

SAVONIA

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

VIHREÄ VETY JA JATKOJALOSTUS

TEKIJÄ Jari Morko

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä Jari Morko	
Työn nimi Vihreä vety ja jatkojalostus	
Päiväys 21.5.2024	Sivumäärä/Liitteet 62
Toimeksiantaja	
Tiivistelmä	
<p>Opinnäytetyössä perehdyttiin vedyn ominaisuuksiin, vihreän vedyn ja jatkojalosteiden tuotantoon, käyttöön ja näiden markkinoihin, sekä niiden roolia ilmastonmuutoksen torjunnassa. Työssä esiteltiin vedyn siirto- ja varastointiratkaisuja, sekä vedyn sovelluskohteita eri sektoreilla. Lisäksi työssä kuvattiin Suomen vetystrategia ja sen tavoitteet, tuuli- ja aurinkosähkön tuotantoa ja sähkömarkkinoita, sekä analysoitiin Suomen vetytalouden mahdollisuuksia ja haasteita.</p> <p>Työssä käytettiin kirjallisuuskatsausta menetelmänä ja hyödynnettiin erilaisia lähteitä, kuten tutkimusraportteja, artikkeleita, tilastoja ja verkkosivuja. Lisäksi opinnäytetyön tukena oli Turku AMK:n ja VAMK:in järjestämä Vedyntuotanto ja vetytalouden arvoketjut koulutus. Työn tarkoituksena oli kerätä tietoa Suomen vetytaloudesta, sen tulevaisuuden näkymistä ja koostaa kattava tietopaketti.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena saatiin luotua tiivis kirjallinen selvitys vetytalouden mahdollisuuksista Suomelle ja mahdollisista esteistä. Suunniteltujen tavoitteiden toteutuessa, Suomi tulee hyötymään vetytalouden tuomista eduista, jos sähkön markkinahinta saadaan pidettyä kilpailukykyisenä.</p>	
Avainsanat Vihreä vety, vetytalous, jatkojalosteet, tuulivoima, aurinkovoima, sähkömarkkinat	

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Energy Engineering	
Author(s) Jari Morko	
Title of Thesis Green Hydrogen and Downstream Processing	
Date 21 May 2024	Pages/Appendices 62
Client Organisation /Partners	
<p>Abstract</p> <p>In the thesis the properties of hydrogen, the production, use and markets of green hydrogen and downstream products, and their role in combating climate change were explored. Hydrogen transport and storage solutions, as well as hydrogen applications in different sectors are presented. Also, Finland's hydrogen strategy and its objectives and wind and solar power generation and electricity markets were studied, and the opportunities and challenges of the Finnish hydrogen economy were analysed in the thesis. The purpose of the thesis was to collect information on hydrogen economy in Finland, its future prospects and to compile a comprehensive information package.</p> <p>In the study a literature review methodology was used and various sources, including research portals, articles, statistics, and websites were used. In addition, the thesis was supported by a training course on hydrogen production and value chains in the hydrogen economy organised by Turku UAS and Vaasa University of Applied Sciences.</p> <p>As a result of the thesis, a written report was created on the opportunities and potential obstacles of the hydrogen economy in Finland. If the planned objectives are achieved, Finland will benefit from the advantages of the hydrogen economy if the market price of electricity can be kept competitive.</p>	
<p>Keywords Green hydrogen, hydrogen economy, downstream products, wind power, solar power, electricity market</p>	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
2	VEDYN VALMISTUS	9
2.1	Vedyn ominaisuudet ja vety alkuaineena	9
2.2	Vihreän vedyn teollinen valmistus	10
2.2.1	Alkalielektrolyysi, AEL	10
2.2.2	Polymeerimembraanielektrolyysi (PEM, Proton exchange membrane)	12
2.2.3	AEM-elektrolyysi	14
2.2.4	Höyryelektrolyysi	15
2.3	Turvallisuus	17
3	SÄHKÖENERGIAN TUOTANTO JA HANKINTA	19
3.1	Aurinkovoima.....	19
3.1.1	Aurinkokennon toiminta	19
3.1.2	Aurinkopaneelit tuotannossa	20
3.1.3	Aurinkovoimalat Suomessa	21
3.1.4	Sähkön tuotannon tulevaisuus	21
3.1.5	Aurinkosähkön tuotannon hyödyt ja haitat	22
3.2	Tuulivoima.....	23
3.2.1	Miten tuuli syntyy	23
3.2.2	Tuulivoimaloiden rakenne.....	23
3.2.3	Tuulivoima Suomessa	24
3.2.4	Tuulivoimala tuotannossa	25
3.3	Energiamarkkinat ja uusiutuvan energian hankinta.....	25
3.3.1	Sähkömarkkinat.....	25
3.3.2	Sähkönjakeluverkko	28
4	VETYTALOUS JA YMPÄRISTÖ	29
4.1	Liiketoimintamallit ja lainsäädäntö.....	29
4.2	Suomen vetystrategia.....	30
4.3	Vedyn vaikutukset ympäristöön.....	31
5	VEDYN KULJETUS JA VARASTOINTI	32
5.1	Vedyn puhdistus	32
5.2	Vedyn varastointi kaasuna ja nesteinä	32

5.3	Putkilogistiikka	33
5.4	Maakuljetukset ja autotankkausasemat	35
6	VEDYN KÄYTTÖ.....	37
6.1	Maaliikennekäyttö ja ajoneuvotekniikka	37
6.2	Teollisuuskäyttö.....	38
7	SYNTEETTISET POLTTOAINEET VEDYSTÄ.....	40
7.1	Valmistusprosessit.....	40
7.1.1	Haber-Bosch	40
7.1.2	Fischer-Tropsch	41
7.1.3	Sabatier-reaktio.....	41
7.1.4	Synteettinen metanoli	42
7.2	Hiilidioksidin talteenotto	42
8	POHDINTA.....	44
	LÄHTEET	46
	LIITE 1: VEDYN KANSSA YHTEENSOPIVAT MATERIAALIT	52
	LIITE 2: VEDYN TANKKAUSASEMAT EUROOPASSA.....	53
	LIITE 3: UUSIUTUVAN ENERGIAN KASVUENNUSTE.....	54
	LIITE 4: BMW POLTTOKENNOAUTON TEKNIikka.....	55
	LIITE 5: POLTTOKENNOT SOFC, AEF JA PAFC.....	56
	LIITE 6: MASUUNIN PÄÄREAKTIOT.....	58
	LIITE 7: HABER-BOSCH KATALYTTITEKNOLOGIA.....	59
	LIITE 8: POLTTOAINEIDEN HYÖTYSUHTEITA.....	60
	LIITE 9: VEDYN JOHDANNAISET.....	61
	LIITE 10: SYNTEETTISEN METAANIN TUOTANTOON TARVITTAVAT AINEMÄÄRÄT.....	62

KUVALUETTELO

Kuva 1.	AEL:n kennon rakenne (Irena 2020 s. 31)	11
Kuva 2.	Alkaalielektrolyyserilaitoksen toimintaperiaate (Irena 2020 s. 34)	12
Kuva 3.	PEM:n kennon rakenne (Irena 2020 s. 31).....	13

Kuva 4. PEM-elektrolyysilaitoksen toimintaperiaate (Irena 2020 s. 35).....	13
Kuva 5. AEM:n kennon rakenne (Irena 2020 s. 31)	14
Kuva 6. AEM-elektrolyysilaitoksen toimintaperiaate (Irena 2020 s. 36).....	15
Kuva 7. SOEC:n kennon rakenne (Irena 2020 s. 31).....	16
Kuva 8. SOEC-elektrolyysilaitoksen toimintaperiaate (Irena 2020 s. 36).....	16
Kuva 9. Eri elektrolyysereiden sähkönkulutuksen vertailua (Bloomenergy 2024).....	17
Kuva 10. Vety tunkeutuu teräksen kiderakenteisiin. Copyright Afry Finland Oy 31.3.2022	18
Kuva 11. Auringon kokonaissäteilyenergia. Kuvan data: Ilmatieteenlaitos, Energialaskennan testivuodet nykyilmastossa. (Motiva julkaisuaika tuntematon b)	19
Kuva 12. Aurinkokennon toimintaperiaate (Motiva, Aurinkosähköteknologiat 2024)	20
Kuva 13. Verkkoon liitetty aurinkosähkön pientuotantokapasiteetti Suomessa (MW) (Energiavirasto 2022) .	21
Kuva 14. Sähköntuotannon päätyypit 2050 (Radical transformation pathway towards sustainable electricity via evolutionary steps 2019).....	22
Kuva 15. Tuulivoimalan osat. (Motiva julkaisuaika tuntematon d, päivitetty 2023)	24
Kuva 16. Ilman tiheyden vaikutus tuulen energiamäärään (Koskinen, Ossi VAMK 2023).....	25
Kuva 17. Sähkömarkkinoiden rakenne ja markkinapaikat (Fingrid julkaisuaika tuntematon d)	27
Kuva 18. PPA-sopimuksien kehitys 2018–2023 (GW) (Balkan Green Energy News 30.1.2024).....	27
Kuva 19. Tukkusähkön negatiiviset tuntihinnat 2023. (Flourish: European Cumulative Negative Prices 2023. 20.4.2024)	30
Kuva 20. Suomen kaasun siirtoverkosto 2024. Copyright Gasgrid Finland Oy 2024	34
Kuva 21. Suunniteltu Nordic Hydrogen Route. Copyright Gasgrid Finland Oy 2024	35
Kuva 22. Putkiperävaunu, kaasumaisen vedyn kuljetukseen (Ikonen 2023).....	36
Kuva 23. PEM-polttokennon toimintaperiaate. Copyright 2022 Manhattan Gold & Silver	38
Kuva 24. Ammoniakkisynteesi. (IKSAD Publications 2024)	40
Kuva 25. Sabatier-reaktio katalyyysin pinnalla. (Kuva: Giuseppe Etiope 2015)	41
Kuva 26. Amiinipesun toimintaperiaate. (Kuva: Teir, Tsupari, Koljonen, Pikkarainen, Kujanpää, Arasto, Tourunen, Kärki, Nieminen 2009)	42

1 JOHDANTO

Vihreä vety on keskeisessä asemassa, kun tavoitteena on kasviuonekaasupäästöjen vähentäminen ja tavoitellaan hiilineutraalia yhteiskuntaa. Vihreä vety tuotetaan elektrolyysillä, puhdistetusta vedestä, sähkön avulla. Vety voidaan jatkojalostaa erilaisiksi synteettisiksi tuotteiksi, kuten ammoniakiksi, metaaniksi tai metanoliksi, joita voidaan käyttää liikenteessä, teollisuudessa ja energiantuotannossa. Vety ja sen jatkojalosteet voivat korvata fossiilisia polttoaineita ja vähentää niiden aiheuttamia päästöjä. Vety voi myös toimia energian varastointi- ja tasausvälineenä, joka mahdollistaa uusiutuvan sähkön hyödyntämisen silloin, kun sitä on tarjolla, ja sen siirtämisen sinne, missä sitä tarvitaan.

Suomen vetytaloudessa on käynnissä kiihtyvä kehitys, joka perustuu hallituksen vetystrategiaan sekä EU:n tavoitteisiin vähentää kasviuonekaasujen nettopäästöjä 55 % vuoteen 2030 mennessä, sekä tavoitteeseen, jotta EU olisi hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä. Suomi on asettanut omaksi hiilineutraaliustavoitteekseen vuoden 2035. Suomi pyrkii olemaan EU:n johtava toimija päästöttömän vedyn tuotannossa, jatkojalostuksessa, käytössä sekä vedyn ja sen jatkojalosteiden vientimaana. Suomessa on jo useita vetyhankkeita käynnissä tai suunnitteilla, erityisesti tuuli- ja aurinkovoiman yhdistämisessä vedyn tuotantoon, sekä vedyn siirto- ja varastointiratkaisuissa. Suomen vetytalouden tulevaisuus on kuitenkin riippuvainen monista tekijöistä, kuten sähkön saatavuudesta ja hinnasta, vedyn kysynnästä ja kilpailukyvystä, infrastruktuurin rakentamisesta ja rahoituksesta, turvallisuus- ja ympäristövaatimuksista, sekä lainsäädännön ja markkinoiden kehityksestä. Suomen on myös varmistettava, että vetytalous tukee ilmastotavoitteita ja edistää kiertotaloutta.

Vetytalouden keskeisenä tavoitteena, on fossiilisen vedyn korvaaminen päästöttömällä vedyllä, sekä korvata vaikeasti sähköistettävät sektorit, kuten lento-, rekka- ja laivaliikenteen fossiiliset polttoaineet vedyllä ja sen jatkojalosteilla. Kriisien yhteydessä on puhuttu usein vedyn käytöstä energialähteenä, ja ilmastokysymys on nostanut sen taas esiin. Nyt on kuitenkin erilaista se, että monet maat ja järjestöt haluavat tosissaan pysäyttää ilmastonmuutoksen ja irrottautua fossiilisista polttoaineista. Yhdeksi Suomen valttikortiksi voi muodostua biopohjaisen hiilidioksidin hyödyntäminen ja sen markkinaosuudet EU:ssa.

Suomen investointisuunnitelmien mukaan, tavoitteena on 7500 MW vihreän vedyn tuotantokapasiteettia. Nykyisin vedyn tuotanto ja kulutus ovat melko tasapainossa. Vuonna 2021 maailmanlaajuisen vedyn kulutuksen määrä oli 94 Mt, josta 40 Mt meni öljynjalostukseen ja teollisuuden tarpeisiin loput 54 Mt. 99 % vedystä valmistetaan nykyisin fossiilisista polttoaineista, pääosin maakaasun höyryreformoinnin avulla. Suomessa vetyä tuotettiin vuonna 2020, 145 000 tonnia, josta suurin osa tarvittiin öljynjalostuksessa. Vedyn maailmanlaajuisen kulutuksen arvioidaan nousevan 20–40 prosenttia vuoteen 2030 mennessä, ja kasvuun vaikuttavat myös uudet käyttöalueet, kuten vetypelkistetyn teräksen tuottaminen. (Fimpec 2023)

Vedyn kysynnän arvioidaan olevan, vuonna 2040, 200–300 Mt ja nousevan vuoteen 2050 mennessä, 500–600 Mt:n. EU:n Fit for 55 lakipaketti ja REFuelEU -asetus määrittää tavoitteet synteettisten polttoaineiden käytölle ilmailussa ja merenkulussa. Näihin kuuluvat synteettisten lentopolttoaineiden kulutuksen 1,2 prosentin vähimmäisosuus vuonna 2030 ja 35 prosentin vähimmäisosuus vuonna 2050.

Meriliikenteessä tavoitteena on saavuttaa synteettisten polttoaineiden 1 prosentin kulutusosuus sekä 6 prosentin päästöjen alentaminen vuonna 2030 ja 80 prosentin alentaminen vuonna 2050. (Fimpec 2023)

Jos Suomen nykyinen vedyn tuotanto perustuisi kokonaan vihreään vetyyn, tarvittaisiin noin 1–1,4 GW elektrolyyserikapasiteetti ja lähes 8 TWh sähköä. Suomen nykyinen sähköntuotantomäärä on noin 78 TWh vuodessa. Eli vedyn tuotannon osalta, sähkön tuotantoa tulisi lisätä noin 11 prosenttia. Uusiutuvan energian tuotantokapasiteetin arvioidaan kuitenkin kasvavan voimakkaasti seuraavina vuosina Suomessa, ja vetytalouden edellytyksenä on uusiutuvan energian riittävä saatavuus. (Fimpec 2023)

Suunniteltujen vihreän vedyn hankkeiden kapasiteetti on jo lähellä tavoitteita. Suomen vetystrategiassa on tavoitteena tuottaa EU:n vihreästä vedystä noin 10 prosenttia, eli noin miljoona tonnia vuodessa, vuoteen 2030 mennessä. Tämä edellyttää noin 6–9 GW:n elektrolyyserikapasiteettia pelkästään Suomessa ja 60–90 GW EU:ssa. Kesäkuuhun 2023 mennessä Suomessa julkistetut vihreän vedyn investointisuunnitelmat ovat noin 7,5 GW ja hankkeet suurimmaksi osaksi liittyvät teolliseen käyttöön, metaaniin ja muihin hiilipohjaisiin sähköpolttoaineisiin sekä ammoniakkiin. Monet julkistetuista vihreän vedyn hankkeista ovat kuitenkin vielä alustavia tai selvitysvaiheessa. (Fimpec 2023)

Opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää mitä kaikkea pitää sisällään vetytalous ja siihen liittyvät toiminnot. Uutiset ja lehtiartikkelit antavat yleensä kovin pinnallisen tiedon millä vetyä on tarkoitus valmistaa ja mitä kaikkea vaatii, että tuotanto, varastointi, kuljetukset ja jatkojalostus saadaan toimimaan ja tuotteet sitä tarvitseville. Myös tarvittava sähkön tuotanto, siirto ja siihen liittyvät markkinat jäävät vähemmälle huomiolle. Yleensä mainitaan vain, että vetyä on tarkoitus tuottaa, kun sähkö on halpaa ja tuotetulla vedyllä korvataan kaikki ilmastopäästöjä aiheuttavat toiminnot. Opinnäytetyö tehtiin kirjallisuustutkimuksena ja lähdemateriaaleina käytettiin tutkimusraportteja, artikkeleita, tilastoja ja verkkosivuja.

2 VEDYN VALMISTUS

2.1 Vedyn ominaisuudet ja vety alkuaineena

Vety on rakenteeltaan yksinkertaisin alkuaine. Vetyatomi (H) rakentuu kahdesta osasta. Atomin ytimen yhdestä protonista ja ydintä kiertävästä elektronista. Protoni koostuu kolmesta alkeishiukasta, kahdesta U-kvarkista (ylös-kvarkki) ja yhdestä D-kvarkista (alas-kvarkki). Elektroni on itsessään alkeishiukkanen, eli elektronilla ei tiedetä olevan erillistä sisäistä rakennetta. (Mäkinen 2022 s. 5)

Vety on universumin yleisin alkuaine ja maailmankaikkeuden kaikesta materiasta 74 % on vedyn muodossa. Maapallolla vety on 10. yleisin alkuaine, mutta vapaana kaasuna sitä esiintyy vain yläilmakehässä ja maankuoressa. Yleensä vety on maapallolla hiileen tai happeen sitoutuneena. Hiilen kanssa vety muodostaa hiilivetyjä, joista rakenteeltaan yksinkertaisin on metaani (CH₄). Metaani pitää sisällään yhden hiili- ja neljä vetyatomia. Hapen kanssa vety muodostaa vesimolekyylin (H₂O). Vesimolekyyliä on siis kaksi vetyatomia ja yksi happiatomi. (Koskinen 2022 s. 13–15)

Vetyatomin massa on 1,008 u ja happiatomin vastaavasti 16,00 u. Normaaleissa paine- ja lämpötilaolosuhteissa (NTP) vety- ja happikaasu, esiintyvät kaksiatomisina molekyyleinä, H₂ ja O₂, joten vetykaasun molekyylimassa on 2,016 u ja happikaasun molekyylimassa on 32,00 u. Moolimassana ilmoitettuna, lukuarvo on sama, mutta moolimassan yksikkö on g/mol. H₂ = 2,016 g/mol ja O₂ = 32,00 g/mol. (Koskinen 2022 s. 15)

Vety koostuu siis H₂ molekyyleistä ja näiden moolimassa on 2,016 g/mol. Ilma koostuu pääasiallisesti typestä, hapestä. Näiden osuudet ilman tilavuudesta ovat: typpi 78 til-%, happi 20,9 til-% ja argon 0,9 til-%. Loput 0,2 til-% pitävät sisällään hiilidioksidia, vesihöyryä ja muita kaasuja. Näillä kaasusuoksilla laskemalla, voidaan todeta ilman moolimassaksi 29 g/mol. Verrattaessa vedyn ja ilman moolimassoja, voidaan todeta, että vety on 14,5 kertaa kevyempää kuin ilma. (Mäkinen 2022 s. 6–7)

Kaasun tiheys voidaan laskea kaavalla:

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1)$$

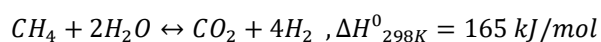
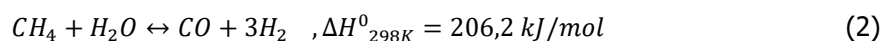
Laskukaavassa ρ = tiheys, p = kaasun paine, M = kaasun moolimassa, R = kaasuvakio 8,314 J/mol*K ja T = kaasun absoluuttinen lämpötila kelvineinä.

Kun vety reagoi hapen kanssa, syntyy vettä (H₂O). Tämä kemiallinen reaktio on eksotermien, joten siinä vapautuu suuri määrä lämpöenergiaa. Vedyn energiatiheys suhteessa massaansa onkin erittäin suuri, 120 MJ/kg. Vastaavasti maakaasun (CH₄) lämpöarvo on 49 MJ/kg. Vedyn syttymisherkkyys on erittäin alhainen. Vetykaasun ja ilman seoksen ollessa 30 til-%, syttyy seos niinkin matalalla syttymisenergialla kuin 0,017 mJ. Maakaasulla (CH₄) syttymisenergia on 0,3 mJ ja ammoniakilla 600 mJ. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024)

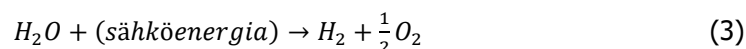
Paineistetusta varastosäiliöstä vuotaessaan, vety voi syttyä itsestään vuodon muodostaman staattisen varauksen, tai kitkan aiheuttaman lämmön seurauksena. Jos vuotokohdan pintamateriaali on ruosteinen, voi vety syttyä itsesyttymislämpötilaa (560°C) alemmassakin lämpötilassa. (Työterveyslaitos julkaisuaika tuntematon, päivitetty 2022)

2.2 Vihreän vedyn teollinen valmistus

Vetyä voidaan tuottaa monella eri menetelmällä, esimerkiksi kaasuttamalla tai elektrolyysillä, mutta maailmanlaajuisesti yleisin ja halvin vedyntuotanto on fossiilisen maakaasun (CH₄) höyryreformointi (SMR, Steam Methane Reforming). Menetelmässä hiilen ja vedyn väliset kemialliset sidokset hajotetaan höyryn avulla ja tuotteena saadaan hiilidioksidia ja vetyä. Maakaasun sijaan, voidaan myös käyttää biometaania, joka on päästöjen kannalta parempi vaihtoehto. Höyryreformointi on endoterminen reaktio, joten reaktion ylläpitoon vaaditaan energiaa. Kemialliset reaktiot ovat kaavassa 2. (Motiva julkaisuaika tuntematon a, päivitetty 2024; Sopo 2024)



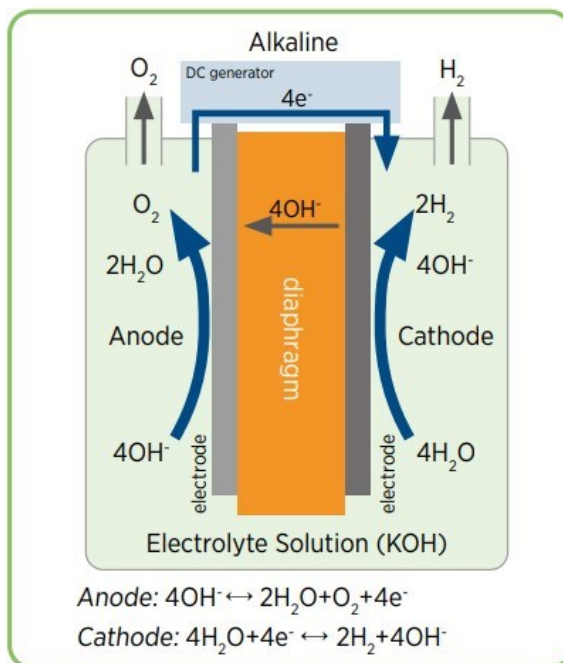
Päästöjen kannalta puhtainta, eli vihreää vetyä saadaan elektrolyysillä, jossa vesi hajotetaan sähkökemiallisessa prosessissa, tasavirralla vedyksi ja hapeksi. Elektrolyserin kennon katodilta saadaan vetykaasu ja anodilta happikaasu. Elektrolyysissä käytettävä sähkö on tuotettava päästöttömästi, esimerkiksi aurinko- tai tuulivoimalla. Elektrolyysiteknologiosta yleisimmät neljä menetelmää ovat: alkalielektrolyysi (AEL, Alkaline Electrolysis), AEM elektrolyysi (Anion Exchange Membranes), Polymeerielektrolyysi (PEM, Polymer Electrolyte Membrane Electrolysis) ja höyryelektrolyysi (SOEC, Solid Oxide Electrolyzer cell). (Irena 2020. s.16)



2.2.1 Alkalielektrolyysi, AEL

AEL on vanhin ja yleisin käytössä oleva elektrolyyseri malli. Alkalielektrolyyserin elektrolyytinä käytetään yleensä kaliumhydroksidia (KOH). KOH-liuos nostaa elektrolyysin sähkönjohtavuutta ja tämä nostattaa reaktion hyötysuhdetta. Elektrolyytti kiertää järjestelmässä ja sitä lisätään prosessiin vain tarvittaessa. Elektrolyytin määrä kierrossa on noin 10 m³/h ja uutta ultrapuhdasta vettä lisätään noin 200 litraa/h per MW. Jos elektrolyyserin teho on 10 MW, tarvitaan vedyntuotantoprosessiin uutta vettä 2000 l/h ja elektrolyyttiä on kiertänyt tunnin aikana noin 100 m³. Riippuen elektrolyyserin valmistajasta, elektrolyyserin operointilämpötila on 70–90°C ja järjestelmän paine 1–30 bar. Kennon elektrolyyttiliuokseen upotetut elektrodit on erotettu zirkoniumionioksidi membraanikalvolla (diaphragm). Membraanikalvon tehtävänä on pitää vety ja happi erillään toisistaan. Jo 4 % määrä vetyä hapessa, saattaa aiheuttaa räjähdyksen. Membraanikalvo päästää läpi negatiivisesti

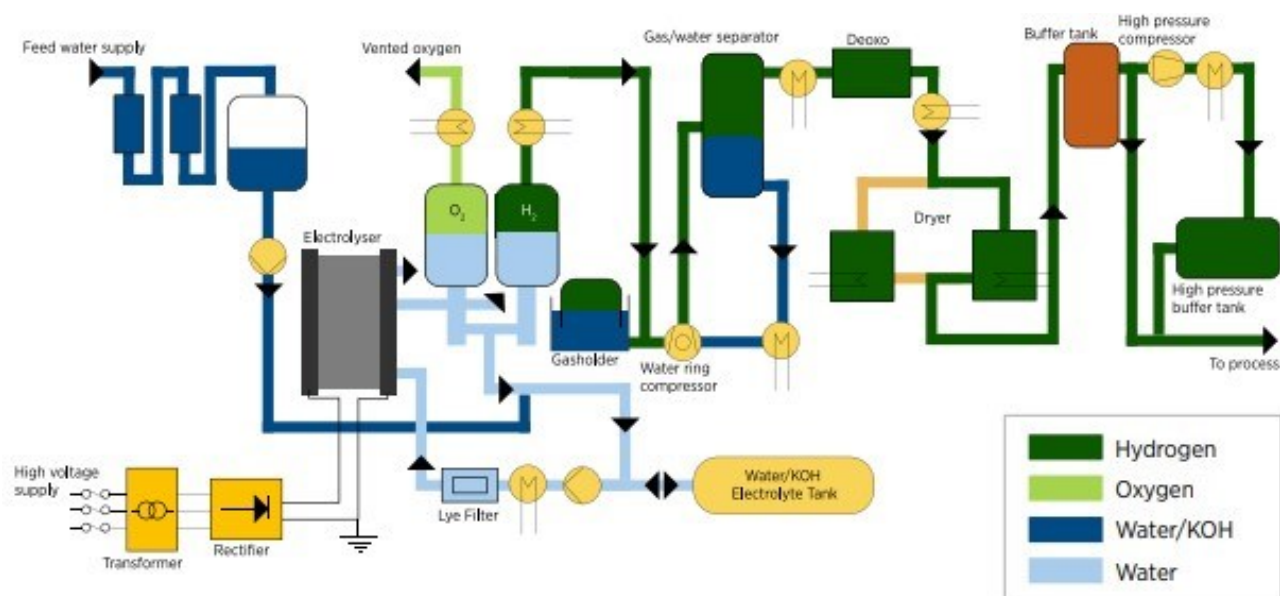
varautuneet hydroksidi-ionit, jotka liikkuvat positiiviselle anodille, muodostaen happea ja vettä. Positiivisesti varautuneet vetyionit pysyttelevät katodin puolella. Alkalielektrolyysikennon hyötysuhde on noin 63–70 %. Yhden vetykilon tuottamiseen AEL kuluttaa sähköä noin 49–50 kWh. (Irena 2020; Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024)



Kuva 1. AEL:n kennon rakenne (Irena 2020 s. 31)

Alkalielektrolyysissä tapahtuvat reaktiot:

- Anodi (hapetus) $4OH^- \rightarrow 2H_2O + O_2 + 4e^-$ (4)
- Katodi (pelkistys) $4H_2O + 4e^- \rightarrow 2H_2 + 4OH^-$ (5)
- Reaktio $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$ (6)

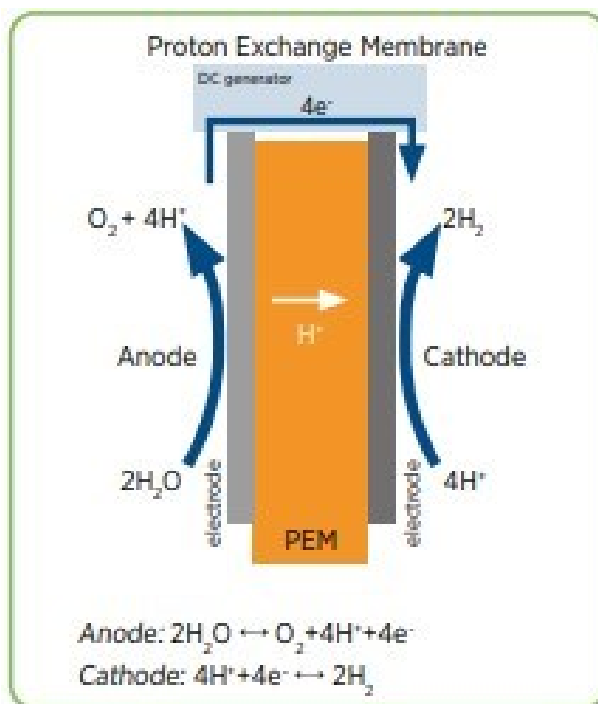


Kuva 2. Alkaalielektrolyyserilaitoksen toimintaperiaate (Irena 2020 s. 34)

2.2.2 Polymeerimembraanielektrolyyseri (PEM, Proton exchange membrane)

PEM-elektrolyyserissä ei käytetä elektrolyyttinä nestettä/liuosta, kuten AEL-elektrolyyserissä, vaan PEM-kenno pitää sisällään protoninvaihtomembraanin, eli polymeerikalvon, jossa on elektrokatalyyttiset pinnoitteet. Uloimpana kalvon pinnalla ovat elektrodit. Vetyionit kulkeutuvat polymeerikalvon läpi. Katodilla vetyionit ja elektronit yhdistyvät, muodostaen vetykaasua. Vetyionit (protonit) aiheuttavat polymeerikalvon happamuuden nousun korkeaksi ja tästä syystä rakenneosissa käytetään titania ja se voidaan päällystää vielä jalometalleilla, kuten kullalla tai platinalla. Anodipuolen elektrodi on valmistettu iridium oksidista ja katodipuolen elektrodi platinasta ja hiilestä. Valmistuksessa vaadittavien metallilaatujen takia, PEM-elektrolyyserit ovat kalliimpia kuin alkaalielektrolyyserit. (Irena 2020 s. 32)

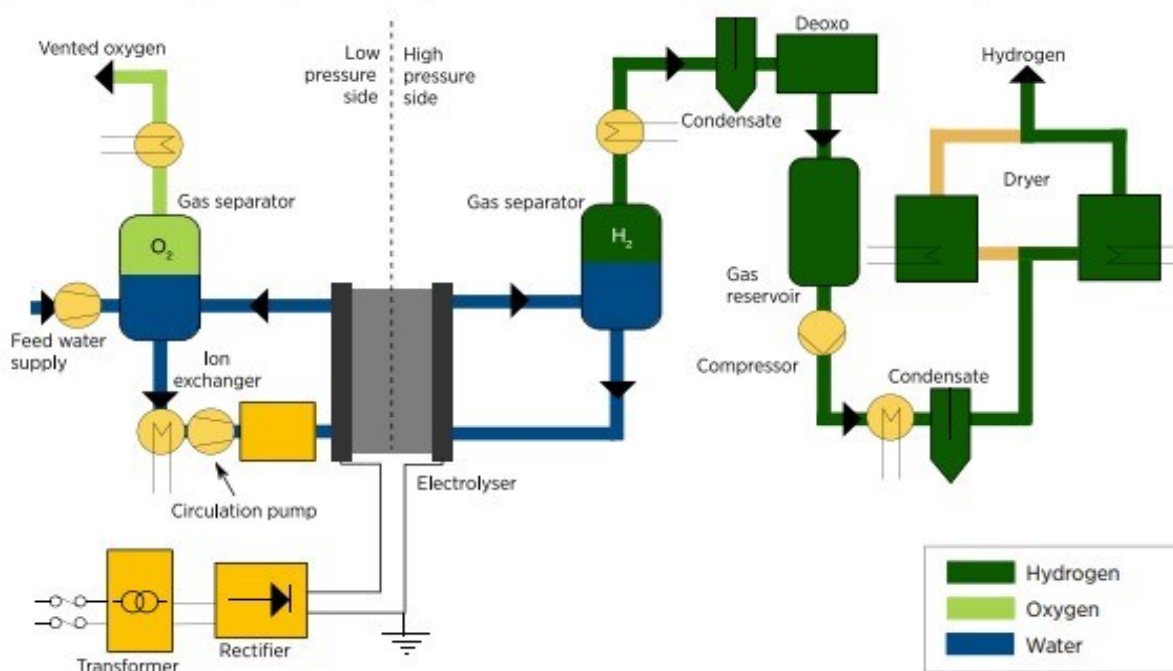
PEM-elektrolyyserin käyttölämpötila on noin 50–80°C ja käyttöpaine maksimissaan 70 bar. PEM-elektrolyyserit ovat kooltaan pienempiä ja rakenteeltaan yksinkertaisempia kuin alkaalielektrolyyserit. Mutta PEM-kennot ovat herkempiä veden epäpuhtauksille, kuten raudalle, kuparille, kromille ja natriumille, sekä voivat kalkkeutua. Veden laatu ja sen tarkkailu käytön aikana, on varmistettava. Yhden vetykilon tuottaminen PEM:llä, kuluttaa sähköä noin 52–55 kWh. (Irena 2020 s. 32–33; Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024)



Kuva 3. PEM:n kennon rakenne (Irena 2020 s. 31)

PEM-elektrolyysissä tapahtuvat reaktiot:

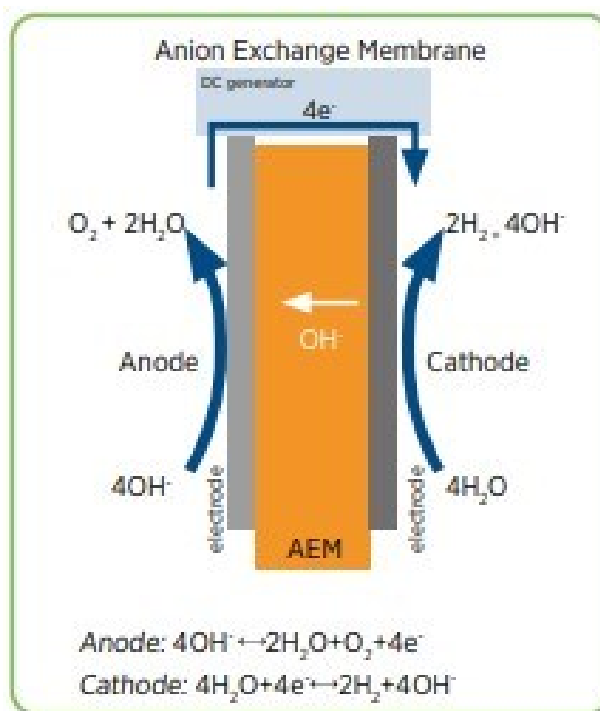
- Anodi (hapetus) $2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$ (7)
- Katodi (pelkistys) $4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2$ (8)
- Reaktio $4H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$ (9)



Kuva 4. PEM-elektrolyysilaitoksen toimintaperiaate (Irena 2020 s. 35)

2.2.3 AEM-elektrolyysi

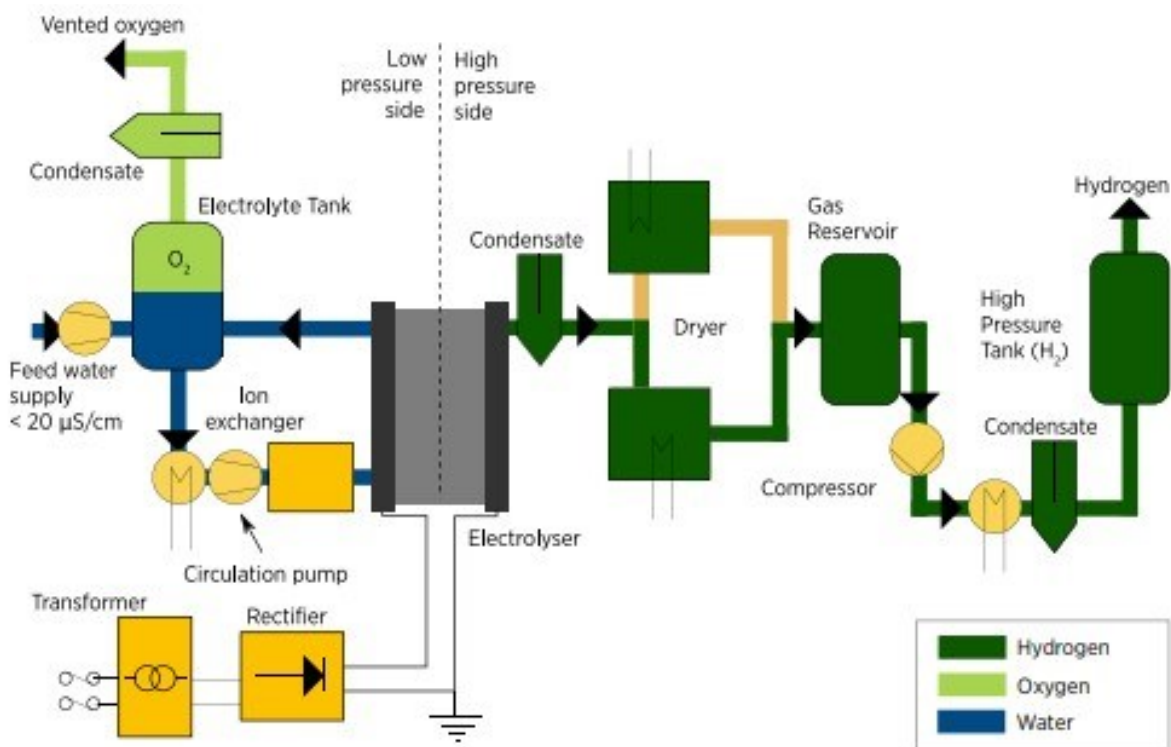
Anioninvaihtomembraanielektrolyysi (anion exchange membrane) on uusimpia elektrolyysitekniikoiden tekniikoita ja vain muutamat yritykset ovat kaupallistaneet ja lähteneet kehittämään kyseistä tekniikkaa. AEM:ssä on yhdistetty AEL- ja PEM-elektrolyysereiden parhaita puolia, eli vähemmän korroosioita aiheuttava ympäristö, kuten AEL:ssä sekä yksinkertaisempi rakenne, kuten PEM:ssä. Vähäisen korroosioriskin takia, rakenteissa voidaan käyttää halvempia materiaaleja, titaanin sijaan. AEM-elektrolyyseriä voidaan operoida PEM:n tapaan vaihtelevilla paine-eroilla. Haasteina AEM-membraanissa on kemiallisia ja mekaanisia kestävyysongelmia, jotka lyhentävät elektrolyysin käyttöikää merkittävästi, verrattuna esimerkiksi PEM-elektrolyysereihin. Suorituskyvyn parantamiseksi, voidaan membraanin johtavuutta parantaa tai lisätään prosessiin elektrolyyttiä kaliumhydroksidia (KOH) tai natriumvetykarbonaattia (NaHCO_3), mutta tällöin vaarana on, että kennon käyttöikä lyhenee merkittävästi. (Irena 2020 s. 34)



Kuva 5. AEM:n kennon rakenne (Irena 2020 s. 31)

AEM-elektrolyysissä tapahtuvat reaktiot:

- Anodi (hapetus) $4\text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4e^-$ (10)
- Katodi (pelkistys) $4\text{H}_2\text{O} + 4e^- \rightarrow 2\text{H}_2 + 4\text{OH}^-$ (11)
- Reaktio $4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 2\text{H}_2$ (12)

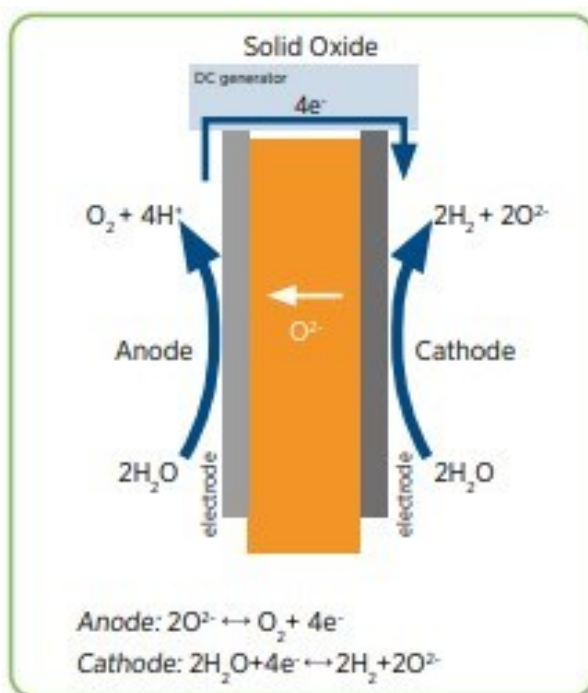


Kuva 6. AEM-elektrolyysilaitoksen toimintaperiaate (Irena 2020 s. 36)

2.2.4 Höyryelektrolyysi

SOEC (Solid Oxide Electrolysis cell), eli kiinteäoksidi-elektrolyysikemno koostuu elektrolyytistä, anodista ja katodista. Elektrolyytti itsessään on kiinteää keraamista materiaalia. Anodi ja katodi ovat valmistettu erityisistä musteista, joilla keraaminen elektrolyytti on päällystetty ja nämä mahdollistavat sähkökemiallisen reitin vedyn tuottamiseksi. Kiinteäoksidikemnoissa käytetty korkea noin 700–800°C lämpötila parantaa kokonaishyötysuhdetta vaihtoehtoisiin tekniikoihin (PEM tai AEL) verrattuna, jotta reaktioon tarvitaan vähemmän sähköä. SOEC:n käyttöpaine on noin 1 bar ja yhden vetykilon valmistukseen tarvittava sähkönmäärä on 39–40 kWh. (Bloomenergy 2024; Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024)

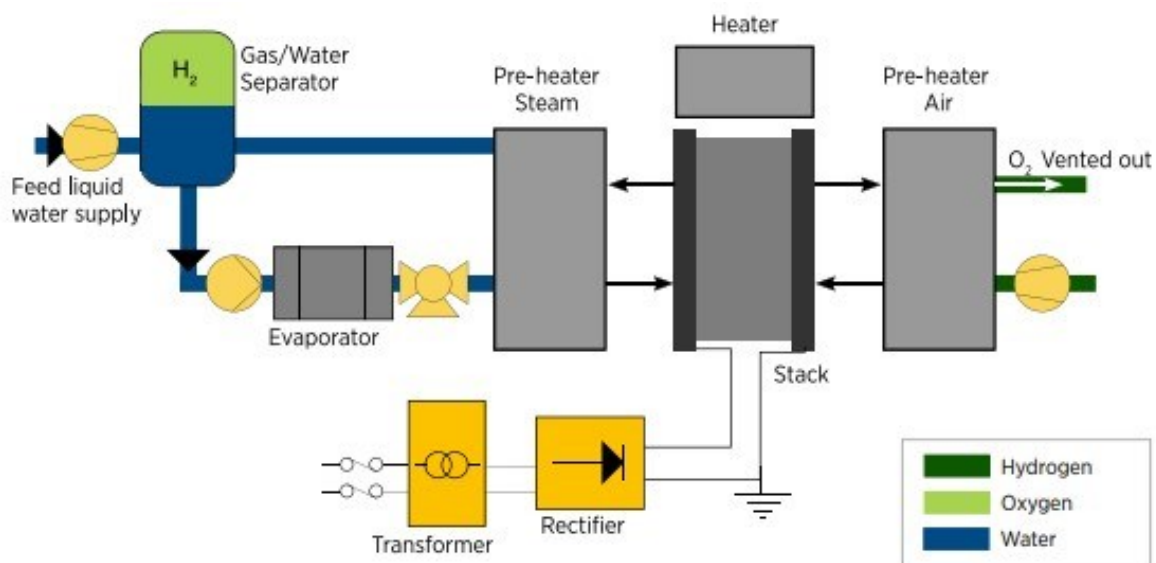
SOEC:lla höyryelektrolyysin lisäksi, on myös elektrolyysi hiilidioksidin (CO_2) ja veden (H_2O) välillä mahdollista. Eli syöttämällä SOEC:iin höyryä ja hiilidioksidia, saadaan elektrolyyseristä ulos happea, vetyä ja häkäkaasua. Vedyn ja häkäkaasun yhdisteestä käytetään nimitystä synteetikaasu (Syngas). Synteetikaasusta on mahdollista tehdä jatkojalosteita, esimerkiksi metanolia (CH_3OH). (Irena 2020 s. 33)



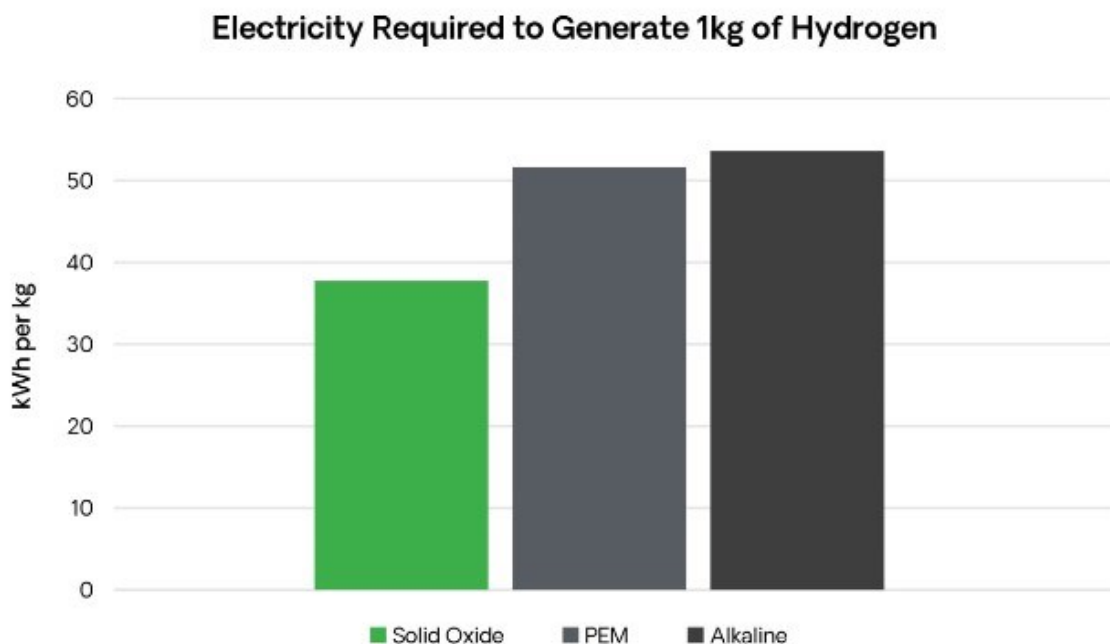
Kuva 7. SOEC:n kennon rakenne (Irena 2020 s. 31)

SOEC-elektrolyysissä tapahtuvat reaktiot:

- Anodi (hapetus) $2O^{2-} \rightarrow O_2 + 4e^-$ (13)
- Katodi (pelkistys) $2H_2O + 4e^- \rightarrow 2H_2 + 2O^{2-}$ (14)
- Reaktio $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$ (15)



Kuva 8. SOEC-elektrolyysilaitoksen toimintaperiaate (Irena 2020 s. 36)



Kuva 9. Eri elektrolyysereiden sähkönkulutuksen vertailua (Bloomenergy 2024)

2.3 Turvallisuus

Vety erittäin helposti syttyvä, hajuton ja väritön kaasu. Vetykaasua hengitettäessä, puheääni muuttuu korkeaksi. Puhdas vetykaasu itsessään ei ole myrkyllistä, mutta suurissa määrissä se syrjäyttää hapen ja voi aiheuttaa tukehtumisen. Hapenpuutteen oireet ilmenevät, jos ympäröivän tilan happipitoisuus laskee alle 18 prosentin. Vetykaasua voidaan hajustaa, mutta harvoin näin tehdään, koska hajusteet täytyisi poistaa ennen vedyn käyttöä. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024; Työterveyslaitos julkaisuaika ei tiedossa, päivitetty 2022)

Vety sekoittuu keveytensä takia ilman kanssa hyvin, mutta toisaalta, laimenee nopeasti. Vedyn ja ilman seoksen syttymisraja, ilmakehän paineessa, on 4–75 til-% ja puhtaan hapen kanssa, alue on huomattavasti laajempi 4–94 til-%. Elektrolyysereiden osalta, vetyräjähdykset ovat mahdollisia sekä laitteiden sisällä, että ulkopuolella. Elektrolyyserin sisällä räjähdys aiheuttaa mahdollinen hapen ja vedyn sekoittuminen ja ulkopuolella vedyn ja ilman. (Noordende & Bollen 2023 s. 23–24; Koskinen 2022 s. 15)

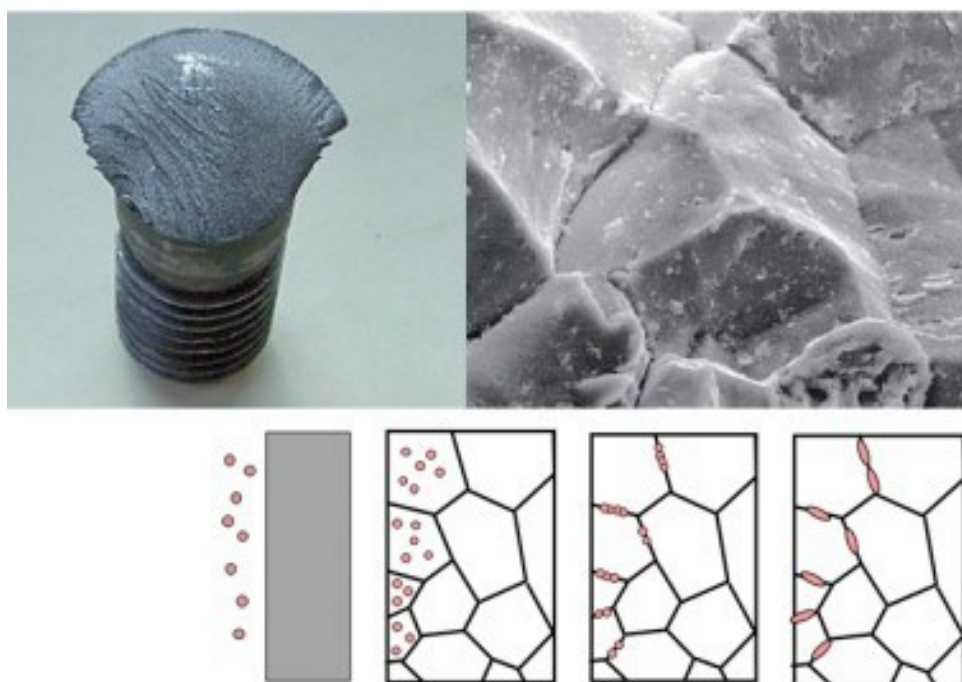
Vetyvuotojen aiheuttamat onnettomuudet ovat yleensä tulipaloja tai räjähdysä. Onnettomuuden vakavuus ja laajuus, riippuvat vedyn määrästä, ympäristön olosuhteista, syttymiskohdasta sekä siitä, syttykö vuotava kaasu heti alkuunsa vai viiveellä, jolloin vaarana on räjähdys. Sisätiloissa räjähdysvoimakkuus on erityisen tuhoisa, koska vedyn palamisnopeus, on huomattavan suuri. Vedyn (H_2) ja ilman seoksen laminaarinen palamisnopeus on 2,7 m/s, kun vastaavasti maakaasun (CH_4) ja ilman seoksen 0,4 m/s. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024)

Elektrolyysereiden kehittyessä, laitteen tehokkuutta on lisätty mm. ohuemmilla membraanikalvoilla. Kalvoa ohentamalla, kennon teho kasvaa, mutta samalla ongelmaksi tulee kalvon kestävyys. Jos kennon membraanikalvo pettää, on vaarana räjähdysvaarallinen vety-happiseos. Muita

elektrolyyserin heikentäviä tekijöitä voivat olla sähkönsaannin epätasaisuus, jos laitoksen vaatima sähkö tuotetaan tuuli- tai aurinkovoimalla ja sähkönsaantia ei ole tasoitettu esimerkiksi sähkövarastolla (akulla). Toistuva laitoksen ylös ja alasajo rasittaa tuotantolaitteita. Jos vedyntuotantolaitoksessa on useita elektrolyysereitä, vaarana on räjähdysen eteneminen elektrolyyseristä toiseen, ns. domino efekti. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024)

Vetypaloa on vaikea havaita, koska vety palaa lähes näkymättömällä, vaaleansinisellä liekillä, eikä palotapahtumasta muodostu savua. Vetyliekki ei säteile juurikaan lämpöä ympäristöön, vaikka liekki itsessään on erittäin kuuma noin 2045°C. Lämpökamera on hyvä väline vetyliekin paikallistamiseen turvalliselta etäisyydeltä. Tulipalon sattuessa, vetyliekkiä ei yritetä sammuttaa, vaan pyritään sulkemaan vedyn tulolähde ja annetaan vuotavan vedyn palaa pois. Vetyputkistojen sulkuventtiilit tulisi sijoittaa turvalliisiin paikkoihin ja kaukokäyttö tulisi olla mahdollista. Paras menetelmä on varustaa sulkuventtiilit automaattitoiminnolla, joka sulkee venttiilit vuoto- tai häiriötilanteessa. Esimerkiksi jos kaasuvuotohälytyn aktivoituu tai putkiston paine laskee äkillisesti. Liekin sammuttaminen voi aiheuttaa vuotavan vedyn kertymisen ns. vetypilveksi ja seurauksena voi olla räjähdys. Palotapahtuma pyritään rajaamaan mahdollisimman pienelle alalle ja suojataan ympäröivät rakennukset/rakennelmat. Jos tilassa on paineellisia vety- tai muita kaasupulloja, jäädytetään näitä vedellä, jotta lisävahingoilta vältyttäisiin. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024; Työterveyslaitos julkaisuaika tuntematon, päivitetty 2022)

Vety tunkeutuu teräksen kiderakenteeseen, aiheuttaen mekaanisten ominaisuuksien, eli lujuuden heikkenemistä. Mitä korkeampi paine, sitä helpommin vety tunkeutuu teräksen rakenteisiin. Yleisesti puhutaan teräksen vetyhauraudesta. Vetyhaurausmurtuma aiheutuu kolmen tekijän summasta. Putken seinämän tai paineastian kuoren **vetojännitystila**, tarpeeksi suuri määrä **vetyä sisältävä ympäristö**, teräksen **liian suuri lujuus**, eli materiaali on vedylle altis. (Paanu 2023)



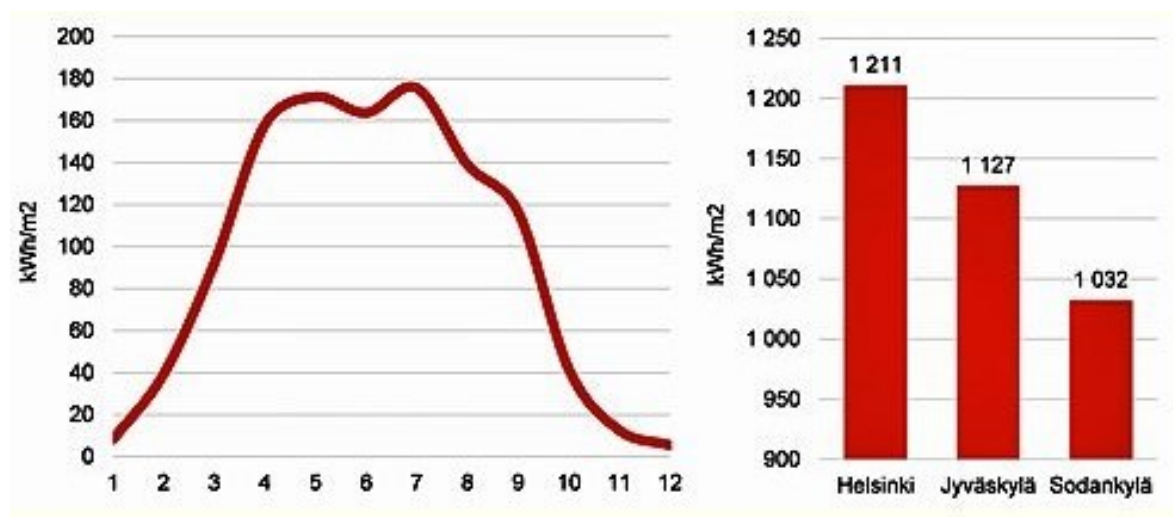
Kuva 10. Vety tunkeutuu teräksen kiderakenteisiin. Copyright Afry Finland Oy 31.3.2022

3 SÄHKÖENERGIAN TUOTANTO JA HANKINTA

3.1 Aurinkovoima

Auringosta maapallolle tuleva keskimääräinen säteilyteho kohtisuoraan aurinkoa kohden olevalle pinnalle neliometriä kohden, on noin 1000 W/m². Säteilytehon kokonaismäärä joka maapallolle osuu, on noin 130 000 TW. Ihmiskunta kuluttaa energiaa vuoden 2012 tilaston mukaan, keskimäärin 16,5 TW teholla (noin 2 kW per asukas) eli auringon tuottama teho on noin 8000 kertaa suurempi, kuin kulutuksemme. Auringon säteilyteho yhden tunnin aikana on sama, kuin vuodessa kuluttamamme energiamäärä. (Lampila 2016)

Suomen eteläosissa vuotuinen auringon kokonaissäteilyenergian määrä vaakatasolle on noin 980 kWh/m², keskiosissa Suomea 890 kWh/m² ja Pohjois-Suomessa 790 kWh/m². Suuntaamalla aurinkopaneelit kohti aurinkoa saadaan suuremmat teholutekemat. Kuvassa 11. on esitelty kuukausittaiset kokonaissäteilyenergian summat Suomessa etelään päin 45 asteen kulmaan asennetulle pinnalle. Oikeanpuoleinen pylväsiagrammi havainnollistaa vuotuisten säteilymäärien erot eri kaupunkien välillä. (Motiva julkaisuaika tuntematon b)



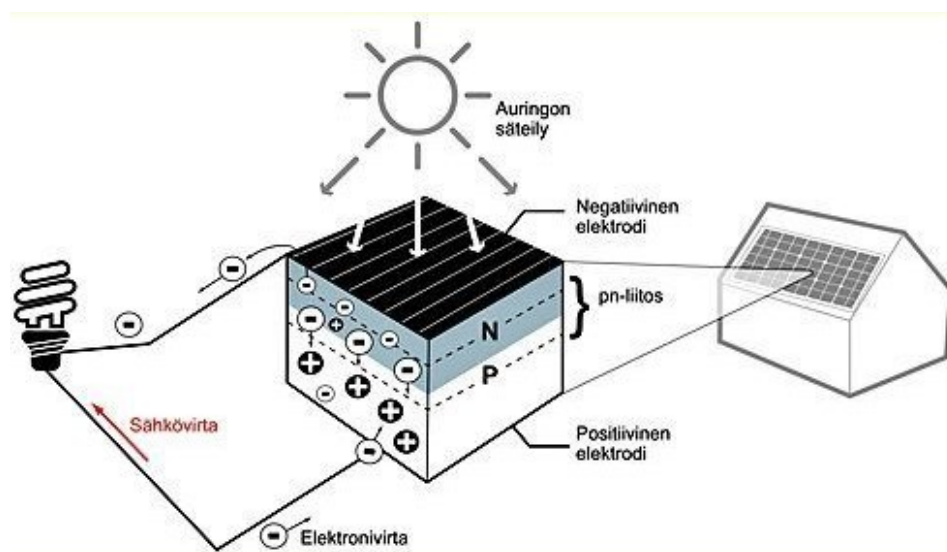
Kuva 11. Auringon kokonaissäteilyenergia. Kuvan data: Ilmatieteenlaitos, Energialaskennan testivuodet nykyilmastossa. (Motiva julkaisuaika tuntematon b)

3.1.1 Aurinkokennon toiminta

Maapallolle saapuva auringon säteilyenergia muunnetaan sähköenergiaksi aurinkopaneelien avulla. Tällä hetkellä kaupallisessa käytössä olevat aurinkopaneelit muodostuvat aurinkokennoista, jotka koostuvat kahdesta erityyppisestä puolijohdemateriaalista (P- ja N-tyyppistä). Puolijohteen perusaine on pii (Si). N-tyyppin puolijohhteessa piin saosteena käytetään esimerkiksi arseenia (As) tai fosforia (P) ja P-tyyppissä käytetään yleensä saosteena booria (B) tai galliumia (Ga). Puolijohteiden sähkönjohtokyky on parempi kuin eristeillä, mutta huonompi kuin metalleilla.

N-tyyppin puolijohhteeseen saostetaan alkuainetta, esimerkiksi arseenia ja P-tyyppin puolijohhteeseen booria. Arseenissa on elektroneja enemmän ja boorissa vähemmän kuin puolijohteen muilla

atomeilla. N-tyyppin ylimääräiset elektronit siirtyvät P-tyyppin puolelle ja tästä syntyy N-tyyppin puolijohteeseen positiivinen varaus ja P-tyyppin puolijohteeseen negatiivinen varaus. Negatiivisen varauksen kuljettajana on elektronit ja näiden jälkeen jää aukko, joka toimii positiivisen varauksen kuljettajana. Puolijohteen sähkönjohtavuuden perustana on vapaiden elektronien ja aukkojen liike. Kennon sisälle muodostuvan sähkökentän elektronit saavat energiansa fotoneilta. Puolijohteessa elektronit voivat kulkeutua ainoastaan P-puolelta N-puolelle, josta ne voidaan johtaa ulkoisen virtapiirin kautta P-puolelle takaisin. Aurinkopaneeleilta saadaan tasavirtasähköä (DC) ja se voidaan muuttaa invertterin avulla vaihtovirtasähköksi (AC) suoraan käytettäväksi sähkölaitteissa. Aurinkopaneelien rinnalle voidaan asentaa myös sähkövarasto, eli akkujärjestelmä. Kuvassa 11. on esitetty PN-liitokseen perustuvan kennon toimintaperiaate. (Ala-Myllymäki 2016; Motiva julkaisuaika tuntematon c)



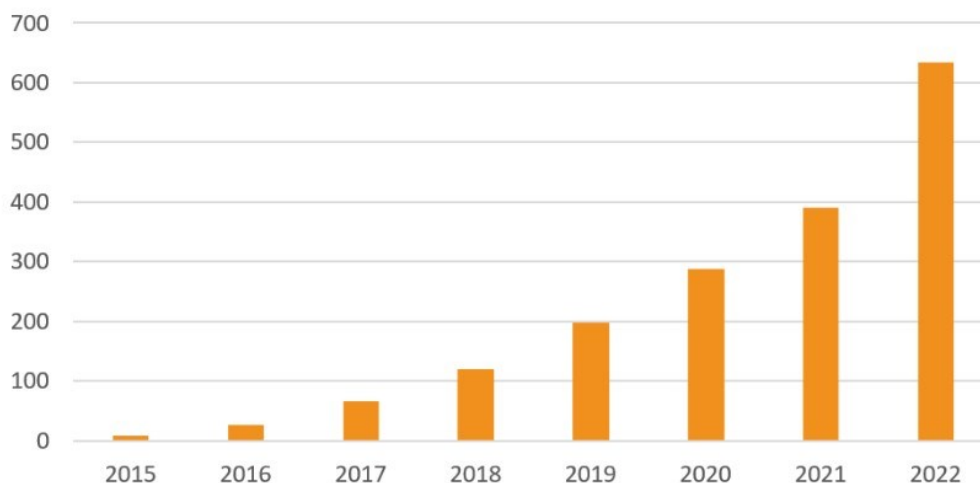
Kuva 12. Aurinkokennon toimintaperiaate (Motiva, Aurinkosähköteknologiat 2024)

3.1.2 Aurinkopaneelit tuotannossa

Aurinkokennon kykyyn tuottaa sähköenergiaa, vaikuttaa auringon säteilyn määrä, laatu ja kennossa käytetyt materiaalit. Sähköntuoton hyötysuhteeseen vaikuttaa myös aurinkokennon/paneelin toimintalämpötila. Lämpötilan noustessa, hyötysuhde tippuu. Myös paneelin pintaan kertyvä lumi/kuura tai pöly/lika huonontaa oleellisesti toimintaa, kun fotonien kulkeutuminen kennoille estyy. Aurinkopaneeleita ei tulisi asentaa 10° pienempään kulmaan, vaakasuunnasta mitattuna, koska sadevesi ei tällöin puhdistaa paneelin pintaa. (Ala-Myllymäki 2016)

Aurinkopaneelien nimellisteho ilmoitetaan piikkiwatteina (W_p), eli huipputehona. Teho määritellään laboratorion standardiolosuhteissa STC (Standard Test Condition), jossa kennon lämpötila on 25°C , ilmassa AM on 1,5 ja säteilyintensiteetin arvo on 1000 W/m^2 . 1 kW_p (piikkikilowatti) vaatii paneeleita noin $6\text{--}8 \text{ m}^2$ pinta-alalle. Aurinkopaneelien hyötysuhde voidaan määrittellä jakamalla nimellisteho, paneelin pinta-alalla ja standardiolosuhteiden säteilymäärällä (1000 W/m^2). Esimerkiksi aurinkopaneelin, jonka pinta-ala on $1,95 \text{ m}^2$ ja nimellisteho on 400 W_p , hyötysuhde on: $400 \text{ W}_p / (1,95 \text{ m}^2 \times 1000 \text{ W/m}^2) = 20,5 \%$. (Ala-Myllymäki 2016)

Aurinkosähkön pientuotannon kapasiteetti vuoden 2022 lopulla oli noin 635 megawattia. Pientuotannolla tarkoitetaan alle 1 MW:n tuotantolaitteistoja. Aurinkosähkön hyödyntäminen onkin kovassa nousujohteessa. Pientuotannon kapasiteetti kasvoi yli 60 % (240 MW), verrattuna vuoteen 2021. (Motiva julkaisuaika tuntematon c)



Kuva 13. Verkkoon liitetty aurinkosähkön pientuotantokapasiteetti Suomessa (MW) (Energiavirasto 2022)

3.1.3 Aurinkovoimalat Suomessa

Teollisen kokoluokan, eli yli 1 MW:n aurinkovoimaloita on suunnitteilla Suomeen ennätysmäärä. Tällä hetkellä on yli 1 MW:n aurinkovoimaloita käytössä/tuotannossa alle 20 kappaletta, mutta esisuunnittelu- tai luvitusvaiheessa on jopa 117 aurinkovoimalaa, joista suurimmat ovat tehoiltaan 600 MW. Näiden suurimpien voimala-alueiden maankäyttötarve on jopa 780 hehtaaria. Liitteenä (liite3) on aurinkovoimakapasiteetin kasvuennuste Suomessa. (Motiva julkaisuaika tuntematon c)

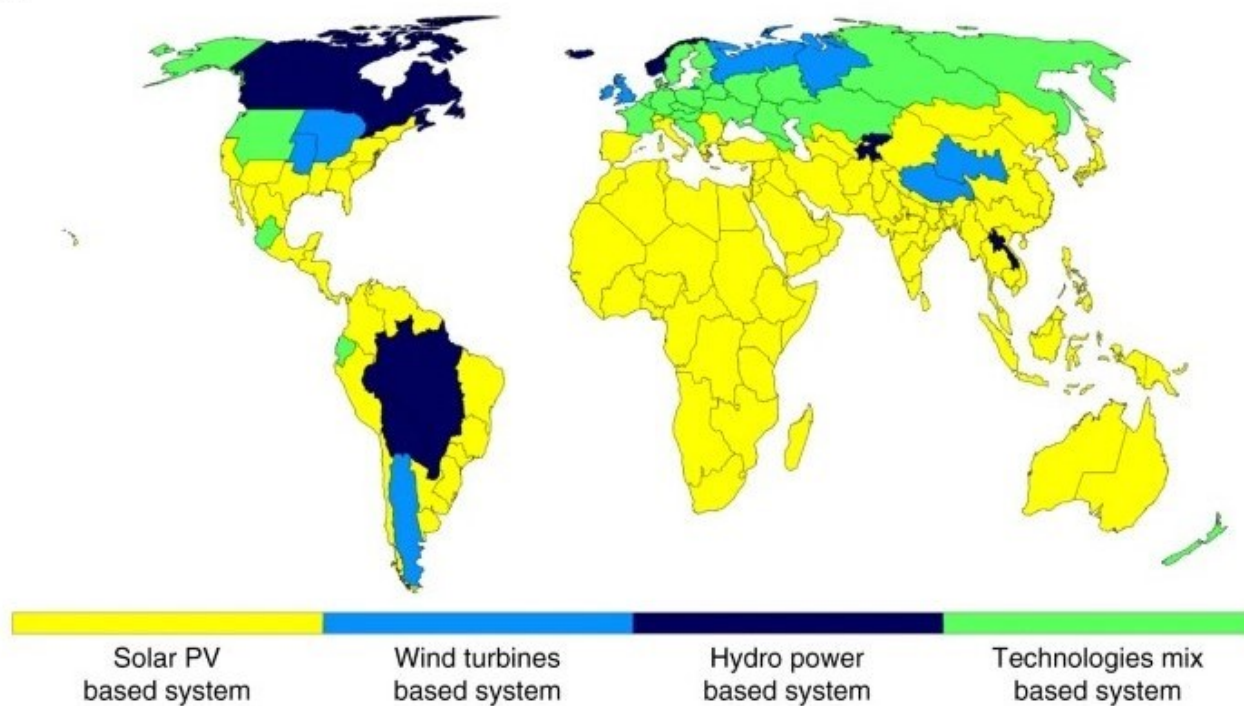
Suomessa aurinkokennojen hyötysuhdetta parantaa ympäristön matala lämpötila. Esimerkiksi Väli-meren eteläpuolella auringonsäteilyn määrä on jopa kaksinkertainen Suomeen verrattuna, mutta ympäristön lämpötila rasittaa paneeleja, lyhentäen käyttöikää ja hyötysuhde on matalampi. Suomen eteläosissa hehtaarin kokoinen aurinkovoimala alue (noin 1 MW), vastaa sähköenergian tuotantopotentiaaliltaan 330 hehtaarin metsää, jonka tuotto vuodessa on 10 m³/hehtaari. Auringon säteilyenergian muuttaminen paneelien avulla sähköksi, on 200–400 kertaa tehokkaampi menetelmä, kuin konversio biomassan avulla voimalaitosprosesseissa. Uusia rakennuksia- ja alueita suunniteltaessa, tulisi ottaa huomioon arkkitehtuurissa aurinkosähkö ja sen tuotanto, koska se on yksinkertaisin ja edullisin tapa tuottaa sähköä paikallisesti. (Kosonen & Breyer 2019)

Suomen aurinkosähkön tuotantomäärät ovat vielä suhteellisen vähäiset (635 MW, vuonna 2022), verrattuna Euroopan suurimpiin aurinkosähkön tuottajiin (vuonna 2021): Saksa 59,2 GW, Italia 22,6 GW, Espanja 18,5 GW, Ranska 14,3 GW ja Alankomaat 13,2 GW. (IEA 2022, s.15)

3.1.4 Sähkön tuotannon tulevaisuus

Aurinkosähkön tuotantokapasiteetin kaksinkertaistuminen maailmanlaajuisesti, on laskenut paneelien hintaa aina 20 prosenttia. Toisin sanottuna, kun kapasiteetti tuplaantuu, hinta laskee

viidenneksen. Hintojen voimakkaan alentumisen takia, aurinkosähkön tuotannosta on tullut edullisin sähköntuotantomuoto, lähes kaikkialla. Maailmanlaajuisesti aurinkosähkön tuotantomäärä on nyt yli 1 terawattia (maaliskuu 2022). 2 terawatin raja ylittyy seuraavan 3 vuoden kuluessa. Mallinnustuloksien perusteella (LUT Energy System Transition), uusiutuviin energialähteisiin perustuva, hiilineutraali sähköjärjestelmä olisi toteutettavissa vuoteen 2050 mennessä. Sähkön LCOE-tuotantokustannuksien (Levelized cost of energy) on laskettu olevan noin 52 euroa/MWh. Tämänhetkinen sähkön LCOE on noin 70 euroa/MWh. Sähkön tuotanto jakautuisi pääasiallisesti kolmeen eri tuotantomenetelmään, aurinko-, tuuli- ja vesivoimaan. Suomessa hyödynnettäisiin kaikkia näitä, kun esimerkiksi Norjan sähköntuotannon päämenetelmä olisi vesivoima. Kuvassa 13. havainnoidaan, millä uusiutuvalla energialähteellä sähkö alueella tuotetaan, vuonna 2050. Jos mikään kolmen (tuuli, vesi, aurinko) tuotantomenetelmän osuus ei ylitä 50 %, alue on väriltään vihreä, siellä siis hyödynnetään kaikkia kolmea tarjolla olevaa menetelmää. (Bogdanov, Dmitrii ym. 2019; Breyer, Christian 2019)



Kuva 14. Sähköntuotannon päätyypit 2050 (Radical transformation pathway towards sustainable electricity via evolutionary steps 2019)

3.1.5 Aurinkosähkön tuotannon hyödyt ja haitat

Aurinkoenergian positiivisena puolena voidaan pitää sitä, että se on rajaton ja uusiutuva, hiilidioksidon energialähde, se on laajennettavissa mökki- ja kotitalouskäytöstä, teollisen mittakaavan sähköntuotantoon. Pienetkin aurinkosähkökohteet voidaan varustaa akkujärjestelmällä, josta energiaa voidaan ottaa käyttöön suoraan omaan kotitalouskäyttöön, tai syöttää sähkö tarvittaessa sähköverkkoon. Aurinkopaneelit ovat myös lähes huoltovapaita. Suomalaisten mökkikäytössä on yhä yli 40 vuotta vanhoja aurinkopaneeleita. Suomessa yksittäiset paneelit päätyvät SER-jätteeksi, elektroniikkaromuna. Suomessa tavoitellaan aurinkopaneelien kierrätystasoksi 70 %, kun vastaavasti

Ranskassa, piipohjaisten aurinkopaneelien materiaalien kierrätettävyys on 95 %. (Fortum 2024; Rantaruoko, Taru 2022 s. 24,28)

Aurinkoenergian negatiivisiin puoliin kuuluu aurinkopaneelien valmistuksessa tarvittavien metallien ja materiaalien tuotanto ja riittävyys. Välillisesti, aurinkokennojen valmistus kuluttaa rajallisia resursseja. Aurinkoenergian tuotanto on riippuvainen valon määrästä ja rinnalle tarvitaankin säätövoimaa, esimerkiksi vesivoimaa. Teollisen mittakaavan aurinkoenergian tuotanto vaatii laajat maa-alueet itse paneelientälle, mutta myös sähköverkon rakentaminen vaatii oman tilansa. Yhdistämällä tuuli- ja aurinkovoimalat ja sähkövarastot yhtenäiseksi hybridivoimalaksi, voidaan maa-alueet ja rakennettu infra hyödyntää tehokkaammin. (Vaasan sähkö julkaisuaika tuntematon; Ilmatar Energy 2023)

3.2 Tuulivoima

3.2.1 Miten tuuli syntyy

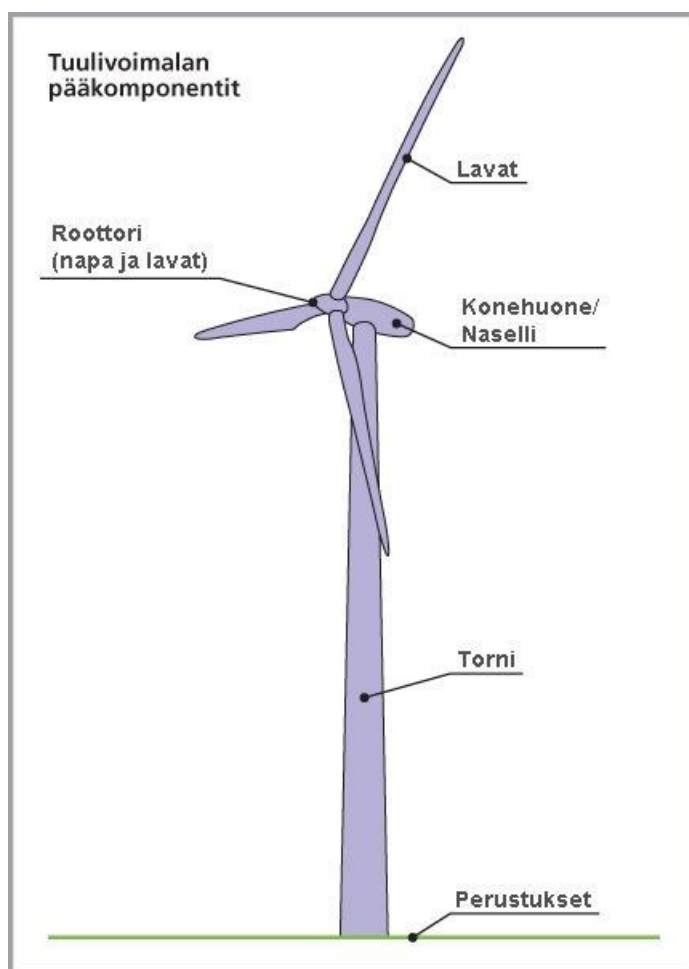
Aurinko lämmittää maapallon ilmakehää ja pintaa epätasaisesti. Tämän seurauksena syntyy lämpö- ja ilmanpaine-eroja. Maapallon pohjois- ja etelänavan alueella, kylmä ilma on raskaampaa, kuin päiväntasaajan alueen lämmin ilma. Ilmanpaine-erot pyrkivät tasautumaan ja tämän seurauksena, syntyy tuuli. Tuuli suuntautuu aina korkeapaineesta, matalapainetta kohti. Ja mitä suurempi paine-ero, sitä suurempi tuulen nopeus. Yleensä voimakkaimmat tuulet esiintyvät matalapaineen keskuksen reunamilla. Planetaariseen, eli koko maapalloa koskevaan tuulijärjestelmään vaikuttavat auringon lämpösäteily sekä maapallon pyörimisestä johtuva coriolis ilmiö, jonka seurauksena pohjoisella pallonpuoliskolla tuuli kiertää korkeapaineen aluetta myötäpäivään ja matalapaineen aluetta vastapäivään. Tilanne on päinvastainen eteläisellä pallonpuoliskolla. Paikallisesti esiintyviin tuuliin vaikuttavat maan pinnanmuodot, jotka jarruttavat tuulta, kitkan vaikutuksesta ja tuuleen tulee pyörteitä. Tuulisuuteen vaikuttaa myös vallitseva vuorokauden aika. Kun auringon säteilyn lämmittävä säteily illalla lakkaa, heikkotuulisena päivänä, tuuli tyyntyy. Suomessakin talven tullen, lämpötilaerot kasvavat ja siksi myös tuulet voimistuvat. Merialueilla, eniten myrskypäiviä esiintyy joulukuussa. (Mehtola, Johanna 2017; Takala, Petri 2012)

Suomen maa- ja merialueiden yleisin tuulensuunta on lounaistuuli ja harvinaisin tuulensuunta on itätuuli. Ilmastonmuutoksen vaikutuksesta, on arvioitu, että talven ja syksyn tuulet voimistuisivat 2–4 prosenttia. Lisäksi, jos Itämeren alueella jääpeite jatkossa kutistuu, meri pysyy sulana, niin tuulen nopeudet merenpinnan tasolla kasvavat. (Mehtola, Johanna 2017)

3.2.2 Tuulivoimaloiden rakenne

Tuulivoimalan tarkoitus on muuttaa tuulen liike-energia, mekaaniseksi energiaksi, eli akselin pyörimisenergiaksi. Tuuli liike-energia pyörittää lapoja, jotka ovat kiinni akselissa. Akseli on kytketty vaihdelaatikkoon, joka muuttaa pyörimisliikkeen nopeammaksi, generaattoria varten. Generaattori muuntaa pyörimisenergian sähköksi, joka johdetaan muuntajan kautta sähköverkkoon. Suurin osa nykyään valmistuvista tuulivoimaloista ovat vaaka-akselisia, kolmilapaisia ja roottori/konehuone kääntyy tuulen mukaan. Tuulivoimalan tuotto, riippuu lapojen pyyhkäisynta-alasta. Mitä pidemmät lavat, sitä isompi pyyhkäisynta-ala ja sitä enemmän tehoja. Roottorin pinta-ala on suhteellisen

pieni, pyyhkäisyypinta-alaan verrattuna, vain 2–3 %. Kolmilapainen roottori on muodostunut markkinoiden yleisimmäksi malliksi. Kaksilapainen roottori aiheuttaa koneistoon tärinää, johtuen massahäviövoimien eroista, pysty- ja vaaka-akselin suhteen. Jos lapoja olisi useampia, kustannukset nousevat, mutta tehot eivät nouse merkittävästi. (Motiva julkaisuaika tuntematon d, päivitetty 2023; Suomen tuulivoimayhdistys ry julkaisuaika tuntematon a; Suomen tuulivoimayhdistys ry julkaisuaika tuntematon b)



Kuva 15. Tuulivoimalan osat. (Motiva julkaisuaika tuntematon d, päivitetty 2023)

3.2.3 Tuulivoima Suomessa

Vuoden lopussa 2023, Suomessa oli toiminnassa 1601 tuulivoimalaa ja näistä valmistui vuoden 2023 aikana 212 kappaletta, joiden yhteenlaskettu teho on 1278 MW. Tuulivoimakapasiteetti vuoden 2023 lopussa oli 6946 MW. Suomeen on suunnitteilla yli 130 000 megawattia tuulivoimaa. Tämänlaajuinen hankemäärä tarkoittaa investointipotentiaalina yli 200 miljardin euron investointeja. Näistä maatuulihankkeiden osuus on 90 miljardia ja merituulihankkeiden yli 170 miljardia. Vuosien 2024–2025 aikana on Suomeen valmistumassa yli 3 miljardin edestä tuulivoimaa. Suomessa tuulivoimalat sijaitsevat pääasiallisesti maan länsiosassa. Tasaisemman tuotannon ja pienemmän hintojen vaihtelun varmistaisi tuulivoiman rakentamisen, myös maan itä- ja pohjoisosiin. Itä-Suomen alueelle ei ole tulossa korkeita tuulivoimaloita, koska ne häiritsevät puolustusvoimien tutkien toimintaa, luomalla

katvealueita. Tuulivoimakapasiteetin kasvuennuste ja Suomen tuulivoimapuistot on kuvattu liitteessä (liite3) (Mikkonen, Anni & Kangasniemi 2024; Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2023)

Suomessa asennettujen tuulivoimaloiden keskimääräinen teho on noussut viimeisen 10 vuoden aikana kolmesta megawattista, kuuteen megawattiin. Samalla voimaloiden keskimääräinen napakorkeus on kasvanut noin 125 metristä, 145 metriin ja roottoreiden keskimääräinen halkaisija 120 metristä, 163 metriin. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2023)

3.2.4 Tuulivoimala tuotannossa

Tuulivoimala tarvitsee käynnistyäkseen noin 3 m/s tuulen. Tuulivoimalan teho kasvaa nopeasti, tuulen nopeuden kasvaessa. Tuulen nopeuden kaksinkertaistuessa, tuulen energiasisältö kahdeksankertaistuu. Kun tuulennopeus on noin 10–15 metriä sekunnissa, tuulivoimalat saavuttavat nimellistehonsa. Tuulennopeuden ollessa 15–25 metriä sekunnissa, tehoa voidaan joutua rajoittamaan. Laittevaurioiden välttämiseksi automaatio pysäyttää laitoksen tuulen nopeuden ylittäessä 25–30 metriä sekunnissa. Tuulennopeuden lisäksi, voimalan tehoon vaikuttavat ilman lämpötila ja voimalan sijoituspäikan korkeus. Talvella ilma on kylmempää ja näin ollen tiheämpää ja painavampaa. Esimerkiksi -25°C pakkasella, tuulen energiasisältö on 25 %:a korkeampi, kuin +35°C helteellä, vaikka tuulennopeus olisi sama. Tuulivoimalat on automatisoitu niin, että vain huollot ja vikakorjaukset vaativat käytettäväksi työvoimaa. Tuulivoimaloiden käyttöikäni määritellään yleensä 25–30 vuotta. (Motiva julkaisuaika tuntematon d, päivitetty 2023; Eklund, Esa 2011; Koskinen, Ossi 2023)

Air Temperature in Celsius	Air Density (kg/m ³)	Energy (Watts) per m ²
-25	1,423	364
10	1,247	319
35	1,146	293

Kuva 16. Ilman tiheyden vaikutus tuulen energiamäärään (Koskinen, Ossi VAMK 2023)

3.3 Energiamarkkinat ja uusiutuvan energian hankinta

3.3.1 Sähkötmarkkinat

Vuonna 1995 tuli voimaan sähkömarkkinalaki, joka avasi asteittain Suomen sähkömarkkinat kilpailulle. Sähkön myynti ja tuotanto erotettiin sähkön jakelusta ja siirrosta, joiden liiketoiminta on toimilupaperustainen. Vuodesta 1998, myös kotitalouksien on ollut mahdollista kilpailuttaa sähkömyyjänsä. Markkinalain perimmäinen ajatus oli, että kuluttajien valinnanvapaus lisäisi kilpailua ja tämä laskisi sähköenergian hintaa. Sähkön siirtoa ja jakelua ei voi kilpailuttaa, koska kuluttaja ei hyötyisi useamman rinnakkaisen sähköverkon rakentamisesta. Vähittäismyyjiä on Suomessa tällä hetkellä

noin 75 kappaletta. Nykyisten sähkömarkkinoiden ansiosta, myös kotitaloudet voivat toimia sähkön tuottajina ja myyjinä. (Työ- ja elinkeinoministeriö julkaisuaika tuntematon; Vattenfall 2020)

Sähkömarkkinat ovat markkinapaikkoja, joilla sähkön tuottajat, kuluttajat ja sähköverkot toimivat. Sähkön hinnat, jotka markkinoilla muodostuvat, ohjaavat markkinoilla toimijoiden sähkön kulutus- ja tuotantopäätöksiä lyhyellä- ja investointeja pitkällä aikavälillä. Tärkeimpänä sähkömarkkinapaikoista pidetään vuorokausimarkkinoita. Vuorokausimarkkinoista käytetään nimenä myös day-ahead ja tukkusähkömarkkinat. Tukkusähkömarkkinoiden tarkoituksena on tarjota kustannustehokkaasti tuotettua sähköä, kaikille markkinoille osallistuville alueille. Vuorokausi- eli tukkusähkömarkkinoiden sähkön hinnasta käytetään termiä pörssisähkön hinta. (Fingrid julkaisuaika tuntematon c)

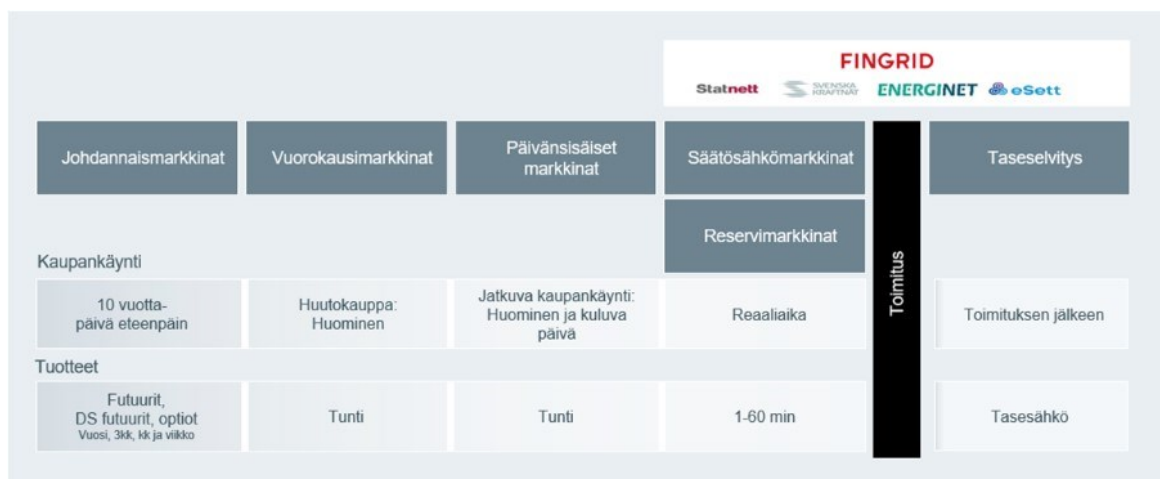
Pohjoismaissa on tukkumarkkinoiden lisäksi omat sähkön vähittäismarkkinat. Sähkönmyyntiyhtiöt myyvät vähittäismarkkinoilla tukkumarkkinoilta ostamaansa tai itse tuottamaansa sähköä asiakkailleen. Myyjien on mahdollista tarjota useita erilaisia sähkönmyyntisopimuksia, asiakkailleen. Kiinteähintaisessa sähkösopimuksessa, sähkön hinta on tietyn suuruinen koko sopimuksen ajan, eikä tukkumarkkinahinnalla ole siihen vaikutusta. Vastaavasti pörssisähkösopimuksessa, kuluttaja maksaa kuluttamastaan sähköstään tukkumarkkinahinnan ja sen lisäksi myyjän määrittelemän välitysmaksun. (Fingrid julkaisuaika tuntematon c)

Tukkumarkkinoihin kuuluvat myös päivänsisäiset-, reservi- ja johdannaismarkkinat. Vuorokausimarkkinoiden jälkeen käynnistetään sähkön myyjien ja tuottajien välinen vuorokauden sisäinen, jatkuva-aikaisesti toimiva kaupankäynti. Päivänsisäisillä markkinoilla, voivat kuluttajat, jälleenmyyjät ja suuret sähkön tuottajat tasata sähkötasettaan lähemmäs käyttöhetkeä, tuotanto- ja kulutusennusteiden tarkentuessa. Suomessa tämä on mahdollista käyttötunnin alkuun asti. Päivänsisäistä markkinapaikkaa ylläpitävät EPEX Spot ja Nord Pool. (Fingrid julkaisuaika tuntematon c; d)

Säätösähkömarkkinat ovat pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden ja Fingridin ylläpitämiä säätöenergiamarkkinoita, mFRR (manual Frequency Restoration Reserves). Fingridin vastuulla on varmistaa, että sillä on käytössään tarvittava määrä säätökykyistä kapasiteettia sähkön kulutuksen ja tuotannon välisen tasapainon ylläpitoon. Säätösähkötarjoukset on jätettävä vähintään 45 minuuttia ennen tarjous kohteen käyttötuntia. (Fingrid julkaisuaika tuntematon d)

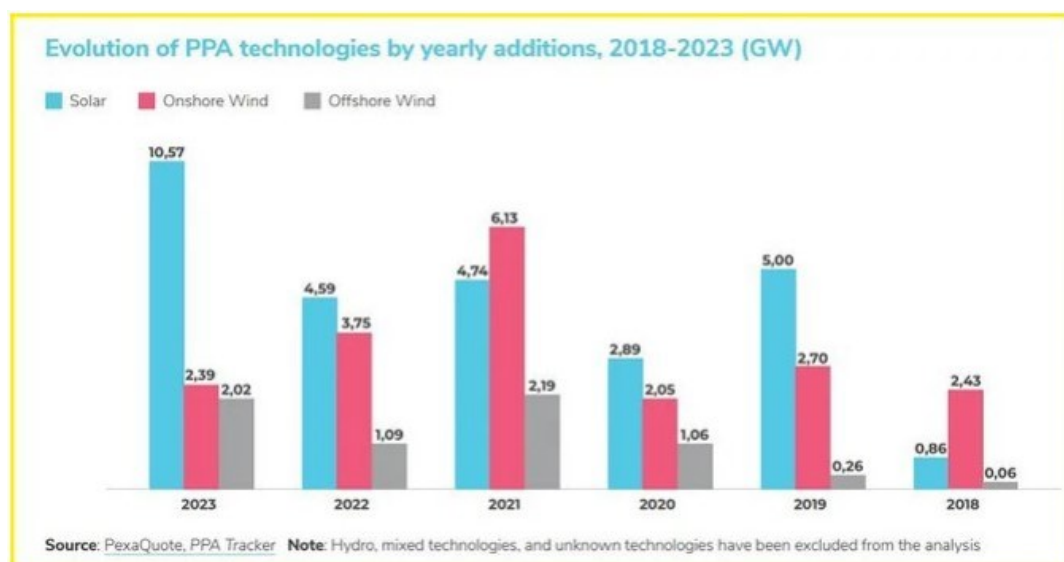
Fingridin reservimarkkinoihin kuuluu myös nopea taajuusreservi (FFR), taajuudenvakautusreservit (FCR-N ja FCR-D), automaattinen taajuudenpalautusreservi (aFFR) ja säätökapasiteetti (mFRR kapasiteetti). Näiden lisäksi Fingridillä on käytössään nopeaa häiriöreserviä varten varavoimallaitoksia sekä pitkäaikaisilla käyttöoikeussopimuksilla hankittuja varavoimallaitoksia. Tehoreservijärjestelmän tarkoituksena on turvata Suomen sähköjärjestelmä, jos suunnitelmien mukainen sähkön hankinta ei kata ennakoitua sähkön kulutusta. (Fingrid julkaisuaika tuntematon d)

Johdannaismarkkinoilla voivat sähkön kuluttajat ja tuottajat käydä kauppaa sähköstä, vaikka useita vuosia eteenpäin. Johdannaissopimukseen perustuvilla kiinteähintaisilla sähkösopimuksilla, sähkön myyjät ja ostajat saavat varmistettua koko sopimuskauden ajaksi, taloudellisesti kannattavan ja itselleen sopivan sähkön hinnan. (Fingrid julkaisuaika tuntematon c)



Kuva 17. Sähkötömarkkinoiden rakenne ja markkinapaikat (Fingrid julkaisuaika tuntematon d)

Pitkäaikaisesta sähkönostosopimuksesta, käytetään nimitystä PPA-sopimus (power purchase agreement). Sopimus tehdään tyypillisesti silloin, kun runsaasti sähköä käyttävä, tai pienemmät sähkökuluttajat ostavat joukolla, sovitun määrän sähköä sopimuksen mukaiseen hintaan, 10–20 vuoden ajan. Hinnoittelutyyppinä ovat esimerkiksi: kiinteä hinta euroa/MWh, indeksiin sidottu hinta tai ns. hintaputki, jossa on määriteltynä sähkön hinnan ylä- ja alarajat. Uusiutuvan energian PPA-sopimusten määrät on lähteneet Pohjoismaissa voimakkaaseen kasvuun vuoden 2010 jälkeen. Sopimuksia tehdään tuuli- ja aurinkovoimatuotannoista. Suomessa tuulivoimatuotannoista tehdään määrällisesti enemmän PPA-sopimuksia. Euroopan alueella, vuonna 2023 ylivoimaisesti eniten PPA-sopimuksia tehtiin aurinkovoimatuotannosta (kuva 16). Ostajien näkökulmasta, kiinnostavuus PPA-sopimukseen on kasvanut, tavoitteena päästöjen vähentäminen ja selkeästi kustannussyistä. Kun uusiutuvan energian tuotantokustannukset ovat laskussa ja tuotannon tukijärjestelmät poistumassa, sekä rahoituskustannusten laskeminen on tarpeen, kiinnostus PPA-sopimukseen kasvaa sähköntuottajien näkökulmasta. Suomen ensimmäinen tuulivoimantuotantoa koskeva PPA-sopimus tehtiin kesällä 2018. (Suomen tuulivoimayhdistys ry julkaisuaika tuntematon c; Balkan Green Energy News 30.1.2024; Koskinen, Ossi Vaasan VAMK opetusmateriaali 2023)



Kuva 18. PPA-sopimusten kehitys 2018–2023 (GW) (Balkan Green Energy News 30.1.2024)

Sähkön alkuperätakuu (GOO) on sertifikaatti, jolla todistetaan, että markkinoilla oleva sähkö on tuotettu uusiutuvaa energiaa hyödyntäen. Takuiden käytön perustana on laki (1050/2021) ja valtioneuvoston asetus (1081/2021) sähköenergian alkuperätakuista. EU:n RED II direktiivin tavoitteena on uusiutuvan energian käytön edistäminen ja juuri tätä alkuperätakuulaki todentaa. Ainoa menetelmä, jolla varmennetaan, että sähkö on tuotettu ydinvoimalla tai uusiutuvista energialähteistä on sähkön alkuperätakuu. Suomessa alkuperätakuurekisteriä ylläpitää Finextra Oy, joka on Fingridin omistama yhtiö. Lain noudattamista valvoo Energiavirasto. Alkuperätakuuta myönnetään myös uusiutuvalla kaasulla, uusiutuvilla energialähteillä tuotetuille vedylle, lämmölle, jäähdytykselle ja hukkalämmölle ja hukkakylmälle. (Energiavirasto julkaisuaika tuntematon; Lumme Energia julkaisuaika tuntematon)

3.3.2 Sähkönjakeluverkko

Suomen sähköverkko on kolmiosainen. Siihen kuuluvat kantaverkko, jota kehittää ja valvoo Fingrid Oyj, suurjännitteiset jakeluverkot ja jakeluverkot. Suuret voimalaitokset, tehtaot ja jakeluverkot ovat liitettynä kantaverkkoon, joka on koko maan kattava suurjänniteverkko, jossa on voimajohtoa yli 14 000 km ja sähköasemia yli 120 kappaletta (Fingrid 2023). Kuluttajille sähkö siirretään alueellisten ja paikallisten verkkojen, eli jakeluverkon kautta, johon on liitettynä myös voimalaitoksia. Vajaa 80 sähköverkkoyhtiötä ylläpitää ja huoltaa jakeluverkoja. Jakeluverkon ja kantaverkon välissä toimii hiukan alle 10 suurjännitejakeluverkkoa. Jakeluverkon jännitetasot ovat 0,4–110 kilovolttia. (Energiateollisuus julkaisuaika tuntematon; Vattenfall 2020; Fingrid julkaisuaika tuntematon a)

Suurimmat jakeluverkkoyhtiöt Suomessa ovat Elenia Verkko Oyj, Caruna Oy ja Helen Sähköverkko Oy. Viisitoista suurinta sähkönjakeluverkkoyhtiötä Suomessa, kattavat jakeluverkoista, sähkön käyttäjistä ja yhtiöiden liikevaihdosta noin 70 prosenttia. Pienimmät sähköverkkoyhtiöt toimivat yhden kunnan alueella ja asiakkaina on muutama tuhat asiakasta. Suurin osa jakeluverkkoyhtiöistä on kunnan tai kuntaenemmistöisen osakeyhtiön omistamia. Sähköverkkoyhtiön vastuulla on sähkön siirto ja sähkön kulutuksen mittaus. (Energiateollisuus julkaisuaika tuntematon a; Vattenfall 2020)

Pohjoismaiden sähkömarkkinoiden perustana on sähkönsiirtojärjestelmä, johon kuuluu kantaverkot ja niiden väliset yhteydet. Suomen kantaverkon lisäksi, Fingrid omistaa kaikki Suomen yhteydet muihin Pohjoismaihin ja Viroon. Suomen sähköjärjestelmän tekninen toimivuus ja käyttövarmuus on Fingridin vastuulla. Sähkön kulutus ja tuotanto täytyy olla tasapainossa ja sähköverkon taajuuden on pysyttävä 50 Hz:n tasolla. Taajuuden sallittu vaihteluväli on 49,9–50,1 Hz. Jos taajuus laskee, on kulutus tuotantoa suurempi. Vastaavasti taajuus nousee, jos tuotanto on suurempi kuin kulutus. (Fingrid julkaisuaika tuntematon b)

Kulutuksen ja tuotannon tasapainoa Fingrid ylläpitää säätötarjouksien ja varaamiensa reservien avulla. Reserveihin kuuluu tuotantolaitoksen tai kulutusyksikön vapaa säätökykyinen pätötehotekapasiiteetti. Fingridin käytössä on erilaisia reservituotteita, jotka reagoivat eri aikatasoilla tuotantoon ja kulutukseen. Suomessa on käytössä, reservien lisäksi, tehoreservijärjestelmä. Jos suunniteltu sähkön hankinta ei riitä kattamaan aiemmin ennustettua sähkönkulutusta, otetaan käyttöön tehoreservit, joita voivat olla joustoon kykeneviä sähkön kulutuskohteita tai voimalaitoksia. Voimalaitokset, jotka on valittu tehoreserviin, eivät voi osallistua kaupallisille markkinoille. (Fingrid julkaisuaika tuntematon b)

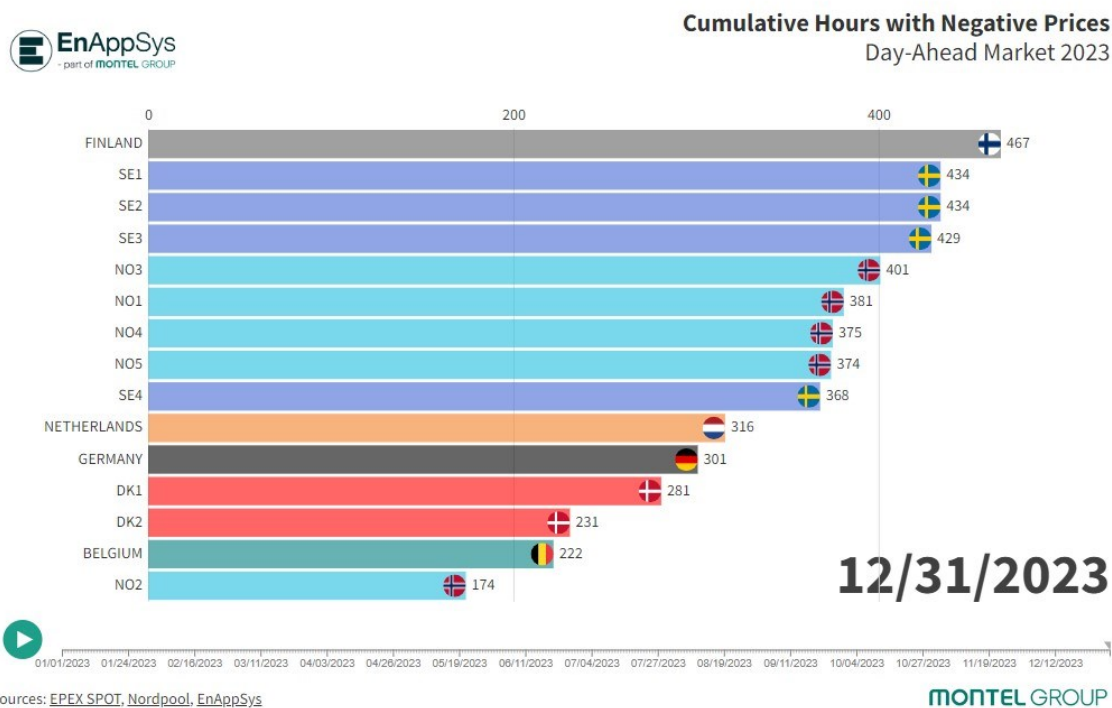
4 VETYTALOUS JA YMPÄRISTÖ

4.1 Liiketoimintamallit ja lainsäädäntö

Vihreän vedyn tuotantoon elektrolyysin avulla on kolme eri toimintaperiaatetta. Korkeimman laitteiston käyttöasteen saa käyttämällä verkkosähköä, eli tällöin laitteiston huipunkäyttöaika on suuri. Verkkosähkön käytöllä on kuitenkin yksi heikkous. EU ei anna virallista hyväksyntää alkuperätakuiden (aurinko- ja tuulisähkötuotanto) käytöstä vihreän vedyn tuotannossa. Vedyn tuottaja voi kuitenkin tehdä, sopimuksen sähkönmyyjän kanssa 100-prosenttisen tuuli- tai aurinkosähkön ostamisesta, joka perustuu sähkön alkuperätakuisiin (GOO). (Koskinen, Ossi 2022)

Toinen vaihtoehto vedyn tuotannossa, on tuottaa sähkö paikallisesti aurinko-, tuulivoiman tai näiden yhdistelmän, hybridivoimalan avulla. Näin toimimalla, vältetään sähkön siirtomaksut ja niiden liitännäismaksut, kuten verot ja huoltovarmuusmaksu. Tässä toimintamallissa mahdolliseksi haasteeksi tulee elektrolyysilaitteiston alhainen huipunkäyttöaika, johtuen alati vaihtelevista sääolosuhteista. Toinen haaste on, miten valittu elektrolyysilaitteisto sietää vaihtelevaa sähkön tuotantoa. Yleisesti onkin tiedossa, että PEM-elektrolyysi, sietää paremmin muuttuvaa tuotantoa, sekä ylös ja alas ajoja, kuin AEL-elektrolyysi. (Koskinen, Ossi 2022)

Kolmantena tuotantomallina on usein esitetty vihreän vedyn tuottamista nollahintaisella, ylijäämä sähköllä. Eli sähkön tuotantomäärät olisivat reilusti kulutusta suuremmat. Suomeen on suunnitteilla suuret määrät aurinko- ja tuulivoimaloita, mutta ongelmaksi voi tulla sähköverkon tekniset rajoitteet. Meri- ja maatuulivoimahankkeita on tällä hetkellä suunnitteilla Suomeen yli 134 000 MW ja aurinkovoimalahankkeita yli 9500 MW. Vuonna 2023, Suomessa negatiivisia sähkötuntihintoja oli yhteensä 467 kappaletta, joka oli suurin määrä Euroopassa. Kasvu on ollut nopeaa, koska vuonna 2022 negatiivisia tunteja oli vain 27 kappaletta. Myös sähkön tukkuhinta oli Suomessa 2023 halpaa, verrattuna muihin Euroopan maihin. Suomessa keskimääräinen sähkön tukkuhinta oli vuonna 2023, 56 euroa/MWh. (Koskinen, Ossi 2022; Energiategollisuus 2024)



Kuva 19. Tukkusähkön negatiiviset tuntihinnat 2023. (Flourish: European Cumulative Negative Prices 2023)

4.2 Suomen vetystrategia

Suomen hallituksen, kesällä 2022 laatimassa Ilmasto- ja energiastrategian vetyosiossa on kirjattuna, että Suomesta on tavoitteena luoda kilpailukykyinen ja ennakoitava investointiympäristö vetytaloudelle. Vedyn tarjoama mahdollisuus nopeuttaa Suomen vihreää siirtymää ja vetytalouteen liittyvä teknologiavienti luo edellytykset merkittäviin päästövähennyksiin maailmanlaajuisesti. Tavoitteisiin kuuluu myös johtava asema Euroopassa vetytalouden arvoketjuissa ja markkinaolosuhteiden kehittyessä, on Suomella edellytyksiä tuottaa EU:n päästöttömästä vedystä vähintään 10 prosenttia jo vuonna 2030. Puhdasta vetyä ja sähköpolttoaineita valmistetaan kotimaan tarpeisiin teollisuudelle, energijärjestelmille ja varmistetaan korkean jalostusasteen ventiliiketoiminnan kasvaminen. Irtautuminen ulkomaisista fossiilisista polttoaineista on mahdollista jalostusarvon kasvattamisen myötä. Investoinnit siirtoverkkoihin, ulkomaanyhteyksiin ja tarpeeksi suuri päästöttömän sähkön tuotanto, ovat edellytyksenä Suomen kehittymiselle vihreän vedyn ja sähköpolttoaineiden vientimaaksi. (Valtioneuvosto 2023)

Tuotantokapasiteetin lisäämisen, siirtoverkon rakentamisen ja jalostusasteen nostamisen lisäksi tarvitaan seuraavan 10–20 vuoden aikana suuria investointeja vedyn tuotannon ja sen jatkojalosteiden, kuten metaanin, metanolin ja ammoniakkin tuottamiseksi. Investointien suuruus tulee olemaan kymmeniä miljardeja euroja. Sähkön siirron lisäksi on tehtävä investointeja vedyn siirtoverkkoon ja varastointiin ja varmistettava tuotannon sivutuotteiden, kuten lämmön ja hapen tehokas hyödyntäminen. Julkisilla toimilla vauhditetaan vedyn hyödyntämistä teollisuudessa, liikenteessä ja energiaverkkojen tasapainotuksessa. Taloudellisia kannustimia käytetään investointien käynnistykseen ja huolehditaan osaavan työvoimatarpeen saatavuudesta. Turvallisuus on varmistettava, otettaessa käyttöön uusia vetyteknologian tuotteita. Ennakointi ja turvallisuussäätelyn uudistus, tukevat laitteistojen kehitystyötä ja tuovat säästöjä kustannusten osalta, sekä vähentävät onnettomuusriskejä.

Hankkeiden toteutumisen edellytyksenä on maankäytön suunnittelun ja lupamenettelyjen sujuvuuden kehittäminen kohti yhtenäistä mallia, koko valtakunnan tasolla. (Valtioneuvosto 2023)

Jos Suomen nykyinen vedyn tuotanto perustuisi kokonaan vihreään vetyyn, tarvittaisiin noin 1–1,4 GW elektrolyyserikapasiteetti ja lähes 8 TWh sähköä, mikä vastaa yli 11 prosenttia Suomen nykyisestä sähköntuotannosta. Tämä on melko paljon verrattuna Suomen sähköntuotantoon, mutta uusiutuvan energian tuotantokapasiteetin arvioidaan kuitenkin kasvavan voimakkaasti seuraavina vuosina Suomessa, ja vetytalouden edellytyksenä onkin riittävä uusiutuvan energian saatavuus. (Fimpec 2023)

Suunniteltujen vihreän vedyn hankkeiden kapasiteetti on jo lähellä tavoitteita. Suomen vetystrategiassa on tavoitteena tuottaa 10 prosenttia EU:n vihreästä vedystä eli miljoona tonnia vuodessa vuoteen 2030 mennessä. Tämä edellyttää noin 6–9 GW elektrolyyserikapasiteettia Suomessa ja 60–90 GW koko EU:n tasolla. Kesäkuuhun 2023 mennessä Suomessa julkistetut vihreän vedyn investointisuunnitelmat ovat noin 7,5 GW ja hankkeet suurimmaksi osaksi liittyvät teolliseen käyttöön, metaaniin ja muihin hiilipohjaisiin sähköpolttoaineisiin sekä ammoniakkiin. Monet julkistetuista vihreän vedyn hankkeista ovat kuitenkin vielä alustavia tai selvitysvaiheessa. (Fimpec 2023)

4.3 Vedyn vaikutukset ympäristöön

Alailmakehässä (troposfääri) vety reagoi hydroksyyli-radikaalien kanssa, jotka normaalisti reagoivat metaanin kanssa. Vedyn ja metaanin hapettuminen alailmakehässä voi johtaa otsonin muodostumiseen. Alailmakehässä otsoni on kasvihuonekaasu, mutta yläilmakehässä se suojaa maapallon pintaa uv-säteiltä. Stratosfäärissä vedyn ja metaanin hapettuminen, aiheuttaa vesihöyryn lisääntymistä. Toinen haittatekijä vedyn reagoidessa hydroksyyli-radikaalien kanssa on se, kun reaktiotuotteena syntyvä protoni (H) reagoi ilmakehässä olevan hapen (O₂) kanssa. Tästä muodostuu peroksidiradikaali (HO₂) joka vastaavasti vaikuttaa typpioksidin (NO_x) määrän kasvuun. Vety ei ole suoranainen kasvihuonekaasu, mutta sen reaktiot (16) hydroksyyli-radikaalien kanssa vähentää metaanin (17) hajoamista, lisää ilmakehän vesihöyryn määrää ja osallistuu alailmakehässä otsonin muodostumiseen ja näin aiheuttaa ilmaston lämpenemistä. Voidaan sanoa siis, että vety on epäsuorasti kasvihuonekaasu. Arviot vedyn vuotomäärästä, maailmanlaajuisesti ovat 1–10 prosenttia kaikesta tuotannosta. Vedyn 100 vuoden ilmastonlämpenemispotentiaaliksi (GWP 100a) on arvioitu 12±6. Vuotomäärän mukaan, arvioidaan vaikutuksen olevan 0,4–4 prosenttia nykyisiä CO₂ päästöistä. (Warwick, Archibald, Griffiths, Keeble, O'Connor, Pyle & Shine 2023)



5 VEDYN KULJETUS JA VARASTOINTI

5.1 Vedyn puhdistus

Käytettäessä vetyä polttoaineena ja jatkojalosteiden raaka-aineena, täytyy se kuivata ja puhdistaa, jotta se ei aiheutuisi ei toivottuja reaktioita varastoinnissa, polttokennossa tai jatkojalosteprosesseissa. Vedyn mahdollisia epäpuhtauksia ja suurimpia sallittuja pitoisuuksia on listattuna standardissa ISO 14687, Hydrogen fuel quality. Vetykaasun puhdistusprosessissa kaasusta poistetaan esimerkiksi happea, typpeä ja vettä. Polttokennokäytössä typpi, happi ja vesihöyry vaikuttavat polttokennon toimintaan haitallisesti, aiheuttaen hapettumista ja tehon alenemista. Varastoitaessa vetyä, täytyy vesi/vesihöyry saada poistettua, koska vedessä voi olla liuenneita ioneja, jotka aiheuttavat korroosiota varastosäiliön metalliosiin. Vesi aiheuttaa myös jäätymisongelmia laitteistoihin. Vesipitoisuuden raja vetykaasussa on alle 5 ppm. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2023; Åhman, Emil 2022)

Vedyn kuivaus voidaan tehdä kaasu-neste-erottimella (knock-out drum) joka yleensä on varustettu myös jäädyttimellä. Tämä menetelmä antaa vetykaasun puhtausasteeksi yli 99 prosenttia. Puhdistusastetta saadaan tästäkin nostettua, jos kuivauksen jälkeen käytetään molekyyliseulaa (molecular sieve), jossa vedyn epäpuhtaudet adsorptoituvat seulan sisältämiin alkalialumiinisilikaatti pelleteihin. (Molecular Sieve Desiccants 2024; Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024; Åhman, Emil 2022)

Kolme yleisintä vedynpuhdistus menetelmää ovat painevaihteluadsorptio (PSA, Pressure Swing Adsorption), membraanierotus, ja kryogeeninen tislauks. Painevaihteluabsorptio on näistä yleisin menetelmä. Samalla menetelmällä voidaan puhdistaa vedyn lisäksi myös metaania, hiilidioksidia, typpiä ja happea. PSA-prosessin suosio johtuu prosessin yksinkertaisuudesta ja alhaisista käyttökustannuksista. Membraanierotuksessa vety puhdistetaan tyypillisesti palladiumkalvon lävitse. Vain vety läpäisee membraanikalvon, paine-eron vaikutuksesta, epäpuhtauksien jäädessä kalvon pinnalle. Kryogeeninen puhdistus suoritetaan tislaukskolonnissa, jossa vetykaasusta erotellaan epäpuhtaudet, niiden kiehumispisteen perusteella. Puhdistuksessa hyödynnetään alhaisia lämpötiloja sekä korkeaa painetta. Hiilidioksidi (CO₂) nesteytyy -56,6 °C, normaalissa ilmanpaineessa, mutta happi (O₂) ja typpi (N₂) voivat laskea hiilidioksidin nesteytymislämpötilan jopa -80 °C:n. Jäähdytykseen käytettävää energian kulutusta, voidaan laskea, nostamalla järjestelmän painetta. (Linde Group 2024; Turvallisuus- ja Kemikaalivirasto 2024; Åhman, Emil 2022)

5.2 Vedyn varastointi kaasuna ja nesteenä

Vetyä voidaan varastoida kaasuna tai nesteenä. Kehitteillä on myös kylmäkompressoitu vety (CCH₂) ja lähes kiinteä vety (slush hydrogen SH₂). Myös vedyn varastointia kiinteisiin, kuten metallihydrideihin ja hiilipohjaisiin sorbentteihin, on kehitteillä. Vetyä voidaan varastoida myös tekemällä siitä syntettistä jatkojalostetta, esimerkiksi metaania, metanolia tai ammoniakkaa. Yleisin käytössä oleva varastointimenetelmä on paineistettu vety (CGH₂, Compressed Gaseous H₂) ja tyypillisesti varastointi paineena käytetään 350 bar(g) tai 700 bar(g). Menetelmä on halvin ja yksinkertainen, mutta haasteen tuo korkean paineen lisäksi varsin matala varastointitiheys sekä säiliön täytön aikainen lämmönhallinta. Mitä suurempi on varastointipaine, sitä suuremman riskin se tuo turvallisuustekijöihin. Esimerkiksi varoalueet kasvavat nopeasti, mitä suurempi paine on. Varastosäiliön rakenne on

yleensä kolmikerroksinen. Sisäpinta voi olla metallinen, kestumuovinen tai pinnoitetusta komposiittimateriaalista. Välikerros on paineen kestävä ja toimii usein lämpöeristeenä. Ulommainen kerros voi olla metalli- tai hiilikuidusta valmistettu.

Nesteytetyn vedyn (LH₂) energiatiheys on huomattavasti parempi, kuin kaasumaisen vedyn. Vety(kaasu) 0,09 kg/m³ (20°C atm) ja nestevety 70,8 kg/m³ (-253°C). Etuna on myös nestevedyn matala varastointipaine, jonka ansiosta nestesäiliö voidaan muotoilla vapaammin ja sijoitus on helppompaa. Tyypillinen varastointipaine on alle 5 bar(g). Huonoina puolina voidaan pitää nesteytykseen tarvittavaa energiamäärää, säiliön rakennemateriaalien erityisvaatimuksia ja vedyn boil-off, eli höyrystymisilmiö, joka vaatii jatkuvan uudelleen paineistuksen, jäähdytyksen ja kierrätyksen takaisin säiliöön. Vaihtoehtoisesti, boil-off kaasu voidaan käyttää suoraan polttokennossa, paineistaa kaasuna säiliöön, polttaa (poltto)moottorissa tai kaasuturbiinissa. Joissain tapauksissa, kaasu voidaan vapauttaa suoraan ulkoilmaan, mutta tätä ei voida suositella, koska vapautunut vety aiheuttaa epäsuorasti ilmaston lämpenemistä. (Warwick, Archibald, Griffiths, Keeble, O'Connor, Pyle & Shine 2023; Turvallisuus- ja Kemikaalivirasto 2024)

5.3 Putkilogistiikka

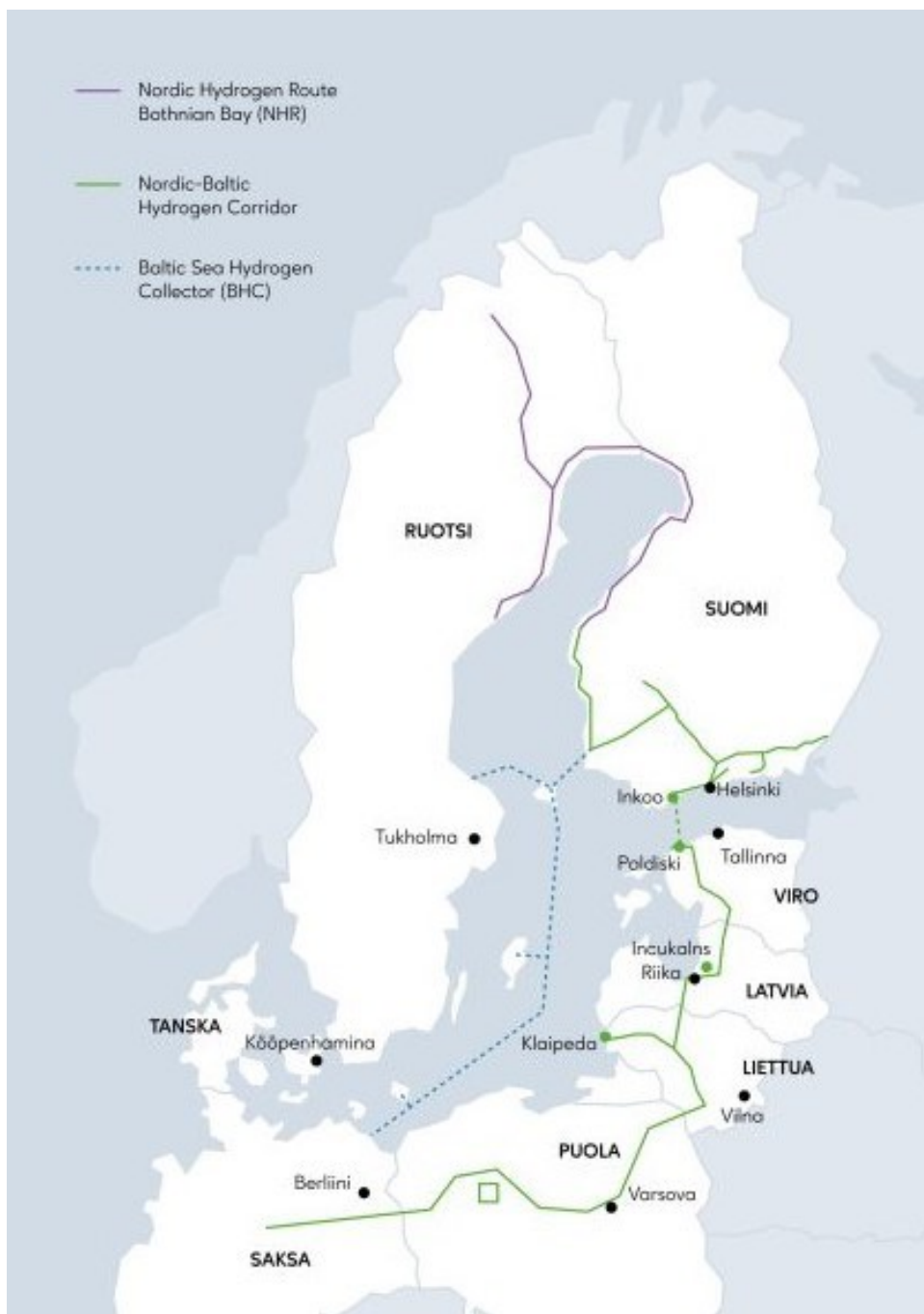
Suurien vetymäärien kuljettaminen putkia pitkin on kustannustehokkain keino. Pienien määrien siirto voidaan suorittaa juna- ja rekkakuljetuksin. Siirtolinjan turvallisuutta ja ympäristöystävällisyyttä lisää, jos putkisto sijoitetaan maan alle. Siirtoputkiston paine on yleensä kahdesta baarista kymmeneen baareihin, putkiston koosta ja sijainnista riippuen. Nopea ja kustannustehokas keino vedynsiirtoon, on ottaa käyttöön olemassa olevat maakaasuputkistot. Vetyä voidaan sekoittaa maakaasun joukkoon 5–15 prosenttia, ilman merkittäviä ongelmia loppukäyttäjien laitteistoissa. Vedyn erottelu muista kaasuista aiheuttaa lisäkustannuksia, joten isommilla määrillä on energiatehokkaampaa siirtää vain puhdasta vetyä omassa putkessa. Vedyn siirtoputkistoissa on vältettävä liian lujien teräslaadujen käyttöä, koska ne ovat alttiimpia vetyhauraudelle. ASTM:n (American Society of Testing and Materials) luokituksen mukaan teräkset, joiden myötöraja on alueella 200–580 MPa eivät ole herkkiä vetyhauraudelle. Soveliaiksi teräslaaduksi on luokiteltu yleisimmin Euroopassa käytetyt maakaasun siirtoputkistossa käytetyt teräslaadut SFS-EN ISO 3183 L360 ja API 5 L Grade X52. Tunnetuin ja käytetyin vetyputkistoihin liittyvä standardi on ASME B31.12–2019, Hydrogen Piping and Pipelines. Putken sisäpinta voidaan myös pinnoittaa, jolloin vedyn pääsy teräkseen estyy. Hyviä pinnoitemateriaaleja ovat molybdeeni, kromi, nikkeli, tina ja titaanioksidi. Liitteistä (liite1), löytyvät vedyn kanssa yhteensopivat materiaalit. (Paanu 2023; Laitinen 2013)



Kuva 20. Suomen kaasun siirtoverkosto 2024. Copyright Gasgrid Finland Oy 2024

Suomen korkeapaineinen kaasun siirtoverkosto on 1150 km pitkä ja putkisto on suurimmalta osin polyeteenimuovilla päällystettyä teräsputkea. Kaasuputkisto on suojattu pinnoitteen lisäksi katodisella suojausjärjestelmällä. Korkeapaineisen putkiston lisäksi verkkoon kuuluu matalapaineista putkea 60 km. Kaasuverkostossa virtaa maakaasua, nesteytettyä maakaasua (LNG) ja biokaasua. Putkiston koko vaihtelee välillä DN100 ja DN1000. Verkostoon on liitettyä kaksi LNG-asemaa, Hamina ja Inkoo, sekä 77 km yhdysputki Viron Paldiskin ja Inkoon välillä. Meriputken koko on DN500 ja suunnittelupaine 80 bar. (Gasgrid 2024)

Nordic Hydrogen Route (kuva 21) on Gasgrid Finlandin ja Nordion Energin yhdistämä hanke, jonka tarkoituksena on nopeuttaa vetytalouden tavoitteita vetyinfrastruktuurin avulla, luomalla vetymarkkina alueiden välille putkiverkoston, joka ylittää Ruotsin Lapista, Perämeren ja Suomen rannikon kautta aina Saksaan asti. NHR edistää Euroopan energiaomavaraisuutta ja tukee hiilineutraalisuustavoitteiden saavuttamista. NHR on verkoston pohjoisin osa, Perämeren rannikko ja haara Ruotsin Kii-runan teollisuusalueelle. Projektin aikataulu on Esisuunnittelu 2022–24, Suunnittelu 2024–26, Rakentaminen 2026–30 ja tavoitteena avoin vetymarkkina vuodesta 2030 eteenpäin. Uuden putkiverkon pituudeksi on suunniteltu 1000 km ja investoinnin arvoksi arvioidaan 3,5 miljardia euroa. Uusi putkilinja mahdollistaa noin 37 miljardin euron investoinnit tuuli-, aurinko- ja elektrolyysijärjestelmiin. Vedyn kuljetuskustannusten on laskettu olevan 0,1–0,2 euroa/kg. Putkiston ansiosta, vuosittaiset CO₂-vähennykset olisivat 20 MT vuoteen 2050 mennessä, joka vastaa 20 prosenttia Suomen ja Ruotsin tämänhetkisistä vuotuisista päästöistä. On odotettavissa vetytalouden ansiosta syntyvän vuoteen 2030 mennessä, 25 000 työpaikkaa ja 2024 mennessä 46 000 työpaikkaa. (Gasgrid 2024)



Kuva 21. Suunniteltu Nordic Hydrogen Route. Copyright Gasgrid Finland Oy 2024

5.4 Maakuljetukset ja autotankkausasemat

Vedyn kuljettaminen maanteitse on kustannustehokasta, jos siirtomatkat ovat maltilliset. Alle 500 km siirtomatkat suoriutuvat rekoilla ja tapauskohtaisesti myös junilla. Paineistettu vetykaasu voidaan varastoida ja siirtää kaasupullokonteissa (MEK-kontti) tai putkiperävaunuissa. Tyypillinen varastointipaine on 180–640 bar. Putkiperävaunussa kuljetettavan vedyn määrä on noin 400 kg ja kaasupullokontteja käytettäessä noin 380–900 kg. Suurimmat kaasumaisen vedyn kuljetus säiliöt ovat mitoitetaan 26 m³, painetaso 500 bar ja maksimi vetymäärä 1100 kg. Nestemäisenä vetyä mahtuu suurimpiin rekalla kuljetettaviin säiliöihin 68 m³ ja 4450 kg, paineen ollessa 10,7 bar. Nestemäisen vedyn kuljetuksessa, päivakohtainen häviö on alle 0,8 prosenttia. (Ikonen 2023; Afry Finland Oy 2022)



Kuva 22. Putkiperävaunu, kaasumaisen vedyn kuljetukseen (Ikonen 2023)

Kirjoitushetkellä Suomessa ei ole yhtään vedyn tankkausasemaa, mutta useampia on suunnitteilla. Ensimmäinen raskaan liikenteen tankkausasema avautunee 2027, Helsingin Vuosaareen, Helenin vedyntuotantolaitoksen yhteyteen. Vedyn tuotanto alkaa jo vuoden 2026 aikana. Pienempiä, henkilöautontankkausasemia on suunnitteilla P2X Solutionilla (1kpl) ja Norjalaisella Norwegian Hydrogenilla (21 kpl). Kaasuyhtiö Woikoskella, oli 2010-luvulla muutaman vuoden mittainen vetytankkauskoekilu, joka oli vain Woikosken omassa käytössä. Liitteessä (liite2) on kaikki Euroopan vetytankkausasemat. Suurin määrä tankkausasemia löytyy Saksasta, 87 kpl ja uusia on suunnitteilla 26 kpl. (Korhonen 2023; H2 MOBILITY 2024; Helen 2024)

6 VEDYN KÄYTTÖ

6.1 Maaliikennekäyttö ja ajoneuvotekniikka

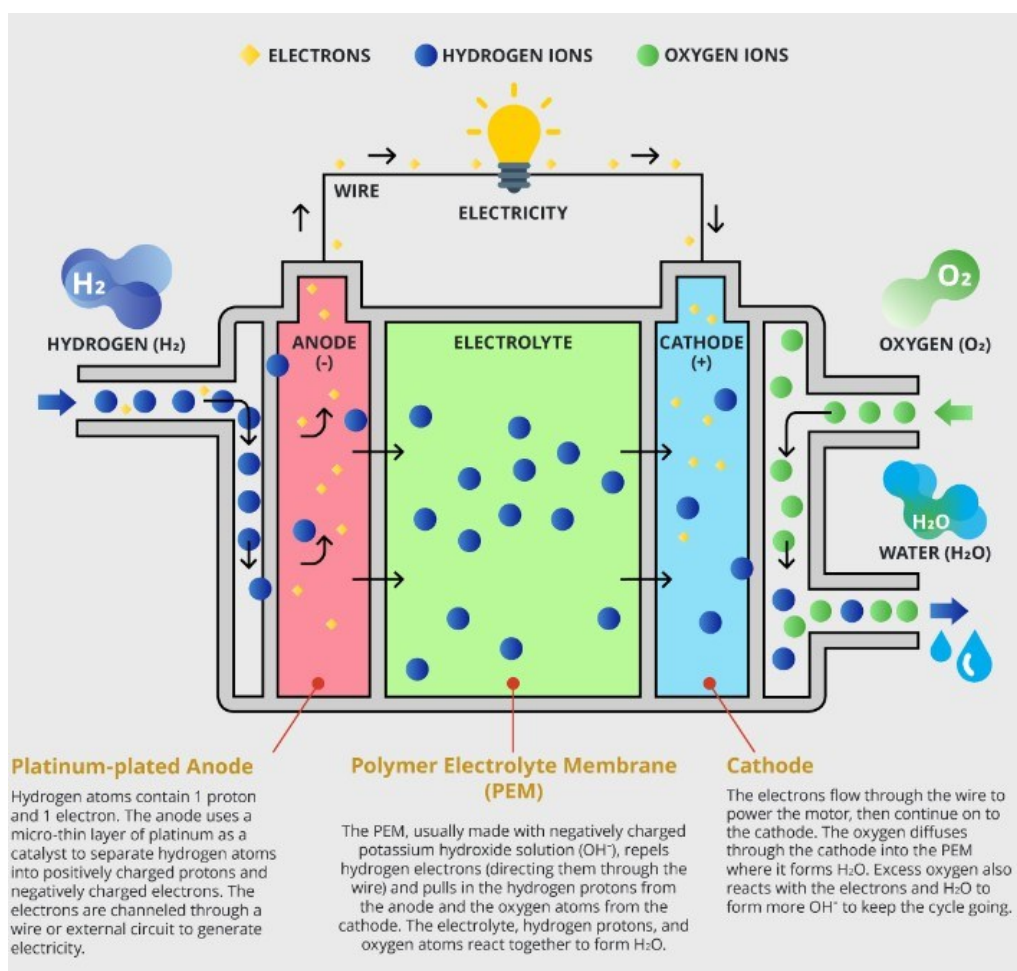
Vedyn liikennekäytölle on kaksi vaihtoehtoa. Polttomoottorikäyttö tai sähköntuotto polttokennon avulla. Polttomoottoritekniikalla varustettuja autoja on markkinoilla vähemmän, kuin polttokennoautoja. Vetypolttomoottoreilla varustettuja kuorma- ja rekka-autoja on tulossa markkinoille vuonna 2024. Ensimmäinen eurooppalainen kuorma-auto tulee olemaan MAN Truck & Bus yhtiön MAN hTGX. Vedyn käyttö raskaalla kalustolla ja pitkillä kuljetusmatkoilla on akkukäyttöisiä autoja kannattavampaa, nopeamman tankkauksen ja pidemmän toimintamatkan ansiosta. EU:n CO₂-säädökset luokittelevat vetykäyttöiset polttomoottorit nollapäästöisiksi. Tämä tukee siis tavoitteita nolla hiilidioksidipäästöjä tavoitellessa. Haittapuolena on polttamisesta syntyvät NO_x päästöt. Vetykäyttö sopii myös hyvin erikoiskuljetustehtäviin, joissa vaaditaan erityistä akselikonseptia tai tapauksissa, joissa alustan rakenne ei mahdollista akkukäyttöä. (Koneviesti 2024; Ikonen 2023 b)

Vetykäyttöinen polttokennoauto on käytännössä sähköauto. Tarvittava sähköenergia tuotetaan polttokennon avulla, sähkökemiallisesti vedystä. Polttokennoauton etuja ovat vetysäiliöiden keveys, verrattuna akkuihin. Pienemmän massan ansiosta auton liikuttaminen kuluttaa vähemmän energiaa. Myös vetykaasun tankkaus on nopeampaa ja auton toimintasäde on pidempi kuin akkukäyttöisillä sähköautoilla. (Ikonen 2023 b)

Yleisin polttokennotyyppi on PEM, joka toimii alle 100°C lämpötilassa. Polttokennoon syötetään vetykaasua anodi, eli negatiivisen elektrodin puolelle. Vety hapettuu (luovuttaa elektroneja ja muuttuu positiivisesti varautuneeksi). Happi pelkistyy katodin puolella (saa elektroneja ja muuttuu negatiivisesti varautuneeksi). Vetymolekyylit, jotka luovuttivat elektroninsa, muuntautuvat vetyioneiksi ja kulkeutuvat membraanikalvon (elektrolyytin) lävitse katodin puolelle. Vetyionit yhtyvät katodipuolelle syötetyn hapen kanssa, katodin katalyyttipinnalla, synnyttäen vesihöyryä. Elektronien kulkiessa ulkoisen kuormituspiirin kautta, anodilta katodille, syntyy sähkövirtaa. Liitteessä (liite5) on havainnekuvat ja selosteet SOFC, AFC ja PAFC polttokennoista. (Ikonen 2023 b; 3M 2024)

Vedyn palamisreaktio:





Kuva 23. PEM-polttokennon toimintaperiaate. Copyright 2022 Manhattan Gold & Silver

Polttokennossa syntyvä sähkövirta johdetaan ajotilanteen mukaan, joko suoraan sähkömoottorille tai akulle. Polttokennokäyttöisen auton akkuja ladataan myös jarrutusenergiaa hyväksikäyttäen. Polttokenno mitoitetaan ajomoottorin käyttämän sähkötehon perusteella, jotta polttokennon tuotto olisi vähintään sama, kuin sähkömoottorin tarvitsema teho. Polttokenno on hidas reagoimaan nopeisiin tehomuutoksiin, joten kiihdytyksissä sähkömoottorin tarvitsemaa tehoa täydennetään akulta syötetyllä sähkövirralla. Polttokennon tarvitsema ilma otetaan suoraan ulkoilmasta, joten puhdistaminen on välttämätöntä, koska ulkoilmassa olevat typen oksidit, rikkidioksidi ja hiukkaset vaurioittavat polttokennoa. Alle 2,5 mikrometrin hiukkaset suodatetaan 90–100 prosenttisesti ennen ilman syöttämistä polttokennolle. (Ikonen 2023 b)

6.2 Teollisuuskäyttö

Neljä suurinta vedyn käyttökohdetta ovat öljynjalostus, ammoniakin tuotanto, metanolin tuotanto ja teräksen tuotanto. Käytännössä kaikki käytettävä vety on tuotettu fossiilisilla polttoaineilla. Teräksen tuotannossa käytetään rautamalmia, jossa on rautaa ja happea. Normaalisti happi poistetaan rautamalmista hiilen avulla. Yhden terästonnin valmistukseen tarvitaan 500 kg hiiltä. Hiilen käytön takia, raudan ja teräksen tuotannon hiilidioksidipäästöt ovat 7 prosenttia globaalilla tasolla. Jokaista tuotettua terästonnin kohden, vapautuu ilmaan 1,8 tonnia CO₂-päästöjä. Rautamalmi voidaan

pelkistää masuunissa hiilen sijasta vedyllä, jolloin prosessista vapautuu hiilidioksidin sijasta vesihöyryä. SSAB:n Raahen terästehtaan tuotantoprosessi on tarkoitus muuttaa vetypelkistystä käyttäväksi 2030-luvulla. Tällöin Suomen hiilidioksidipäästöt vähenisivät noin 7 prosenttia. Masuunin pääreaktiot on kuvattu liitteellä 6. (Vattenfall 2021; VAMK, Turku AMK, JOTPA 2023)

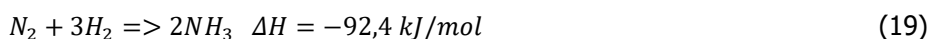
Vetyä voidaan käyttää myös sementtiteollisuuden päästöjen vähentämiseen. Vety soveltuu polttoaineeksi sementtiklinkkerin polttovaiheeseen. Normaalisti kuumentamiseen käytetään kivihiiltä, petrokoksia, erilaisia kierrätyspolttoaineita, autonrengasmurskettä ja SRF-kierrätyspolttoainetta. Sementin tuotannon hiilidioksidipäästöistä 70 prosenttia syntyy kalkkikiven kalsinoitumisen yhteydessä ja polttouunin prosesseissa noin 30 prosenttia. Finnsementin Paraisten ja Lappeenrannan sementtitehtaat tuottavat 1,5 prosenttia Suomen hiilidioksidipäästöistä, eli 56 miljoonaa tonnia. Yksi tuotettu sementtitonni tuottaa keskimäärin 600 kg CO₂-päästöjä ja sementtitonnin tuotanto kuluttaa energiaa noin 0,8–1,75 MWh energiaa ja 1,7 tonnia raaka-aineita. Päästöjen vähentäminen onnistuu myös prosessissa syntyneen hiilidioksidin talteenotolla ja yhdistämällä hiilidioksidi vedyn kanssa, saadaan tuotettua erilaisia jatkojalosteita. Haittapuolena vedyn poltossa kiertouunissa on, typenoksidit, joita paloprosessissa syntyy. (Ahlberg 2020; Finnsementti julkaisuaika tuntematon; VAMK, Turku AMK, JOTPA 2023 b)

7 SYNTEETTISET POLTTOAINEET VEDYSTÄ

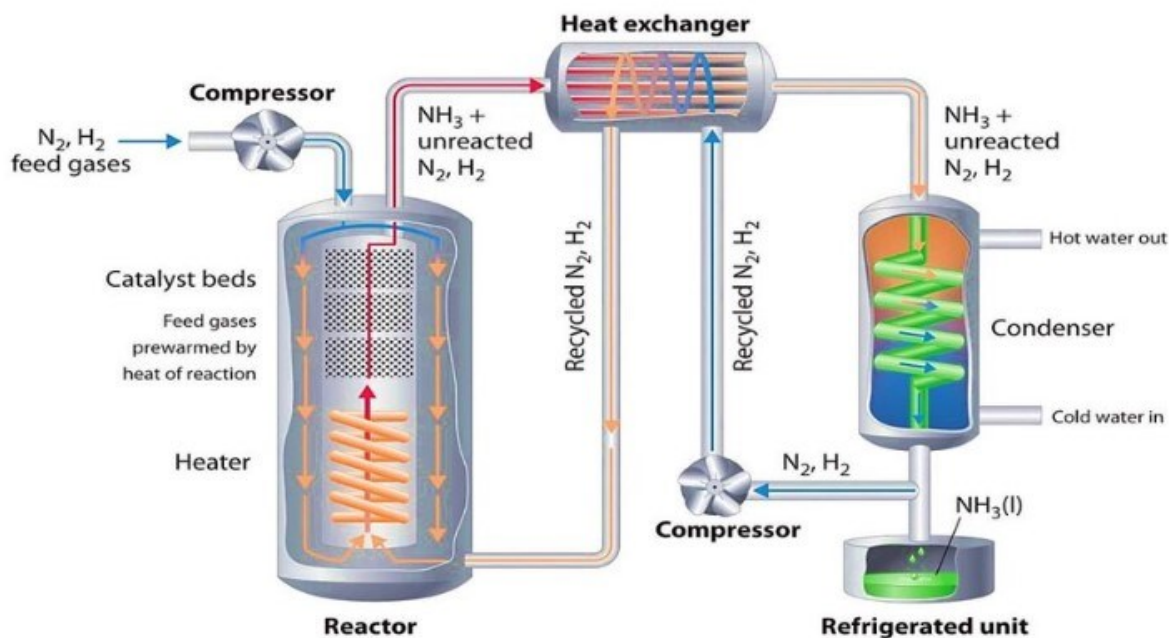
7.1 Valmistusprosessit

7.1.1 Haber-Bosch

Ammoniakki koostuu typpi- ja vetyatomeista ja on tärkeä ja monipuolinen kemikaali teollisuudessa ja erilaisissa sovelluksissa. Ammoniakkia voidaan käyttää myös laivaliikenteessä polttoaineena, typpilannoitteiden valmistamiseen ja energian kantajana, jolloin sitä käytetään vedyn varastointiin ja kuljetukseen. Kuvassa 24. on kuvattu ammoniakin Haber-Bosch valmistusprosessi, jossa vety ja typpi yhdistetään. Reaktio on kuvattu kaavassa 19.



Reaktio toimii 150–300 bar:n paineessa ja 350–550°C lämpötilassa, käytetyn prosessin mukaan. Prosessissa voidaan käyttää rautapohjaista katalyyttiä, jotta reaktioon vaadittavaa painetta ja lämpötilaa voidaan laskea. Kun seos on tilavuusprosenttiltaan 12–16,5 ammoniakkia, siirtyy se erottimeen, jossa reaktioseoksen ammoniakki nesteytetään 155 bar:n paineessa ja -25°C lämpötilassa. Puhdas ammoniakki varastoidaan ja reagoimaton typpi ja vetykaasu jatkaa prosessinkiertoa. Liitteessä 7 on listattuna käytettyjä katalyyttityyppejä. (Vuorela 2024 s. 9; Arasto 2023; IKSAD Publications 2024 s. 62)

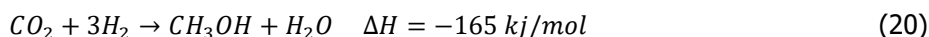


Ammonia synthesis (Haber-Bosch process)

Kuva 24. Ammoniakkisynteesi. (IKSAD Publications 2024)

7.1.2 Fischer-Tropsch

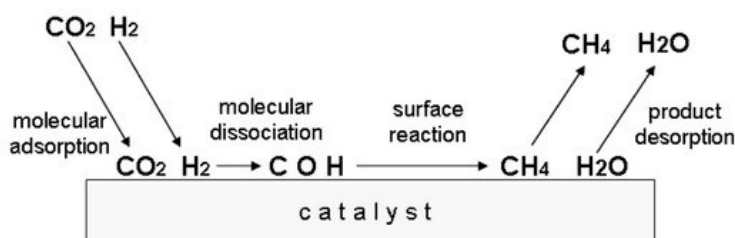
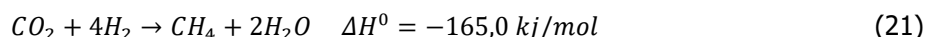
Kerosiinia, dieseliä ja bensiiniä voidaan tuottaa synteettisesti Fischer-Tropsch menetelmällä. Prosessin aikana vedyn ja hiilimonoksidin seoksesta, eli synteetikaasusta muodostuu pitkiä hiilivetyketjuja. Tavoitteena on saada hiilivetyjä, jotka ovat huoneenlämmössä nestemäisiä. Prosessin lämpötila on 200–350°C ja painetaso 15–30 bar. Synteetikaasusta erotellaan vety (H_2) ja häkäkaasu (CO) ja ne syötetään reaktoriin. Fischer-Tropsch synteetissä vedyn ja häkäkaasun seos muunnetaan rautakatalyytin tai kobolttikatalyytin avulla vahamaiseksi hiilivetyneesteeksi. Hiilivetyneeste jatkojalostetaan vetykrakkauksella halutuiksi polttoaineiksi, kuten e-kerosiiniksi, e-dieseliksi tai e-bensiiniksi. Liitteessä 9 on havainnollistettu, kuinka eri prosessit, raaka-aineet ja lopputuotteet ovat toisiinsa kytköksissä. Fischer-Tropsch reaktio on kuvattu kaavassa 20. Reaktio on eksoterminen. (Laitinen 2023)



7.1.3 Sabatier-reaktio

Metaania voidaan tuottaa hiilidioksidista ja vedystä Sabatier reaktion avulla joko biologisesti matalassa lämpötilassa ja paineessa tai epäorgaanisesti (kemiallisesti) korkeassa lämpötilassa ja paineessa nikkelikatalyytin avulla. Reaktio käyttää hiilidioksidia ja vetyä suhteessa 1:4. Erityinen merkitys on sillä, että metaanin raaka-aineena hyödynnetään hiilidioksidia (CO_2), joten hiilidioksidi ei päädy suorana päästönä ilmakehään, vaan siitä voidaan jatkojalostaa metaania, jolla voidaan korvata fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Synteettisen metaanin valmistuksessa, täytyy hiilidioksidin happipitoisuus saada mahdollisimman lähelle 0 %, koska happi reagoi vedyn kanssa, muodostaen vettä. Jos hiilidioksidin happipitoisuus on 0 %, vedyn ja hapen muunnosprosentti metaaniksi on noin 85 %. Mutta jos hiilidioksidin happipitoisuus nousee 8 %:n, niin muunnosprosentti on vain 65 %. Nesteytyksessä kaasumainen kuivattu synteettinen metaani (SNG) muutetaan nestemäiseksi (LSNG) jäädyttämällä se noin -170 asteen lämpötilaan (metaani nesteytyy noin -163°C lämpötilassa). Metaani nesteytetään, jotta se puristuisi kuudessadasosaan siitä, mitä se olisi ilmakehän paineessa. Nestemäisen metaani on huomattavasti helpompi ja taloudellisempi kuljettaa ja varastoida. Nesteytystä käytetään tyypillisesti silloin, kun kaasun kuljetusmatkat ovat pitkiä ja kun kaasua halutaan suuri määrä mahdollisimman pieneen tilavuuteen, kuten laivojen polttoainekäytössä. (Suomen Biovoima Oy 2019; Q Power 2024; Ylén 2021)

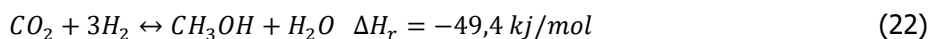
Metanoinnin kemiallinen Sabatier-reaktio kaavassa 21. Vety ja hiilidioksidi reagoivat keskenään. Reaktio on eksoterminen.



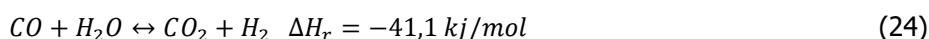
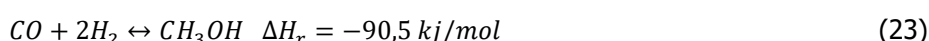
Kuva 25. Sabatier-reaktio katalyyysin pinnalla. (Kuva: Giuseppe Etiope 2015)

7.1.4 Synteettinen metanoli

Synteettistä, eli e-metanolia valmistetaan vihreän vedyn ja hiilidioksidin avulla. Metanolisynteesiä kutsutaan katalyyttiseksi hydrausreaktioksi/hydrogenaatioksi, jossa hiilidioksidi tai hiilimonoksidi reagoi vedyn kanssa. Hiilidioksidin katalyyttinen hydrauksen reaktio on kuvattu kaavassa (22). (Aho 2023; IRENA 2021)

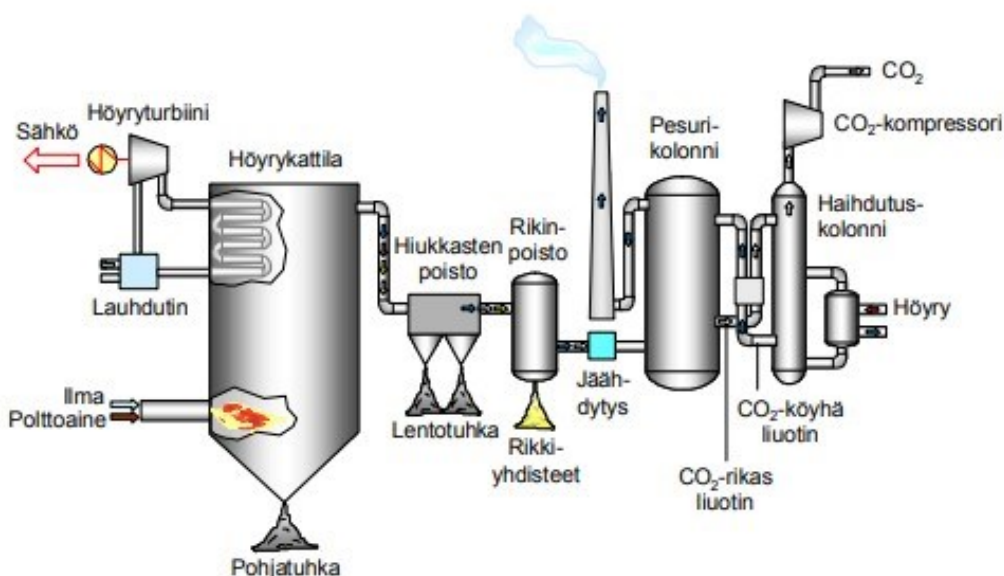


Olosuhteista riippuen, reaktiossa tapahtuu myös hiilimonoksidin katalyyttinen hydraus (23) ja vesikaasureaktio (24). Metanolisynteesin reaktioihin vaikuttavat lämpötila ja paine. Teoriassa näitä kaikkia kolmea reaktiota voi tapahtua metanolisynteesissä samaan aikaan ja molempiin suuntiin. (Aho 2023; IRENA 2021)



7.2 Hiilidioksidin talteenotto

Savukaasujen hiilidioksidi voidaan ottaa talteen pesurilla, jossa käytetään erilaisia kemiallisia liuottimia. Yleisin käytössä oleva liuotin on monoetanoliamiini (MEA). Kun MEA reagoi hiilidioksidin kanssa, syntyy yhdiste nimeltä karbamaatti. Reaktiosta vapautuva lämpö määrä on noin 2,0 MJ yhtä hiilidioksidikilogrammaa kohti. Savukaasujen sisältämästä hiilidioksidista on mahdollista saada talteen 90 prosenttia ja tyypillisesti hiilidioksidin puhtaus on noin 99 p-%. Ennen talteenottoa prosessissa savukaasusta on poistettava hiukkaset ja kaikki happamat ainekset, kuten rikki- ja typpiyhdisteet. Happamat komponentit reagoivat MEA:n kanssa, hajottaen tätä. MEA pesuprosessissa on kolme erillistä yksikköä: esikäsitteily, CO₂:n talteenotto ja paineistus. Talteenottoa prosessin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 26. (Teir, Tsupari, Koljonen, Pikkarainen, Kujanpää, Arasto, Tourunen, Kärki, Nieminen 2009; Syrjälä 2020)



Kuva 26. Amiinipesun toimintaperiaate. (Kuva: Teir, Tsupari, Koljonen, Pikkarainen, Kujanpää, Arasto, Tourunen, Kärki, Nieminen 2009)

Puhdistusprosessin jälkeen jäähdytetään savukaasu noin 40–50 °C:een, ja johdetaan siitä pesurikoloniin. Liutin syötetään pesurikoloniin sen yläosasta. MEA liuos reagoi savukaasussa olevan hiilidioksidin kanssa, josta muodostuu erilaisia yhdisteitä. Savukaasut poistuvat kolonin yläosasta, kun siitä on ensin pesty liutinjäämät pois veden avulla. Pesukolonilta savukaasu vapautetaan ulkoilmaan. Hiilidioksidin kanssa reagoinut liutin pumpataan tornin alaosaan lämmönsiirtimen kautta haihdutuskolonin yläosaan. Lämmönsiirtimessä liutin lämmitetään noin 100–140 °C:een. Lämmön vaikutuksesta tapahtuu käänteinen reaktio, jolloin hiilidioksidi irtoaa. Reaktioon tarvittava lämpömäärä on noin 4,0 MJ yhtä hiilidioksidikilogrammaa kohti. Hiilidioksidin irrotus liuottimesta, vie kaksinkertaisen määrän lämpöenergiaa, kuin niiden yhdistäminen. Lämmönsiirtimeltä vesihöyry ja hiilidioksidi siirtyvät lauhduttimeen haihdutuskolonin yläosasta ja vesihöyry lauhdutetaan, jolloin se eroaa hiilidioksidista ja lauhde siirretään pumpulla takaisin koloniin. Hiilidioksidi johdetaan kompressorille, jossa se paineistetaan varastointia ja mahdollista kuljetusta varten. Kolonin alaosaan johdetaan puhdistettu MEA liuos voimalaitoksen höyryllä toimivaan esilämmittimeen, ja siitä edelleen pumpulla lämmönsiirtimen kautta takaisin pesurikoloniin. (Teir, Tsupari, Koljonen, Pikkarainen, Kujanpää, Arasto, Tourunen, Kärki, Nieminen 2009; Syrjälä 2020)

Hiilidioksidin käyttökohteita on useita, kuten virvoitusjuomat, kylmäaineet, superkriittiset liuottimet, ponnekaasut, neutralisoivana yhdisteenä, kasvihuoneviljelmissä ravinteena ja inerttinä kaasuna palonsammutusjärjestelmissä hapensyrjäyttämiseen, suojakaasuna hitsauksessa sekä elintarvikkeiden pakkauskaasuna. Hiilidioksidia voidaan käyttää kemianteollisuudessa urean valmistukseen, sekä kasvi- ja eläinperäisten ja polymeerikuitujen puhdistukseen ja värjäykseen. Lääketeollisuus valmistaa hiilidioksidista salisyylihappoa, joka on aspiriinin vaikuttava ainesosa. Hiilidioksidia voidaan käyttää pH-tasapainon hallintaan vedenpuhdistuslaitoksilla, rikkihapon sijasta sekä käyttää raaka-aineena valmistettaessa synteettisiä muoveja, ammoniakkia, kuituja, kumeja. Vihreää vetyä ja hiilidioksidia yhdistämällä, voidaan valmistaa synteettistä metanolia ja metaania. (Ylén 2021)

Liitteessä 10 on esimerkkilasku, jossa on laskettu synteettisen metaanin valmistukseen tarvittavat ainemäärät.

8 POHDINTA

Työn tuloksena voidaan todeta, että vihreällä vedyllä ja sen jatkojalosteilla on suuri potentiaali edistää ilmastomuutoksen torjuntaa ja luoda uusia liiketoimintamahdollisuuksia Suomelle. Vihreän vedyn tuotanto, käyttö ja vienti voivat tukea Suomen teollisuuden, liikenteen ja energiantuotannon uudistumista ja vähähiilisyttä, sekä luoda uusia työpaikkoja ja vahvistaa Suomen kilpailukykyä ja innovaatiokykyä. Vihreän vedyn hyödyntäminen edellyttää kuitenkin merkittäviä investointeja ja toimenpiteitä, sekä yhteistyötä eri toimijoiden välillä. Suomen vetystrategia on hyvä alku, mutta sen toteutumista on seurattava ja arvioitava jatkuvasti, sekä tehtävä tarvittavia muutoksia ja päivityksiä. Suomen on myös oltava aktiivinen ja vaikuttava toimija EU:n ja kansainvälisissä vetyfoorumeissa, sekä edistettävä vihreän vedyn sertifiointia ja standardointia.

Suunnitellun vetytalouden syntyminen on varsin arveluttavaa, koska aikataulut ovat todella tiukat. Suunnitelmissaan Suomi aikoo olla hiilineutraali jo vuonna 2035. EU:n tavoitteena on vuosi 2050. Suomen etuihin lukeutuu jo nyt, lähes hiilidioksidivapaa sähköntuotanto, vahva sähkönsiirtoverkko, halpa sähkönsiirtokapasiteetti, puhdasta vettä löytyy reilusti, sekä biogeenistä hiilidioksidia on saatavilla suuret määrät. Varsinkin biogeenisen hiilidioksidin markkinat voivat olla tulevaisuudessa suuret, koska EU:ssa on monia maita, joille vedyn tuotantoa on tulossa, mutta biogeeninen hiilidioksidi uupuu. Hyvin monet maat tuottavatkin ammoniakkia vihreästä vedystä. Myös Suomen tämänhetkinen kaasuverkosto, ei juurikaan palvele suunniteltuja vedyn siirtomääriä ja suurimmat suunnitellut vedyntuotantolaitokset eivät sijaitse nykyisen kaasuverkoston varrella.

Tuuli- ja aurinkovoimaa on suunniteltu rakennettavan Suomeen seuraavan 20 vuoden aikana, noin 10 kertaa tämänhetkisen sähköntuotannon verran. Jo nyt, on osa hankkeista laitettu odotusvaiheeseen, koska matala sähkönsiirtokapasiteetti, ei ole sähköntuottajan näkökulmasta kovin houkutteleva. Kulutusta olisi saatava lisää, sekä säätösähkömarkkinoille tulisi saada lisäkapasiteettia noin 2000 MW:n verran, jotta vastaavasti sähkönsiirtokapasiteetti ei nousisi liian ylös, sähköntuottajan näkökulmasta.

Vety aiheuttaa ongelmia myös logistiikassa ja varastoinnissa. Vetyatomien pienen koon takia, kuljetus- ja varastosäiliöt, sekä siirtoputkistot täytyy valmistaa huolella ja varsin kalliista materiaaleista, jotta vety ei karkaisi ulkoilmaan ja aiheuttaisi ongelmia ilmastoon. Vety hidastaa metaanin hajoamista yläilmakerkeissä ja muodostaa otsonia alailmakehässä. Vety siis edistää ilmastolämpenemistä, vaikkakin reilusti vähemmän, kuin metaani tai hiilidioksidi.

Elektrolyysereiden kehitykseen tulisi panostaa reilusti, jotta hyötysuhteet saataisiin ylös ja materiaalikustannukset alas. Sama koskee myös polttokennoja. Harvinaiset ja kalliit metallit voivat aiheuttaa tulevaisuudessa ongelmia, koska jalometallien tuotanto keskittyy liikaa muutamalle suurelle maalle ja käytettyjen laitteiden kierrätys ei palvele vielä nykyistä tuotantoa. Maailmalla tapahtuvat poliittiset kuviot hidastavat osaltaan myös vetytalouden kehitystä.

Autoliikenteen muuttaminen vedylle, ei sekään ole helppoa. Jotta raskaampaa kuljetuskalustoa saataisiin käyttöön, tarvittaisiin toimiva ja koko Suomenlaajuinen vetytankkausverkosto. Vety voidaan jatkojalostaa myös bensaksi tai dieseliiksi ja nykyinen jakeluverkko palvelisi suoraan synteettisiä

polttoaineita. Lopputuotteen hinta on vain liian korkea, jotta se voisi kilpailla fossiilisia polttoaineita vastaan. Tällä hetkellä, vain synteettinen metaani saadaan kilpailukykyiseksi markkinoille.

Vihreän vedyn leiman saadakseen, täytyy käytetyn sähkön olla tuotettu tuuli- tai aurinkovoimalla ja näidenkin käyttöönotto saa olla korkeintaan 3 vuotta aikaisemmin, kuin vedyntuotantolaitoksen. Tällä EU pyrkii varmistamaan, että vedyn tuotantoon käytetty puhdas sähkö ei ole pois muilta kuluttajilta. Elektrolyysin mallin mukaan, voi tuotantolaitoksella osallistua myös säätösähkömarkkinoille. Tämä edellyttää laitteistolta säätö mahdollisuutta. AEL-elektrolyysit eivät tähän kykene, vaan niitä käytetään lähinnä tasaiseen tuotantoon. PEM-elektrolyysi on tämän hetken markkinoilla parhaiten säätöön kykenevä. Toistuva tuotannon säätö kuluttaa elektrolyyseriä ja aiheuttaa käyttöiän lyhene mistä.

Opinnäytetyötä tehdessä tuli vastaan tilanteita, jossa samasta asiasta löytyi monta näkemystä ja tämän takia aineistoa joutui vertailemaan ja varmistelemaan tietojen oikeellisuutta. Hyvänä esimerkkinä, kun etsin tietoa vedyn puhdistukseen liittyen Tukesin sivuilta sekä muutamasta muusta sivustolta, oli Tukesin aineistoon lipsahtanut adsorption tilalle sana absorptio. Huomasin virheen vasta myöhemmin tekstiä tarkastaessa. Laitoin Tukesille sähköpostia ja he korjasivatkin tekstin pikimmiten. Tuli siis todistettua, että on parasta varmistaa tekstin oikeellisuus, vertaamalla tarjottua tietoa, muutamaaan muuhunkin lähteeseen. Opinnäytetyön myötä, tietoisuus tulevaisuuden vetytalouden ja hiilineutraalisuuden tavoittelemisen vaikeuksista ja mahdollisuuksista, selkenivät reilusti. Vedyn täysimittaisen tuotannon ja hyödyntämisen mittakaavat eivät käy ilmi pelkkien lehtiartikkeleiden ja uutiskatsausten myötä. Asioista tulisi kirjoittaa tarkemmin ja totuudenmukaisemmin, jotta tieto vaadittavista toimenpiteistä tulisi paremmin ilmi.

Opinnäytetyö uhkasi kasvaa liiankin laajaksi ja aikataulukin tuli täyteen, joten asiamäärää piti rajoittaa. Aiheesta olisi mahdollista kirjoittaa satoja sivuja. Tämän työn lisäksi, suosittelen tutustumaan tarkemmin sähkön- ja vedyn tuotantokustannuksiin, jotta selkeytyisi, miten suurista euromääristä puhutaan vetytalouden ja hiilineutraalisuuden tavoittelussa.

LÄHTEET

- Adeli, Khaoula & Nachtane, Mourad & Faik, Abdessamad & Saifaoui, Dennoun & Boulezhar, Abdelkader 28.7.2023 How green hydrogen and ammonia are revolutionizing the future of energy production: A Comprehensive review of the latest developments and future prospects. Verkkojulkaisu <https://doi.org/10.3390/app13158711> Viitattu 29.4.2024
- Afry Finland Oy 29.6.2022 Vedyn mahdollisuudet Kemille-hankkeen logistiikkaselvitys-loppuraportti. Verkkojulkaisu Viitattu 24.4.2024
- Ahlberg, Tommi 2020. Kiertotalous keventää sementin hiilidioksidipäästöjä. Verkkojulkaisu Viitattu 28.4.2024
- Aho, Samueli 2023. E-Metanolin valmistus uusiutuvasta hiilidioksidista ja vihreästä vedystä. Energia-tekniikan kandidaatintyö https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/166786/Kandidaattinty%C3%B6_Aho_Samueli.pdf?sequence=1&isAllowed=y Viitattu 12.5.2024
- Ala-Myllymäki, Esko 2016. Aurinkodemo. Oy Merinova Ab. https://www.merinova.fi/wp-content/uploads/2016/09/aurinkodemo_loppuraportti.pdf Viitattu 29.3.2024
- Arasto, Antti 15.9.2023 Vihreä ammoniakki, kestävä ratkaisu ilmastokriisin hillitsemiseen. Verkkojulkaisu <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/vihrea-ammoniakki> Viitattu 29.4.2024
- Balkan Green Energy News 30.1.2024. European PPA market enters its golden era in 2023. Verkkojulkaisu <https://balkangreenenergynews.com/european-ppa-market-enters-its-golden-era-in-2023/> Viitattu 13.4.2023
- Bloomenergy 2024. Hydrogen Electrolyzers for a Clean Energy Future. Verkkojulkaisu <https://www.bloomenergy.com/bloomelectrolyzer/> Viitattu 25.3.2023
- Bogdanov, Dmitrii & Farfan, Javier & Sadovskaia, Kristina & Aghahosseini, Arman & Child, Michael & Gulani, Ashish & Oyewo, Ayobami Solomon & Barbosa, Larissa de Souza Noel Simas & Reyer Cristian. 6.3.2019. Verkkojulkaisu <https://www.nature.com/articles/s41467-019-08855-1> Radical transformation pathway towards sustainable electricity via evolutionary steps 2019 Viitattu 29.3.2024
- Breyer, Christian. Hiilineutraali sähköjärjestelmä on mahdollinen vuoteen 2050 mennessä. 6.3.2019. Päivitetty 18.5.2022. Verkkojulkaisu. <https://www.lut.fi/fi/uutiset/hiilineutraali-sahkojarjestelma-mahdollinen-vuoteen-2050-menessa> Viitattu 29.3.2024
- Eklund, Esa 2011. Kodin vihreä energia oy. Jokamiehen opas pientuulivoiman käyttöön, Tampereella tuulee projekti. https://www.motiva.fi/files/6010/Joka_miehen_opas_pientuulivoiman_kayttoon.pdf Viitattu 31.3.2024
- Energiateollisuus julkaisuaika tuntematon. Sähköverkkoyhtiöt. Verkkojulkaisu <https://energia.fi/energiatietoa/energiaverkot/sahkoverkot/sahkoverkkoyhtiot/> Viitattu 13.4.2023
- Energiateollisuus 4.1.2024 Sähkön hintatilastot 2023. Verkkojulkaisu <https://energia.fi/esitykset/sahkon-hintatilasto/> Viitattu 20.4.2023
- Energiavirasto 15.6.2023. Aurinkosähkön pientuotanto kasvoi voimakkaasti vuonna 2022. Verkkojulkaisu. <https://energiavirasto.fi/-/aurinkosahkon-pientuotanto-kasvoi-voimakkaasti-vuonna-2022> Viitattu 29.3.2024
- Energiavirasto julkaisuaika tuntematon. Energian alkuperätakuu. Verkkojulkaisu <https://energiavirasto.fi/energian-alkupera> Viitattu 14.4.2024
- Etiopie, Giuseppe 2015 Abiotic Methane, Sabatier-Reaction. Verkkojulkaisu <https://sites.google.com/a/ingv.it/getiope/g-etiope-home-page/abiotic-gas> Viitattu 30.4.2024

- Fimpec 6.9.2023 Vetymarkkinan nykytila ja tulevaisuus. Verkkajulkaisu <https://fimpec.com/ajankoh- taista/vetymarkkinan-nykytila-ja-tulevaisuus/> Viitattu 5.5.2024
- Fingrid julkaisuaika tuntematon a. Suomen sähköjärjestelmä. Verkkajulkaisu <https://www.fing- rid.fi/kantaverkko/kehittaminen/suomen-sahkojarjestelma/> Viitattu 13.4.2024
- Fingrid julkaisuaika tuntematon b. Kulutuksen ja tuotannon tasapainon ylläpito. Verkkajulkaisu <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/kulutuksen-ja-tuotannon-tasapainon-yllapito/#taa- juusmittausdata> Viitattu 13.4.2024
- Fingrid julkaisuaika tuntematon c. Yleistietoa sähkömarkkinoista. Verkkajulkaisu <https://www.fing- rid.fi/sahkomarkkinat/yleistietoa-sahkomarkkinoista/?tag=3462&pageSize=5&page=1&language=fi> Viitattu 13.4.2023
- Fingrid julkaisuaika tuntematon d. Markkinapaikat. Verkkajulkaisu <https://www.fingrid.fi/sahkomark- kinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/johdanto-sahkomarkkinoihin/#saatosahko--ja-reservimarkkinat-> Viitattu 15.4.2024
- Finnsementti julkaisuaika tuntematon. Sementin valmistuksen prosessi. Verkkajulkaisu https://finn- sementti.fi/wp-content/uploads/sementin_valmistus_NETTI.pdf Viitattu 28.4.2024
- Flourish 31.12.2023 European Cumulative Negative Prices 2023. Verkkajulkaisu <https://pub- lic.flourish.studio/visualisation/16297215/> <https://public.flourish.studio/visualisation/16297215/> Viitattu 20.4.2023
- Fortum 2024. julkaisuaika tuntematon. Tietoa Fortumista, Energiantuotanto, Aurinkoenergia-ehy- mätön energianlähde. Verkkajulkaisu. <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/energiantuotanto/aurin- koenergia?vtab=accordion-item-13111> Viitattu 30.3.2024
- Gasgrid 2024 Kaasun siirtoverkosto. Verkkajulkaisu <https://gasgrid.fi/kaasuverkosto/kaasun-siirto- verkosto/#kaasun-hajustus> <https://gasgrid.fi/kaasuverkosto/kaasun-siirtoverkosto/#kaasun-hajustus> Viitattu 24.4.2024
- Helen 3.4.2024 Helen investoi Helsingin ensimmäiseen vihreän vedyn tuotantolaitokseen. Uutiset ja artikkelit. Verkkajulkaisu <https://www.helen.fi/uutiset/2024/helen-investoi-helsingin-ensimmaiseen- vihrean-vedyn-tuotantolaitokseen> Viitattu 1.5.2024
- H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG 2024, Hydrogen Stations. Verkkajulkaisu <https://h2.live/en/tankstellen/> Viitattu 24.4.2024
- Ikonen, Markku 2023. Vedyn kuljetus ja varastointi, Maakuljetukset ja Autotankkausasemat. Turku AMK opintomateriaali Viitattu 24.4.2024
- Ikonen, Markku 2023 b. Maaliikennekäyttö ja ajoneuvotekniikka. Turku AMK opintomateriaali. Viitattu 26.4.2024
- IKSAD Publications 25.4.2024 Dynamics of ammonia synthesis from industrial reactors: a gaze to- wards production diversity. Verkkajulkaisu https://www.researchgate.net/publica- tion/380124128_DYNAMICS_OF_AMMONIA_SYNTHESIS_FROM_INDUSTRIAL_REAC- TORS_A_GAZE_TOWARDS_PRODUCTION_DIVERSITY Viitattu 29.4.2024
- Ilmatar Energy 26.1.2023. Kas näin syntyy hybridivoimala. Verkkajulkaisu <https://virta.ilmatar.fi/kas- nain-syntyy-hybridivoimala/> Viitattu 30.3.2024
- International Energy Agency (IEA) 4/2022. Snapshot of Global PV Markets. https://iea-pvps.org/wp- content/uploads/2022/04/IEA_PVPS_Snapshot_2022-vF.pdf Viitattu 29.3.2024

IRENA 2020. Green Hydrogen Cost Reduction, scaling up electrolyzers to meet the 1,5°C climate goal. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf?rev=95b8c10569874148a44e1d17b301d263 . s.16 Viitattu 12.3.2024

IRENA 2021 Innovation Outlook Renewable Methanol. Verkkojulkaisu https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jan/IRENA_Innovation_Renewable_Methanol_2021.pdf?rev=ca7ec52e824041e8b20407ab2e6c7341 Viitattu 12.5.2024

Koneviesti 9.4.2024 Man laajentaa nollapäästöisten autojen valikoimaansa vetypolttomootorisella kuorma-autolla. Verkkojulkaisu <https://www.koneviesti.fi/ajoneuvot-ja-ymparisto/7338c34a-50aa-49f1-b0bb-9d63d1460d16> Viitattu 26.4.2024

Korhonen, Antti 25.11.2023 Vety tekee tuloaan liikenteeseen. Verkkojulkaisu Viitattu 24.4.2024

Koskinen, Ossi 2023 Vaasan ammattikorkeakoulun opetusmateriaali. Viitattu 1.4.2024

Koskinen, Ossi 2022. H2 Ecosystem Roadmap for Ostrobothnia, Workpackage 1 Report. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/787369/Final_Report_WP_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y Viitattu 10.3.2024

Koskinen, Ossi 20.5.2022 Rajoitettu tuulivoimantuotanto vihreän vedyn tuotannossa: Johdanto-osa A. Verkkojulkaisu <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2022052037506> Viitattu 20.4.2024

Kosonen, Antti & Breyer, Cristian 27.2.2019. Päivitetty 27.6.2023. Verkkojulkaisu. Aurinkoenergia ja aurinkosähkö Suomessa. LUT-Yliopisto. <https://www.lut.fi/fi/artikkelit/aurinkoenergia-ja-aurinkosahko-suomessa> Viitattu 29.3.2024

Laitinen, Ari maaliskuu 2013 Vedyn mahdollisuudet tieliikenteessä. Diplomityö <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/21503/Laitinen.pdf> Viitattu 24.4.2024

Laitinen, Asseri 2023. Hiilivetyjen valmistus ja käyttö. VAMK, Turku AMK, JOTPA opetusmateriaali. Viitattu 29.4.2024

Lampila, Jouko 29.8.2016. Auringon potentiaali. Kestävä Energiatalous. Verkkojulkaisu <https://www.energiatalous.fi/?p=305> Viitattu 28.3.2024

Linde Group 2024 Hydrogen Recovery by Pressure Swing Adsorption. Verkkojulkaisu https://www.linde-engineering.com/en/images/HA_H_1_1_e_09_150dpi_NB_tcm19-6130.pdf Viitattu 22.4.2023

Lumme Energia julkaisuaika tuntematon, Mikä on alkuperätakuu. Verkkojulkaisu <https://www.lumme-energia.fi/yrityksille/blogi/mika-on-alkuperatakuu> Viitattu 14.4.2024

Mehtola, Johanna 20.9.2017. Suomen Luonto, Miten tuuli syntyy. Verkkojulkaisu. <https://suomenluonto.fi/uutiset/miten-tuuli-syntyy/> Hakupäivä 30.3.2024

Mikkonen, Anni & Kangasniemi, Jouko 27.3.2024. Suomen Tuulivoimayhdistys: Vihreän siirtymän suurin investointipotentiaali on tuulivoimassa. Verkkojulkaisu. <https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankoh-taista/tiedotteet/vihrean-siirtymän-suurin-investointipotentiaali-on-tuulivoimassa> Viitattu 31.3.2024

Molecular Sieve Desiccants 2024, Molecular Sieve for Hydrogen Purification. Verkkojulkaisu <https://www.molecularsievedesiccants.com/molecular-sieve-for-hydrogen-purification> Viitattu 22.4.2023

Morris, James 27.3.2021 Synthetic fuels won't save the planet, so don't say they could. Verkkojulkaisu <https://www.forbes.com/sites/jamesmorris/2021/03/27/synthetic-fuels-wont-save-the-planet-so-dont-say-they-could/?sh=5ff0294369a4> Viitattu 29.4.2024

Motiva julkaisuaika tuntematon a. Verkkojulkaisu. Motivan verkkopalvelu energialähteistä. Päivitetty 20.2.2024. https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_vii-saasti/energialahteet/vety Viitattu 11.3.2024

Motiva julkaisuaika tuntematon b. Päivitetty 31.1.2024 Verkkojulkaisu. Motivan verkkopalvelu uusiutuvasta energiasta. Auringonsäteilyn määrä Suomessa. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringsateilyn_maara_suomessa Viitattu 11.3.2024

Motiva julkaisuaika tuntematon c. Päivitetty 31.1.2024. Verkkojulkaisu. Motivan verkkopalvelu uusiutuvasta energiasta. Aurinkosähköteknologiat. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahkoteknologiat Viitattu 28.3.2024

Motiva julkaisuaika tuntematon d, Päivitetty 11.4.2023. Motivan verkkopalvelut Tuulivoimateknologia https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoima_suomessa/tuulivoimateknologia, Miten tuulivoimala toimii. Viitattu 31.3.2024

Mäkinen, Seppo 2022, Vaasan ammattikorkeakoulu. Hiukkasen vedystä. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-5784-59-6> Viitattu 10.3.2024

Noordende, Hans van't & Bollen, Richard. Safety aspects of Green Hydrogen Production on Industrial Scale. 1.11.2023 <https://ispt.eu/media/01112023-ISPT-Public-Report-Safety-Aspects-of-Green-Hydrogen-Production-on-Industrial-Scale-1.pdf> Viitattu 22.3.2024

Närhi, Jussi 16.6.2023, Fingridin näkemys Suomen tulevasta sähköjärjestelmästä. Verkkojulkaisu <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/yhtio/toimikunnat/markkinatoimikunta/2-fingridin-ennuste-ja-pitkan-aikavalin-skenaariot-sahkojarjestelman-kehityksesta-smtk-16.6.2023.pdf> Viitattu 30.4.2024

Paanu, Tommi 2023 Vedyn Putkilogistiikka, Opintojakso 4: Vedyn kuljetus ja varastointi Turku AMK opintomateriaali Viitattu 24.4.2024

Q Power 2024. Biometanointi. Verkkojulkaisu <https://qpower.fi/fi/teknologia/biometanointi/> Viitattu 29.4.2024

Rantaruoko, Taru kevät 2022. Aurinkopaneelien kierrättämisen mahdollisuudet Suomessa. Opinnäytetyö. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/747336/Rantaruoko_Taru.pdf?sequence=2&isAllowed=y Viitattu 30.3.2024

Solarvoima 2017. P-tyyppi vs. N-tyyppi. Verkkojulkaisu. <https://solarvoima.fi/p-tyyppi-vs-n-tyyppi-solarvoima-blogi/> 29.3.2024

Sopo, Aleksi 10.2.2023. Metaanin höyryreformointiprosessi vedyntuotannossa ja sen teknistaloudellinen vertailu. Kandidaatintyö https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/165222/kandidaatin-tyo_sopo_aleksi.pdf?sequence=1 Viitattu 1.5.2024

Suomen Biovoima Oy 2019. Kaasun kompressointi ja nesteytys. Verkkojulkaisu <https://biovoima.com/ratkaisut/kaasun-kompressointi-ja-nesteytys> Viitattu 29.4.2024

Suomen tuulivoimayhdistys ry julkaisuaika tuntematon a. Tuulivoimaloiden rakenne, Verkkojulkaisu. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/tuulivoimaloiden-rakenne> Viitattu 31.3.2024

Suomen tuulivoimayhdistys ry julkaisuaika tuntematon b. Eri tuulivoimalatyyppejä, Verkkojulkaisu. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/eri-voimalatyyppaja> Viitattu 31.3.2024

Suomen tuulivoimayhdistys ry julkaisuaika tuntematon c. Mikä PPA? Verkkajulkaisu <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/ppa-pitkaaikaiset-sahkonostosopimukset-2/ppa-pitkaaikaiset-sahkonostosopimukset> Viitattu 13.4.2024

Suomen Tuulivoimayhdistys ry 31.12.2023. Tuulivoima Suomessa 2023. https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima_vuositilastot-2023-3.pdf Viitattu 31.3.2024

Syrjälä, Joni 2020. Hiilidioksidin talteenotto savukaasuista. Kandidaatintyö <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/119301/SyrjalaJoni.pdf?sequence=2&isAllowed=y> Viitattu 30.4.2024

Takala, Petri 14.3.2012. Sään takana blogi, Foreca. Verkkajulkaisu. <https://blogi.foreca.fi/2012/03/miten-tuuli-syntyy/> Viitattu 30.3.2024

Teir, Sebastian & Tsupari, Eemeli & Koljonen, Tiina & Pikkarainen, Toni & Kujanpää, Lauri & Arasto, Antti & Tourunen, Antti & Kärki, Janne & Nieminen, Matti 2009. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS). Verkkajulkaisu <https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2009/T2503.pdf> Viitattu 30.4.2024

Työ- ja elinkeinoministeriö julkaisuaika tuntematon. Sähkömarkkinat verkkajulkaisu. <https://tem.fi/sahkomarkkinat> Viitattu 13.4.2024

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 23.1.2024. Vedyn käsittelyn ja varastoinnin turvallisuus. <https://tukes.fi/vedyn-kasittelyn-ja-varastoinnin-turvallisuus#vety-kemikaalina> Viitattu 17.3.2024

Työterveyslaitos julkaisuaika tuntematon. Päivitetty 12.7.2022. Onnettomuuden vaaraa aiheuttavat aineet (OVA-ohjeet) Vety. <https://ova.ttl.fi/vety> Viitattu 17.3.2024

Vaasan sähkö julkaisuaika tuntematon. Aurinkovoima sähkön tuotantomuotona. Verkkajulkaisu. <https://www.vaasansahko.fi/sahkosopimus/tuotantomuodot-aurinkovoima/> Viitattu 30.3.2024

Valtioneuvosto 21.3.2023. Valtioneuvoston periaatepäätös vedystä. Verkkajulkaisu <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-990-8> Viitattu 20.4.2024

VAMK, Turku AMK, JOTPA 2023 Vedyn käyttö- Teollisuuskäyttö. Opetusmateriaali Viitattu 28.4.2024

VAMK, Turku AMK, JOTPA 2023 b Vedyn käyttö sementtiteollisuudessa. Opetusmateriaali Viitattu 28.4.2024

Vattenfall 6.11.2020, päivitetty 19.2.2024. Näin toimivat sähkömarkkinat Suomessa. Verkkajulkaisu. <https://energyplaza.vattenfall.fi/blogi/nain-toimivat-sahkomarkkinat-suomessa> Viitattu

Vattenfall 19.2.2021 HYBRIT tekee teräksen valmistuksesta fossiilivapaata. Verkkajulkaisu <https://www.vattenfall.fi/fokuksessa/innovaatiot/hybrid-tekee-teraksen-valmistuksesta-fossiilivapaata/> Viitattu 28.4.2024

Virtanen, Veli-Matti, Motivan uutiset 2024. 13.3.2024. Suurten aurinkovoimaloiden rakentamiseen tulossa ohjeistuksia. Verkkajulkaisu. https://www.motiva.fi/ajankohtaista/uutiset/uutiset_2024/suurten_aurinkovoimaloiden_rakentamiseen_tulossa_ohjeistuksia.20997.news Viitattu 29.3.2024

Vuorela, Jesperi 2024 Vihreän ammoniakkin tuotannon sähköistyminen. Sähkötekniikan kandidaatintyö <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/167061/Kandidaatinty%C3%B6%20Jesperi%20Vuorela.pdf?sequence=1> Viitattu 29.4.2024

Warwick, Nicola J. & Archibald, Alex T. & Griffiths, Paul T. & Keeble, James & O'Connor, Fiona M. & Pyle, John A. & Shine & Keith P. Atmospheric composition, and climate impacts of a future hydrogen economy Julkaistu 25.8.2023. Verkkajulkaisu <https://acp.copernicus.org/articles/23/13451/2023/> <https://acp.copernicus.org/articles/23/13451/2023/> Viitattu 22.4.2024

Ylén, Niklas 2021. Synteettisen metaanin valmistus hiilidioksidista. Opinnäytetyö
https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/504061/YI%C3%A9n_Niklas.pdf?sequence=2&isAllo
Viitattu 29.4.2024

Åhman, Eemil 2022. Puhdistusprosessit elektrolyyttisesti valmistetun vedyn tuotannossa. LUT-yli-
opisto, Kemiantelekniiikan kandidaatintyö [https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/164107/Kan-
dity%C3%B6_%C3%85hman_Eemil.pdf?sequence=1](https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/164107/Kan-
dity%C3%B6_%C3%85hman_Eemil.pdf?sequence=1) Viitattu 22.4.2024

3M Hydrogen Technology 2024. The basics of hydrogen fuel cells. Verkkajulkaisu
https://www.3m.com/3M/en_US/hydrogen-technology-us/applications/fuel-cells/ Viitattu 26.4.2024

LIITE 1: VEDYN KANSSA YHTEENSOPIVAT MATERIAALIT

Materiaali	Vety		Huomiot
	Kaasu	Neste	
Alumiini ja alumiiniseokset	Kyllä	Kyllä	
Austeniittinen ruostumaton teräs (> 7 % nikkeli (kuten 304, 304L, 308, 316, 321, 347))	Kyllä	Kyllä	Martensiittinen konversio matalissa lämpötiloissa, jos rasitus ylittää myötörajan
Hiiliteräs	Kyllä	Ei	Liian hauras nestevetysovelluksiin
Kupari ja kupariseokset (kuten messinki, pronssi ja kupari-nikkeli seokset)	Kyllä	Kyllä	
Harmaa-, pallografiiti- tai tavallinen valurauta	Ei	Ei	Ei sallittu vetysovelluksissa
Niukkaseosteinen teräs	Kyllä	Ei	Liian hauras nestevetysovelluksiin
Nikkeli tai nikkelseokset (kuten Inconel tai Monel)	Ei	Kyllä	Herkkyys vetyhaurastumiselle
Nikkeliteräs (kuten 2.25 %, 3.5 %, 5 % ja 9 % Ni)	Ei	Ei	Sitkeyden menetys
Titaani ja titaaniseokset	Kyllä	Kyllä	

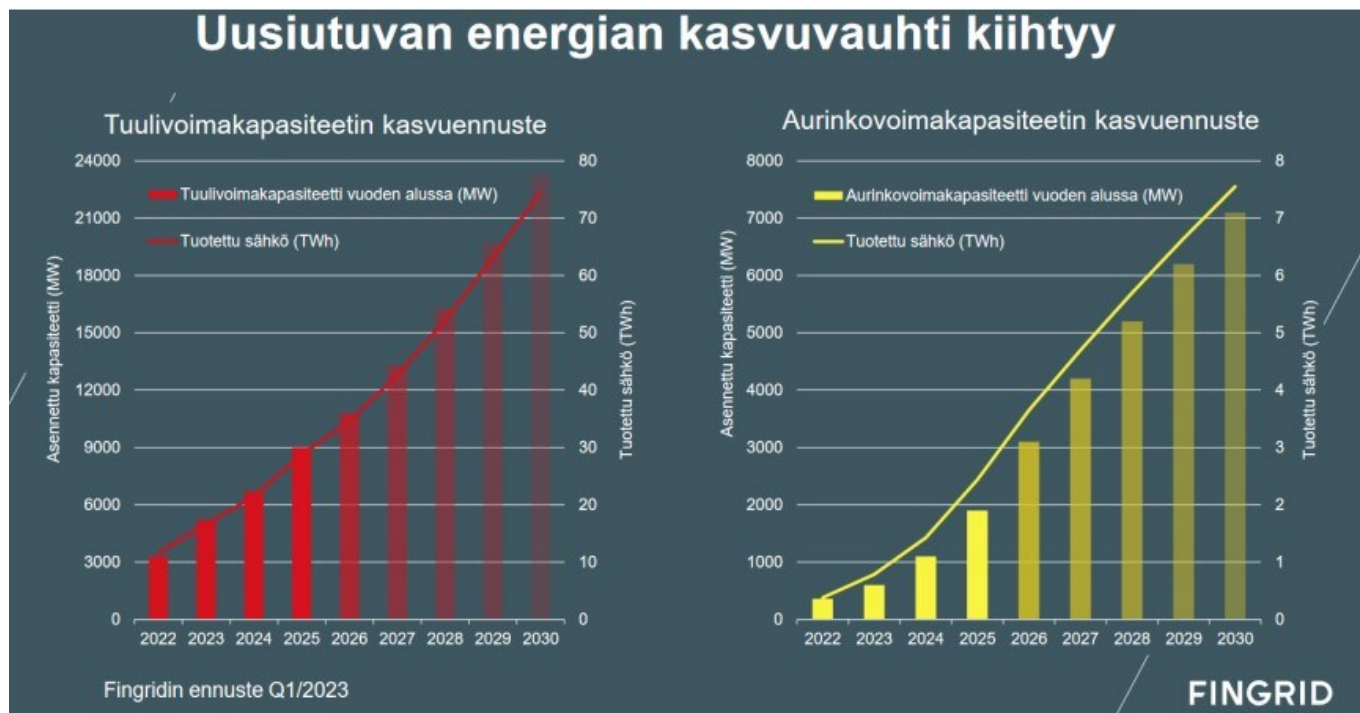
(Copyright Afry Finland Oy 25.9.2022)

LIITE 2: VEDYN TANKKAUSASEMAT EUROOPASSA



Saksasta löytyy ylivoimaisesti eniten vedyntankkausasemia, 87kpl. Tämän lisäksi suunnitteilla on 26 uutta tankkausasemaa. Suomeen on vasta suunnitteilla ja ensimmäiset asemat avattane vuonna 2025. (Copyright H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG)

LIITE 3: UUSIUTUVAN ENERGIAN KASVUENNUSTE

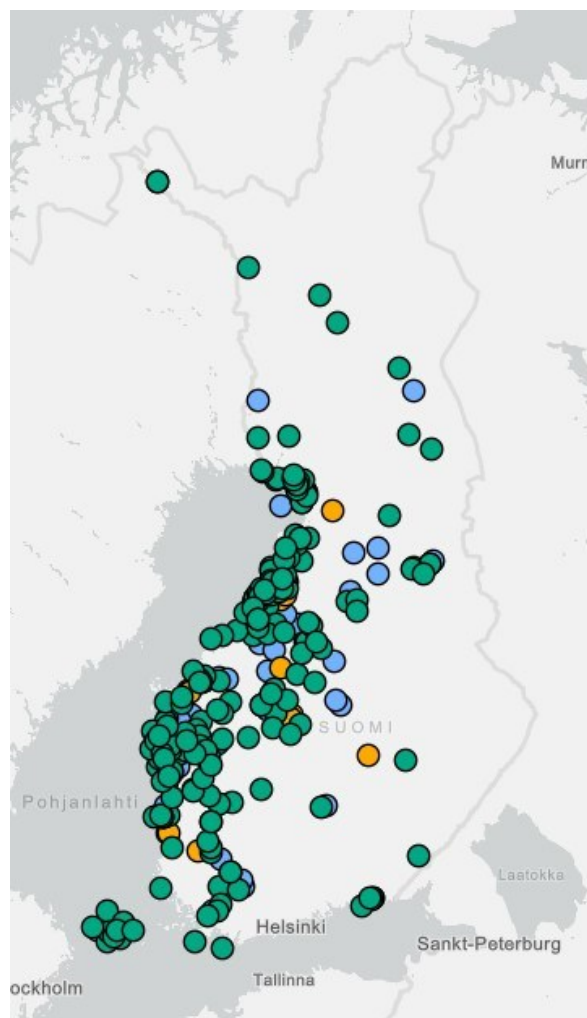


Suomen kilpailuetu on EU:n halvimmat maatuuli ja aurinkovoiman tuotantohinnat. Liittymiskyselyitä Fingridille on tehty yli 280 GW, joista maatuulivoimaa 160 GW, merituulivoimaa 55 GW ja aurinkovoimaa 65 GW. (Kuva: Jussi Närhi, Fingrid 16.6.2023)

Viereisessä karttakuvassa, näkyy vihreällä toiminnassa olevat tuulivoimapaistot, oranssilla rakenteilla olevat ja sinisellä luvitetut tuulivoimapaistot.

Itä-Suomeen tarvittaisiin tuulivoimaa, mutta tuulimyllyjen aiheuttamat katvealueet ja häiriöt tutkuvissa, estävät rakentamisen.

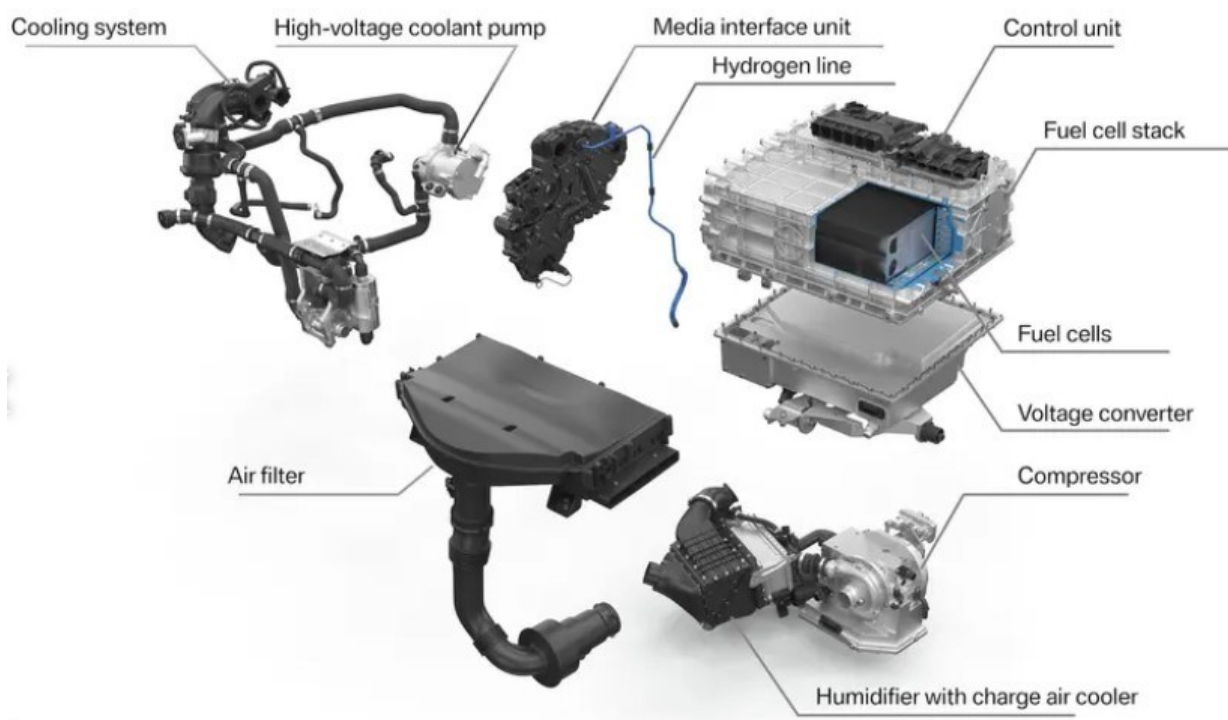
Kuva Tuulivoimayhdistys 2024.



LIITE 4: BMW POLTTOKENNOAUTON TEKNIikka

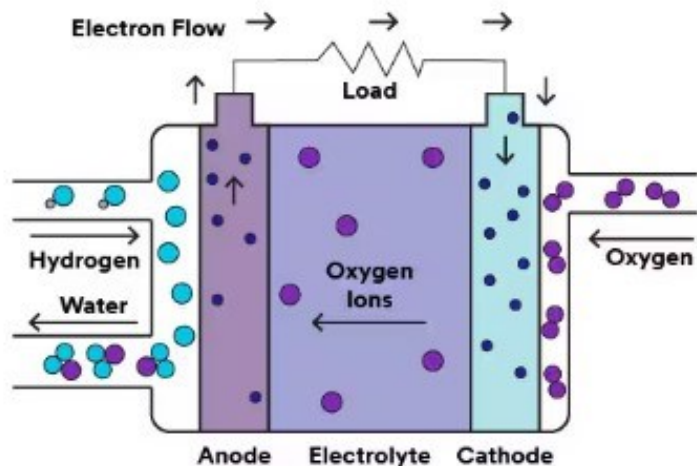


BMW iX5 HYDROGEN polttokennoauton tekniikka. Polttokenno, vetysäiliöt ja sähkömoottori.

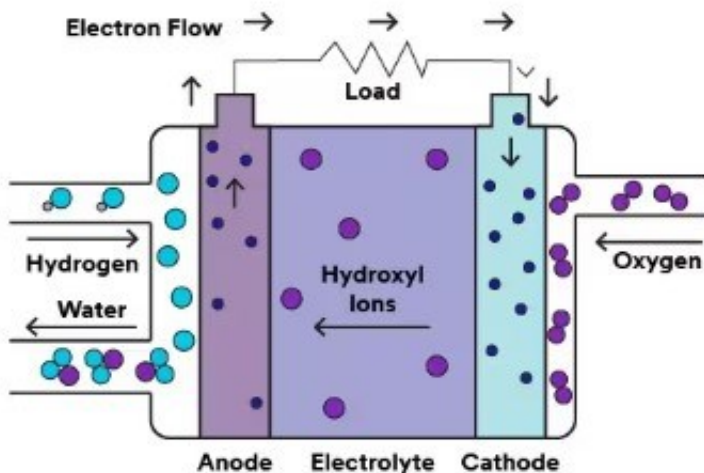


Polttokenno ja sen tarvitsemat lisälaitteet.

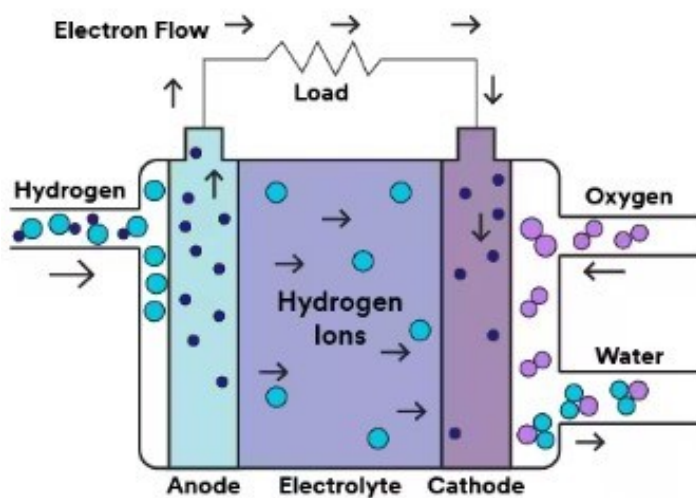
LIITE 5: POLTTOKENNOT SOFC, AEF JA PAFC



SOFC, eli kiinteäoksidipolttokennot ovat tunnetusti energiatehokkaita, kestäviä ja soveltuvat hyvin sovelluksiin, joissa hukkalämpöä voidaan käyttää hyödyksi. PEM-polttokennoihin verrattuna, käynnistysajat ovat pitkät ja korkeat, jopa 1000°C käyttölämpötilat eivät sovellu liikennesovelluksiin. SOFC soveltuu pääasiassa kiinteisiin kohteisiin sähköntuottoon, kuten sairaaloihin tai datakeskuksiin. (3M 2024; kuva © 3M 2024)



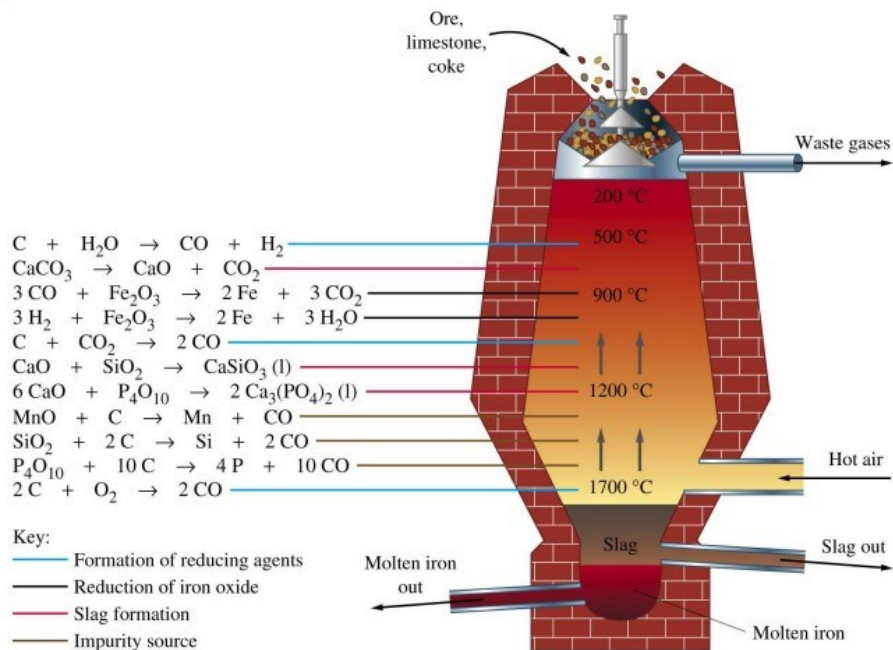
AFC, eli emäksisissä polttokennoissa käytetään elektrolyytinä yleensä kaliumhydroksidia, jonka avulla hydroksidi-ionit johdetaan katodilta anodille. Kuten SOFC:ssä, myös AFC:ssä vesi muodostuu anodin puolelle. AFC on vanhin vetypolttokennotyyppi ja ensimmäiset kehitettiin jo vuonna 1932. NASA käytti AFC:tä Apollo lennoilla vuosina 1968–72. AFC on energiatehokas ja luotettava kennotyyppi. Myös kennon materiaalikustannukset ovat suhteellisen alhaiset. (3M 2024; kuva © 3M 2024)



PAFC eli fosforihappopolttokeinoissa, käytetään nestemäistä fosforihappoelektrolyyttiä. PAFC:ssä, vetyionit kulkevat elektrolyytin läpi katodille ja elektronit kulkevat kuormituspiirin kautta, aivan kuten PEM-keinoissakin. Vetyionit ja happi yhdistyessään muodostavat vettä katodin puolelle. Poiketen muista polttokeinoilleista, PAFC sietää paremmin polttoainevirran epäpuhtauksia, esimerkiksi hiilidioksidia (CO_2). PAFC toimintalämpöalue on noin 150–200 °C. (3M 2024; kuva © 3M 2024)

LIITE 6. MASUUNIN PÄÄREAKTIOT

Masuunin pääreaktiot

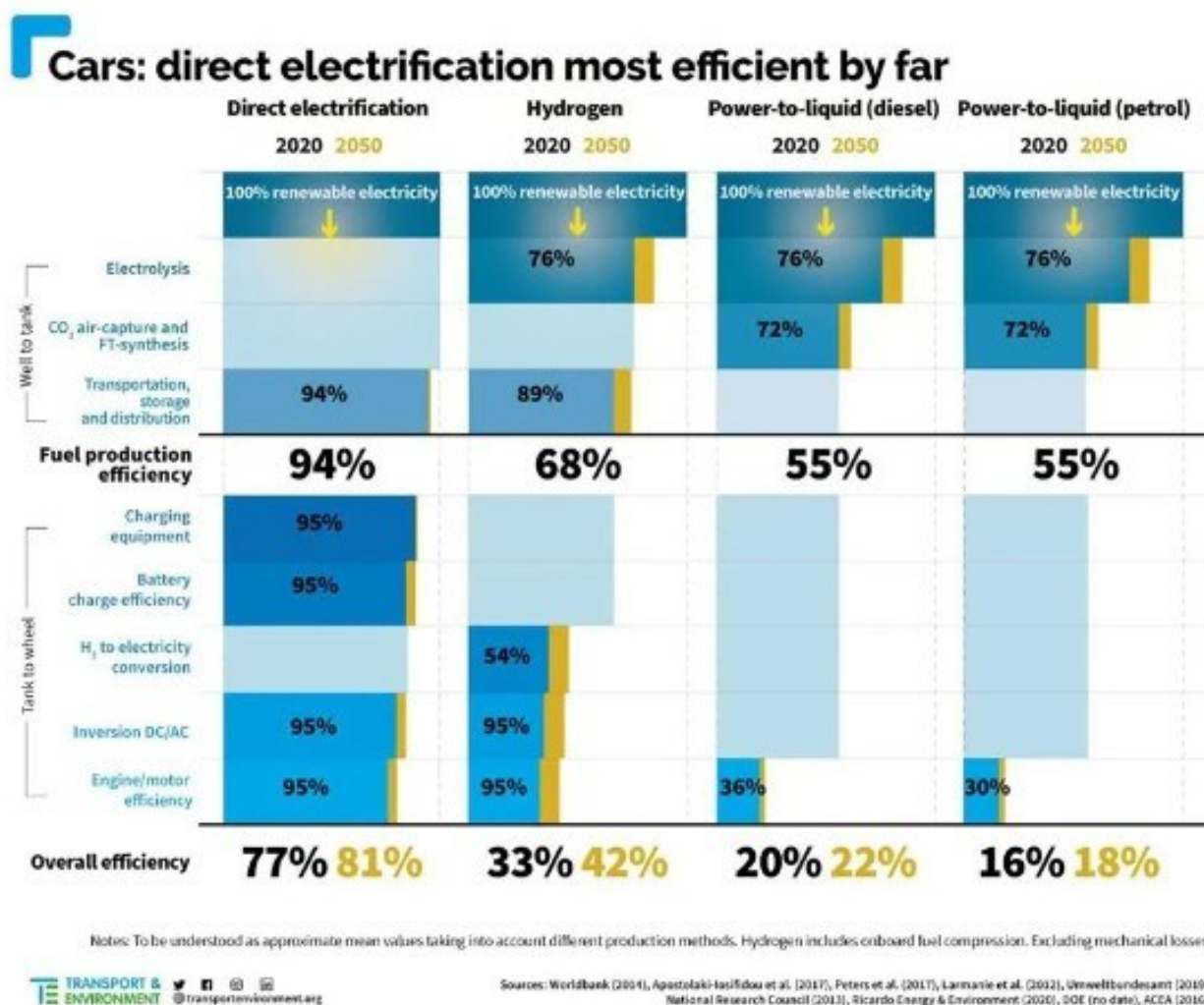
CO, C ja H₂ ovat pääpelkistin

LIITE 7: HABER-BOSCH KATALYTTITEKNOLOGIA

Catalyst	Reactor Temperature (°C)	Reactor Pressure [bar]	Ammonia Synthesis Rate [$\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$]
Iron	100	1	155
7% Fe/CeO ₂ (applied electric field 6 mA)	300	1	1703
20% Fe–BaH ₂	400	9	6800
1.2% Fe/BaCeO _{3-x} H _y N _z FeOOH/Al ₂ O ₃ (K (5 wt%))	500	90	32,850
Ruthenium	50	1	50
Ru(12 wt%)/CaFH	400	10	60,200
Ru(5 wt%)/La _{0.5} Pr _{0.5} O _{1.75}	400	30	64,000
Ru(5 wt%)/Pr ₂ O ₃	400	100	312,500
Ru/AC-G (Ba 9 wt%)	400	100	312,500
Cobalt	300	10	1866
20% Co–BaH ₂ (chemical looping process)	350	10	576
20% Co–BaH ₂	300	10	48
Nickel	400	90	6500
Ni–BaH ₂	400	90	6500
Ni/CeN NPs	400	90	1450
molybdenum nitride and ternary nitrides	400	90	1450
CeN NPs	500	10	354
Ni _{1.1} Fe _{0.9} Mo ₃ N	400	10	166
NiCoMo ₃ N	400	10	166
K ₂ [Mn(NH ₂) ₄]	400	100	11,141

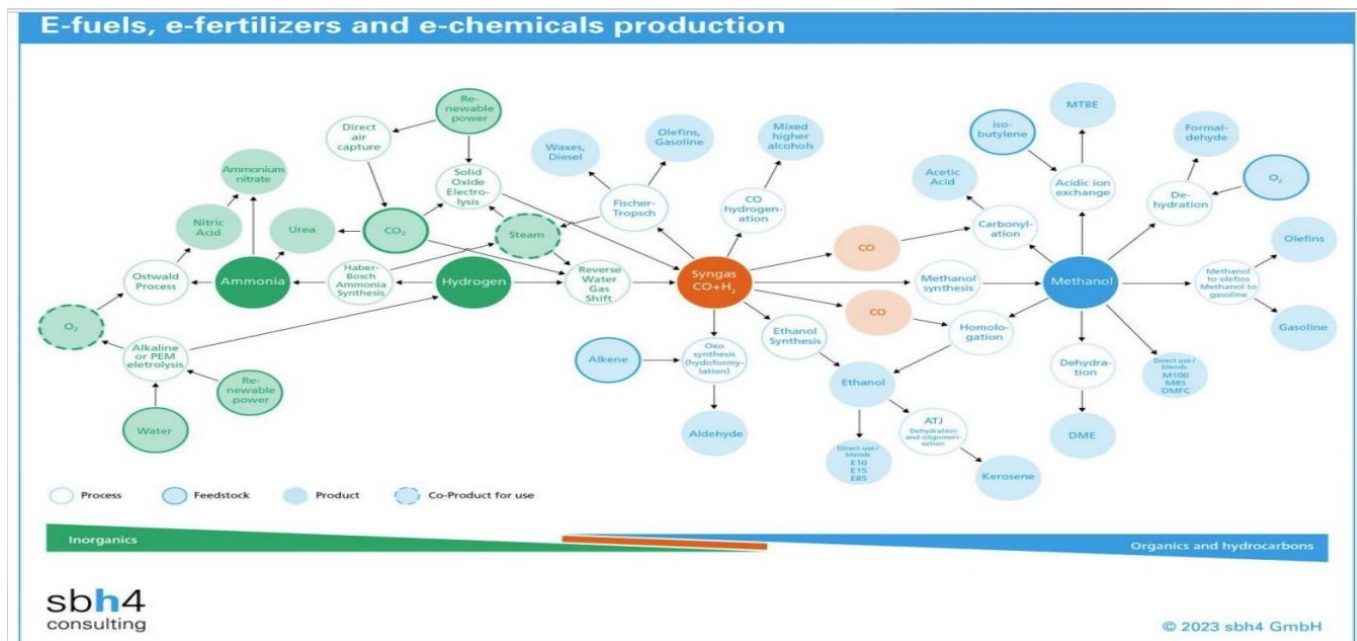
Kehitys katalyyttiteknologiassa on parantanut Haber-Bosch prosessin tehokkuutta, mahdollistamalla alhaisemmat käyttöpaineet ja lämpötilat. (Adeli & Nachtane & Faik & Saifaoui & Boulezhar 2023)

LIITE 8: POLTTOAINEIDEN HYÖTYSUHTEITA



Synteettiset polttoaineet ovat hyötysuhteeltaan varsin huonoja, kun verrataan akkukäyttöisiin sähköautoihin. Polttomoottorit pudottavat kannattavuutta huomattavasti. Hyötysuhde ei näyttäisi parantuvan juurikaan vuoteen 2050 mennessä. Sen sijaan polttokennoautojen kehitys näyttäisi menevän reilusti eteenpäin, jääden hyötysuhteeltaan kuitenkin puoleen, akkusähköautoihin verrattuna. (Morris 2021; Kuva Transport & Environment)

LIITE 9: VEDYN JOHDANNAISET



Havainnekuva, mitä lopputuotteita on saatavilla eri prosesseilla ja raaka-aineilla. (Stephen B. Harrison sbh4 Consulting 2023)

LIITE 10: SYNTEETTISEN METAANIN TUOTANTOON TARVITTAVAT AINEMÄÄRÄT

$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$									
$n(CO_2)=$	1512 g/s	/	(12,01 + 2 * 16,00) g/mol	=	34,3574 mol	<-- Laita siniseen ruutuun käytettävissä olevan hiilidioksidin määrä			
$n(H_2)=$	4 * n (CO ₂)			=	137,4296 mol				
$n(H_2O)=$	2 * n (CO ₂)			=	68,7148 mol				
$n(O_2)=$	(H ₂) / 2			=	68,7148 mol				
$m(CO_2)=$					1512 g/s	5443,2 kg/h	<-- Käytettävissä oleva hiilidioksidin määrä		
$m(H_2)=$	137,430 mol * (2*1,008)g/mol			=	277,06 g/s	997,41 kg/h	<-- Tarvittava vedyn määrä		
$m(CH_4)=$	34,357 mol * (12,01+4*1,008)g/mol			=	551,20 g/s	1984,30 kg/h	<-- Prosessissa syntyvän metaanin määrä		
$m(H_2O)=$	68,715 mol * (2*1,008+16,00)g/mol			=	1237,90 g/s	4456,43 kg/h	<-- Prosessissa syntyvän veden määrä		
Metaanin energiasäilitö (E=m*e)	=	49853 MJ/t	* (1984,3042 / 1000)	=	98923,52 MJ	27,48 MWh			
Metanointireaktiossa syntyvä lämpö $Q=n*\Delta H'_0$				=	20420,7 MJ	5,67 MWh	<-- Hukkalämpö		
Metaanin energiasäilön avulla arvioidaan metanointireaktioon tarvittavaa vedyn määrää.									
Hyötysuhteena käytetään $\eta=82,6\%$									
$\eta=E_{out} / E_{in} \rightarrow E_{out} / E_{in} / \eta =$			98923,52 MJ /	0,826	=	119762,125 MJ			
					=	33,27 MWh			
massa, $m=E / e =$	119762,13 MJ	/	120087 MJ/t		=	997,29 kg/h			
Vedyn ainemäärä, $n=m/M=$	997295 g	/	2,016 g/mol		=	494689,817 mol			
Elektrolyysi									
Vedyntuotantoon kuluva sähköenergian määrä eri hyötysuhteille									
$\eta = E_{out} / E_{in} \rightarrow E_{in} = E_{out} / \eta$									
							Hukkalämpö		
Ein ($\eta = 50\%$)	=	33,27 MWh /	0,5	=	66,53 MWh	33,27 MWh			
Ein ($\eta = 60\%$)	=	33,27 MWh /	0,6	=	55,45 MWh	22,18 MWh			
Ein ($\eta = 80\%$)	=	33,27 MWh /	0,8	=	41,58 MWh	8,32 MWh			
Ein ($\eta = 100\%$)	=	33,27 MWh /	1	=	33,27 MWh	0,00 MWh			

Jos hiilidioksidia on saatavilla **5443,2 kg/h**, niin tarvitaan metaanin valmistukseen **vetyä 997,41 kg/h**, jolloin prosessissa syntyy **metaania 1984,3 kg/h** ja sivutuotteena syntyy **vettä 4456,43 kg/h**.

Metanoinnista syntyvän hukkalämmön määrä on 5,67 MWh ja vedyn elektrolyysissä hukkalämpöä syntyy 22,18 MWh. Yhteensä siis 27,85 MWh.

Prosessin hyötysuhde on noin 50 prosenttia (sähkö->vety->metaani). Elektrolyysin hyötysuhteeksi valittiin 60 prosenttia ja metanoinnin hyötysuhde on noin 83 prosenttia.

Elektrolyysiin syötetty sähköteho on 55,45 MWh.

Suurin osa syntyvästä vedestä voidaan kierrättää uudelleen elektrolyysille, puhdistuksen jälkeen.