



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **Vedyn tuotanto elektrolyysillä**

Annika Jääskö

TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Helmikuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Vedyn tuotanto elektrolyysillä

Annika Jääskö

Oulun yliopisto, Ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2021, 34 s.

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: Esa Turpeinen

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on tarkastella vedyn tuottamista eri elektrolyysimenetelmillä. Työssä käydään läpi myös vedyn käyttökohteita ja muita tuotantomenetelmiä elektrolyysin lisäksi. Työ on toteutettu kirjallisuusselvityksenä.

Vedyllä odotetaan olevan suuri rooli tulevaisuuden energiajärjestelmissä. Yhteiskunnan ja teollisuuden eri osa-alueiden irrottautuessa fossiilisista polttoaineista, uusiutuvien energiajärjestelmien tarve kasvaa. Vetyä ei kuitenkaan tavata maapallolla sellaisenaan, vaan sitä on tuotettava eri lähtöaineista kuten maakaasusta tai vedestä. Vetyä käytetään muun muassa vetyautojen polttokennoissa, energian- ja sähköntuotannossa sekä kemianteollisuudessa. Vetytalouden yleistyessä on tarvetta lisätä vedyn tuotantoa ja tuotantomenetelmiä. Elektrolyysi on ympäristöllisesti paras tapa tuottaa vetyä, koska menetelmällä saadaan tuotettua puhtainta vetyä. Vedyn muita tuotantomenetelmiä elektrolyysin lisäksi ovat höyryreformointi, hiilen ja biomassan kaasutus, termokemialliset syklit ja fotolyytiset menetelmät.

Työssä käsitellään elektrolyysin toimintaperiaatetta ja tunnetumpia elektrolyysimenetelmiä. Elektrolyysissä käytetty sähköenergia muuntuu reaktiossa kemialliseksi energiaksi, jonka kantajana vety toimii. Tarkasteltavat elektrolyysimenetelmät ovat alkalielektrolyysi, PEM-elektrolyysi ja höyryelektrolyysi. Menetelmien tarkastelussa keskitytään niiden ominaisuuksiin, toimintaperiaatteisiin ja laitekonstruktioon.

Työssä käsitellään myös kestäväen yhteiskunnan ulottuvuuksia ja millaisia vaikutuksia vedyllä on näihin. Vetytalouden vaikutuksia energiajärjestelmien ympäristölliseen, taloudelliseen ja sosiaaliseen kestävyYTEEN tarkastellaan. Lisäksi työssä käydään läpi Suomen vetytaloutta nykypäivänä ja sen mahdollisuuksia tulevaisuudessa.

*Asiasanat: Vety, Elektrolyysi, Fossiiliset polttoaineet, Polttokenno, Vetytalous*

# ABSTRACT

Hydrogen production by electrolysis

Annika Jääskö

University of Oulu, Environmental technology of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2021, 34 pp.

Supervisor(s) at the university: Esa Turpeinen

The aim of this work is to examine the production of hydrogen by different electrolysis methods. The work also examines the different uses of hydrogen and other hydrogen production methods in addition to electrolysis. The work has been completed as a literature review.

Hydrogen is expected to play a major role in future energy systems. As different sectors of society and industry break away from fossil fuels, the need for renewable energy systems increases. However, hydrogen is not found on Earth as it is, but must be produced e.g. through extraction from source materials that contain it, e.g. natural gas or water. Hydrogen is used in fuel cells, energy and electricity production and in the chemical industry. As the hydrogen economy becomes more common the need for hydrogen production and production methods grows. Electrolysis is environmentally the best way to produce hydrogen because the method produces the purest hydrogen. Other hydrogen production methods in addition to electrolysis include steam reforming, coal and biomass gasification, thermochemical cycles and photolytic processes.

This work deals with the operating principle of electrolysis and more known electrolysis methods. The electrical energy used in electrolysis is converted in the reaction into chemical energy, which is carried by hydrogen. The electrolysis methods considered are alkali electrolysis, PEM electrolysis and steam electrolysis. The review of the methods focuses on their characteristics, operating principles and configuration.

The work also examines the dimensions of a sustainable society and the effects of hydrogen on these. The effects of hydrogen economy on the sustainability of energy

systems environmentally and also economic and social sustainability, are examined. In the addition, the work reviews the Finnish hydrogen economy today and its possibilities in the future.

*Keywords: Hydrogen, Electrolysis, Fossil Fuels, Fuel cell, Hydrogen economy*

# SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto .....	8
2 Vedyn käyttökohteet .....	10
2.1 Polttokennot ja vetyenergia.....	11
2.2 Vety kemianteollisuudessa.....	12
3 Vedyn valmistusmenetelmät .....	13
3.1 Höyryreformointi .....	13
3.2 Hiilen ja biomassan kaasutus .....	14
3.3 Termokemialliset syklit.....	14
3.4 Fotolyttiset menetelmät.....	15
4 Elektrolyysitekniikka .....	17
4.1 Elektrolyysi .....	17
4.2 Veden alkalelektrolyysi.....	18
4.3 Protoninvaihtomembraanielektrolyysi (PEM-elektrolyysi, Proton-exchange membrane).....	19
4.4 Veden höyryelektrolyysi .....	21
4.5 Elektrolyysimenetelmien yhteenveto .....	22
5 Vedyn varastoiminen .....	25
6 Vedyn tuotannon kestävyystarkastelua .....	26
6.1 Vedyn tuotannon ympäristöllinen kestävyys .....	27
6.2 Vedyn tuotannon taloudellinen -ja sosiaalinen kestävyys .....	27
7 Suomen vetytalous .....	29
8 Yhteenveto .....	30
LÄHDELUETTELO.....	32

## MERKINNÄT JA LYHENTEET

CH <sub>4</sub>	Metaani
CO <sub>2</sub>	Hiilidioksidi
EU	Euroopan Unioni
H <sub>2</sub>	Vety
H <sub>2</sub> O	Vesi
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Rikkihappo
I	jodi
KOH	Kaliumhydroksidi
NaOH	Natriumhydroksidi
PFSA	Perfluorisulfonihappo
PEM	Protoninvaihtomembraani (Proton-exchange membrane)
PEMFL	Protoninvaihtomembraanin polttokenno (Proton-exchange membrane fuel cell)
SO <sub>2</sub>	Rikkidioksidi
ZrO <sub>2</sub>	Zirkoniumoksidi

## 1 JOHDANTO

Ilmastonmuutos on maailmanlaajuisesti yksi aikamme suurimmista ongelmista. Maapallon keskilämpötila on noussut noin asteen esiteollisesta ajanjaksosta ja vaikutukset ympäristöön ovat jo näkyviä. Suurin tekijä ilmastonlämpenemiselle on fossiilisten polttoaineiden käyttö. Ilmaston lämpenemistä pyritään rajaamaan 1,5 asteeseen, mutta nykyisillä toimintatavoillamme raja-arvoa on vaikea saavuttaa. (WWF, 2021) Vuonna 2016 astui voimaan Pariisin sopimus, jonka tavoitteena on vähentää päästöjä maailmanlaajuisesti sekä mennä kohti vähähiilistä ja kestävämpää kehitystä. (Ympäristöministeriö, 2019) EU:n tavoitteena on saavuttaa ilmastoneutraalius vuoteen 2050 mennessä ja Suomen tavoitteena vuoteen 2035 mennessä. (Ympäristöministeriö, 2021) Tavoitteiden saavuttamiseksi tulisi ehkäistä fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja korvata ne kestävillä vaihtoehdoilla. Lisäksi tulisi edistää kestäviä energiaratkaisuja. (WWF, 2021) Uusiutuvalla vedyllä odotetaan olevan keskeinen rooli tulevaisuuden kestävässä energiajärjestelmissä. (Honnery and Moriarty, 2012)

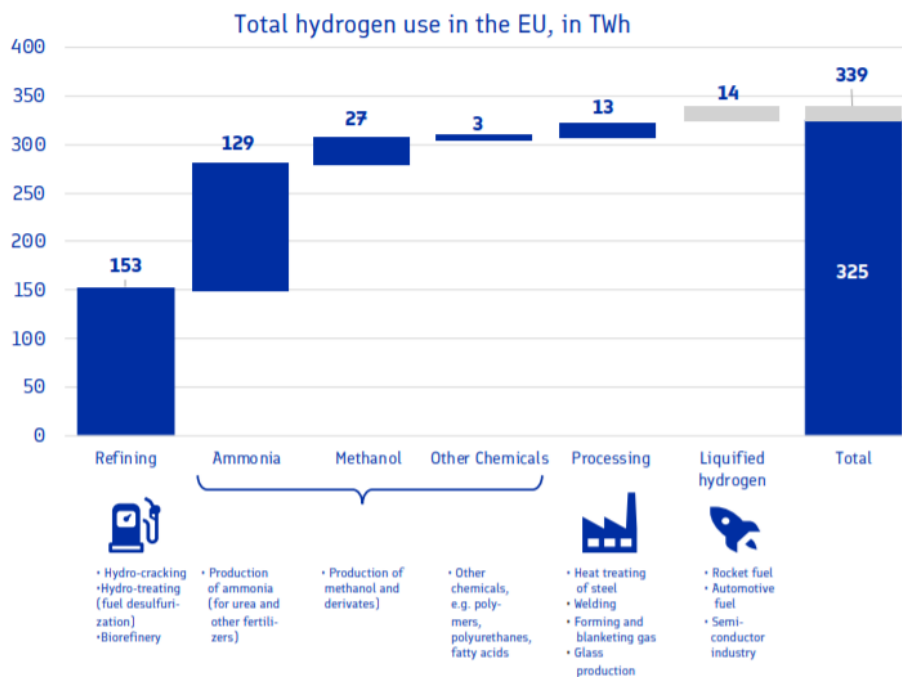
Vety on yksi yleisimmistä alkuaineista. Sitä esiintyy maapallolla lähinnä sitoutuneena veteen. Näin ollen vetyä ei voida käyttää sellaisenaan primäärienergiana vaan sen tuottamiseen on käytettävä energiaa. Energiaa voidaan siirtää ja varastoida vedyn kautta. (Honnery and Moriarty, 2012) Vety sisältää suuria määriä energiaa massayksikköä kohden verrattuna esimerkiksi bensiiniin tai dieseliin. (Motiva, 2020b) Uusiutuvan vedyn tuotannossa vety erotetaan vedestä energian avulla, jolloin ainoana päästönä on vesihöyry. Näin ollen vety toimii päästöttömänä energiankantajana. (Honnery and Moriarty, 2012) Elektrolyysi on ympäristöllisesti paras vedyntuotanto menetelmä, koska tällöin saadaan puhtainta vetyä. Elektrolyysimenetelmä on taloudellisesti kannattava, kun siinä käytettävä sähköenergia on tuotettu kestävillä energiaratkaisuilla, kuten aurinko- tai tuulivoimalla. (Gandia, et al., 2013) Nykypäivänä vetyä tuotetaan pääsääntöisesti fossiilisista polttoaineista. (Motiva, 2020b) Vetytalouden kasvaessa on kuitenkin odotettavissa lisää kestäviä energiaratkaisuja, jolloin fossiilisten polttoaineiden käyttö vähenee entisestään. Suomessa tuulivoiman ja aurinkovoiman lisääntyminen voi mahdollistaa vedyn käytön kasvamista energiajärjestelmissä. (Laurikko, ym., 2020) Tämän työn tavoite on tarkastella vedyn tuottamista eri elektrolyysimenetelmillä. Lisäksi



työssä tarkastellaan vedyn eri käyttökohteita ja muita vedyn tuotantomenetelmiä elektrolyysin lisäksi.

## 2 VEDYN KÄYTTÖKOHTEET

Energia on teollisuusyhteiskuntien avaintekijä. Elintaso ja elämäntavat ovat riippuvaisia energiasta. Väestön kasvu ja elintason nousu on voimakasta etenkin kehitysmaissa ja näin ollen energian tarve kasvaa. Huoli monien energianlähteiden niukkuudesta sekä energiajärjestelmien ympäristövaikutukset vaikuttavat energian käyttöön. Vedyllä odotetaan olevan keskeinen rooli energiankantajana tulevilla energiajärjestelmissä. Fossiilisten polttoaineiden määrän vähentyessä ja ympäristöongelmien lisääntyessä, vedystä tulee yhä tärkeämpi energialähde. Vetyperäisen energian ympäristövaikutukset riippuvat siitä, mitä lähtöainetta käytetään vedyn tuottamiseen. Vetyä voidaan tuottaa ympäristöystävällisesti vedestä elektrolyysin kautta ja polttokennossa se muuntuu takaisin vedeksi hapettumisreaktion jälkeen. (Honnery and Moriarty, 2012) Kuvasta 1 nähdään, että EU:ssa vedyn kulutus oli vuonna 2015 339 TWh (noin 10 Mt) eurooppalaisten polttokenno- ja vety-yhteisyritysten mukaan. Tähän sisältyy myös se vedyn määrä, mikä syntyy eri prosessien sivutuotteena. (Laurikko, et al., 2020)



Kuva 1. Vedyn kulutus EU:ssa 2015. (Laurikko, et al., 2020)

Vetyä syntyy sivutuotteena monissa eri teollisuuden prosesseissa. Esimerkiksi Suomessa Kemira Chemicals Oy hyödyntää tehtaansa prosesseista syntyvää sivutuotevetyä lämmöntuotantoon. Näin ollen Joutsenon kaukolämmöntuotannossa on saatu vähennettyä hiilidioksidipäästöjä jopa 4000 tonnia vuodessa. (Leppäkoski Group Oy, 2012) Kuvasta 1 nähdään, että suurimmat vedyn käyttökohteet ovat liikenne ja kemianteollisuus. Vetyä käytetään myös lämmöntuotannossa, prosessiteollisuudessa ja jopa polttoaineena avaruusraketeissa.

## 2.1 Polttokennot ja vetyenergia

Vetyä voidaan muuntaa energiaksi erilaisilla menetelmillä. (Autoalan keskusliitto, 2020) Yleisin menetelmä on polttokennotekniikka. Polttokenno on sähköä tuottava laite, joka muuttaa polttoaineesta ja hapettimesta varastoidun kemiallisen energian suoraan sähköenergiaksi elektrodireaktion avulla. Polttokennot koostuvat kahdesta elektrodista eli anodista ja katodista sekä elektrolyytistä. Lisäksi prosessiin tarvitaan katalyyttejä, mitkä nopeuttavat reaktiota. (Tong, et al., 2018) Prosessissa vety sekoitetaan ilmasta saadun hapen kanssa, jolloin hapetus-pelkistysreaktion tuotteena syntyy vesihöyryä ja sähköenergiaa. (Datamonitor Plc, 2011) Polttokennot voidaan luokitella niiden käyttölämpötilan, polttoainelähteen tai erilaisten elektrolyytin mukaan. Käyttölämpötilan mukaan polttokennot luokitellaan matalan lämpötilan, keskilämpötilan ja korkean lämpötilan polttokennoiksi. Polttoainelähteen mukaan polttokennot luokitellaan suoriksi tai epäsuoriksi polttokennoiksi. Elektrolyyttien mukaan polttokennot luokitellaan viiteen eri luokkaan; emäksinen polttokenno, fosforihappopolttokenno, sulakarbonaattipolttokenno, kiinteäoksidipolttokenno ja protoninvaihto(kalvo)polttokenno. (Tong, et al., 2018) Polttokennoautot ovat sähköautoja, joissa vety toimii polttoaineena siten, että vedyn kemiallinen energia muutetaan sähköenergiaksi. (Motiva, 2020a) Polttokennoautojen tankkaus on yksinkertaista. Ongelmana on kuitenkin se, ettei polttokennoautoille ole vielä tarpeeksi tankkausasemia maailman laajuisesti. (Koca, et al., 2010) Vetypolttoaineen tuottaminen, tankkausasemien vähäisyys ja vetyautojen korkeat valmistuskustannukset hidastavat polttokennoautokannan kasvamista. Vety on kuitenkin saanut suosiota vaihtoehtoisena polttoaineena, koska siitä syntyvänä ainoana päästönä on vesihöyry. Polttoaineen monikäyttöisyys, moottorin vähäinen melu ja tehokkuus ovat vetyperäisen polttoaineen

hyötyjä. Lisäksi vedyn energiasisältö on suuri sen massayksikköä kohden, jopa suurempi kuin bensiinillä ja dieselillä. (Tong, et al., 2018)

Fossiiliset polttoaineet kattavat suurimman osan maailman primaarienergian kokonaistarpeesta. Muita vaihtoehtoja fossiilipohjaiselle energialle ovat muun muassa vesi-, aurinko-, tuuli-, ydin- ja maalämpöenergia. Ydinenergiaa on käytetty lähinnä sähköntuotantoon, mutta käyttäen esimerkiksi vetyä energiankuljettajana sitä voidaan käyttää suoraan teollisuuslämmitykseen, kaukolämpöön ja energianmuunnosprosesseihin. (Honnery and Moriarty, 2012) Vety on energian kantajana puhdasta, mutta sen tuottaminen ilman hiilidioksidipäästöjä on haasteellista. Käyttämällä uusiutuvia energialähteitä, maakaasua, biomassaa tai ydinenergiaa voidaan hiilidioksidipäästöjä pienentää ja riippuvuus fossiilisista polttoaineista vähenee. (Koca. et al., 2012) Vetyä suunnitellaan käytettäväksi muun muassa tuuli- ja aurinkovoiman tuotannon vaihtelevuuden kompensointiin sekä pidemmän ajan energianvarastointiin. Vety tarvitsee kuitenkin laajan varastointi- ja siirtoinfrastruktuurin. (Tulkki, 2020) FCH JU (Fuel cells and hydrogen Joint Undertaking) arvioi, että vedyllä voitaisiin tuottaa jopa 665 TWh (noin 6%) energiaa EU:ssa vuoteen 2030 mennessä. Vuoteen 2050 mennessä vetyenergia voisi kattaa noin neljännesosan EU:n energian kokonaiskysynnästä. Tämä määrä polttoainetta riittäisi noin 42 miljoonaan isoon autoon, 1,7 miljoonaan kuorma-autoon, neljännesmiljoonaan bussiin ja yli 5,5 tuhanteen junaan. Lisäksi sillä lämmitettäisiin 52 miljoonaa kotitaloutta. (Laurikko, et al., 2020)

## 2.2 Vety kemianteollisuudessa

Kemianteollisuus on toiseksi suurin vedyn käyttökohteista. Kuvasta 1 nähdään sen osuuden olleen 40 % vuonna 2015. Vetyä hyödynnetään EU:ssa muun muassa erilaisten kemikaalien valmistuksessa ja kemian teollisuuden muissa sovelluksissa, prosessiteollisuudessa sekä nesteytettynä erilaisiin tarkoituksiin. (Laurikko, et al., 2020) Kemianteollisuudessa vetyä käytetään eniten ammoniakkin valmistamiseen. Muita vedyn käyttökohteita kemianteollisuudessa ovat metanolin ja muiden yhdisteiden, kuten polymeerien, valmistus. Useimmiten yritykset, jotka käyttävät suuria määriä vetyä, tuottavat sitä itse. Esimerkkinä näistä voidaan mainita ammoniakkipohjaisen lannoitteen tuottajat ja metanolitehtaat. (Kauranen, ym., 2013)

### 3 VEDYN VALMISTUSMENETELMÄT

Vetyä ei tavata maapallolla sellaisenaan, joten sitä on aina valmistettava. Vedyn valmistaminen vaatii energiaa. Vetyä voidaan valmistaa reformoimalla, elektrolyysillä, termokemiallisilla sykleillä, biokemiallisilla prosesseilla, radiolyysillä sekä fotolyysillä. Näistä yleisin tapa on reformointi, mutta puhtain vedyn valmistusmenetelmä elektrolyysitekniikka. Suomessa vedyn kokonaistuotanto on arvioltaan 140 000-150 000 t/a. 99 % vedystä tuotetaan joko höyryreformoinnilla tai fossiilisten polttoaineiden osittaisella hapetuksella. Vain alle 1 % tuotetaan elektrolyysillä. (Motiva, 2020b)

#### 3.1 Höyryreformointi

Maakaasun, yleensä metaanin, höyryreformointi on nykypäivänä yleisin vedyn valmistusmenetelmä. Höyryreformointi-reaktiossa lähtöaineen hiilen ja vedyn väliset sidokset hajoavat, jolloin hiili hapettuu hiilidioksidiksi ja reaktion tuotteena syntyy vetyä, hiilidioksidia sekä hiilimonoksidia. (Motiva, 2020b)

Metaani hajoaa vedyksi ja hiilidioksidiksi seuraavasti:



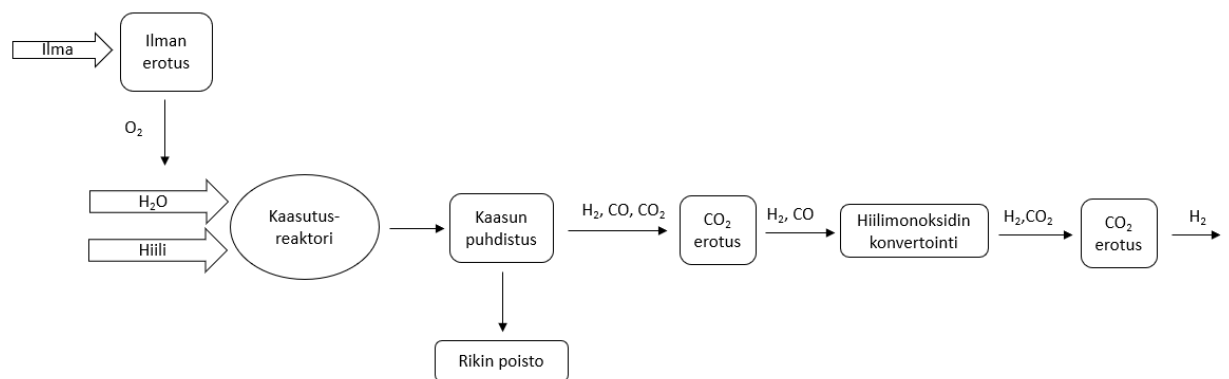
Reaktiossa syntyvä hiilimonoksidi konvertoidaan vedyksi vesikaasun siirtoreaktion avulla:



Höyryreformointi on endoterminen reaktio eli se sitoo lämpöä itseensä ja näin ollen tarvitsee paljon energiaa. Höyryreformoinnissa käytetty lämpötila on yleensä noin 800 °C, koska reaktio on helpommin toteutettavissa korkeammissa lämpötiloissa. Höyryreformoinnin hyötysuhde on korkeimmillaan noin 75 %. (Seelam, 2013)

### 3.2 Hiilen ja biomassan kaasutus

Hiilen kaasutusprosessissa tapahtuu hapetusreaktio, jonka tuotteena saadaan useita yhdisteitä sisältävää kaasua. Kaasusta poistetaan ei halutut raskasmetallit ja rikki. Reaktiossa saatu kaasu muodostuu nyt vedystä, hiilimonoksidista ja hiilidioksidista. Kaasusta erotetaan hiilidioksidi ja kaasuun jäänyt hiilimonoksidi konvertoidaan vedyksi ja hiilidioksidiksi vesikaasun siirtoreaktiossa. Tämän jälkeen vety ja hiilidioksidi edelleen erotetaan toisistaan prosessin loppuvaiheessa, jolloin tuotteena saadaan vetyä. Kuvasta 2 nähdään hiilen kaasutusprosessin prosessikaavio.



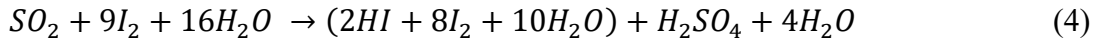
Kuva 2. Vedyn tuotanto hiilen kaasutusprosessissa. Mukailten (Jumppanen P., 2009)

Kuvassa 2 kuvattua prosessia sovelletaan myös biomassan kaasutukseen. Kiinteää biomassaa kaasuttamalla saadaan vetyä ja samalla muodostuu orgaanisia epäpuhtauksia pieninä määrinä. Biokaasutuksessa käytetään korkeita lämpötiloja. (Pieniniemi ja Muilu, 2011) Biomassan sisältämien epäpuhtauksien takia saadun vedyn puhtausaste on huono, joten biomassan kaasutuksen tekniikassa on vielä kehitettävää. (Motiva, 2020b)

### 3.3 Termokemialliset syklit

Termokemiallisen syklin yksi hyöty on se, että se voidaan toteuttaa ilman että prosessissa muodostuu hiilidioksidia. (Outotec Oyj, 2008) Termokemiallisissa sykleissä toiminta perustuu veden kemiallisiin ominaisuuksiin. Vesi voidaan sitoa erilaisiin kemiallisiin yhdisteisiin. Tunnetuin termokemiallinen sykli on jodi-rikki-sykli (I-S). Jodi-rikkisykliin

lisätään vettä ja lämpöenergiaa, jolloin tuotteena syntyy vetyä ja happea seuraavien reaktioiden mukaisesti.



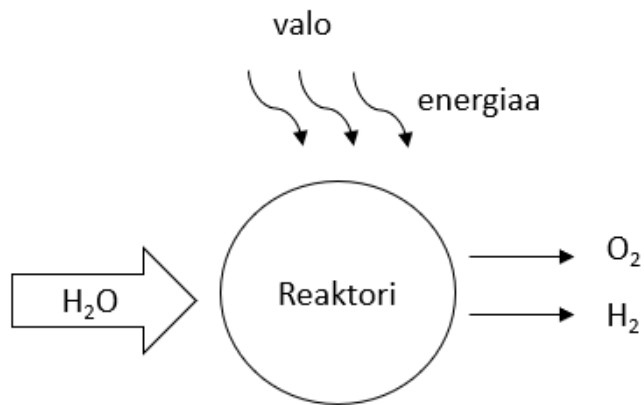
Rikkidioksidin ja jodin reaktiossa (4) syntyy tuotteena rikkihappoa sekä vetyjodidia. Tuotteena saatava rikkihappo ja sulussa oleva osa erotetaan toisistaan. Rikkihappo hajotetaan vedeksi sekä sulfiitiksi. Sulfiitti hajotetaan edelleen rikkidioksidiksi ja voidaan kierrättää takaisin reaktioon (4). Vetyjodidi tislataan, jolloin syntyy vetykaasua (5). Tislauksessa erotettu jodi voidaan rikkidioksidin tavoin kierrättää takaisin reaktioon (4).



Menetelmän hyötysuhde riippuu prosessilämpötilasta. Mitä korkeampi lämpötila, sitä parempi hyötysuhde. (Raunio, 2017)

### 3.4 Fotolyttiset menetelmät

Fotolyttiset menetelmät perustuvat kemialliseen prosessiin, jossa valon säteilyenergia hajottaa molekyyliä. Veden fotolyysissä vesimolekyylit ( $H_2O$ ) hajoavat happimolekyyliksi ( $O_2$ ) ja vetymolekyyliksi ( $H_2$ ). Kuvasta 3. nähdään fotolyysin kemiallinen reaktio, missä valoenergia hajottaa vesimolekyylin. Fotolyysi ei ole spontaani reaktio vaan se on toteutettava muun muassa katalyyttien avulla. (Thpanorama, 2020)



Kuva 3. Veden fotolyysireaktio. Mukaillen (Daniels, J. A., 2012)

Vedyn valmistamiseen voidaan myös soveltaa fotosähkökemiallista veden hajotusta. Prosessissa auringonvalo kohdistetaan joko sähkökemiallisiin materiaaleihin, joita ovat erilaiset puolijohteet ja ohutkalvot, tai erilaisiin katalyytteihin, mitkä ovat herkkiä valolle. (Jumppanen, 2009)

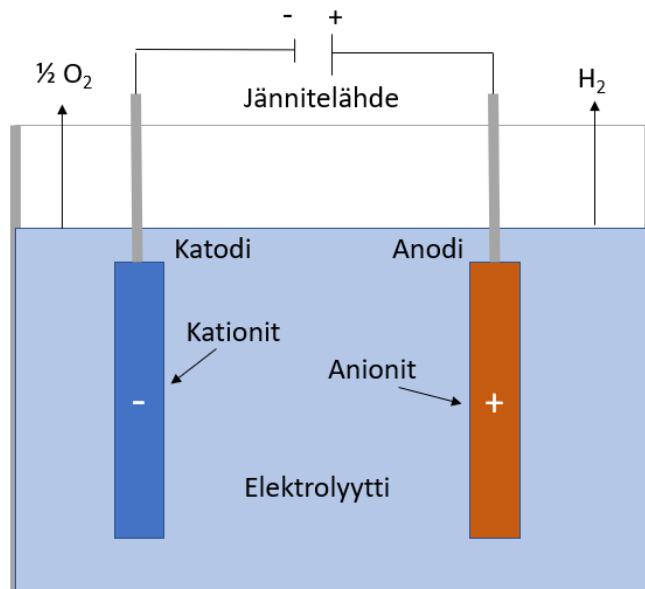


## 4 ELEKTROLYYSITEKNIikka

### 4.1 Elektrolyysi

Veden elektrolyysi on vedyn valmistusmenetelmistä puhtain. Se on kuitenkin kallista suuren sähkön tarpeen vuoksi. (Motiva, 2020b)

Elektrolyysissä vedestä erotetaan happi ja vety sähköenergian avulla.



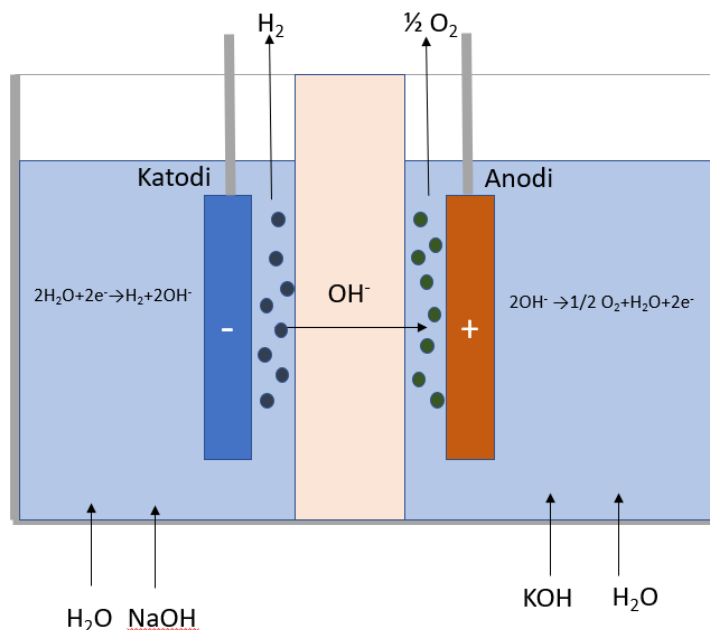
Kuva 4. Elektrolyysikenno. Mukaillen (Gandia, et al., 2013)

Elektrolyysissä sähköenergia muuntuu vedyn ja lämpöenergian kuljettamaksi kemialliseksi energiaksi. (Koponen J., 2020) Veden sisältämä vety pelkistetään katodilla ja happi hapetetaan anodilla elektrodien kautta johdetulla sähkövirralla. Elektrodit ovat metalleja, jotka on päällystetty toisilla metalleilla korroosion ehkäisemiseksi. Yleensä elektrodien päällystämiseen käytetään sinkkiä, kromia tai kuparia. (Nettinuotta, 2020) Elektrolyytinä käytetään yleensä emäksistä, vesipohjaista kaliumhydroksidi- tai natriumhydroksidiliuosta. Elektrolyyttiliuoksen pitoisuus on usein jopa 40 m-%, jotta sähkönjohtavuudesta saadaan mahdollisimman korkea. (Gandia, et al., 2013)

Katalyyteillä kasvatetaan elektrolyysin sähkönjohtavuutta, jolloin reaktiosta saadaan tehokkaampi. (Jumppanen P., 2009) On olemassa kolme eri elektrolyysityyppiä; alkali-elektrolyysi, protonielektrolyysi (PEM) ja höyryelektrolyysi. (Gandia, et al., 2013)

## 4.2 Veden alkali-elektrolyysi

Veden alkali-elektrolyysi on elektrolyysimenetelmistä yleisin ja perinteisin. Sen käyttö on hyvin laajamittaista ja soveltuu suuriin elektrolyysilaitoksiin. (Kauranen, ym., 2013) Alkali-elektrolyysissä kaksi metallielektrodia upotetaan nestemäiseen elektrolyyttiin. Alkali-elektrolyysissä metallielektrodien materiaalina käytetään yleensä nikkeliä. Kuvasta 5 nähdään alkali-elektrolyysikennon toiminta, kun elektrolyytteinä käytetään kaliumhydroksidin (KOH) vesiliuosta ja natriumhydroksidin (NaOH) vesiliuosta. Kuvassa oleva kalvo on sijoitettu erottamaan elektrodit toisistaan, koska muuten vety ja happi muuntuisivat spontaanisti takaisin vedeksi. Erottava kalvo on huokoista ja elektrolyyttisesti kyllästettyä materiaalia. Tiheyden kasvaessa kaasukuplia syntyy tasaisesti molempien elektrodien pinnalle muodostaen resistiivisen kalvon. Tällöin käyttövirrantiheydet rajataan siten, että ne voivat olla korkeintaan muutama  $100 \text{ mA/cm}^2$ . (Gandia, et al., 2013)



Kuva 5. Alkali-elektrolyysikennon. Mukailten (Gandia, et al., 2013)

Alkalielektrolyysissä vesi pelkistetään katodilla, jolloin muodostuu vetykaasua (7):



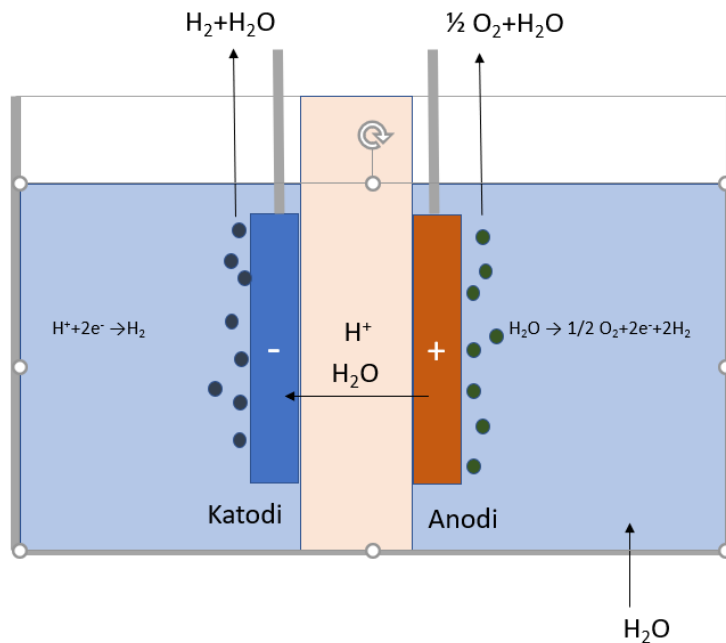
Samaan aikaan anodilla tapahtuu hapettumisreaktio, jolloin muodostuu happea (8):



Vesi kiertää kennossa reaktion jatkuvuuden vuoksi ja jotta elektrolyyttien pitoisuudet pysyvät reaktiolle optimaalisena. Kun kennon kokoonpanossa kaksi elektrodia ovat huokoisia ja ne ovat painettuna niitä erottavaa kalvoa vasten, saavutetaan suuri virtaustiheys, kun kaasut muodostuvat elektrodien vapailta sivuilta. Alkalireaktiossa tyypillinen lämpötila on noin 60-80 °C. Muodostuvan vedyn puhtausaste on noin 99,9 %. (Gandia, et al., 2013)

### 4.3 Protoninvaihtomembraanielektrolyysi (PEM-elektrolyysi, Proton-exchange membrane)

PEM-elektrolyysi on uudempi elektrolyysimenetelmä kuin alkalielektrolyysi. (Kauranen, ym., 2013) Kuvasta 6 nähdään PEM (proton-exchange membrane) elektrolyysin toimintaperiaate. PEM-elektrolyysissä kaksi metallista elektrodia on painautuneena protoneja johtavaa protonielektrolyyttiä vasten. Kennon keskelle on asetettuna polymeerikalvo. Polymeerikalvo on upotettuna vesiliuokseen ja sen sisällä on liikkuvia protoneja, jotka eivät pääse pois kalvon sisältä. PEM-elektrolyysissä elektrolyytin happamuus on korkea. Elektrolyytinä käytetään fluorattuja orgaanisia yhdisteitä kuten perfluorisilfonihappoa (PFSA). Tämän vuoksi reaktion katalyytteinä, sekä anodina että katodina, voidaan käyttää vain jalometalleja kuten platinaa, jotka kestävät happamuutta. (Gandia, et al., 2013)



Kuva 6. PEM-elektrolyysikemmo. Mukailten (Gandia, et al., 2013)

Happea muodostuu anodilla reaktion (9) mukaan:



Samaan aikaan vetyionit kulkeutuvat PEM-kalvon läpi, jolloin vetyä muodostuu katodissa:



PEM elektrolyysin kokonaisreaktio tapahtuu siis seuraavasti:

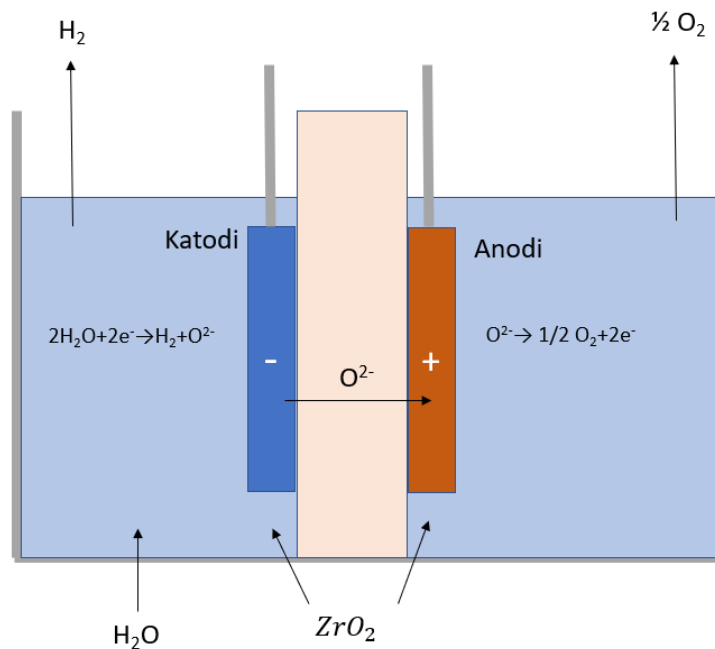


PEM-elektrolyysitekniikka on hyvin kallista, mutta se on myös tehokkain tapa valmistaa vetyä vedestä. PEM-elektrolyysiä käytetään yleensä pienemmissä laitoksissa. (Kauranen, ym., 2013) Sitä käytetään paljon polttokennoautoissa sen tehokkuuden vuoksi. Lisäksi tämä menetelmä on helppo rakentaa ja toteuttaa. Näistä polttokennoista käytetään

yleisesti nimitystä PEMFL (proton-exchange membrane fuel cells). PEM-elektrolyysillä saatavan vedyn puhtausaste on jopa  $\geq 99,9\%$ . (Gandia, et al., 2013)

#### 4.4 Veden höyryelektrolyysi

Korkeassa lämpötilassa tapahtuvaa veden elektrolyysiä kutsutaan höyryelektrolyysiksi. Tämä menetelmä on vielä tutkimusasteella ja vaatii kehittämistä. (Kauranen, ym., 2013) Vaikka höyryelektrolyysimenetelmä onkin vielä kehittämisasteella, on demonstraatioprojekteja käynnistetty esimerkiksi ydinvoimaloissa. Projektit ovat osoittaneet, että höyryelektrolyysi voi olla potentiaalisesti kasvava elektrolyysimenetelmä vielä tämän vuosikymmenen lopulla. Tämän mahdollistamiseksi vetyteknologiaan ja sen kehitykseen olisi ohjattava huomattavia lisäresursseja. (Tulkki V., 2020) Höyryelektrolyysi toteutetaan kiinteäoksidielektrolyysikennossa. Kenno on useimmiten ruostumatonta terästä. Siinä käytetään elektrolyyttinä ja kalvona kiinteitä keraameja, jotka johtavat happi-ioneja. Kalvo erottaa metallielektrodit toisistaan kuten alkalielektrolyysissä ja PEM-elektrolyysissä. Höyryelektrolyysissä tullaan luultavasti käyttämään nikkeliä metallielektrodien materiaalina, kuten alkalielektrolyysissä. Yleisimmin prosessissa käytetään elektrolyyttinä kiinteää zirkoniumoksidia ( $ZrO_2$ ). Zirkoniumoksidin kristallimaisen rakenteen poikkeamissa tapahtuu diffuusiota, jossa happi-ionit kulkevat sen lävitse. Kiinteän elektrolyytin resistiivisyys on suurempi kuin alkalielektrolyysin tai PEM elektrolyysin resistiivisyys. Näin ollen kiinteä keraaminen elektrolyytti vähentää sähkövastuksisia ja resistiivisiä häviöitä tehokkaasti. Prosessissa käytetään noin 800-1000 °C lämpötilaa. (Gandia, et al., 2013)



Kuva 7. Kiinteäoksielektrolyysikennon. Mukailten (Gandia, et al., 2013)

Höyryelektrolyysissä vetyä muodostuu vedestä reaktion (12) mukaan katodissa:



Kuten kuvasta 7 nähdään, että muodostunut happi-ioni  $O^{2-}$  siirtyy elektrolyytin läpi ja muuntuu anodissa reaktion (13) mukaan seuraavasti:



#### 4.5 Elektrolyysimenetelmien yhteenveto

Kolme eri elektrolyysiteknologiaa ovat alkalielektrolyysi, PEM-elektrolyysi ja höyryelektrolyysi. Kaikilla elektrolyysimenetelmillä on sama toimintaperiaate, mutta niiden ominaisuudet, konstruktio ja materiaalit eroavat toisistaan. Taulukkoon 1 on koottu eri elektrolyysityyppien ominaisuuksia. Alkalielektrolyysi on tyypeistä vanhin ja näin

ollen tunnetuin. Se on tehokas tapa tuottaa vetyä ja soveltuu erikokoisiin laitoksiin. Kaikki elektrolyysityypit tapahtuvat kennoissa. Alkalielektrolyysi tapahtuu nikkelöidyssä teräskennossa, jossa erottavana kalvona käytetään huokoista kalvoa. Alkalielektrolyysin käyttö on kallista, koska se vaatii paljon sähköenergiaa. Alkalielektrolyysillä tuotetun vedyn puhtausaste on noin 99,5-99,9 %. PEM-elektrolyysi on melko uusi elektrolyysityyppi. Se on kuitenkin kasvattanut suosiota ja sen toimintaa hyödynnetään pienissä laitoksissa. Esimerkkinä PEM-elektrolyysiä käytetään paljon polttokennoautoissa. PEM-elektrolyysi toteutetaan ruostumattomasta teräksestä koostuvassa kennossa, jossa erottavana kalvona käytetään polymeerikalvoa. Menetelmä on kallis suuren sähköenergian tarpeen vuoksi. Lisäksi PEM-elektrolyysi vaatii jalometalleja elektrolyytin korkean happamuuden vuoksi, joten kustannukset ovat suuremmat kuin alkalielektrolyysissä tai höyryelektrolyysissä. PEM-elektrolyysillä tuotetun vedyn puhtausaste on 99,999 %. Höyryelektrolyysi on kaikista uusien elektrolyysimenetelmä ja se on suurimmaksi osaksi vielä tutkimusasteella. Näin ollen ei voida vielä sanoa, kuinka sen käyttö yleistyy tai mihin käyttökohteisiin menetelmä soveltuu. Höyryelektrolyysin odotetaan kuitenkin yleistyvän vielä tämän vuosikymmenen lopulla ja sen suunnitellaan soveltuvan hyvin ydinvoimalaitoksiin. Höyryelektrolyysi toteutetaan kiinteäoksikennossa, mikä on rakennettu ruostumattomasta teräksestä. Erottava kalvo on materiaaliltaan keraaminen. Höyryelektrolyysin kustannukset odotetaan olevan alhaisemmat kuin muiden elektrolyysimenetelmien. Vaikka höyryelektrolyysi vaatii suuria määriä energiaa ja korkeita lämpötiloja, osa vaaditusta energiasta voidaan tuoda prosessiin lämpöenergiana, mikä alentaisi kustannuksia. Lisäksi höyryelektrolyysiin tarvittavat materiaalit ovat halvempia kuin muiden elektrolyysimenetelmien materiaalit. Höyryelektrolyysin tehokkuutta ja sillä tuotetun vedyn puhtausastetta ei voida vielä tässä vaiheessa määrittää, mutta voidaan olettaa, että menetelmällä on hyvä hyötysuhde. Mikäli höyryelektrolyysiin tarvittavaa energiaa voidaan korvata laitoksen oman lämmöntuotannon tuottamalla lämmöllä, sitä paremman hyötysuhde-edun prosessi omaa. (Gandia, et al., 2013 ; Koponen J., 2020 ; Tulkki V.,2020)

Taulukko 1. Elektrolyysimenetelmien yhteenveto (Gandia, et al., 2013 ; Koponen J., 2020 ; Tulkki V., 2020)

	<b>Alkalielektrolyysi</b>	<b>PEM-elektrolyysi</b>	<b>Höyryelektrolyysi</b>
<b>Kehitysaste</b>	Perinteisin ja tunnetuin elektrolyysimenetelmä kaupallisessa käytössä	Uusi elektrolyysimenetelmä	Vielä tutkimusasteella oleva menetelmä. Demostratioprojekteja suoritettu
<b>Käyttökohteet</b>	Laajat käyttökohteet, soveltuu myös suuriin laitoksiin	Soveltuu vain pieniin laitoksiin	Käyttökohteet vielä tutkimusasteella. Odotetaan soveltuvan ydinvoimaloihin
<b>Kennon materiaali</b>	Nikkelillä päällystetty teräs	Ruostumaton teräs	Ruostumaton teräs
<b>Elektrodien materiaali</b>	Nikkeli. Päällystetään sinkillä, kromilla tai kuparilla	Platina	Nikkeli. Päällystetään sinkillä, kromilla tai kuparilla
<b>Elektrolyytin materiaali</b>	KOH:n ja NaOH:n vesiliuokset	Perfluorisulfonihappo (PFSA)	Zirkoniumoksidi ( $ZrO_2$ )
<b>Kalvon materiaali</b>	Huokoinen	Synteettinen kumi	Keraaminen
<b>Kustannukset</b>	Halvin menetelmä: Suuri energiantarve, mutta suhteellisen halvat materiaalit	Kallein menetelmä: Suuri energiantarve, hyvin kalliit materiaalit	Halvin menetelmä: Suuri energian tarve osittain korvattavissa lämmöllä, halvemmat materiaalit
<b>Tuotetun vedyn puhtausaste</b>	99,5 – 99,9 %	99,999 %	Noin 99 % (vielä tutkimusasteella)



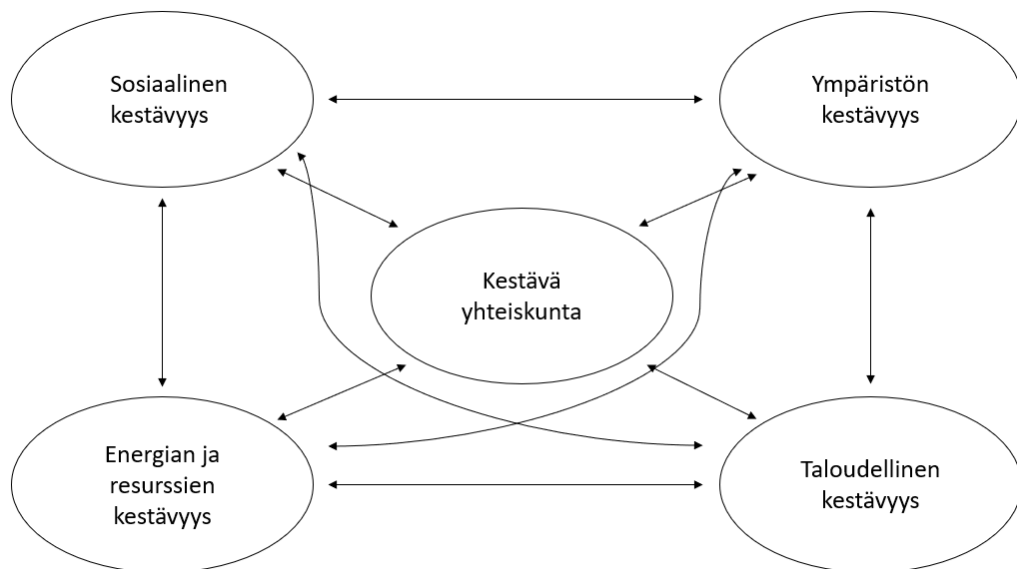
## 5 VEDYN VARASTOIMINEN

Yksi vetytalouden suurimmista ongelmista on vedyn varastoiminen. Vetyä on vaikeaa varastoida, koska sen tiheys on hyvin pieni sen tilavuusyksikköä kohden. Vetyä voidaan varastoida kolmella eri tavalla: paineistettuna kaasuna, nesteenä ja sitomalla se toiseen materiaaliin kemiallisten reaktioiden avulla. (Gandia, et al., 2013)

Vedyn varastoiminen kaasuna vaatii hyvin korkeaa painetta. Yleensä vetykaasun varastoimisessa käytetään noin 200-300 bar:n paineita. (Kauranen, ym., 2013) Varastoinnissa vetykaasu on säilötyinä tiiviiseen terässäiliöön, jonka ympärillä on ulkovaippa. Ulkovaippa suojaa säiliötä ulkoisilta tekijöiltä sekä ympäristöä säiliön suurilta paineilta. Kuljetettavissa vetykaasusäiliöissä käytetään jopa 700 bar:n paineita. (Motiva, 2020b) Autoteollisuudessa yleisimmät varastointikapasiteetit ovat 350 bar:n ja 700 bar:n säiliöt. Vetyä voidaan varastoida nesteenä jäähdyttämällä vety noin -253 °C:een. Vedyn energiasisällöstä kuluu kuitenkin noin 30 % vedyn nesteyttämisessä. (Kauranen, ym., 2013) Nestemäinen vety varastoidaan säiliöön, mikä koostuu kahdesta kerroksesta. Tässä tapauksessa säiliön ja sen ulkovaipan välissä on lämpöeriste, mikä ehkäisee säiliön lämpenemistä. Säiliön lämpötilaa on jatkuvasti tarkkailtava ja pidettävä alhaisena, jottei vety muutu takaisin kaasuksi. Sopivin käyttökohde nestevedylle on jatkuvassa toiminnassa olevat vetyautot. Tällöin nestevetyä ei tarvitse varastoida pitkiä aikoja. (Motiva, 2020b) Vetyä varastoidaan myös eri materiaaleihin. Esimerkiksi eri hydraatit ovat hyviä materiaaleja vedyn varastoimiseen niiden hyvän sitomiskyvyn vuoksi. (Gandia, et al., 2013) Vedyn varastoiminen metallihydraattiin on potentiaalinen ja turvallinen varastointimenetelmä. Vety ei pysty vapautumaan materiaalista itse vaan systeemiä on lämmitettävä vedyn vapauttamiseksi. Varastoimisessa käytetään suuria säiliöitä, koska metallihybridit pystyvät sitomaan vetyä itseensä parhaimmillaan alle 10 % niiden omasta massasta. (Motiva, 2020b) Vety sitoutuu metallihydraattiin liukenemalla metalliyhdisteen hilarakenteeseen. Muita materiaaleja, joihin vetyä voidaan varastoida ovat erilaiset kemialliset yhdisteet kuten metanoli, ammoniakki, muurahaihapo ja synteettinen metaani. (Kauranen, ym., 2013) Vedyn varastoiminen kemikaaleihin on melko yksinkertaista, mutta vedyn palauttaminen energian kantajaksi on monimutkaisempaa. Vedyn varastoimista kemikaaleihin käytetään yleensä pidempiaikaiseen varastoimiseen. (Jumppanen, 2009)

## 6 VEDYN TUOTANNON KESTÄVYYSTARKASTELUA

Yhteiskunnan kehitys, sosiaaliset-, taloudelliset-, ympäristöön liittyvät -sekä energia- ja resurssiulottuvuudet muodostavat yhdessä kestävä yhteiskunnan. Pitkän tähtäimen päämäärä kestävälle yhteiskunnalle vaatii kestävä kehitystä. Kestävä yhteiskunta tarkoittaa nykypäivän tarpeiden täyttämistä vaarantamatta tulevien sukupolvien kykyä tyydyttää omat tarpeensa. Kestävä yhteiskunta voidaan arvioida sen vaikutuksista sosiaalisiin-, ympäristöön liittyviin-, taloudellisiin- ja resurssiulottuuksiin. (Colpan C. O., et al., 2013)



Kuva 8. Kestävä yhteiskunnan ulottuvuudet. Mukailten (Colpan C. O., et al., 2013)

Kuva 8 kuvastaa sitä, miten kaikki yhteiskunnan tekijät ovat riippuvaisia toisistaan ja että ne kaikki vaikuttavat toisiinsa. Kestävässä yhteiskunnassa on myös vedyllä oma paikkansa. Vedyn kestävyyttä voidaan tarkastella kuvan 8 kaikkien tekijöiden kautta.

## 6.1 Vedyn tuotannon ympäristöllinen kestävyys

Puhtaan vedyn tuotanto ja käyttö teollisuudessa sekä energiajärjestelmissä hillitsee hiilidioksidipäästöjä. Vedyn puhtaus riippuu sen tuottamisesta. Vedyn valmistuksen puhtautta edistää sen tuottaminen ns. vihreällä sähköllä. (Honnery and Moriarty, 2012) Tuottamalla vetyä tuuli-, aurinko-, vesi- tai ydinvoimalla saadaan vedystä hiilineutraali energian kantaja. (Motiva, 2020b) Jos vedyn tuotannossa käytetty energia on tuotettu fossiilisilla polttoaineilla, ei voida puhua puhtaasta vedystä. (Honnery and Moriarty, 2012) Suurin osa vedystä tuotetaan nykypäivänä fossiilisten polttoaineiden avulla. (Motiva, 2020b) Vedyn tuotannossa käytetään noin 96 % uusiutumattomia energianlähteitä. Jotta vedyn tuotanto saataisiin kokonaan perustumaan uusiutuviin energianlähteisiin, olisi maailman elektrolyysituotannon kapasiteetti kerrottava sadalla. Näin ollen tuotettaisiin noin 60 Mt puhdasta vetykaasua elektrolyysillä. Tämän toteuttamiseksi tarvittaisiin noin 3 PWh sähköenergiaa, mikä on 2 % maailmanlaajuisesta primäärienergiankulutuksesta. Vedyn tuotannon kasvaessa ja sen keskittyessä vain uusiutuviin energianlähteisiin, johtaa se globaaleja energiajärjestelmiä vähähiilisempään suuntaan. (Koponen J., 2020) Koska puhdasta vetyä valmistetaan vedestä, se on periaatteessa ehtymätön energiankantaja energiajärjestelmissä. (Honnery and Moriarty, 2012) Kestävä energiajärjestelmä on avain hiilineutraaliuuteen ja kestävään ympäristöön. (Colpan C. O., et al. 2013)

## 6.2 Vedyn tuotannon taloudellinen -ja sosiaalinen kestävyys

Uusia investointeja suunniteltaessa on tärkeää ottaa huomioon maapallon kantokyky ja luonnonvarojen riittävyys. (Kestävä kehitys, 2021) Kestävä yhteiskunta edellyttää kestävää taloutta. Taloudellinen kestävyys pyrkii kansalliseen hyvinvointiin ja kestävään pohjaan haasteiden ilmaantuessa. (Kestävä kehitys, 2020) Taloudellinen kestävyys on tasapainossa nousevaa kasvua ilman luonnonvarojen hävittämistä tai velkaantumista. Taloudelliseen kestävyteen päästään käyttämällä uusiutuvia luonnonvaroja kestävästi. Näin ollen vety uusiutuvana energiankantajana on potentiaalinen ratkaisu taloudellisen kestävyuden saavuttamiseksi. Kuluttajan näkökulmasta taloudellinen kestävyys voidaan saavuttaa jokaisen omilla valinnoillaan esimerkiksi valitsemalla kestäviä tuotteita. Vastuulliset kuluttajat valitsevat tuotteensa niiden kestävyuden mukaan, jolloin yritykset

hyötyvät kestävästä tuotteistaan. Tämä kannustaa yrityksiä tuottamaan lisää kestäviä tuotteita ja palveluja. Yritykset pyrkivät yhä enemmän hiilineutraaliuuteen ja kestäviin ratkaisuihin tuottaessaan palvelujaan. Tästä on yrityksille hyötyä kestävien tuotteiden kysynnän kasvaessa. Yritykset voivat kasvattaa tuotantoaan lisäämällä vedyn tuotannon osaksi laitosta. Yleensä tämä on helppoa, jos yrityksen pääprosessit soveltuvat hyvin vedyn sivutuotantoon. Esimerkiksi ydinvoimaloissa voidaan hyödyntää niiden tuottamaa energiaa vedyn tuotannossa. (Kestävä kehitys, 2021 ; Tulkki V., 2020)

Sosiaalisessa kestävydessä pyritään hyvinvoinnin takaamiseen tuleville sukupolville. Sosiaalisessa kestävydessä taloudellinen -ja ympäristön kestävyys ovat vaikuttavia tekijöitä kansalaisten hyvinvoinnin takaamiseksi. Sosiaalisen kestävyuden jokapäiväisiä haasteita ovat muun muassa köyhyys, terveydenhuolto, tasa-arvoisuus ja väestönkasvu. Vedyn tuotannon ja käytön lisääntyessä avautuu uusia työpaikkoja, mikä tukee sosiaalista kestävyttä. Vedyn tuotanto on turvallista, joten työntekijöillä on turvallinen työympäristö. Lisäksi uusiutuvan vedyn myötä päästöjen väheneminen edistää ihmisten terveyttä ja ympäristön hyvinvointia, mikä vaikuttaa myös ihmisten psyykkiseen terveyteen. Vedyn käyttö tukee taloudellista -ja ympäristön kestävyttä, jotka ovat tärkeä osa sosiaalista kestävyttä ja kansalaisten hyvinvointia. Ihmisten hyvinvointi on taattava ilman luonnonvarojen tai ekosysteemien hävittämistä. Näin ollen kestävällä valinnolla taloudellisen -ja ympäristön kestävyden ulottuvuuksissa voidaan vaikuttaa sosiaalisen kestävyden edistämiseen. (Kestävä kehitys, 2020)

## 7 SUOMEN VETYTALOUS

Vedyllä on merkittävä rooli tulevaisuuden päästöttömissä energiajärjestelmissä. (Vartiainen, 2020) Näin ollen vedyn hinnoittelulle, jakelulle sekä tuotannon ja käytön kustannuksille on määritettävä tavoitteet. (Kauranen, ym., 2013) Vetytalous on järjestelmä, missä kehitetään energiamuotoja vedyn avulla sekä suunnitellaan vedyn infrastruktuuria ja kulutussektoreja. (Euroopan komissio, 2020)

Suomella on tavoitteena päästä hiilineutraaliksi vuoteen 2035 mennessä ja hiilinegatiiviseksi vuoteen 2050 mennessä. Suomi näkee vedyn osana kansallisen energia- ja ilmastostrategian kokonaisuutta. Suomella ei ole kuitenkaan omaa vetystrategiaa. (Laurikko, et al., 2020) Vuonna 2020 heinäkuussa Euroopan komissio julkaisi kaksi strategiaa, joiden tavoitteena on kehittää Euroopan energiajärjestelmää ja näin ollen mahdollistaa hiilen käytön vähentämistä. Strategiat käsittelevät vedyn roolia tulevaisuudessa energian kantajana ja energia-aloja. Näillä strategioilla halutaan saavuttaa ilmastoneutraalius ja edistää energiamarkkinoiden kilpailukykyä. Vetystrategian tavoite on vedyn ja muiden energialähteiden tuotannossa syntyvien hiilidioksidipäästöjen vähentäminen. Vetystrategiassa käsitellään vedyn siirron ja käytön ongelmia sekä uusiutuvan ja puhtaan vedyn tuotannon edistämistä. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2020a; Karjalainen, 2020) Suomi osallistuu EU:n vetyhankkeeseen, tavoitteenaan edistää teollisuuden siirtymistä puhtaan vedyn tuotantoon ja käyttöön sekä vedyn käyttökohteiden monipuolistamiseen. Näin ollen suomalaiset yritykset pystyvät entistä helpommin siirtymään vetytalouteen. Suomalaiset yritykset Fortum, Neste ja Wärtsilä ovat jo aloittaneet omat vetystrategiansa. Vetytalouden kasvaessa Suomessa työllisyys ja kilpailukyky kasvaa. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2020b) Lisäksi Suomen teollisuus kehittyy, aurinko -ja tuulivoiman käyttö lisääntyy energiajärjestelmissä ja liikennepäästöt vähenevät. (Laurikko, et al., 2020)

## 8 YHTEENVETO

Vetyä käytetään energiankantajana muun muassa kemianteollisuudessa, vetyautoissa polttoaineena sekä lämmön- ja sähköntuotannossa. Yksi suurimmista vedyn käyttökohteista on kemianteollisuus, mikä kattaa noin 40 % vedyn käyttökohteista. Vetyä käytetään muun muassa ammoniakkin ja metanolin valmistukseen. Vetyä käyttävät kemianteollisuuden yritykset yleensä tuottavat vetyä itse. Vedyn eräs käyttökohde ovat polttokennot. Polttokennoja käytetään mm. vetyautoissa, joissa polttokennot muuntavat sähköenergian kemialliseksi energiaksi, jonka kantajana vetykaasu toimii. Vetyautoja on kuitenkin vielä nykypäivänä vähän suurien valmistuskustannuksien vuoksi. Lisäksi tankkausasemien vähyys hidastaa vetyautokannan yleistymistä. Ei ole kannattavaa tuottaa vetyautoja, jos ei ole niihin soveltuvia tankkausasemia. Ei ole kannattavaa valmistaa tai maahantuoda vetyautoja, jos ei ole niihin soveltuvia tankkausasemia ja päinvastoin ei ole kannattavaa rakentaa tankkausasemia vetyautoille, jos niitä ei ole.

Koska vetyä ei ole maapallolla sellaisenaan, se on valmistettava lähtöaineista, joihin se on sitoutunut (esim. maakaasu tai vesi). Vetyä voidaan tuottaa höyryreformoinnilla, hiilen ja biomassan kaasutuksella, termokemiallisilla sykleillä ja fotolyttisillä menetelmillä sekä elektrolyttisesti vettä hajottamalla. Tällä hetkellä noin 90 % vedystä tuotetaan höyryreformoimalla fossiilisia polttoaineita. Elektrolyysimenetelmät kattavat vain alle 1 % vedyn tuotannosta. Elektrolyysimenetelmiin kuuluvat alkali-elektrolyysi, PEM-elektrolyysi ja höyryelektrolyysi. Näistä alkali-elektrolyysi on kehittynein ja yleisimmin käytetty menetelmä. Alkali-elektrolyysillä on laajimmat käyttökohteet. Alkali-elektrolyysi on elektrolyysimenetelmistä halvin. Se kuitenkin vaatii paljon energiaa. PEM-elektrolyysi on uudempi menetelmä, jota käytetään nykypäivänä mm. polttokennoissa ja vetyautoissa. PEM-elektrolyysi on kallein elektrolyysimenetelmä, koska sen materiaalit (mm. jalometallielektrodit) ovat kalleimmat. Höyryelektrolyysi on näistä kolmesta vielä tutkimusasteella. Höyryelektrolyysimenetelmän odotetaan kuitenkin kasvavan vielä tämän vuosikymmenen lopulla. Tällä hetkellä menetelmästä on tehty demonstraatioprojekteja muun muassa voimalaitoksissa. Höyryelektrolyysi tulee olemaan luultavasti kustannustehokkain elektrolyysimenetelmä, koska siihen tarvittavat materiaalit ovat halvempia kuin muissa elektrolyysereissä käytettävät materiaalit. Lisäksi

siihen tarvittava energia voidaan osittain korvata lämmöllä, mikä lisää prosessin hyötysuhdetta.

Kestävä yhteiskunta takaa nykypäivän tarpeiden täyttämisen ilman, että tulevien sukupolvien kyky tyydyttää omat tarpeensa vaarantuisi. Vedyn tuotannolla on myös osansa kestävässä yhteiskunnassa. Vetytalous vahvistaa energiajärjestelmien kestävyyttä muun muassa päästöjen vähenemisen kautta. Vedyn tuotanto myös edesauttaa taloudellista ja sosiaalista kestävyyttä esimerkiksi tuoden uusia työpaikkoja ja lisäten terveyttä päästöjen vähentämisen kautta. Suomi toimii yhtenä edelläkävijänä hiilineutraaliuuden saavuttamisessa. Vetytalouden yleistyessä myös elektrolyysimenetelmien käyttö kasvaa. Puhtaan sähköenergian tarve lisääntyy ympäri maailmaa. Tuuli- ja aurinkovoiman lisääntyessä vedyn tuotantoon saadaan puhdasta sähköenergiaa. Vetytalouden ja elektrolyysi-infrastruktuurin kasvaessa Suomessa eri yritysten mahdollisuudet tuottaa palvelujaan puhtaasti paranevat. Tällöin tuottajilla ja kuluttajilla on mahdollista valita hiilineutraalimpia vaihtoehtoja, jolloin päästään kohti Suomen ilmastotavoitteita.

## LÄHDELUETTELO

Autoalan keskusliitto, Autotuojat ja –teollisuus ry. 2020. Polttoaineet ja käyttövoimat; vety liikenteen energianlähteenä. [verkkajulkaisu] Saatavissa: [http://www.aut.fi/tieliikenne/polttoaineet\\_ja\\_kayttovoimat/vety](http://www.aut.fi/tieliikenne/polttoaineet_ja_kayttovoimat/vety) [viitattu 6.11.2020]

Colpan C. O., Dincer I., Kadioglu F., 2013. Global Conference on Global Warming, Dincer. Causes, Impacts and Solutions to Global Warming. 1st ed. 2013. New York, NY: Springer New York.

Datamonitor Plc. Honda case study, 2011. The future of hydrogen fuel cell cars. UK: Datamonitor Plc.

Daniels, J. A., 2012. Advances in Environmental Research. New York, NY: Nova Science Publishers.

Euroopan komissio, 2020. Komission strategiat ilmastoneutraaliuden saavuttamiseksi: Katse energiajärjestelmään ja vetyyn. [verkkajulkaisu] saatavissa: [https://ec.europa.eu/finland/news/hydrogen\\_200708\\_fi](https://ec.europa.eu/finland/news/hydrogen_200708_fi) [viitattu 1.1.2021]

Gandia, L. M., Arzamendi, G. & Diéguez, P. M., 2013. Renewable hydrogen technologies: Production, purification, storage, applications and safety. Amsterdam: Elsevier.

Honnery, D. ja Moriarty, P., 2012. Hydrogen production: Prospects and processes. New York: Nova science publishers.

Jumppanen P., 2009. Vety energian tuotannossa, vol 42 (4). Rakenteiden mekaniikka, 16s. [verkkajulkaisu] saatavissa: [http://rmseura.tkk.fi/rmlehti/2009/nro4/RakMek\\_42\\_4\\_2009\\_4.pdf](http://rmseura.tkk.fi/rmlehti/2009/nro4/RakMek_42_4_2009_4.pdf) [viitattu 7.12.2020]

Karjalainen E., työ- ja elinkeinoministeriö, 2020. Epävirallinen energiaministerien videokokous 6.10.2020. [verkkajulkaisu] saatavissa:



[https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/JulkaisuMetatieto/Documents/EUN\\_115+2020.pdf](https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/JulkaisuMetatieto/Documents/EUN_115+2020.pdf)  
[viitattu 1.1.2021]

Kauranen P., Solin J., Törrönen K., Koivula J. & Laurikko J. 2013. Vetytiekartta-Vetyenergian mahdollisuudet Suomessa. [verkkojulkaisu] saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/julkaisut/muut/2013/VTT-R-02257-13.pdf> [viitattu 30.12.2020].

Kestävä kehitys, valtioneuvosto, 2020. Mikä on kestävä kehitys. [verkkojulkaisu] saatavissa: <https://kestavakehitys.fi/kestava-kehitys> [viitattu 7.1.2021]

Kestävä kehitys. 2021. Taloudellinen kestävä kehitys. [verkkojulkaisu] saatavissa: <https://keke.bc.fi/Kestava-kehitys/suomi/taloudellinen/> [viitattu 7.1.2021]

Koca S., 2010. Transition to hydrogen fuel cell vehicles. Fuel cell vehicle infrastructure learning demonstration: Status and results. New York: Nova science publishers.

Koponen J., 2020. Energy efficient hydrogen production by water electrolysis. Lappeenranta: Acta Universitatis Lappeenrantaensis 898, 55s. [verkkojulkaisu] saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/160688/Joonas%20Koponen%20A4.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [viitattu 7.12.2020]

Laurikko J., Ihonen J., Kiviaho J., Himanen O., Weiss R., Saarinen V., Kärki J. ja Hurskainen M., 2020. Business Finland. National hydrogen roadmap for Finland. [verkkojulkaisu] saatavissa: [https://www.businessfinland.fi/4abb35/globalassets/finnish-customers/02-build-your-network/bioeconomy--cleantech/alykas-energia/bf\\_national\\_hydrogen\\_roadmap\\_2020.pdf](https://www.businessfinland.fi/4abb35/globalassets/finnish-customers/02-build-your-network/bioeconomy--cleantech/alykas-energia/bf_national_hydrogen_roadmap_2020.pdf) [viitattu 7.12.2020]

Leppäkoski Group Oy, 2012. Hiilidioksidivapaata kaukolämpöä Joutsenoon. [verkkojulkaisu] saatavissa: <https://leppakoski.fi/hiilidioksidivapaata-kaukolampoa-joutsenoon/> [viitattu 12.11.2020]

Motiva, 2020a. Kestävä liikenne ja liikkuminen. Polttokennoauto. [verkkojulkaisu] saatavissa:

[https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava\\_liikenne\\_ja\\_liikkuminen/nain\\_liikut\\_viisaasti/valitse\\_auto\\_viisaasti/autotyyppe/polttokennoauto](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/autotyyppe/polttokennoauto) [viitattu 21.1.2021]

Motiva, 2020b. Kestävä liikenne ja liikkuminen. Vety. [verkkojulkaisu] saatavissa:

[https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava\\_liikenne\\_ja\\_liikkuminen/nain\\_liikut\\_viisaasti/valitse\\_auto\\_viisaasti/energialahteet/vety](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/energialahteet/vety) [viitattu 7.12.2020]

Nettinuotta, 2020. Metallien kemia. Elektrolyysi. [verkkojulkaisu] saatavissa:

<http://www.nettinuotta.com/opetus/9Ke/elektrolyysi.html> [viitattu 30.12.2020]

Outotec Oyj, 2008. Menetelmä vedyn ja rikkihapon valmistamiseksi. [verkkojulkaisu] saatavissa:

<https://patentimages.storage.googleapis.com/82/7d/74/c11d74f8b1cb38/FI121271B.pdf> [viitattu 7.12.2020]

Pieniniemi K., Muilu Y., 2011. Biomassan kaasutus sähköksi, lämmöksi ja biopolttoaineiksi. Kaasutus ja tuotekaasun analysointi. HighBio. [verkkojulkaisu]

saatavissa: <https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/27058/978-951-39-4313-4.pdf?sequence=1> [viitattu 25.12.2020]

Raunio T., 2017. Vedyn valmistaminen. [verkkojulkaisu] saatavissa:

<https://docplayer.fi/49927752-Vedyn-valmistaminen-tapani-raunio.html> [viitattu 26.12.2020]

Seelam, P. K., 2013. Hydrogen production by steam reforming of bio-alcohols: The use of conventional and membrane-assisted catalytic reactors. Oulu: Oulun yliopiston kirjasto.

Thpanorama, 2020. Mikä on fotolyysi. [verkkojulkaisu] saatavissa:

<https://fi.thpanorama.com/articles/biologa/qu-es-la-fotlisis.html> [viitattu 31.12.2020].

Tong S., Huo C. ja Qian D., 2018. Hydrogen air-PEM fuel cell: Integration, modeling and control. Berlin; Boston: De Gruyter.

Tulkki V., 2020. Fissioreaktori. Vetyä ydinenergialla. [verkkojulkaisu] saatavissa: <https://fissioreaktori.wordpress.com/2020/11/08/vetya-ydinenergialla/> [viitattu 12.11.2020]

Työ- ja elinkeinoministeriö, Valtioneuvosto, 2020a. Komissio julkisti sektori-integraatiota ja vetyä koskevat strategiat. [verkkojulkaisu] saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/-/1410877/komissio-julkisti-sektori-integraatiota-ja-vetya-koskevat-strategiat> [viitattu 1.1.2021]

Työ- ja elinkeinoministeriö, Valtioneuvosto, 2020b. Suomi mukaan EU:n vetyhankkeeseen-Tavoitteena hillitä ilmastonmuutosta ja lisätä teollisuuden kilpailukykyä. [verkkojulkaisu] saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/-/1410877/suomi-mukaan-eu-n-vetyhankkeeseen-tavoitteena-hillita-ilmastonmuutosta-ja-lisata-teollisuuden-kilpailukyky> [viitattu 1.1.2021]

Vartiainen Eero, 2020. Vetytalous tulee - ennemmin tai myöhemmin. ForTheDoers, Fortum. [verkkojulkaisu] saatavissa: <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/blogi/forthedoers-blogi/vetytalous-tulee-ennemmin-tai-myohemmin> [viitattu 30.12.2020]

WWF, 2021. Ilmastonmuutos. [verkkojulkaisu] saatavissa: <https://wwf.fi/uhat/ilmastonmuutos/> [viitattu 17.1.2021]

Ympäristöministeriö, 2019. Pariisin ilmastopimus. [verkkojulkaisu] saatavissa: <https://ym.fi/pariisin-ilmastopimus> [viitattu 17.1.2021]

Ympäristöministeriö, 2021. Euroopan unionin ilmastopolitiikka. [verkkojulkaisu] saatavissa: <https://ym.fi/euroopan-unionin-ilmastopolitiikka> [viitattu 17.1.2021]

