarinen ym. 2021: 1.)

rSOC-laitteiston lisäksi VTT on kehittänyt yhteistyössä THT Controlin kanssa polttokennolla toimivia sähkögeneraattoreita. Kehitys oli osa Euroopan Unionin projektia EVERYWH2ERE. Generaattorit perustuvat PEM-tekniikkaan ja ovat teholtaan 25 kilowattia ja 100 kilowattia. Generaattoreita hyödynnetään koekäytössä ensisijaisesti rakennustyömailla ja musiikkifestivaaleilla. Generaattorit ovat konttirakenteisia, joten niitä voidaan siirtää helposti ja joustavasti. (Suomessa Valmistuu Päästöttömiä VTT 2020)

Lemene

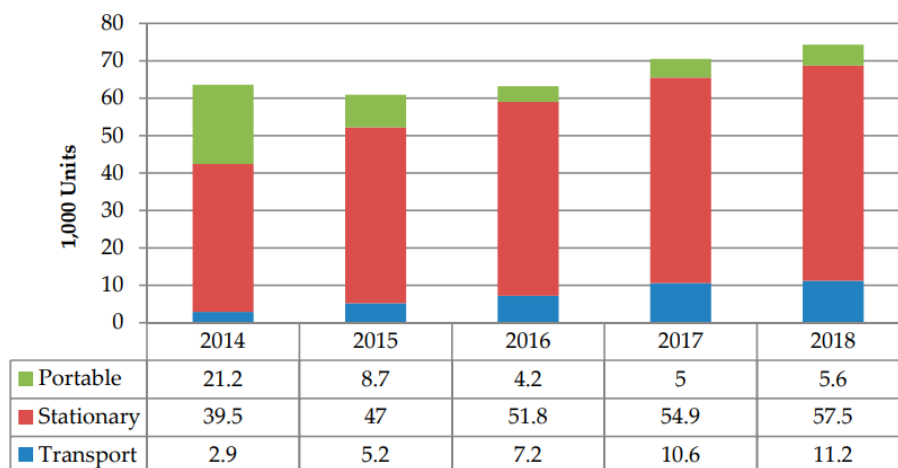
Convion ja Elcogen yhteistyössä Lempäälän Energian kanssa ovat kehittäneet LEMENE Energy Community -projektin. LEMENE on kuin kansallinen sähköverkko, mutta pienoiskoossa, ja siinä käytetään erilaisia sähköntuotantomenetelmiä. Tuotantoa ja kulutusta säädellään alati, jotta sähkön laatu eikä taajuus häiriinny. (Convion's C60 Fuel Cell System Creates Clean Energy and Excellent Reliability for Smart Micro-Grid in Lempäälä - Convion 2021)

LEMENE koostuu 13 000:sta maahan asennetusta aurinkopaneelistä, jotka tuottavat neljän megawatin edestä energiaa sekä kahdesta Convion C60 -polttokennosta, jotka toimivat täydellä teholla. Yksi C60 tuottaa sähköä 60 kilowattia ja lämpöä 25 kilowattia. Kennojen tuottama ylimääräinen sähkö ajetaan akkuihin, joihin voidaan varastoida kolmen megawatin edestä sähköä. Tämä määrä riittäisi kattamaan 400 yksittäisen talon sähkön tarpeen. (Convion's C60 Fuel Cell System Creates Clean Energy and Excellent Reliability for Smart Micro-Grid in Lempäälä - Convion 2021)

8 Polttokennojen käyttö tulevaisuudessa

Vuodesta 2014 lähtien polttokennojen kysyntä on ollut tasaisessa nousussa (kuva 23). Maailmanlaajuisesti toiminnassa on yli 300 000 paikallista polttokennoa ja pelkästään Yhdysvalloissa on asennettu yli 500 megawatin edestä paikallisia polttokennoja ja suurilla yrityksillä on käytössään yhteensä yli 28 000 vetypolttokennotrukkia. (Tellez-Cruz ym. 2021: 37) Japani on ilmoittanut

pyrkivänsä lisäämään Ene-farmin CHP-yksiköitä 2,5 miljoonaan yksikköön vuoteen 2030 mennessä (Japan LP Gas Association).



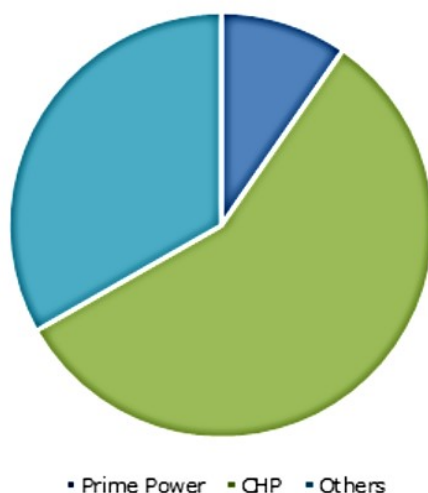
Kuva 23: Kennojen kasvu vuosina 2014–2018 käyttökohteen mukaan (Felseghi ym. 2019: 12)

Nykyään polttokennomarkkinat ovat miljardien arvoisia. Paikallisten polttokennojen markkinat ylittivät 1,6 miljardin USA:n dollarin arvon vuonna 2021 ja markkinoiden povataan kasvavan 13,1 vuotuisen kertymäprosentin luokkaa vuoteen 2030 saakka. (Stationary Fuel Cell Market Trends 2022–2030, Global Forecast.) Kannettavien polttokennojen markkinoiden uskotaan kasvavan 20 kertymäprosentin tahtia vuosina 2022–2030. Erityisesti ajoneuvojen polttokennoapplikaatiot nostavat kysyntää. (Portable Fuel Cell Market Growth Demand Analysis & Opportunity Outlook 2030.) Alla olevassa kuvassa 22 on ennuste Saksan paikallisten polttokennosovellusten tilanteesta vuonna 2028 (Stationary Fuel Cell Market Trends 2022–2030, Global Forecast.).

Paikallisista sovelluksista erityisesti siirrettävät virrantuottojärjestelmät, kuten RAPS, APU ja EPS, ovat maailmanlaajuisesti polttokennoyritysten markkinatavoitteena kuten myös kotitalouksien hajautettu yhteinen sähkön- ja lämmöntuotanto (Velisala ym. 2015: 10). Kuvasta 24 ilmenee, kuinka suuresti CHP-

tuotannon uskotaan kasvavan. Ennusteeseen vaikuttanee Saksan kfw 433-aloite. (Stationary Fuel Cell Market Trends 2022–2030, Global Forecast.)

Germany stationary fuel cell market, by application, 2028 (MW)



Kuva 24: Ennuste Saksan paikallisten polttokennojen markkinoista vuonna 2028

Polttokennojen korkea energiatiheys, energiatehokkuus, nopea latausaika ja hiljainen käyttö tekevät niistä potentiaalisen korvaajan fossiilisille polttoaineille puolustussektorilla. NATO on etsinyt fossiilisten polttoaineiden korvaajaa kasvaneen energiankulutuksen myötä ja näkee polttokennot yhtenä vaihtoehtona. Puolustussektorilla polttokennoja voitaisiin käyttää esimerkiksi sukellusveneissä. Hiljaisen toimintansa ansiosta sukellusveneistä tulisi käytännössä äänettömiä verrattuna diesel- ja ydinkäyttöisiin sukellusveneisiin. Saksassa ja Italiassa on jo rakennettu luokan 212A sukellusveneitä, jotka käyttävät PEM-kennotekniikkaa. (A Review of Fuel Cells and Their Military Applications 2019)

Sukellusveneiden ohella lennokit nähdään potentiaalisina polttokennojen kehityskohteina. Polttokennojen myötä lennokeista tulisi huomaamattomampia ja niiden kantosäde olisi pidempi kuin akkukäyttöisillä lennokeilla. (A Review of Fuel Cells and Their Military Applications 2019) Suorametanolikennoilla pyritään korvaamaan tulevaisuudessa Li-on-akkutoimisia laitteita. Näitä olisivat muun

muassa armeijan varustuksessa käytettävät ladattavat ja paristotoimiset laitteet, kannettavan elektroniikan akut, lyhyen kantaman ajoneuvot kuten trukit ja skootterit. (Sazali ym. 2020: 5.)

Suurin etu polttokennoilla nähdään olevan sotilaiden henkilökohtaisen varustuksen keventämisessä ja tehostamisessa. Varustukseen kuuluu esimerkiksi GPS, radio, tietokone, pimeännäkölaitteisto, lääketieteellinen varustus ja valaistus. (A Review of Fuel Cells and Their Military Applications, 2019.)

Koska polttokennot nähdään akkujen ja paristojen korvaajana, niin niiden tulevaisuuden käyttökohteena on laajasti eri alan laitteita. Kuluttajaelektroniikan osalta tällaisia laitteita on muun muassa kannettavat laitteet, kuten tietokoneet, matkapuhelimet, laturit, kamerat ja musiikkisoittimet. Tämän lisäksi paristo- ja akkutoimiset lelut ja lääketieteen implantit, kuten defibrillaattori, tahdistin ja kuulosimpukka sekä laitteet esimerkiksi kuulolaite ja insuliinipumppu. (Velisala ym. 2015: 1–2.)

Suomen kansallisessa energia- ja ilmastostrategiassa vuoteen 2030 mainittiin polttokennot suomalaisena vientituotteena. Polttokennojen suurin yksittäinen kuluerä on jalometallikatalyytit, kuten platina. Kuitenkin uusia katalyyttimahdollisuuksia on tutkittu. Alkalikenoissa voidaan käyttää nikkeliä, hopeaa ja mangaanidioksidia (Ferriday & Middleton 2021). Kiinteäoksidikenoissa on tutkittu mahdollisuutta käyttää hopeaa tai hopeaseosta katalyyttinä (Kim ym. 2018: 2). Suorametanolikennoihin on puolestaan testattu erilaisia rautayhdisteitä (Martinaiou ym. 2020: 2). Suomessa toimii useita kaivosyhtiöitä. Suomi on kaivostuotannoltaan Euroopan Unionin suurin koboltin, platinan, palladiumin ja kullan tuottaja. (Metallimalmikaivokset Ja Metallinjalostus.) Kuitenkin Suomessa toimivista kaivoksista vain murto-osa on suomalaisia. Kemissä Outokumpu louhii hopeaa ja Terrafame Oy louhii Sotkamossa pääasiassa nikkeliä ja sinkkiä. Suomessa toimii ruotsalaisen Boliden AB:n kaivokset Kevitsalla ja Harjavallassa ja norjalaisen Lannoteyrityksen Yaran tytäryhtiö Yara Suomi. (Metallimalmikaivokset Ja Metallinjalostus.)

Useat suomalaiset yritykset tekevät jo yhteistyötä sähköpolttoaineiden parissa. VTT määrittelee sähköpolttoaineet polttoaineiksi, jotka hyödyntävät kestävästi tuotettua sähköä ja talteen otettua hiilidioksidia. (VTT Ja Neste | VTT) Suomalainen Convion esimerkiksi keskittyy elektrolyyssitekniikoihin ja kiinteäoksidikennon pohjautuviin polttokennojärjestelmiin (Products - Convion.)

Myös akkuklusteri kehittyy Suomessa. Suomessa on kolme akkukemikaalitehdasta ja uusia suunnitelmia akkuklusterin kehittämiseksi on meneillä. Akuissa käytetään paljon samoja materiaaleja kuin polttokennoissa. Suomella on edellytykset tuottaa kaikkia keskeisiä akkujen tuotannossa tarvittavia materiaaleja. (Akkuklusteri Kehittyy Suomessa | Kaivosteollisuus.) Näin ollen erilaisten polttokenno-akkuhybridijärjestelmien valmistus voisi olla mahdollista suomalaisena tuotteena.

9 Yhteenveto

Insinööriyössä selvitettiin polttokennojen käyttömahdollisuuksia tulevaisuuden energiantuotannossa. Lisäksi työssä vertailtiin vety- ja metanolipoltttokennojen eroja ja esiteltiin Noatek Oy:n metanolikennolle suorittama pilotointikoe. Työn tavoitteena oli kartoittaa polttokennojen käyttömahdollisuuksia, niiden vaikutuksia ilmastoon ja tulevaisuusnäkyviä. Työssä ei käsitelty polttokennojen käyttöä liikenteessä.

Noatek Oy:n suorittama kuormituskoe onnistui, eli metanolikennon ja sen kaukokäyttötoiminnot toimivat suunnitellusti. Lisäksi testistä saatiin tietoa käyttöikänsä ylittäneen polttokennon toiminnasta.

Polttokennoja voidaan käyttää mikroverkkoina, jolloin ne ovat joko itsenäisiä järjestelmiä tai kytköksissä kantaverkkoon. Mikroverkkojärjestelmissä niitä voidaan soveltaa joko ensisijaiseen energiantuotantoon, yhdistettyyn sähkön ja lämmön tuotantoon tai varavirtalähteinä. Itsenäisinä järjestelminä polttokennot eivät ole riippuvaisia kantaverkosta, vaan niillä voidaan tuottaa sähköä myös syrjäisille

alueille. Niitä voitaisiin hyödyntää Suomessa esimerkiksi mökkialueilla, jonne ei ole vedetty voimalinjoja, tai tukemaan kotitalouksien sähköntarvetta.

Mikroverkon ohella polttokennoja voidaan modulaarisuutena ansiosta hyödyntää myös kannettavina laitteina. Ne voisivat korvata nykyisissä kannettavissa laitteissa olevat akut, ja polttokennoja voitaisiin hyödyntää esimerkiksi viranomaisverkon virtalähteenä.

Suomen maaperä on hyvin metallipitoista, minkä vuoksi Suomella on hyvä mahdollisuus panostaa polttokennojen valmistukseen. Polttokennojen pinnoiteteeniikkaa tutkitaan ja siihen kaivataan uusia innovaatioita, jolloin voisi tähän tutkimukseen panostamalla saada uuden suomalaisen vientituotteen kennomarkkinoille, mitä valtioneuvosto on selonteossaan myös ehdottanut. Valtioneuvoston selonteossa mainittiin polttokennojen mahdollisuus suomalaisena vientituotteena, jolloin tulevaisuuden osalta olisi kannattavaa selvittää tuotantojärjestelmän rakentamista. Tässä tuotantojärjestelmässä esimerkiksi vety, kiinteäoksidi ja alkalipolttokennot sekä niiden pinnoitemateriaalit voisivat olla yksi palveluketjun osa.

Lähteet

- A review of fuel cells and their military applications. 2019. Energy Security: Operational highlights. <<https://www.researchgate.net/publication/331097143>>
- Aarnio, J., & Leiviskä, K. 2008. Vetypolttokennojen dynaamiset mallit. Raportti B Nro 67. Oulun Yliopisto.
- Akinyele, D., Olabode, E. & Amole, A. 2020. Review of fuel cell technologies and applications for sustainable microgrid systems. Teoksessa *Inventions* Vol. 5, Issue 3, s. 1–35). MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <<https://doi.org/10.3390/inventions5030042>>
- Akkuklusteri kehittyy Suomessa. Verkkodokumentti. Kaivosteollisuus. Luettu 9.5.2022. <<https://www.kaivosteollisuus.fi/fi/kaivosala-suomessa/tiesitkoetta/akkuklusteri-kehittyy-suomessa>>

- Alias, M. S., Kamarudin, S. K., Zainoodin, A. M. & Masdar, M. S. 2020. Active direct methanol fuel cell: An overview. Teoksessa *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 45, Issue 38, s. 19 620–19 641). Elsevier Ltd. <<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.202>>
- Alternative Fuels Data Center: Hydrogen Benefits and Considerations. Verkkodokumentti. Luettu 19.4.2022. <https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_benefits.html>
- Andújar, J. M., & Segura, F. 2009. Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries. Teoksessa *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 13, Issue 9, s. 2309–2322). <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.03.015>>
- Asia-Pacific Fuel Cell Market | 2022 - 27 | Industry Share, Size, Growth. Mordor Intelligence. Verkkodokumentti. Luettu 4.4.2022. <<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/asia-pacific-fuel-cell-market-industry>>
- Barckholtz, T. A., Taylor, K. M., Narayanan, S., Jolly, S., & Ghezel-Ayagh, H. 2022. Molten carbonate fuel cells for simultaneous CO₂ capture, power generation, and H₂ generation. Teoksessa *Applied Energy*. <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118553>>
- Bruijn, A. F., & Janssen, G. J. M. 2012. PEM Fuel Cell Materials: Costs, Performance and Durability. Teoksessa *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology* (pp. 7694–7730). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3_152>
- Chang, Z., Zhang, J., Zhang, W., Su, H., Xing, L., Ma, Q., Zhang, H., & Xu, Q. 2021. Enhanced Cell Performance and Improved Catalyst Utilization for a Direct Methanol Fuel Cell with an In-Plane Gradient Loading Catalyst Electrode. Teoksessa *Processes*. <<https://doi.org/10.3390/pr9101787>>
- Cigolotti, V., Genovese, M., & Fragiaco, P. 2021. Comprehensive review on fuel cell technology for stationary applications as sustainable and efficient poly-generation energy systems. Teoksessa *Energies* (Vol. 14, Issue 16). MDPI AG. <<https://doi.org/10.3390/en14164963>>
- Convion's C60 fuel cell system creates clean energy and excellent reliability for smart micro-grid in Lempäälä. 2021. Convion. <<https://convion.fi/convions-c60-fuel-cell-system-creates-clean-energy-and-excellent-reliability-for-smart-micro-grid-in-lempaala/>>

- Defense Fuel Cell Market Size: Global Industry Demand, Growth, Share & Forecast 2024. 2022. Verkkodokumentti. Research Nester. <<https://www.researchnester.com/reports/defense-fuel-cell-market/521>>
- Dieselin saastuminen | Dieselbakteeri. Verkkodokumentti. Luettu 5.5.2022. <<https://www.dieselbakteeri.fi/polttoaineen-saastuminen>>
- Eikerling, M., Kornyshev, A. A., & Kucernak, A. R. 2007. Water in polymer electrolyte fuel cells: Friend or foe? *Physics Today*. <<https://doi.org/10.1063/1.2387087>>
- Emergency and Standby Power Systems for Buildings. 2021. Verkkodokumentti. <<https://www.archtoolbox.com/emergency-power-systems-for-buildings/>>
- ENERGY. Verkkodokumentti. Luettu 6.4.2022. <<https://www.fch.europa.eu/page/energy>>
- Felseghi, R. A., Carcadea, E., Raboaca, M. S., Trufin, C. N., & Filote, C. 2019. Hydrogen fuel cell technology for the sustainable future of stationary applications. *Teoksessa Energies* (Vol. 12, Issue 23). MDPI AG. <<https://doi.org/10.3390/en12234593>>
- Ferriday, T. B., & Middleton, P. H. 2021. Alkaline fuel cell technology - A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(35), 18489–18510. <<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.203>>
- Frantti, A. 2019. Varavoima – Harvoin käytetty, mutta silti välttämätön. Verkkodokumentti. *Fingrid-lehti*. <<https://www.fingridlehti.fi/varavoima-2/>>
- Fuel Cell Today, the leading authority on fuel cells. Verkkodokumentti. Luettu 9.2.2022. <<http://www.fuelcelltoday.com/>>
- Fuel Cells | Department of Chemical Engineering and Biotechnology. Verkkodokumentti. *Cambridgen Yliopisto*. Luettu 22.3.2022. <<https://www.ceb.cam.ac.uk/research/groups/rg-eme/Edu/fuelcells>>
- Fuel Cells Works - Fuel Cells, Energy And Hydrogen News. Verkkodokumentti. Luettu 2.5.2022. <<https://fuelcellsworks.com/>>
- Guangul, F. M., & Chala, G. T. 2020. A comparative study between the seven types of fuel cells. *Teoksessa Applied Science and Engineering Progress*, 13(3), 185–194. <<https://doi.org/10.14416/J.ASEP.2020.04.007>>
- Habib, M. S., Arefin, P., Salam, M. A., Ahmed, K., Uddin, M. S., Hossain, T., Papri, N., & Islam, T. 2021. Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)

- Durability Factors, Challenges, and Future Perspectives: A Detailed Review. *Material Science Research India*, 18(2), s. 217–234. <<https://doi.org/10.13005/msri/180209>>
- Hiilineutraali Suomi 2035. 2019. Ympäristöministeriö. Verkkodokumentti. Luettu 10.4.2022. <<https://ym.fi/hiilineutraalisuomi2035>>
- History - FuelCellsWorks. Verkkodokumentti. Luettu 27.4.2022. <<https://fuelcells-works.com/knowledge/history/>>
- Introduction - HyTechCycling. Verkkodokumentti. Luettu 9.4.2022. <<http://hy-techcycling.eu/project/introduction/>>
- Japan LP Gas Association | Appliances. Verkkodokumentti. Luettu 4.4.2022. <<https://www.j-lpgas.gr.jp/en/appliances/>>
- Käyttöturvallisuustiedote Kloori. 2020. Verkkodokumentti. Linde. Luettu 8.5.2022. <https://www.linde-gas.fi/fi/images/Kloori_2.0_FI_tcm634-448447.pdf>
- Ke, Y., Yuan, W., Zhou, F., Guo, W., Li, J., Zhuang, Z., Su, X., Lu, B., Zhao, Y., Tang, Y., Chen, Y., & Song, J. 2021. A critical review on surface-pattern engineering of nafion membrane for fuel cell applications. *Teoksessa Renewable and Sustainable Energy Reviews..* <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110860>>
- Khotseng, L. 2019. Fuel Cell Thermodynamics. *Teoksessa Thermodynamics and Energy Engineering. IntechOpen.* <<https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.90141>>
- Kim, D. H., Bae, K., Choi, H. J., & Shim, J. H. 2018. Ag surface-coated with nano-YSZ as an alternative to Pt catalyst for low-temperature solid oxide fuel cells. *Journal of Alloys and Compounds.* s.545–551. <<https://doi.org/10.1016/j.jall-com.2018.08.005>>
- Li, Z., Zheng, Z., Xu, L., & Lu, X. 2019. A review of the applications of fuel cells in microgrids: opportunities and challenges. *BMC Energy.* <<https://doi.org/10.1186/s42500-019-0008-3>>
- Lounasheimo, A. 2020. Syrjäseuduilta kaupunkeihin – mikroverkot mahdollistavat vähähiilisen energiantuotannon yleistymisen. Verkkodokumentti. *Teknologiateollisuus.Fi.* <<https://teknologiateollisuus.fi/en/node/27084>>
- Luna, J., Usai, E., Husar, A., & Serra, M. 2017. Enhancing the Efficiency and Lifetime of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell Using Nonlinear Model-

- Predictive Control With Nonlinear Observation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. s. 6649–6659. <<https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2682787>>
- Luo, Y., Shi, Y., & Cai, N. 2021. Bridging a bi-directional connection between electricity and fuels in hybrid multienergy systems. *Teoksessa Hybrid Systems and Multi-energy Networks for the Future Energy Internet* (s. 41–84). Elsevier. <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819184-2.00003-1>>
- Ma, S., Lin, M., Lin, T. E., Lan, T., Liao, X., Maréchal, F., van herle, J., Yang, Y., Dong, C., & Wang, L. 2021. Fuel cell-battery hybrid systems for mobility and off-grid applications: A review. *Teoksessa Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol.135). Elsevier Ltd. <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110119>>
- Ma, Z., Eichman, J., & Kurtz, J. 2018. *Fuel Cell Backup Power System for Grid Service and Micro-Grid in Telecommunication Applications*. Elsevier.
- Martinaiou, I., Monteverde Videla, A. H. A., Weidler, N., Kübler, M., Wallace, W. D. Z., Paul, S., Wagner, S., Shahraei, A., Stark, R. W., Specchia, S., & Kramm, U. I. 2020. Activity and degradation study of an Fe-N-C catalyst for ORR in Direct Methanol Fuel Cell (DMFC). *Applied Catalysis B: Environmental*. <<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.118217>>
- Mekhilef, S., Saidur, R., & Safari, A. 2012. Comparative study of different fuel cell technologies. *Teoksessa Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 16, Issue 1, s. 981–989). Elsevier Ltd. <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.020>>
- Metallimalmikaivokset ja metallinjalostus. Verkkodokumentti. Kaiva.fi. Luettu 9.5.2022. <<https://kaiva.fi/kaivannaisala/kaivostoiminta/metallimalmikaivokset/>>
- Mohamed, M. M., Khairy, M., & Ghanem, M. A. 2020. Nonplatinum-based anode catalyst systems for direct methanol fuel cells. *Teoksessa Direct Methanol Fuel Cell Technology*, s. 201–256. Elsevier. <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819158-3.00008-2>>
- Nafil, R. Q., & Majeed, M. S. 2020. Fuel Cells as a Source of Green Energy. *Teoksessa Thermodynamics and Energy Engineering*. <<https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.89736>>

- NaH käyttöturvatiedote. 2021. Verkkodokumentti. Sigma-Aldrich. <<https://www.sigmaaldrich.com/FI/en/product/aldrich/452912>>
- Olabi, A. G., Wilberforce, T., Sayed, E. T., Elsaid, K., & Abdelkareem, M. A. 2020. Prospects of Fuel Cell Combined Heat and Power Systems. <<https://doi.org/10.3390/en13164104>>
- Petreanu, I., Dragan, M., & Badea, S. L. 2020. Fuel Cells: Alternative Energy Sources for Stationary, Mobile and Automotive Applications. Teoksessa Thermodynamics and Energy Engineering. <<https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.93032>>
- Portable Fuel Cell Market Growth | Demand Analysis & Opportunity Outlook 2030. Verkkodokumentti. Luettu 31.3.2022. <<https://www.researchnester.com/reports/portable-fuel-cell-market/3701>>
- Products - Convion. Verkkodokumentti. Convion. Luettu 9.5.2022. <<https://convion.fi/products/>>
- Programme & Impact. Verkkodokumentti. Luettu 6.4.2022. <<https://www.fch.europa.eu/page/programme-impact>>
- Rafiee, R., Seiedhoseiny, M., & Ghasemzadeh, K. 2019. Transport Mechanism and Modeling of Microporous Polymeric Membranes. Teoksessa Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes (s. 259–280). Elsevier. <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816350-4.00011-8>>
- Rönnqvist, K. 2022. Suomi hyötyy vetybuumista. Verkkodokumentti. TEK. <<https://www.tek.fi/fi/uutiset-blogit/suomi-hyotyy-vetybuumista>>
- Saarinen, V., Pennanen, J., Kotisaari, M., Thomann, O., Himanen, O., Iorio, S. di, Hanoux, P., Aicart, J., Couturier, K., Sun, X., Chen, M., & Sudireddy, B. R. 2021. Design, manufacturing, and operation of movable 2 × 10 kW size rSOC system. Fuel Cells, s. 477–487. <<https://doi.org/10.1002/FUCE.202100021>>
- Samimi, F., & Rahimpour, M. R. 2018. Direct Methanol Fuel Cell. Teoksessa Methanol (s. 381–397). Elsevier. <<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63903-5.00014-5>>
- Sazali, N., Salleh, W. N. W., Jamaludin, A. S., & Razali, M. N. M. 2020. New perspectives on fuel cell technology: A brief review. Teoksessa Membranes

- (Vol. 10, Issue 5). MDPI AG. <<https://doi.org/10.3390/membranes10050099>>
- Service, R. F. 2010. The Case of the Poisoned Fuel Cell. News from Science. <<https://doi.org/10.1126/article.30154>>
- SFC JENNY. Verkkodokumentti. SFC Defense. Luettu 17.4.2022. <<https://www.sfc-defense.com/en/products/jenny/>>
- Sharaf, O. Z., & Orhan, M. F. 2014. An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. Teoksessa Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 32, s. 810–853). <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.012>>
- Spiegel, C. 2021. An Introduction to Alkaline Fuel Cells. <<https://www.fuelcellstore.com/blog-section/introduction-alkaline-fuel-cells>>
- Stationary Fuel Cell Market Trends 2022-2030, Global Forecast. Verkkodokumentti. Luettu 31.3.2022. <<https://www.gminsights.com/industry-analysis/stationary-fuel-cell-market>>
- Steele, B. C. H., & Heinzel, A. 2001. Materials for fuel-cell technologies. <www.nature.com>
- Strickland, K., Pavlicek, R., Miner, E., Jia, Q., Zoller, I., Ghoshal, S., Liang, W., & Mukerjee, S. 2018. Anion Resistant Oxygen Reduction Electrocatalyst in Phosphoric Acid Fuel Cell. ACS Catalysis, s. 3833–3843. <<https://doi.org/10.1021/ACSCATAL.8B00390>>
- Suomessa valmistuu päästöttömiä. 2020. VTT. <<https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/suomessa-valmistuu-paastottomia-vedylla-toimivia-sahkogeneraattoreita-vtt-ja-tht>>
- Technology & Market Report. 2021. <<https://www.fchobservatory.eu/>>
- Tellez-Cruz, M. M., Escorihuela, J., Solorza-Feria, O., & Compañ, V. 2021. Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs): Advances and Challenges. Polymers. <<https://doi.org/10.3390/polym13183064>>
- Tielinen, A. 2019. Polttokennoihin perustuva mikro-CHP-järjestelmä. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Use of hydrogen. U.S. Energy Information Administration (EIA). Verkkoaineisto. Luettu 19.4.2022. <<https://www.eia.gov/energyexplained/hydrogen/use-of-hydrogen.php>>

- Valente, A., Iribarren, D., & Dufour, J. 2019. End of life of fuel cells and hydrogen products: From technologies to strategies. *International Journal of Hydrogen Energy*, s.20 965–20 977. <<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.110>>
- Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia-ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. 2017. Verkkoaineisto. Työ- ja elinkeinoministeriö.
- Varavoima & varavoimakoneet. Suomen Diesel Voima Osakeyhtiö. Verkkodokumentti. Luettu 9.5.2022. <<https://www.dieselvoima.fi/varavoimakoneet-laitteet-ja-jarjestelmat/>>
- Velisala, V., Srinivasulu, G. N., Reddy, B. S., & Rao, K. V. K. 2015. Review on challenges of direct liquid fuel cells for portable application. *World Journal of Engineering*, s. 591–606. <<https://doi.org/10.1260/1708-5284.12.6.591>>
- Venkateswarlu, V., Srinivasulu, N. G., Reddy, S. B., & Koteswara Rao, V. K. 2015. Review on challenges of direct liquid fuel cells for portable application. *World Journal of Engineering*.
- Vety. Motiva. Verkkodokumentti Luettu 3.5.2022. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_viisaasti/energialahitteet/vety>
- VTT ja Neste. VTT. Verkkodokumentti. Luettu 9.5.2022. <<https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/vtt-ja-neste-kumppaneineen-tahtaavat-suomalaisen-sahkopolttoaineteknologian>>
- Wilberforce, T., Alaswad, A., Palumbo, A., Dassisti, M., & Olabi, A. G. 2016. Advances in stationary and portable fuel cell applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(37), s. 16509–16522. <<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.02.057>>
- Xu, Q., Guo, Z., Xia, L., He, Q., Li, Z., Temitope Bello, I., Zheng, K., & Ni, M. 2022. A comprehensive review of solid oxide fuel cells operating on various promising alternative fuels. *Energy Conversion and Management*. <<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115175>>
- Zahari, N. M., & Aziz, A. A. 2012. Effect of platinum catalyst loading on membrane electrode assembly (MEA) in proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). 2012 10th IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE), s. 669–673. <<https://doi.org/10.1109/SMElec.2012.6417232>>

