



Vety ja vaihtoehtoiset polttoaineet henkilöautoissa

Ansamaa Joonas

Opinnäytetyö

Huhtikuu 2025

Autotekniikka

Älykkäät koneet

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Autotekniikan tutkinto-ohjelma
Älykkäät koneet

ANSAMAA, JOONAS:

Vety ja vaihtoehtoiset polttoaineet henkilöautoissa

Opinnäytetyö 38 sivua, joista liitteitä 0 sivua

Huhtikuu 2025

Tämä opinnäytetyö tarkasteli vedyn ja muiden vaihtoehtoisten polttoaineiden merkitystä henkilöautoilun hiilijalanjäljen pienentämisessä. Euroopan unionin päästörajoitukset ja kestävä kehityksen tavoitteet ohjaavat auto- ja energiasektoria etsimään fossiilisia polttoaineita korvaavia ratkaisuja. Työssä kartoitettiin vedyn tuotanto-, varastointi- ja jakelumenetelmiä sekä sen käyttöä vetypolttomootoreissa ja polttokennoajoneuvoissa. Lisäksi tarkasteltiin muita vaihtoehtoisia polttoaineita, kuten uusiutuvia biopolttoaineita, maakaasupohjaisia polttoaineita ja synteettisiä polttoaineita.

Opinnäytetyössä arvioitiin vaihtoehtoisten polttoaineiden soveltuvuutta henkilöautoiluun teknisten ominaisuuksien, infrastruktuurin kehityksen ja taloudellisten näkökulmien perusteella. Vedyn osalta keskeisessä roolissa olivat sen valmistusteknologiat, varastoinnin ja jakelun haasteet sekä historiallinen kehitys ajoneuvokäytössä. Lisäksi työssä analysoitiin vaihtoehtoisten polttoaineiden roolia liikenteen päästöjen vähentämisessä pitkällä aikavälillä.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että vedyllä ja muilla vaihtoehtoisilla polttoaineilla on merkittävä rooli tulevaisuuden päästöttömässä liikenteessä. Vetytalouden laajamittainen käyttöönotto edellyttää kuitenkin teknologian kehitystä, infrastruktuuri-investointeja sekä poliittisia kannustimia. Vaihtoehtoiset polttoaineet voivat tukea sähköautojen yleistymistä ja tarjota ratkaisuja erityisesti pitkän matkan liikenteeseen sekä alueille, joissa latausinfrastruktuuri on puutteellinen.

Opinnäytetyön tuloksia voidaan hyödyntää vaihtoehtoisten polttoaineiden kehittämisessä ja niiden soveltuvuuden arvioinnissa eri käyttöympäristöihin. Jatkossa tutkimusta voitaisiin laajentaa vetytalouden taloudellisiin vaikutuksiin ja uusien teknologioiden käyttöönoton edellytyksiin.

Asiasanat: vety, vaihtoehtoiset polttoaineet, vetytalous, polttokennoajoneuvot

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Automotive Engineering
Intelligent Machines

ANSAMAA, JOONAS:
Hydrogen and Alternative Fuels in Passenger Cars

Bachelor's thesis 38 pages, 0 appendices
April 2025

The purpose of this thesis was to examine the role of hydrogen and other alternative fuels in reducing the carbon footprint of passenger transport in Europe. The emission limits set by the European Union and the goals of sustainable development are driving the automotive and energy sectors to seek solutions that replace fossil fuels. The aim of this thesis was to explore the methods of hydrogen production, storage and distribution, as well as its use in hydrogen internal combustion engines and fuel cell vehicles. Additionally, other alternative fuels, such as renewable biofuels, natural gas-based fuels and synthetic fuels were investigated

The suitability of alternative fuels for passenger transport was assessed from the perspective of technical characteristics, infrastructure development, and economic aspects. Regarding hydrogen, special attention was given to its most common production technologies and the challenges related to its storage and distribution. Furthermore, the history of hydrogen in vehicle applications and its future development prospect was examined

The findings indicate that hydrogen and other alternative fuels will play a significant role in the future of zero-emission transport. However, the widespread adoption of hydrogen economy requires technological advancements, investments in infrastructure, and political incentives. Alternative fuels can complement the increasing adoption of electric vehicles and provide solutions particularly for long-distance transport and regions with insufficient charging infrastructure.

Keywords: hydrogen, alternative fuels, hydrogen economy, fuel cell vehicles

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	POLIITTISET PAKOTTEET HENKILÖAUTOILUSSA.....	7
3	VEDYN TUOTANTO.....	8
3.1	Elektrolyysi.....	8
3.1.1	Alkalielektrolyysi	9
3.1.2	Protoninvaihtomembraani elektrolyysi (PEM).....	9
3.1.3	Kiinteäoksidi-elektrolyysi (SOEC).....	10
3.2	Höyryreformointi.....	11
3.3	Power to x (P2X).....	12
3.3.1	HyBalance-hanke	13
3.4	Vedyn jakelu ja varastointi	14
3.5	Vedyn varastoinnin turvallisuus henkilöautoissa	16
3.6	Vedyn historia ajoneuvo käytössä.....	16
4	VEDYN KÄYTTÖ HENKILÖAUTOISSA	19
4.1	Vetypolttomoottori (HICE)	19
4.2	Polttokennoajoneuvot (FCEV).....	19
4.3	Vetyautoilun tulevaisuus	21
4.4	Vedyn sovellukset muissa kulkuneuvoissa	24
4.4.1	Japanilainen yhteistyömoottoripyörä	24
4.4.2	Eurooppalainen Hydrocycle-hanke.....	26
5	MUUT VAIHTOEHTOISET POLTTOAINEET	27
5.1	Uusiutuvat polttoaineet.....	29
5.2	Nestekaasu (LPG).....	30
5.3	Paineistettu maakaasu (CNG)	31
5.4	Synteettiset polttoaineet.....	31
6	YHTEENVETO	33
	LÄHTEET.....	34

Lyhenteet

PEM: Protonivaihtomembraani elektrolyysi, vedyn tuotantotapa

SOEC: Kiinteäoksidi elektrolyysi, vedyn tuotantotapa

P2X: Power to x, päästöttömien polttoaineiden tuotantotapa

HICE: Hydrogen internal combustion engine, vetypolttomoottori

FCEV: Fuel cell electric vehicle, polttokennoajoneuvo

BEV: Battery electric vehicle, sähköajoneuvo

PHEV: Plug in hybrid electric vehicle, hybridi-auto

LPG: Liquefied petroleum gas, nestekaasu

CNG: Compressed Natural gas, paineistettu maakaasu

LNG: Liquefied natural gas, nesteytetty maakaasu

FFV: Flexible fuel vehicle, etanoli-bensiiniauto

AFI: Alternative fuel infrastructure, vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuuri

E-SAF: Sustainable aviation fuel, lentoliikennepolttoaine

1 JOHDANTO

Tässä työssä käsitellään vedyn ja muiden vaihtoehtoisten polttoaineiden roolia, kun yritetään keksiä ratkaisuita henkilöautoilun hiilijalanjäljen pienentämiseksi. Euroopan unionin päästörajoitukset, sekä kestävä kehityksen tavoitteet ovat ajaneet auto- ja energiasektoria etsimään korvaavia vaihtoehtoja perinteisille fossiilisille polttoaineille. Erityisesti ajoneuvosektorilla on käynnissä merkittävä murros, jossa pyritään kehittämään päästöttömiä ja vähäpäästöisiä energiaratkaisuja. Työ on tehty henkilöautoilun näkökulmasta, eikä siinä keskitytä ras- kaampiin ajoneuvoihin.

Työssä tarkastellaan vedyn tuotantomenetelmiä, varastointia, jakelua sekä sen käyttöä polttomoottori ja polttokennoajoneuvoissa. Vedyn rinnalla tarkastellaan myös muita vaihtoehtoisia polttoaineita, joilla on potentiaalia vähentää henkilö- autoilun päästöjä ja jotka voivat muodostaa merkittävän osan tulevaisuuden energiaratkaisuista. Käsiteltäviä aineita ovat muun muassa uusiutuvat biopoltto- aineet, maakaasupohjaiset polttoaineet sekä synteettiset polttoaineet. Työssä arvioidaan näiden polttoaineiden soveltuvuutta henkilöautoiluun teknisten omi- naisuuksien, infrastruktuurin kehityksen ja taloudellisten näkökulmien valossa, sekä tarkastellaan niiden roolia liikenteen päästöjen vähentämisessä pitkällä ai- kavälillä.

Työn tavoitteena on antaa kokonaiskuva vaihtoehtoisten polttoaineiden nykyti- lasta ja kehityssuunnista henkilöautosektorilla. Tarkastelu perustuu ajankohtai- seen tutkimustietoon, säädöksiin ja alan kehitykseen, jotta voidaan hahmottaa eri polttoainevaihtoehtojen vaikutukset ja haasteet tulevaisuuden henkilöautoi- lussa.

2 POLIITTISET PAKOTTEET HENKILÖAUTOILUSSA

Euroopan unioni on sitoutunut saavuttamaan ilmastoneutraaliuden vuoteen 2050 mennessä, ja yksi keskeisistä keinoista tämän tavoitteen saavuttamiseksi on tieliikenteen hiilidioksidipäästöjen vähentäminen. Tieliikenne on vastuussa noin viidenneksestä EU:n hiilidioksidipäästöistä, minkä vuoksi EU on asettanut kunnianhimoiset päästövähennystavoitteet. Vuoteen 2030 mennessä uusien autojen hiilidioksidipäästöjä on tarkoitus vähentää 55 % ja pakettiautojen 50 % vuoden 2021 tasosta. Tavoitteena on, että kaikki uudet henkilö- ja pakettiautot ovat hiilidioksidipäästöttömiä vuoteen 2035 mennessä. Lainsäädännön mukaan uusien polttomoottoriautojen myynti kielletään vuodesta 2035 alkaen, mutta tämä ei kuitenkaan vaikuta jo liikenteessä oleviin ajoneuvoihin. (Euroopan parlamentti 2023).

Tulevaisuuden autoilun odotetaan perustuvan ensisijaisesti akkusähköajoneuvoihin, koska ne ovat kokonaistaloudellisesti edullisempia verrattuna muihin päästöttömiin vaihtoehtoihin, kuten vetyä tai synteettistä polttoainetta käyttäviin ajoneuvoihin. Päästöttömien ajoneuvojen infrastruktuurin kehittäminen on myös merkittävä osa EU:n ilmastostrategiaa. Parlamentti on hyväksynyt linjauksia, joilla lisätään lataus- ja vetytankkausasemien määrää erityisesti kaupunkien ulkopuolella. Sähköautojen toimintamatka kasvaa jatkuvasti, mikä helpottaa niiden käyttöä pitkän matkan liikenteessä. (Euroopan parlamentti 2023).

Tämän lisäksi Euroopan parlamentti ja neuvosto hyväksyi huhtikuussa 2023 Euro 7 -asetuksen, joka liitettiin osaksi vuoden 2021 saasteettomuussuunnitelmaa. Euro 7 -asetuksessa on ensimmäistä kertaa asetettu raja-arvot jarrujen hiukkaspäästöille sekä renkaiden kulumisesta aiheutuville päästöille. Nämä säännöt koskevat sekä henkilö- ja pakettiautoja että raskaita ajoneuvoja, mukaan lukien sähköajoneuvot. Lisäksi asetuksessa on tiukennettu ajoneuvojen käyttöikää koskevia vaatimuksia sekä kilometrimäärän että ajallisen keston osalta. (Euroopan unionin neuvosto 2024).

3 VEDYN TUOTANTO

Vety ei esiinny luonnossa vapaana vetymolekyylinä, vaan on sitoutuneena yhdisteisiin, kuten veteen ja hiilivetyihin. Tästä syystä sen erottaminen käyttökelpoiseksi edellyttää energiaa kuluttavia prosesseja. Tällaisia menetelmiä ovat esimerkiksi höyryreformointi, joka on maailmanlaajuisesti yleisin vedyn tuotantomenetelmä. Höyryreformoinnissa vetyä valmistetaan fossiilisesta maakaasusta, mutta tuotannossa pyritään siirtymään uusiutuviin lähteisiin. (Tukes 2024).

Suomessa on jo useita suunnitteilla tai rakenteilla olevia hankkeita, joissa keskitytään ns. vihreän vedyn tuotantoon. Tämän tuotantotavan keskeisin teknologia on elektrolyysi, jossa vesi hajotetaan vedeksi ja hapeksi uusiutuvalla energialla tuotetun sähkön avulla. (Tukes 2024).

3.1 Elektrolyysi

Elektrolyysi on vedyn tuotantomenetelmä, joka mahdollistaa hiilineutraalin vedyntuotannon, edellyttäen, että prosessiin käytettävä sähkö on peräisin uusiutuvista energialähteistä (Valtioneuvosto 2022). Elektrolyysi hajottaa veden vedyn ja hapen sähkökemiallisesti, kuluttaen noin 55 kWh/kg vetyä, josta 30 % muuttuu lämmöksi. Elektrolyysissä syntyvä happi voidaan hyödyntää teollisuudessa. Kulutuksesta näkee, että elektrolyysi on paljon sähköä kuluttava menetelmä eli toisin sanoen kallis (Tukes 2024). Elektrolyysissä sähköä tuottavaa laitetta, joka hajottaa veden vedyksi ja hapeksi, kutsutaan elektrolyyseriksi. Elektrolyysimenetelmiä on useita erilaisia, niillä kaikilla on erilaiset ominaisuudet, jotka sopivat tietyille käyttökohteille. Tässä luvussa käsitellään kolmea elektrolyysin pääteknologiaa, joiden toimintaperiaatteet näkyvät kuvassa 1 (Tukes 2024). Jokaiselle elektrolyysiteknologialle on kuitenkin yhteinen tekijä, se että ne vaativat kompressorin. Kompressorilla tiivistetään vetyä, jotta sen energiatiheyttä saadaan nostettua. Kompressiossa kaasumaisen aineen lämpötila nousee, ja vedyn kanssa on välitettävä lämpötilan nousemista yli 130 °C. (Atlas Copco 2025).

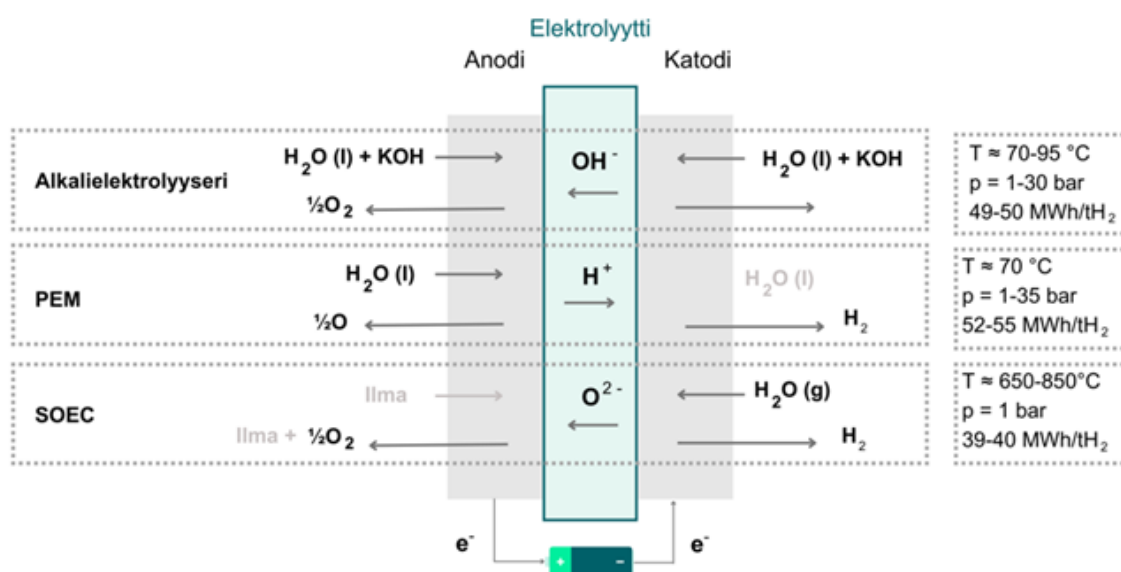
3.1.1 Alkalielektrolyysi

Alkalielektrolyysi on vanhin ja vakiintunein elektrolyysiteknologia. Siinä käytetään yleensä elektrolyyttinä emäksistä liuosta, kuten kaliumhydroksidia. Jotta estetään vedyn ja hapen sekoittuminen prosessin aikana, on metallielektrodien välissä huokoinen kalvo. Ensimmäisessä vaiheessa vesimolekyyli hajoaa katodilla hydroksidi-ioniksi ja vedyksi, jonka jälkeen hydroksidi-ioni kulkee huokoisen kalvon läpi anodille, jossa se muodostaa toisen hydroksidi-ionin kanssa happea ja vettä (Tukes 2024). Alkalielektrolyysi on ollut käytössä elektrolyysiteknologiosta kauan, koska siihen ei vaadita harvinaisia metalleja, kuten muihin teknologioihin ja se tekee siitä myös halvan vaihtoehdon. Tämä elektrolyysitekniikka on optimaalinen 10–20 MW:n sovelluksiin ja sen käyttöpaine vaihtelee 1–30 barin välillä. elektrolyysin aikana alkalikennon lämpötila on useimmiten 70–95 °C. Alkalielektrolyysin huonona puolena on sen hidas reagointi kennossa tapahtuviin muutoksiin ja sen käynnistysaika on 20 minuuttia eli suhteellisen pitkä. (Atlas Copco 2025).

3.1.2 Protoninvaihtomembraani elektrolyysi (PEM)

Protoninvaihtomembraani-elektrolyysissä (PEM) elektrolyyttinä toimii kiinteä, protoneja johtava erikoismuovikalvo, joka estää vedyn ja hapen sekoittumisen. Anodi ja katodi puristetaan kalvoa vasten tai integroidaan siihen, muodostaen elektrodikokoonpanon. Anodilla vesi hajoaa hapeksi ja protoneiksi (H^+), jotka kulkeutuvat kalvon läpi katodille ja reagoivat siellä elektronien kanssa muodostaen vetykaasua. PEM-elektrolyysin käyttölämpötila on 50–80 °C ja käyttöpaine vaihtelee 1–35 bar välillä. Menetelmän lopputuotteena saatava vety on yleensä ilman erillistä puhdistustakin lähes täysin puhdasta (99,99 %). (Tukes 2024). PEM elektrolyysi on tällä hetkellä yksi suosituimmista menetelmistä, koska sen käynnistysviive on lähes mitätön ja se reagoi muutoksiin huomattavasti nopeammin kuin esimerkiksi alkalielektrolyysi. Se on myös monikäyttöisempi vaihtoehto, koska sen käyttöväli 10–40 MW, sopii useampaan käyttökohteeseen. Sen suurin

ongelma onkin vain sen tarve harvinaisemmille metalleille, joka tekee sen käytöstä kallista. (Atlas Copco 2025).



KUVA 1. Elektrolyysikennojen toimintaperiaatteet. (Tukes 2024).

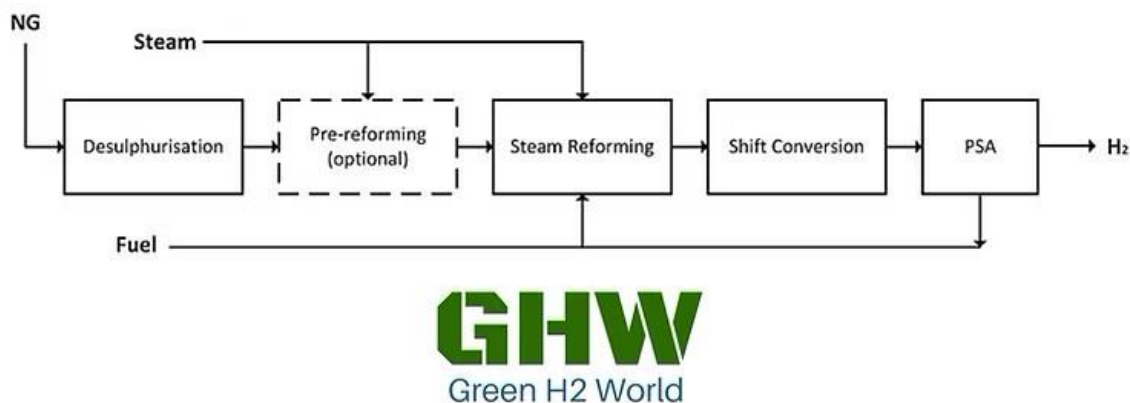
3.1.3 Kiinteäoksidi-elektrolyysi (SOEC)

Kiinteäoksidi-elektrolyysikennon toimintaperiaate poikkeaa kahdesta edeltävästä tavasta, sillä (SOEC) elektrolyytinä toimii kiinteä ionisesti johtava keraaminen kalvo, joka sijaitsee huokoisten elektrodien välissä. Katodilla vesi reagoi ulkoisesta piiristä tulevien elektronien kanssa, muodostaen vetykaasua ja happi-ioneja. Negatiivisesti varautuneet happi-ionit kulkeutuvat elektrolyytin läpi anodille, jossa ne muodostavat happikaasua ja vapauttavat elektroneja ulkoiseen piiriin. SOEC toimii korkeassa lämpötilassa, yleensä 650–850 °C. Sen paineistaminen on haastavaa, joten käyttöpaine on lähellä ilmanpainetta. (Tukes 2024). SOEC on tällä hetkellä tehokkain menetelmä, mutta se jakaa kuitenkin saman ongelman PEM-elektrolyysin kanssa, eli se on todella kallista. Tuotantomenetelmänä SOEC on aika uusi, eikä sitä ei ole otettu vielä laajasti käyttöön missään, mutta sen tehokkuuden ansiosta se on lähellä teollistumista. Koska se on suhteellisen uusi menetelmä se ei ole laajalti vielä käytössä, joten sen käyttökustannukset varmasti laskevat sen yleistymisen kanssa. (Atlas Copco 2025)

3.2 Höyryreformointi

Höyryreformoinnissa raaka-aineina käytetään yleisimmin maakaasua, mutta myös metanolia, kevyempiä hiilivetyjä ja happipitoisia hiilivetyjä voidaan hyödyntää. Prosessi alkaa poistamalla maakaasusta rikkiyhdisteet. Reformointi etenee kahdessa vaiheessa: ensimmäisessä hiilivety yhdistyy vesihöyryn kanssa jonka jälkeen ne syötetään katalyyttiseen putkireaktoriin, jossa syntyy vety-hiilimonoksidi-seos sekä pieni määrä hiilidioksidia. Toisessa vaiheessa, vesikaasun siirto-reaktiossa (water-gas shift), hiilimonoksidi reagoi vesihöyryn kanssa katalyytin avulla, tuottaen lisää vetyä ja hiilidioksidia. Lopuksi vety puhdistetaan PSA-yksikössä (pressure-swing adsorption), jossa hiilidioksidi ja muut epäpuhtaudet erotetaan tehokkaasti. (Tukes 2024).

STEAM METHANE REFORMING PROCESS

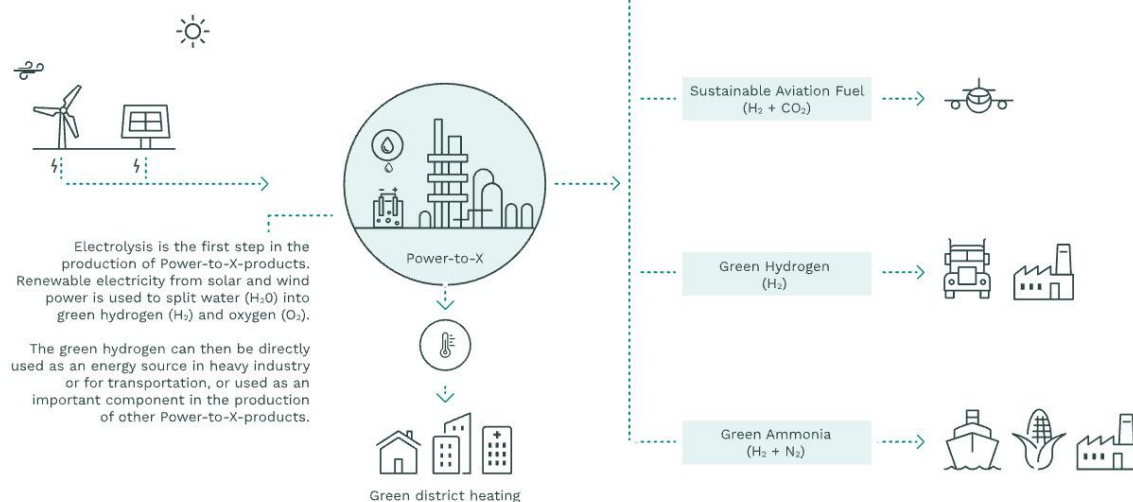


KUVA 2 Höyryreformoinnin vaiheet (Green H2 World 2023).

3.3 Power to x (P2X)

Power-to-X (P2X) on joukko teknologioita, joilla voidaan muuntaa sähköä kemiallisiksi energian kantajiksi, kuten vedyksi. P2X on keskeinen menetelmä, jolla pyritään ratkaisemaan ilmastonmuutoksen ongelmia. Yksinkertaisesti selitettynä P2X on prosessi, johon syötetään uusiutuvaa energiaa (P), kuten aurinko- tai tuulisähköä ja lopputuotteena saadaan erilaisia puhtaita polttoaineita tai kemikaleja (X). (European Energy n.d).

The European Energy Power-to-X process



KUVA 3 Power-to-X prosessi ja sen yleisimmät lopputuotteet (European Energy n.d.)

Kun tuotetaan vetyä P2X menetelmällä kuvan 3 mukaisesti, on sen keskeinen prosessi luvussa 3.1 selitetty elektrolyysi, jossa vesi hajotetaan vedyksi ja hapeksi sähkön avulla. Mikäli prosessiin käytettävä sähkö on peräisin uusiutuvista energialähteistä, lopputuloksena syntyy niin kutsuttua vihreää vetyä. Elektrolyysissä syntyy paljon lämpöä sivutuotteena, jota voidaan hyödyntää esimerkiksi asuntojen lämmitykseen. Vedyn lisäksi muita yleisimpiä P2X lopputuotteita ovat e-metanoli, jota käytetään kuorma-autojen ja laivojen energialähteenä, sekä muoviteollisuudessa, vihreä ammoniakki, jota hyödynnetään maataloudessa,

energiavarastona ja liikennesektorilla ja E-SAF, joka on ympäristöystävällisempi vaihtoehto lentopolttoaineelle. (European Energy n.d)

Vety toimii tehokkaana energian varastojana, sillä se mahdollistaa ylimääräisen uusiutuvan sähkön muuntamisen helposti kuljetettavaan ja varastoitavaan muotoon, kun luonto ei pysty tuottamaan kovaa tuulta tai auringonpaistetta. Vedyn kuljetus voidaan toteuttaa esimerkiksi siirtoputkistojen tai muun infrastruktuurin avulla, mikä tukee sen käyttöä eri sektoreilla, kuten teollisuudessa ja liikenteessä.

Lisäksi vety toimii lähtöaineena monissa P2X-prosesseissa. Esimerkiksi Power-to-Gas-tekniologiassa vetyä voidaan yhdistää hiilidioksidiin, jolloin syntyy metaania ja muita synteettisiä polttoaineita. Tällaiset ratkaisut mahdollistavat hiilineutraalin energijärjestelmän kehittämisen, sillä ne hyödyntävät teollisuuden hiilidioksidipäästöjä. P2X-tekniologiat tarjoavat merkittäviä mahdollisuuksia vetytalouden edistämiseen, sillä ne mahdollistavat uusiutuvan energian tehokkaan varastoinnin, jakelun ja hyödyntämisen eri sovelluksissa. (Ruth 2024).

3.3.1 HyBalance-hanke

HyBalance on luvussa 3.1 esiteltyyn P2X-menetelmään pohjautuva EU:n tukema Power-to-Hydrogen (PtH₂) -hanke. Hankkeen tarkoituksena on todentaa teknologian käytännön toimivuus sekä selvittää PtH₂:n potentiaaliset tulonlähteet huomioiden sekä nykyiset että tulevat sääntelyvaatimukset ja teknologian kehityksen suuntaukset. Hankkeessa hyödynnetään edullista tuulivoimaa vedyn tuotantoon elektrolyysin avulla, silloin kuin sähköä on yli tarpeen, jonka jälkeen sitä voidaan ohjata vedyn loppukäyttökohteisiin parhaiden liiketoimintamahdollisuuksien mukaisesti, esimerkiksi sähköntuotantoon sähköpulan aikana. (Horizon 2020 2025).



KUVA 4 Tanskassa sijaitseva HyBalance-hankkeen tuotantolaitos (HyBalance n.d).

Hanke toteutettiin Tanskaan rakennetun yhden megawatin Pth2-laitoksella (KUVA 4) Pohjois-Jyllannissa, Hobron kaupungissa. Hankkeeseen koottiin EU:n lisäksi toimijoita yksityiseltä sektorilta, jotka kattavat koko arvoketjun vedyn lopputähtäjästä sähkön tuottajiin. Vedyn tuotantolaitoksen läheisyydessä on useita käyttömahdollisuuksia, kuten polttokennokäyttöisten autojen ja linja-autojen tankkausasemat Hobrossa, paikallinen teollisuus sekä tulevaisuudessa vedyn varastointi suolaluoissa Hvornumissa ja Lille Torupissa. (Horizon 2020 2025).

3.4 Vedyn jakelu ja varastointi

Vedyn varastointi ja siirto ovat merkittäviä haasteita sen kemiallisten ominaisuuksien takia. Tällä hetkellä yleisin tapa varastoida vetyä on vetykompressio eli vedyn paineistaminen tankkiin. Vedyn tiheys on normaalissa ilmanpaineessa 20 °C lämpötilassa vain noin 0,083 kg/m³. Kun vety paineistetaan 350 barin paineeseen samassa lämpötilassa on sen tiheys 23,715 kg/m³ ja 700 barin paineistamisella ylletään jopa 39,75 kg/m³ tiheyteen. Jotkut raskaan kaluston kulkuneuvot esimerkiksi kuorma-autot, ovat varustettu 350 barin vetytankeilla. Tankatessa 50–70 kg vetyä tällaiseen tankkiin, kulkee 55 tonnin vetykuorma-auto 500–600 km matkan. Henkilöauto puolella Toyota Mirai:ssa on 700 barin vetytankki, johon mahtuu

5 kiloa vetyä ja tällä määrällä on ilmoitettu kantamaksi noin 600 km. (demaco n.d). Vaikka teoriassa kompressio vaikuttaa yksinkertaiselta menetelmältä, kuluttaa se paljon energiaa ja varastointi on tilaa vievää.

Jos vety muunnetaan nestemäiseksi, saavutetaan sillä suurempi varastointitiheys, kuin paineistamalla. Vety tiivistyy kaasusta nesteeksi, kun se jäädytetään $-252.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilaan, jolloin sen tiheys nousee 70.9 kg/m^3 (demaco n.d). Kun liikutaan näin alhaisissa varastointilämpötiloissa, on selvää, että pelkästään tämänkaltaisen lämpötilan ylläpitäminen on haastavaa puhumattakaan kryogeenisten järjestelmien monimutkaisuudesta. Näin ollen henkilöautoiluun tai muihin pienemmän kokoluokan ratkaisuihin nestemäinen vety ei sovellu. Suuremman kokoluokan järjestelmiin, kuten kuorma-autoihin, teollisuuden ratkaisuihin ja ilmailuteollisuuteen on nestemäisellä vedyllä hyvät edellytykset suuren energiatihetyensä ansiosta. (fastechus 2024).

Tällä hetkellä edellä mainittujen varastointimenetelmien lisäksi tutkijat ympäri maailmaa yrittävät kehittää ja keksiä uusia tehokkaampia tapoja vedyn varastoinniseksi. Yksi kehitettävä menetelmä on metallihydridit, mitkä ovat tietynlaisia seoksia, jotka varastoivat vetyä kideomaiseen rakenteeseensa. Näitä seoksia ovat esimerkiksi titaanipohjaiset hydridit (TiFe ja TiMn), sekä magnesiumhydridi (MgH_2). Metallihydridejä kuumennettaessa vapauttavat ne varastoidun vedyn. Ne soveltuvat useisiin erilaisiin käyttötarkoituksiin, koska jokainen seos vaatii eri paine- ja lämpötilaolosuhteet sekä niiden eri varastointikapasiteetin vuoksi. (fastechus 2024).

Toinen tutkimusten alla oleva lähestymistapa liittyy kemiallisiin kantajiin. Vety voidaan sitoa molekyyliin kuten ammoniakkiin tai tietynlaisiin orgaanisiin yhdisteisiin. Tästä syntyviä aineita on helpompi kuljettaa jo olemassa olevaa infrastruktuuria käyttäen. Vetyä voidaan sitoa myös niin kutsuttuihin hydrogeeleihin eli vesipohjaisiin geeleihin. Tutkimuksissa on ollut toiveita herättäviä vaikutuksia vedyn vapauttamisessa ja imeyttämässä, joka voisi mahdollistaa suuritiheyksisen varastoinnin turvallisesti ilman korkeaa painetta tai todella matalia lämpötiloja. Edellä mainitut menetelmät ovat kuitenkin vasta kehitysasteella ja tarvitaan paljon tutkimusta, sekä testausta ennen kuin niitä voidaan ottaa käyttöön käytännön sovelluksissa. (fastechus 2024).

3.5 Vedyn varastoinnin turvallisuus henkilöautoissa

Vedyn varastointiin henkilöautoissa liittyy merkittäviä turvallisuuskysymyksiä, jotka on otettava huomioon teknologian laajamittaisen käyttöönoton yhteydessä. Ajoneuvoihin tankattu vety säilytetään korkeapaineisissa säiliöissä, mikä on herättänyt huolta kaasun syttyvyydestä ja mahdollisista turvallisuusriskeistä. On kuitenkin tärkeää huomata, että kaikki kaupallisesti saatavilla olevat vetyajoneuvot ovat läpäisseet tiukat turvallisuustestit ennen markkinoille tuloa. (TWI Global n.d.).

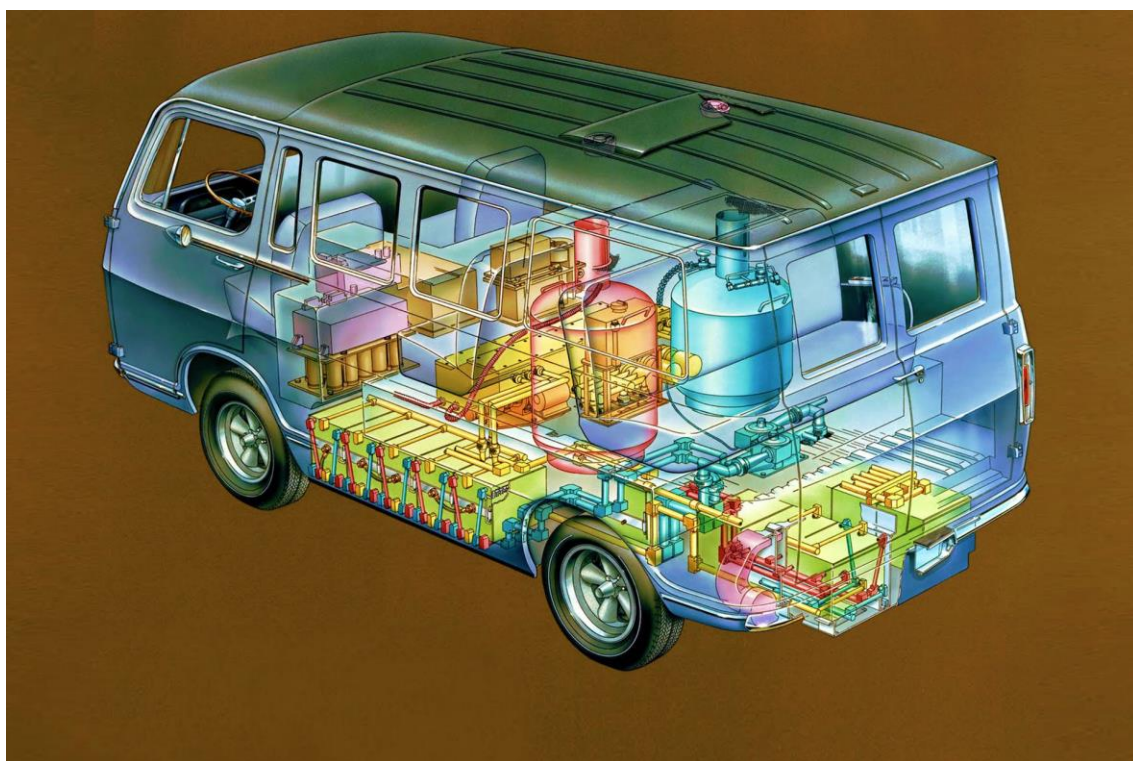
Vedyn kuljetuksen osalta on tutkittu vaihtoehtoisia varastointimenetelmiä, kuten ammoniakkiboraanin käyttöä vedyn sitomiseen. Tästä yhdisteestä vety voidaan vapauttaa kalvoteknologian avulla, mikä parantaa vedyn kuljetettavuutta ja turvallisuutta. Ammoniakki on varastoinnin ja kuljetuksen kannalta helpommin hallittavissa kuin puhdas vety, mikä tekee siitä potentiaalisen vaihtoehdon vedyn logistiikan kehittämisessä. (TWI Global n.d.).

Lisäksi vetyä on varastoitava jakeluasemilla, mikä tuo mukanaan uusia haasteita. Vedyn alhainen syttymisenergia ja korkea palamisenergia, yhdistettynä sen taipumukseen vuotaa säiliöistä, ovat aiheuttaneet räjähdyksiä joillakin tankkausasemilla. Tämä turvallisuusnäkökulma on keskeinen ja edellyttää huolellista huomiointia ennen vedyn laajamittaista käyttöönottoa liikennepolttoaineena. (TWI Global n.d.).

3.6 Vedyn historia ajoneuvo käytössä

Vuonna 1847 fyysikko, lakimies ja kemisti William Grove keksi ensimmäisen toimivan polttokennon, eli laitteen, joka muuntaa vedyn ja hapen kemiallisen energian sähköksi. Polttokennojen historiassa otettiin seuraava merkittävä askel eteenpäin vuosien 1939 ja 1959 välillä, kun englantilainen insinööri Francis Thomas Bacon kehitti Groven aloittamaa työtä. Ensimmäisenä nykyaikaisena polttokennoja käyttävänä ajoneuvona pidetään Allis-Chalmersin maatilatrakto-

ria, johon asennettiin polttokennojärjestelmä 1950-luvun loppu puolella. Ensimmäinen samaa teknologiaa käyttävä maantieajoneuvo oli General Motorsin Chevrolet Electrovan (KUVA 5), joka esiteltiin maailmalle vuonna 1966. Electrovanille ilmoitettiin toimintamatkaksi lähes 200 km, huippunopeuden ollessa 112 km/h. 1980- ja 1990-luvuilla vetyä käytettiin pääasiassa avaruussukkuloiden polttoaineena, mutta vuoteen 2001 mennessä kehitettiin ensimmäiset 700 barin (10 000 PSI) vetykaasutankit. Tämä oli merkittävä edistysaskel, sillä teknologia mahdollisti vedyn laajemman käytön ajoneuvoissa ja pidensi niiden ajomatkaa. (Corby 2021). Vaikka vety- ja sähköautot koetaan uusina keksintöinä, ovat ne olleet käytössä jo pitkän aikaa. Ei sen takia, että ne ovat tärkeitä palasia ympäristön pelastamiseksi vaan, koska bensiinimoottori valtasi markkinat vasta myöhemmässä vaiheessa (Heikkilä 2024, 11).



KUVA 5 Chevrolet Electrovan ja sen tekninen rakenne (Motortrend 2016).

Suomessa on tehty vetyä vedestä ensimmäistä kertaa jo vuonna 1913 Woikosken toimesta. Saman yrityksen johtaja muunsi sen aikaisen luksusauton, eli kuvassa 6 näkyvän vuoden 1927 Packardin kulkemaan vedyllä. Autoon oli asennettu kupariputki takapenkkien ja moottorin väliin, joka kuljetti vetysäiliöistä vetyä moottorille. Täydellä pullollisella vetyä, kulki Packardi silloin vajaat 10 kilometriä. Voidaan puhua, että Suomessa on siis oltu vetyautoilussa, jopa edelläkävijöitä.

(Kemia-lehti 2024). Woikoski Oy rakensi vuonna 2014 Kokkolaan Euroopan suurimman vetyä elektrolyysimenetelmällä tuottavan laitoksen. Tehtaan sivutuotteena valmistuu myös ultrapuhdasta happea. Tehdas mahdollisti Suomessa polttonoteknologian lanseerauksen, samalla lisäten polttoaineena käytetyn vedyn tuotantokapasiteettia. Woikosken vedyntankkausasema on yrityksen kehittämä innovaatio, jonka tavoitteena on laajentaa sen roolia globaaleilla tankkausasemamarkkinoilla. (Woikoski Oy 2014).



KUVA 6 Woikosken vetykäyttöinen Packardi vuodelta 1927 Woikosken automuseossa (Von Bell 2017)

4 VEDYN KÄYTTÖ HENKILÖAUTOISSA

4.1 Vetypolttomoottori (HICE)

Vetyä käyttävistä polttomoottoreista käytetään yleisesti termiä HICE. Toimintaperiaate ei eroa juurikaan normaalista fossiilista polttoainetta käyttävästä moottorista, vain sytytettävä aine on eri. Vedyn palamisen ainoat sivutuotteet ovat lämpö ja vesihöyry, mikä tekee vetypolttomoottorista huomattavasti ympäristöystävällisen vaihtoehdon fossiilista polttoainetta käyttävälle moottorille. (sopp+sopp n.d). Koska vedyn fysikaaliset ominaisuudet kuitenkin eroavat bensiinin ja dieselin kanssa, on vetypolttomoottorissa hieman eroja normaaliin polttomoottoriin. Johtuen vedyn matalammasta syttymislämpötilasta verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin, on sillä suurempi riski ennenaikaiselle syttymiselle. Tämän takia vetypolttomoottoreissa ruiskutetaan polttoaine suoraan sylintereille imusarjan tai imukanavan sijaan, eli puhutaan suoraruiskutusjärjestelmästä. (Nebergall 2022).

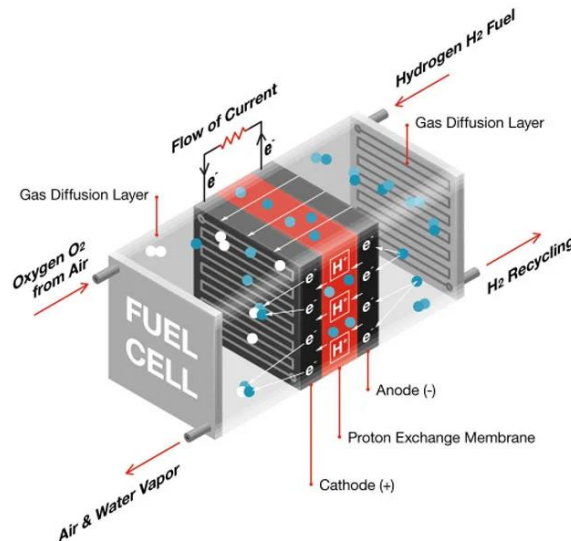
4.2 Polttokennoajoneuvot (FCEV)

Polttokennoissa voidaan teoreettisesti käyttää mitä vaan kaasu- tai nestemäistä ainetta, joka pystyy fysikaalisesti hapettumaan. Vety on erinomainen polttoaine polttokennoille, koska se omaa suuren reaktionopeuden ilmasta saatavan hapen kanssa, jonka lisäksi niiden välillä syntyvässä reaktiossa ei ole ongelmallisia sivutuotteita. Polttokennot jaetaan eri luokkiin, niiden toimintalämpötilan ja elektrolyyttimateriaalien mukaisesti. (Motiva n.d)

Kuvassa 7 näkyvää polttokennon rakennetta voisi kuvailla avoimeksi akuksi, sillä siinä on suljetun akun tavoin anodi ja katodi, mutta hapetin ja reaktioaine lisätään ulkoisesta lähteestä. Polttokennon anodilla tapahtuu reaktio, jossa reaktioaine menettää elektronin eli hapettuu. Polttokennoajoneuvoissa hapettimena toimii ulkoilmasta saatava happi. Elektronit, jotka syntyvät sähkövirrasta, siirtyvät anodilta ulkoisen piiriin kautta katodille. Ulkoiseen piiriin kuuluu ajoneuvossa liikkumi-

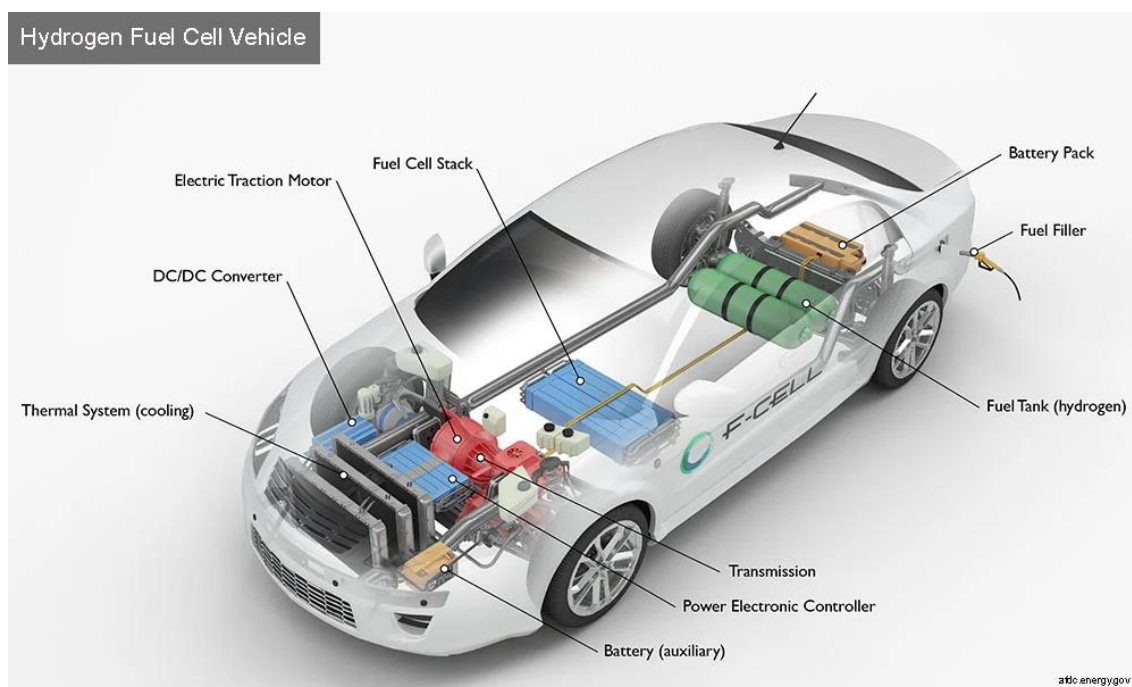
seen voiman tuottava sähkömoottori. Reaktiossa syntyvän sähköenergian sivutuotteena syntyy lämpöä, jota pystytään hyödyntämään polttokennon hyötysuhteen parantamiseen. (Motiva n.d)

HYDROGEN FUEL CELL TECHNOLOGY



KUVA 7 Polttokennon rakenne selitettynä (Quarktwin 2023).

Vetyä käyttävät polttokennoajoneuvot (FCEV) luetellaan sähköajoneuvoiksi, koska niiden toimintaperiaate on energialähdettä lukuun ottamatta hyvin samankaltainen. Polttokennoajoneuvoissa sähköntuotanto tulee vetykäyttöisistä polttokennoista, sähköautojen raskaiden akustojen sijaan (KUVA 8). Valtaosa ajoneuvovalmistajista on suunnitellut polttokennoajoneuvon ilman pistokelataus mahdollisuutta akulle, koska suurin osa tämänhetkisistä malleista käyttää akkua vain pääasiassa lisätehon tuottamiseen lyhyiden kiihdytysten aikana, jarrutusenergian talteenottoon, sekä polttokennon tuottaman tehon tasaukseen matalan tehontarpeen tilanteissa, jolloin se voidaan sammuttaa tai asettaa tyhjäkäynnille tarvittaessa. Täyssähköajoneuvoissa saatavilla oleva energia ja teho ovat sidoksissa akun kokoon, kun taas polttokennoajoneuvoissa vetykaasutankin koko määrittää ajoneuvoon varastoidun energian määrän. (U.S. Department of Energy n.d.).



KUVA 8 Polttokennoauton rakenne ja toimintaperiaate (Quarktwin 2023).

4.3 Vetyautoilun tulevaisuus

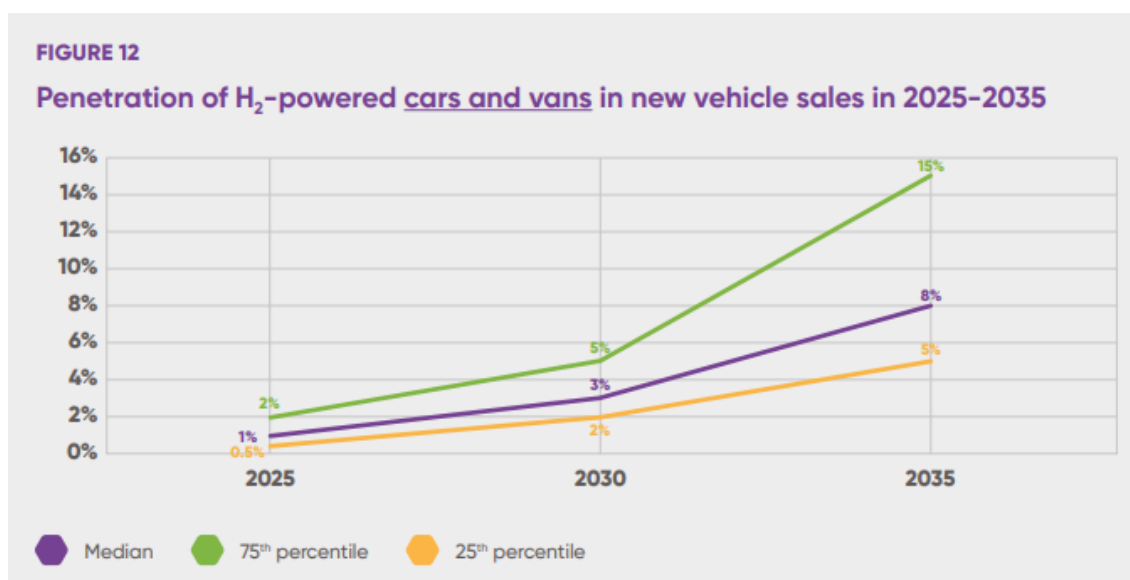
Vetyautot putoavat tällä hetkellä sähköautojen ja perinteisten polttomoottoriautojen väliin, kun puhutaan tehokkuudesta, ympäristöystävällisyydestä ja kustannuksista. Edellä mainituista kolmesta vaihtoehdosta vetyautot ovat osto- sekä kulu-tushinnaltaan kallein vaihtoehto, varsinkin jos autoilun päästöt halutaan pitää nol-lissa. Vetyautojen välillä polttokennoautot ovat vetypolttomoottoriautoja parempi ratkaisu monestakin syystä. Polttokennoajoneuvojen huoltaminen on helpom-paa, koska niissä on yksinkertaisempi mekaaninen suunnittelu ja vähemmän liik-kuvia osia verrattuna vetypolttomoottorilla varustettuihin autoihin. Samasta syystä myös hyötysuhde on parempi kuin vetypolttomoottorissa. Kun vety palaa polttomoottorissa, palamisprosessin sivutuotteena syntyy pieniä määriä typpiok-sideja sekä hiilidioksidia, kun taas polttokennoajoneuvossa käyttöpäästöt ovat nollassa, käytettäessä puhdasta vetyä. (H2X global 2024).

Tällä hetkellä Euroopan markkinoiden suosituimmat vetyautot ovat Hyundain NEXO (77490e) ja Toyotan Mirai (65990e). Edellä mainituista autoista NEXO ku-

luttaa noin 1,2 kg vetyä sadalla kilometrillä, Mirain kuluttaessa hieman vähemmän, 1 kg sadalla kilometrillä. Kun tankataan puhtaasti tuotettua vetyä, maksaa se kuluttajalle noin 15–16 euroa per kilo, jolloin vetyautolla ajaessa polttoainekustannukset pyörivät 15–17 euron tuntumassa, joka on tällä hetkellä kallista verrattuna sähköautoiluun tai jopa polttomoottoriautoiluun. (go-e 2024). Kustannukset ovat tällä hetkellä korkeita verrattuna toisiin vaihtoehtoihin, mutta ajoneuvonvalmistajiin suunnatuilla poliittisilla pakotteilla on tulevaisuuden näkymät vetyautoilussa halvemmat nykyhetken verrattuna.

Tarkastellessa ajoneuvojen hyötysuhteita vetyautot päihittävät polttomoottoriautot, mutta jää toistaiseksi vielä kauas sähköautoista. Fossiilisia polttoaineita käyttävien polttomoottoriautojen suurin ongelma päästöjen lisäksi, on niiden alhainen hyötysuhde sen ollessa arviolta 20–25 %. Vetyautolla saavutetaan parhaillaan, jopa 40 % hyötysuhde, joka on siis parempi, kuin polttomoottoriauton, mutta kuitenkin vain noin puolet sähköautojen korkeasta hyötysuhteesta, joka on noin 85 % (Pirelli 2022). Vetyauton pieni etu suhteessa sähköautoon on nopeampi tankkaus. Sähköautojen optimaalisessa latauksessa kestää laturityypistä sekä autosta riippuen 20–40 minuuttia tai kotona ladattaessa jopa 4–6 tuntia, kun vetyauton tankin saa täyteen noin viidessä minuutissa (go-e 2024).

Hydrogen Europe teki vuonna 2024 kyselyn pohjalta tutkimuksen, jossa käsiteltiin muun muassa vetyautoilun tulevaisuuden näkymiä. Tutkimukseen osallistui 99 asiantuntijaa, joista suurin osa työskentelee vedyn arvoketjun parissa. Vastaajien mukaan neljä tämän hetken merkittävintä ongelmaa koskien vetyautoilua ovat infrastruktuurin puute (70,6 %), korkeat pääomakustannukset (52,9 %) ja niihin liittyvien tukien tarve (48,2 %) sekä korkeat käyttökustannukset (40,5 %). Kyselyn pohjalta tehtiin myös kasvuennuste uusien vetykäyttöisten autojen ja pakettiautojen osuudesta uusien ajoneuvojen myynissä vuoteen 2035 mennessä (KUVA 9).



KUVA 9 Vetykäyttöisten autojen ja pakettiautojen osuus uusien ajoneuvojen myynissä vuosina 2025–2035 (Hydrogen Europe 2024, 19).

Tulokset on esitetty viiden vuoden välein vuoteen 2035 asti, jolloin kevyiden ajoneuvojen hiilidioksidipäästöjä koskevat päästöstandardit edellyttävät 100 % päästövähennystä pakokaasupäästöistä Euroopassa. Koska kyseessä on kyselyyn perustuva tutkimus, on kuvassa 9 näkyvässä ennusteessa esitetty ylimpään arvioon perustuva keskiarvo (75. prosenttipiste), alimpaan arvioon perustuva keskiarvo (25. prosenttipiste) ja mediaani. Jos tarkastellaan mediaania, voi uusien autojen myyntiosuudessa huomata suuren kasvun vuoteen 2035 mennessä. Kyseessä on kuitenkin vain suuntaa antava ennuste, joten sen pohjalta ei voi tehdä eksakteja päätelmiä, mutta antaa se kuitenkin osviittaa vetyautojen tulevaisuuden näkymistä.

4.4 Vedyn sovellukset muissa kulkuneuvoissa

Vaikka vedyn ominaisuudet polttoaineena sopivat paremmin raskaampaan kalustoon, käsitellään tässä työssä vain henkilöautoja ja tässä luvussa henkilöautoja pienempiä laitteita ja niiden sovelluksia.

4.4.1 Japanilainen yhteistyömoottoripyörä

Japanilaiset ajoneuvovalmistajat Toyota ja Hyundai ovat suunnannäyttäjiä vetyautoilussa ja polttokennoteknologian kehittämässä. Japanilainen Kawasaki seurasi perässä julkaisemalla ensimmäisen prototyypin vetyä polttoaineena käytävän moottoripyörän vuoden 2024 heinäkuussa. Pyörää on kehitelty vuodesta 2023 Kawasakin Ninja H2 mallin pohjalle (KUVA 10) yhdessä muiden japanilaisten kulkuneuvovalmistajien kanssa. Suzuki, Yamaha ja Honda ovat etsineet yhdessä ratkaisuja Kawasakin kanssa vihreämmän tulevaisuuden ratkaisuun moottoripyörämarkkinoilla keskinäisen kilpailun sijaan. HySE (Hydrogen Small mobility and Engine) nimellä kulkevaan valmistajien yhteisprojektiin on jaettu kehitysalueet nii, että Kawasaki motors ja Yamaha motors vastaa itse vetymoottorin, tankkausjärjestelmän ja suoraruiskutuksen kehityksestä, kun taas Honda ja Suzuki vastaa tutkinta ja kehitystyöstä. Kehitystyö vetymoottoripyörän kanssa on vasta alkamassa ja on arvioitu, että Ninja H2 tulisi julkisille markkinoille vasta vuonna 2030. (Sarah I. 2025).



KUVA 10 Kuvitteellinen kuva Kawasakin H2 Ninja vetymoottoripyörästä (Kawasaki 2023).

Japanilaiset valmistajat valikoivat H2 Ninjan pohjaksi vetymoottoripyörälle, koska sen turbo- tai mekaanisesti ahdettu nelisynterinen moottori tarjoaa mahdollisuuden päästä edes lähelle bensiinikäyttöistä moottoripyörää. Koska vety vaatii bensiiniä enemmän ilmaa syttyäkseen (Bensiinin ilma-polttoainesuhde 14.7:1 ja vedyn vähintään 34:1), käytetään Kawasakin vetymoottorissa olevaa mekaanista ahdinta ilman tiivistämiseen, ennen kuin se päästää ilman sylintereille. Toinen kehitysvaiheessa huomattu ongelma on vedyn säilytys ja vetytankkien koko. Kuvassa 10 näkyy, kuinka suuria vetytankkeja pyörään suunnitellaan. Kawasakin tämänhetkinen kehityssuunta vetytankeille on poistaa kuljettajalta kokonaan vastuu tankkaamisesta ja siirtyä vaihdettaviin vetypatruunoihin. Myös Toyota on tämän ratkaisun puolesta puhuja, koska vedyn tankkaamisessa nähdään riskejä korkeiden paineiden ja alhaisten säilytyslämpötilojen takia. (Purvis 2023).

4.4.2 Eurooppalainen Hydrocycle-hanke

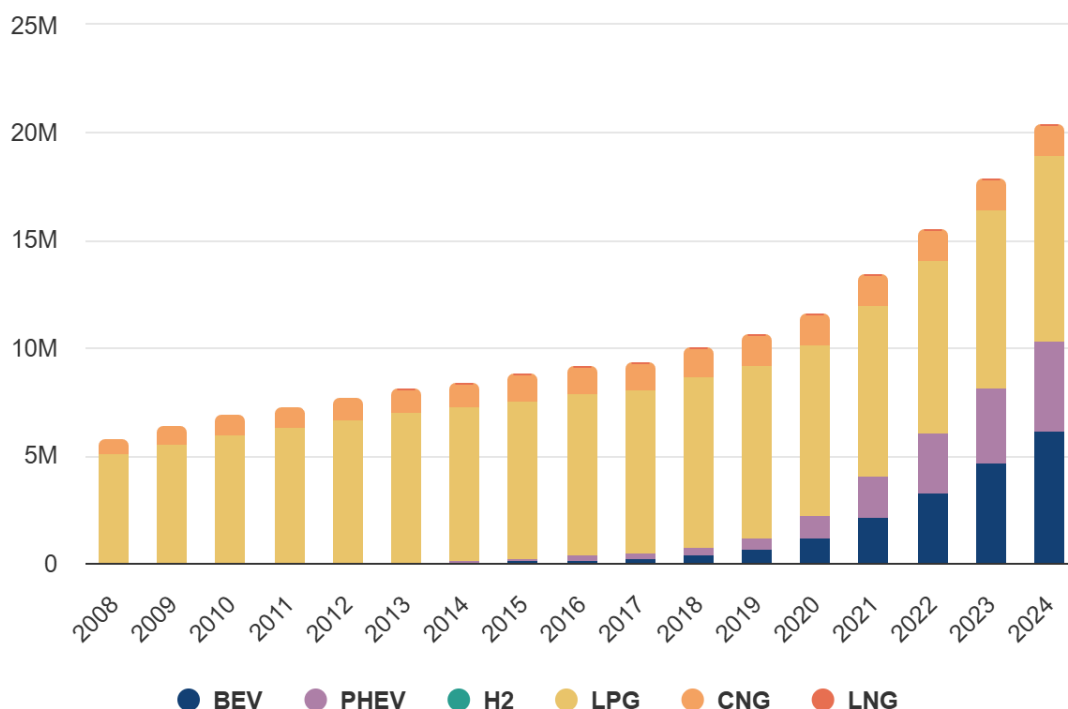
Aivan kuten Aasian mantereella, on myös Euroopassa yhdistetty voimia vety-moottoripyörän kehitystyön suhteen. Saksalais-tshekkiläinen konsortio tutkimus-instituutioiden välillä on luvannut tuoda toimivan demokappaleen yleisön nähtäväksi vuoden 2025 loppuun mennessä, joka läpäisee tarkat EU:n asettamat hyväksyntä- ja sertifiointivaatimukset. Yhteistyön pääkumppanit ovat saksalainen Wärmetauscher Sachsen GmbH, joka vastaa voimalinjan kehittämisestä, kun taas tshekkiläinen Fraunhofer IWU vastaa ergonomiasta, ajoneuvon rakenteesta ja teknologisen sovittamisen suunnittelusta. Lisäksi hankkeessa on mukana 1to1design (Tshekki), UJV Rez sekä Tshekin teknillinen yliopisto, jolla on historiaa vaihtoehtoisia polttoaineita käyttävien moottoripyörien kanssa. (Fraunhofer IWU 2024).

Konsortion mukaan keskeinen ongelma on polttokennoteknologian integrointi moottoripyörän runkoon, eikä niinkään tankkaukseen tai säilytykseen liittyvä ongelma. Hankkeessa uskotaan, että Hydrocycle tarjoaisi vaihtoehdon sähkökäyttöisille kuljetusalan kaksipyöräisille vähemmällä meluhaitalla, pienemmällä hiilijalanjäljellä, lyhyemmällä latausajalla ja pidemmällä toimintakantamalla. Hydrocycle-hanke puoltaa luvussa 2 läpikäytyjä EU:n poliittisia pakotteita, jossa pyritään hiilineutraaliuteen vuoteen 2050 mennessä ja hankkeen kumppanit uskovat sillä olevan keskeinen rooli uusiutuvana energialähteenä liikennesektorilla vuodesta 2030 eteenpäin. (Fraunhofer IWU 2024).

5 MUUT VAIHTOEHTOISET POLTTOAINEET

Tieliikenne aiheuttaa noin viidesosan EU:n hiilidioksidipäästöistä. Tätä halutaan vähentää ja EU:n luomat poliittiset pakotteet suuntaavat autonvalmistajia ja kuluttajia pienempään hiilijalanjälkeen autoilussa. Vedyn lisäksi vaihtoehtoisia polttoaineita kehitetään koko ajan lisää ja tässä luvussa käsitellään niitä, joilla olisi tällä hetkellä parhaat tulevaisuuden näkymät fossiilisten polttoaineiden korvaajana. Vaihtoehtoiset polttoaineet jaetaan Euroopan parlamentin ja neuvoston antaman AFI-direktiivin mukaisesti kolmeen pääkategoriaan. Siirtymävaiheen fossiiliset vaihtoehtoiset polttoaineet, jotka ovat vähäpäästöisempiä kuin diesel ja bensiini, mutta ei täysin fossiilittomia. Näitä käytetään siirtymäkaudella, ennen kuin voidaan siirtyä täysin päästöttömiin vaihtoehtoihin. Toinen kategoria on vaihtoehtoiset polttoaineet nollapäästöisille ajoneuvoille, jotka eivät tuota pakokaasupäästöjä ajoneuvon käytön aikana. Viimeinen kategoria on uusiutuvat polttoaineet, esimerkiksi nestemäiset, kiinteät tai kaasumaiset biopolttoaineet, jotka voidaan tuottaa hiilineutraalisti, kun käytetään uusiutuvia energianlähteitä. (European Comissio n.d)

Kuvasta 11 näkee että, vuonna 2025 EU:n alueella oli yli 20 miljoonaa vaihtoehtoisia polttoaineita käyttävää henkilö- ja pakettiautoa. Vuonna 2022 vaihtoehtoisia polttoaineita käyttävien autojen osuus oli 5 prosenttia ja vuonna 2024 osuus lähenteli jo 10 prosenttia. Suurin prosentuaalinen osuus vuonna 2024 vaihtoehtoisia polttoaineita käyttävistä autoista jakautuivat sähköautojen (BEV ja PHEV) ja maakaasuun pohjautuvien autojen välille (LPG, CNG ja LNG). (European commission 2024).



KUVA 11 Vaihtoehtoisilla polttoaineilla kulkevien henkilöautojen ja pakettiautojen kokonaismäärän kehitys Euroopan unionissa vuosina 2008–2024. (European Commission 2025).

Poliittisten pakotteiden lisäksi EU haluaa myös tukea ja kehittää vaihtoehtoisten polttoaineiden tankkausinfrastruktuuria. Vuoden 2023 maaliskuussa EU:n neuvosto ja parlamentti sopivat henkilöautojen, sekä kuorma-autojen vaihtoisten polttoaineiden infrastruktuurin käyttöönotosta. Neuvotteluissa vaadittiin lisää tehokkaampia latauspisteitä sähköautoille ja 60 km välein olevia latauspisteitä henkilöautoille EU:n pääteille vuoteen 2026 mennessä, sekä raskaammalle kalustolle vuoteen 2028 mennessä. Vetytankkauspisteitä tulee olemaan 200 kilometrin välein EU:n pääteiden varrella vuoteen 2031 mennessä, joka on rajua korotus tämänhetkiseen 136 vetytankkauspisteeseen koko Euroopassa. Mepit vaativat myös kehitystä lataamiseen sekä maksamiseen lataus- ja tankkauspisteillä. Komission on perustettava EU:n laajuinen tietokanta, missä jaetaan kuluttajille tietoa asemien eri hinnoittelusta, mahdollisista jonotusajoista sekä tietoa vaihtoehtoisten polttoaineiden saatavuudesta. (Euroopan parlamentti 2023).

5.1 Uusiutuvat polttoaineet

Tämän hetken tärkeimpiä vaihtoehtoisia polttoaineita ovat biopolttoaineet. Niiden prosentuaalinen osuus EU:n liikenteestä on 4,4 %. Biopolttoaineet ovat biohajoava ja uusiutuva ratkaisu, jota valmistetaan kierrätetystä ravintolarasvasta, eläinrasvasta ja kotimaisesti tuotetusta kasviöljystä. Biopolttoaineet tarjoavat puhdasta energiaa niin henkilöautoiluun, lentoliikenteelle kuin raskaallekin kalustolle, mutta sen tämänhetkinen ongelma on sen kestävyteen liittyvät tekijät sekä rajallinen saatavuus. Jos biopolttoaineiden tuotanto on toteutettu kestävästi eikä aiheuta epäsuoraa maankäytön muutosta, voivat ne vähentää hiilidioksidipäästöjä huomattavasti. (European commission n.d)

Biopolttoaineet ovat monipuolinen ratkaisu uusiutuville polttoaineille, sillä niitä voidaan sekoittaa fossiilisten polttoaineiden kanssa tai käyttää sellaisenaan. Niitä voidaan valmistaa koko ajan kehittyvien valmistusteknologioiden avulla useista eri raaka-aineista, joita ovat biometanoli, bioetanoli, korkeat bioalkoholit, biodiesel (FAME ja rasvahappomettyliesteri), dimetyylieetteri (DME), erilaiset orgaaniset yhdisteet, sekä vetykäsittelyt- ja puhtaat kasviöljyt. Biopolttoaineetkin kategoriaan karkeasti ensimmäisen sukupolven biopolttoaineisiin ja kehittyneempiin biopolttoaineisiin. Kaupallisesti saatavilla olevista nestemäisistä biopolttoaineista valtaosa on ensimmäisen sukupolven biopolttoaineita. Näihin kuuluvat bioetanoli sekä biodiesel, joiden valmistamiseen käytetään pääasiassa eläinrasvoja ja viljelykasveja. Ensimmäisen sukupolven biopolttoaineilla on kuitenkin haittavaikutuksia, ja niitten takia Euroopan komissio on ehdottanut niiden osuuden tavoitteellista rajaa viiteen prosenttiin. Samanaikaisesti komissio on asettanut kannustimia kehittyneempien biopolttoaineiden valmistukselle, joita valmistetaan esimerkiksi levästä, mikro-organismeista, jätteistä, tähteistä ja lignuselluloosabiomassasta. (European commission n.d)

Biopolttoaineiden tämänhetkiset ongelmat ovat kehityksen puutteessa. Jäsenvaltioiden yhteisten teknisten määrittelyn puutteellisuus ja riittämätön tieto uusien biopolttoaineiden yhteensopivuudesta autojen kanssa hidastaa kehitystä. Tällä hetkellä yleisimpiin biopolttoaineihin kuuluvat E-10 bensiini, joka sisältää 10 % bioetanolia ja biodiesel, joka sisältää 7 % FAME biodieseliä. Prosentuaaliset

osuudet ovat pieniä ja seossuhteiden korottaminen vaatisi muutostyötä jo olemassa oleviin autojen ja alusten voimalinjoihin sekä uusien polttoainestandardien kehittämisen. On kuitenkin olemassa biopolttoaineita, joita voidaan käyttää olemassa olevilla voimalinjoilla ja jopa 50 % seossuhteilla minkä tahansa fossiilisen polttoaineen kanssa, esimerkiksi vetykäsitelty kasviöljy. E85 taas koostuu 85 % etanolista, mutta toimii vain joustopolttoajoneuvoissa (FFV), joita on käytössä harvassa EU:n jäsenvaltiossa. (European comission n.d)

5.2 Nestekaasu (LPG)

Euroopassa vaihtoehtoisista polttoaineista tällä hetkellä eniten käytetty vaihtoehto on nestekaasu (LPG), jota kutsutaan myös autokaasuksi. Euroopassa on tällä hetkellä jo 46000 nestekaasun jakeluasemaa ja 15 miljoonaa ajoneuvoa käyttää käyttövoimanaan autokaasua. Nestekaasu syntyy hiilivetyjen jalostusketjun sivutuotteena ja sillä on mitattu 35 % pienemmät hiilidioksidi päästöt kuin kivihieillä ja 12 % pienemmät kuin öljyllä. Nestekaasun käyttö liikenteessä edistää resurssitehokkuutta, jonka lisäksi se ei tuota käytännössä ollenkaan mustaa hiiltä, jota pidetään ilmaston lämpenemisen kannalta toiseksi suurimpana riskitekijänä maailmanlaajuisesti. (European comission n.d).

Tämän hetken ennusteiden mukaan nestekaasua saataisiin tulevaisuudessa valmistettua myös biomassasta, mutta toistaiseksi sen tuotanto keskittyy vain raakaöljyyn ja maakaasuun. Nestekaasulla on Euroopassa laaja infrastruktuuri, mutta sen 32000 tankkausasemaa ovat jakautuneet epätasaisesti valtioiden välillä. Sen eduiksi luetaan myös alhaiset hiukkaspäästöt typpioksidien ja rikkipitoisuuksien osalta, mutta EURO-standardien siirryttyä matalampiin päästörajoituksiin, on sen kilpailukyky heikentynyt. Edellä mainituista syistä nestekaasun markkinaosuus todennäköisesti kasvaa tämänhetkisestä, mutta se pitää asemansa kuitenkin markkinarakotuotteena. (European comission n.d)

5.3 Paineistettu maakaasu (CNG)

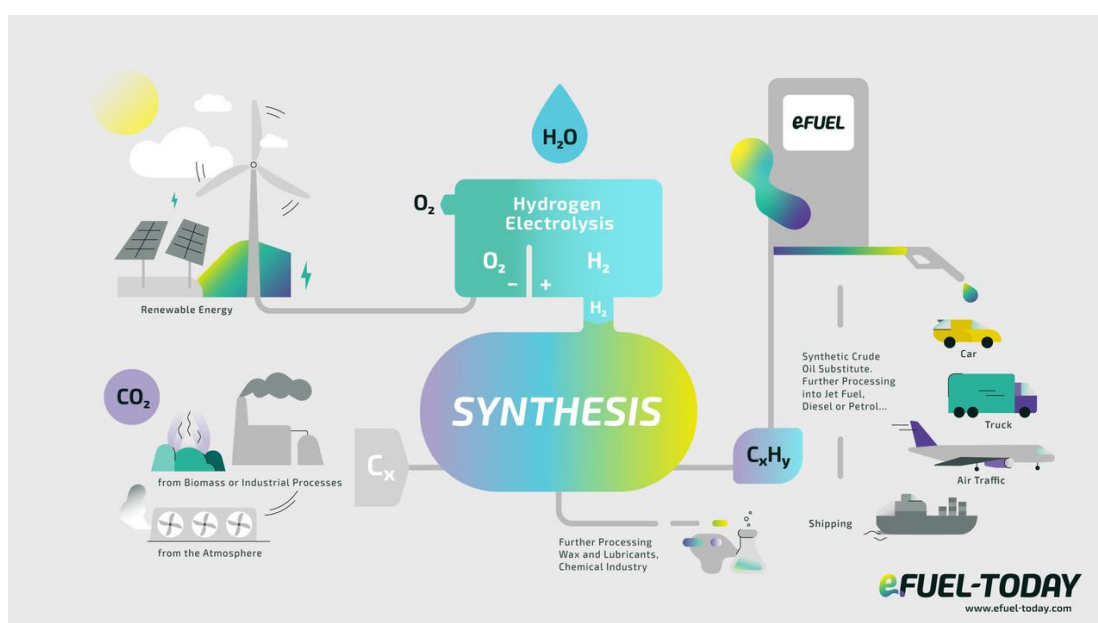
Paineistettu maakaasu on yleistynyt nopeasti erityisesti EU:n kaupunkiliikenteessä muun muassa sen vähäisten päästöjen takia. Toinen suuri syy CNG:n yleistymiselle on järkevä hinta/suorituskyky suhte verrattaessa fossiilisilla polttoaineilla kulkeviin ajoneuvoihin. Paineistettua maakaasua käyttövoimanlähteenään hyödyntäviä ajoneuvoja on Euroopassa jo lähes miljoona, ja suuri osa niistä on kaupunkiliikenteessä olevia takseja, linja-autoja ja muita hyötyajoneuvoja. Paineistetulla maakaasulla olisi hyvät lähtökohdat yleistymiselle Euroopan laajan maakaasujakeluverkon avulla, mutta tällä hetkellä tankkausasemia on vain noin 3000. Tämä johtuu osakseen siitä, että paineistettua maakaasua käyttävät ajoneuvot voivat käyttää vain korkealaatuista maakaasua, jota ei saa suoraan maakaasujakeluverkosta. Koska CNG itsessään on halvempaa kuin bensiini tai diesel ja suorituskyvyllisessä vertailussa se voittaa perinteiset autot, on odotettavissa että, taloudellista markkinakehitystä ohjailee yksityinen sektori. Mutta niin kuin kaikkien vaihtoehtoisten polttoaineiden kohdalla, poliittista ohjausta tarvitaan, jotta markkinat pysyvät stabiilina. (European commission n.d).

5.4 Synteettiset polttoaineet

Yksinkertaisesti selitettynä synteettinen polttoaine on nestemäinen keinotekoinen vaihtoehto fossiilisille polttoaineille, joka ei ole peräisin öljypohjaisesta aineesta. Synteettisiä polttoaineita voidaan valmistaa useilla eri valmistustavoilla, mutta niitä kaikkia yhdistää se, että lopputuote sopii nykyaikaisen ajoneuvon polttoainesäiliöön. Kemiallisesti selitettynä synteettinen polttoaine koostuu yksinkertaisimmillaan kahdesta hiiliatomista ja neljästä vetyatomista, joka tunnetaan alkeenina tai eteeninä. (Khaitan BioEnergy 2025).

Luvussa 5.1 käsiteltävät biodiesel, etanoli ja metanoli, luetaan myös synteettisiksi polttoaineiksi. Riippumatta synteettisen polttoaineen valmistustavasta, yhdistää niitä myös se, että vedystä ja hiilimonoksidista koostuva synteetikaasu on kaikkien keskeinen lähtöaine. Jo teollistunut prosessi synteetikaasun muuttamiseksi polttoaineeksi, on käyttää kivihiihtä ja maakaasua raaka-aineena. Tämä ei ole kuitenkaan kestävä vaihtoehto, vaan jotta sen hiilijalanjälki saataisiin mahdollisimman pieneksi, tulisi prosessissa käyttää vesi-, tuuli- tai aurinkovoimalla tuotettua energiaa, joka taas on todella kallista. (Khaitan BioEnergy 2025).

Tämän hetken potentiaalisimmassa valmistusmenetelmässä synteettisille polttoaineille, hyödynnetään maapallon ilmakehässä olevaa hiilidioksidia. Prosessin ensimmäisessä vaiheessa hiilidioksidia kerätään talteen teollisuuslaitoksista tai vaihtoehtoisesti suoraan ilmakehästä. Tämän jälkeen tuotetaan vetyä käyttäen uusiutuvia energianlähteitä ja tästä tuotettua vetyä voidaan myös käyttää vetyautoihin. Lopuksi tuotettu vety ja kerätty hiilidioksidi yhdistetään synteettiseksi metanoliksi, josta voidaan jalostaa synteettistä dieseliä ja bensiiniä. Tämä valmistustekniikka on saanut paljon kehuja, tunnustusta ja sen mukana suuria investointeja teollisuudentoimijoilta ja autonvalmistajilta. (Khaitan BioEnergy 2025). Prosessi eroaa kappaleessa 3.3 käsiteltävästä P2X-menetelmästä, sen hiilidioksidin hyötykäytöllä, mutta on muuten hyvin samankaltainen.



KUVA 11 Synteettisten polttoaineiden tuotantoprosessi ja jatkojalostus (Efuel – TODAY 2025)

6 YHTEENVETO

Vety ja muut työssä käsiteltävät vaihtoehtoiset polttoaineet tarjoavat merkittävän mahdollisuuden henkilöautoilun hiilijalanjäljen pienentämiseen, mutta niiden käyttöön liittyy haasteita infrastruktuurin, taloudellisten tekijöiden ja teknologian kehityksen osalta. Vedyllä tai muilla vaihtoehtoisilla polttoaineilla ei voida korvata yksinään koko henkilöautoilun voimanlähteitä, mutta jos ne onnistuttaisiin roolitamaan oikein, voidaan niillä sähköautojen kanssa tavoitella päästötöntä autoilun tulevaisuutta vuoteen 2050 mennessä.

Tällä hetkellä vetyteknologian haasteina ovat korkeat tuotantokustannukset, varastoinnin ja jakelun ongelmat sekä rajallinen tankkausasemaverkosto. Jotta vedystä voisi tulla laajemmin hyödynnettävä polttoaine, sen tuotantoa tulisi kehittää kohti täysin uusiutuviin energialähteisiin perustuvia ratkaisuja. Lisäksi vetytankkausverkoston laajentaminen on keskeinen edellytys sen kilpailukyvyille.

Vaihtoehtoiset polttoaineet voivat täydentää sähköautoja erityisesti pitkän matkan liikenteessä ja alueilla, joissa sähkölatausinfrastruktuuri ei ole riittävän kehittynyttä. Esimerkiksi biopolttoaineet ja synteettiset polttoaineet voivat tarjota keinoja vähentää päästöjä jo nykyisessä autokannassa ilman suuria muutoksia infrastruktuuriin. Myös vetypolttokennoajoneuvoilla on potentiaalia raskaamassa liikenteessä, jossa akkuteknologian haasteet ovat suurempia.

Jotta päästöttömään liikenteeseen voitaisiin siirtyä vuoteen 2050 mennessä, tarvitaan monipuolinen yhdistelmä eri käyttövoimia. Taloudelliset kannustimet, lainsäädännön ohjaus ja teknologian kehitys vaikuttavat siihen, miten nopeasti vety ja muut vaihtoehtoiset polttoaineet yleistyvät. Tulevaisuuden liikennejärjestelmät edellyttävät kokonaisvaltaista suunnittelua, jossa eri energialähteiden roolit määritellään tarkoituksenmukaisesti ja tehokkaasti.

LÄHTEET

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes). 2024. Vedyn käsittelyn ja varastoinnin turvallisuus. Verkkosivu. Viitattu 6.2.2025.

<https://tukes.fi/vedyn-kasittelyn-ja-varastoinnin-turvallisuus#elektrolyysi>

Euroopan parlamentti. 2023. Uusien bensiini- ja dieselautojen myyntikielto: Mitä vuosi 2035 tuo mukanaan? Verkkosivu. Viitattu 13.2.2025.

<https://www.europarl.europa.eu/topics/fi/article/20221019STO44572/uusien-bensiini-ja-dieselautojen-myyntikielto-mita-vuosi-2035-tuo-mukanaan>

Euroopan unionin neuvosto. 2024. Euro 7: Neuvosto hyväksyy uudet säännöt autojen, pakettiautojen ja kuorma-autojen päästörajoista. Verkkosivu. Viitattu 13.2.2025.

<https://www.consilium.europa.eu/fi/press/press-releases/2024/04/12/euro-7-council-adopts-new-rules-on-emission-limits-for-cars-vans-and-trucks>

Valtioneuvosto. 2022. Vedyn tuotanto ja käyttö Suomessa. Verkkosivu. Viitattu 6.2.2025.

https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163901/VNTEAS_2022_21.pdf

Vartiainen, E. 2020. Vetytalous tulee ennemmin tai myöhemmin. Fortum. Verkkosivu. Viitattu 17.2.2025.

<http://fortum.fi/tietoa-meista/blogi/forthedoers-blogi/vetytalous-tulee-ennemmin-tai-myohemmin>

Ruth, J. 2024. Power-to-X: kohti vetytaloutta. Finnish Consulting Group. Verkkosivu. Viitattu 18.2.2025.

<https://www.fcg.fi/nakemyksia/power-to-x-kohti-vetytaloutta/>

Corby, S. 2023. The history of hydrogen fuel cell cars. CarsGuide. Verkkosivu. Viitattu 19.2.2025.

<https://www.carsguide.com.au/car-advice/the-history-of-hydrogen-fuel-cell-cars-85330>

Heikkilä, V. 2024. Vedyn käyttö ajoneuvojen energianlähteenä. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Theseus.

Viitattu 19.2.2025. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/876094/Heikkila_Ville.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Kemia-lehti. 2023. Vetyhuumalla on pitkät perinteet – Suomessa tehtiin vetyä jo 1913. Verkkosivu. Viitattu 19.2.2025.

<https://kemia-lehti.fi/vetyhuumalla-on-pitkat-perinteet-suomessa-tehtiin-vetya-jo-1913/>

Woikoski Oy. 2014. Woikoski avaa Euroopan suurimman elektrolyysimenetelmää käyttävän vetytehtaan. STT. Verkkosivu. Viitattu 20.2.2025.

<https://www.sttinfo.fi/tiedote/19920989/woikoski-avaa-euroopan-suurimman-elektrolyysimenetelmaa-kayttavan-vetytehtaan?publisherId=10857148>

Nebergall, J. 2022. How do hydrogen engines work? Cummins Inc. Verkkosivu. Viitattu 20.2.2025.

<https://www.cummins.com/news/2022/01/26/how-do-hydrogen-engines-work>

U.S. Department of Energy. n.d. How do fuel cell electric cars work? Verkkosivu. Viitattu 21.2.2025.

<https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work>

go-e. 2024. Hydrogen Cars: Everything You Need to Know! Verkkosivu. Viitattu 24.2.2025.

<https://go-e.com/en/magazine/hydrogen-cars>

H2X Global. 2024. Hydrogen Combustion vs. Hydrogen Fuel Cell Vehicles: A Comparative Analysis by H2X Global. Verkkosivu. Viitattu 24.2.2025.

<https://h2xglobal.com/2024/05/23/hydrogen-combustion-vs-hydrogen-fuel-cell-vehicles-a-comparative-analysis-by-h2x-global/>

Pirelli. 2022. Hydrogen as a fuel: The pros and cons. Verkkosivu. Viitattu 24.2.2025.

<https://www.pirelli.com/global/en-ww/road/cars/hydrogen-as-a-fuel-the-pros-and-cons-53908/>

FASTECH. 2024. Hydrogen Storage Challenges and Opportunities. Verkkosivu. Viitattu 24.2.2025.

<https://www.fastechus.com/blog/hydrogen-storage-challenges-opportunities>

Sarah, I. 2025. Not gasoline, not electricity — Japan launches a 22-century motorcycle. ECOticias. Verkkosivu. Viitattu 26.2.2025.

<https://www.ecoticias.com/en/japan-launches-a-22-century-motorcycle/11463/>

Purvis, B. 2023. Kawasaki's Supercharged Hydrogen-Fueled H2. Cycle World. Verkkosivu. Viitattu 26.2.2025.

<https://www.cycleworld.com/motorcycle-news/kawasaki-supercharged-hydrogen-fueled-h2/>

Fraunhofer IWU. 2024. Hydrocycle – the Motorcycle for the Hydrogen Age. Verkkosivu. Viitattu 27.2.2025.

<https://www.iwu.fraunhofer.de/en/press/PM-2024-Hydrocycle-the-Motorcycle-for-the-Hydrogen-Age.html>

Atlas Copco. 2025. Elektrolysaattorit vedyn tuotantoteknologioina. Verkkosivu. Viitattu 28.2.2025.

<https://www.atlascopco.com/fi-fi/compressors/wiki/compressed-air-articles/electrolyzers-as-hydrogen-production-technologies>

eFUEL-TODAY. 2025. How are e-fuels produced. Verkkosivu. Viitattu 28.2.2025

<https://efuel-today.com/en/start-en/>

European Commission. 2025. European Alternative Fuels Observatory. Verkkosivu. Viitattu 4.3.2025.

<https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/european-union-eu27>

Euroopan parlamentti. 2023. Lisää vaihtoehtoisia polttoaineita autoille. Verkkosivu. Viitattu 4.3.2025.

<https://www.europarl.europa.eu/topics/fi/article/20221013STO43019/lisaa-vaihtoehtoisia-polttoaineita-autoille>

Khaitan BioEnergy. 2025. An Overview on Synthetic Fuel. Verkkosivu. Viitattu 11.3.2025. <https://khaitanbioenergy.com/an-overview-on-synthetic-fuel/>

NEDO. n.d. Development of Technology for producing fuel using CO₂, etc. Verkkosivu. Viitattu 11.3.2025.

<https://green-innovation.nedo.go.jp/en/project/development-fuel-manufacturing-technology-co2/>

European Energy. n.d. Power-to-X. Verkkosivu. Viitattu 13.3.2025.

<https://europeanenergy.com/green-solutions/ptx/>

Horizon 2020. 2023. HyBalance – Demonstrating the feasibility of multi-sectoral hydrogen end-use. Euroopan komissio. Verkkosivu. Viitattu 18.3.2025.

<https://cordis.europa.eu/project/id/671384>

Hydrogen Europe. 2024. Long-term outlook on zero-emission mobility. Pdf-dokumentti. Viitattu 19.3.2025

https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2024/02/2024.02.14-Long-term-outlook-on-zero-emission-mobility_Report_14-02-2024_DIGITAL.pdf

Hybalance. n.d. Verkkosivu. Viitattu 19.3.2025

<https://hybalance.eu/>

Green H₂ World. 2023. Steam methane reforming process. Verkkosivu. Viitattu 20.3.2025.

<https://www.greenh2world.com/post/steam-methane-reforming>

F.Markus. 2016. 1966 GM Electrovan Fuel Cell Prototype Turns 50. Motortrend. Verkkosivu. Viitattu 20.3.2025

<https://www.motortrend.com/news/1966-gm-electrovan-fuel-cell-prototype-turns-50/>

C. Von Bell. 2017. Päivän museoauto: Suomen ensimmäinen vetyauto vuodelta 1927! autotoday. Verkkosivu. Viitattu 24.3.2025

<https://autotoday.fi/paivan-museoauto-suomen-ensimmainen-vetyauto-vuodelta-1927/>