

VETYTALOUSAIHEISEN VERKKOKOULUTUKSEN KEHITTÄMINEN

Lotta Helevä-Räsänen
Opinnäytetyö (AMK)
Kevät 2025
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä: Lotta Helevä-Räsänen

Opinnäytetyön otsikko: Vetytalousaiheisen verkkokoulutuksen kehittäminen

Työn ohjaaja: Saku Leskelä, Eetu Karjalainen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2025

Sivumäärä: 51 + 1 liite

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa Ramboll Finland Oy:lle vetytalouden perusteita käsittelevä verkkokoulutus. Verkkokoulutuksen oli tarkoitus laajentaa Rambollin energia-alan koulutustarjontaa sekä palvella energia-alan ammattilaisten kasvavaa tarvetta ymmärtää vetytalouden roolia ja mahdollisuuksia nykypäivän ja tulevaisuuden energiamarkkinoilla.

Opinnäytetyön rakenne koostui kahdesta osasta. Työn ensimmäisessä osassa käsiteltiin vetytalouden teoriaa ja merkitystä, ja työn toisessa osassa keskityttiin verkkokoulutuksen suunnitteluun ja toteutukseen. Työssä perehdyttiin vedyn luokitteluun, vetytalouden arvoketjuun, uusiutuvan vedyn tuotantoon, vedyn varastointiin ja kuljetukseen, vedyn turvallisuuteen ja säätelyyn sekä vedyn käyttöön ja jatkojalostukseen synteettisiksi polttoaineiksi. Lisäksi käsiteltiin vetytalouden tulevaisuuden näkymiä.

Verkkokoulutus rakennettiin Rambollin käyttämään Totara-oppimisympäristöön. Koulutuksesta tehtiin rakenteeltaan yhdenmukainen Rambollin kaukolämpöaiheisten verkkokoulutusten kanssa. Verkkokoulutuksen sisältö jaoteltiin teemoittain jäsennellyksi kokonaisuudeksi. Sisällöntuotannossa hyödynnettiin alan ajankohtaista kirjallisuutta ja asiantuntijälähteitä. Koulutuksen laatu, toimivuus ja käytäjäystävällisyys varmistettiin testikäytöllä. Testikäytöstä saatua palautetta hyödynnettiin koulutuksen viimeistelyssä.

Opinnäytetyön tuloksena syntyi verkkokoulutus, joka tarjoaa kattavan perehdytyksen vetytalouden keskeisiin käsitteisiin ja perusteisiin. Testikäytöstä saadun palautteen perusteella verkkokoulutuksen katsottiin vastaavan sille asetettuja tavoitteita. Koulutus täyttää selkeän tarpeen tarjoamalla helposti saavutettavan ja ajantasaisen tietopaketin vetytalouden perusteista. Jatkossa vetytalouteen liittyvistä aiheista, esimerkiksi vedyn tuotannosta ja käytöstä, voitaisiin tarjota myös syventäviä verkkokoulutuksia.

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Program in Energy Technology

Author: Lotta Helevä-Räsänen

Title of thesis: Development of an Online Course on the Hydrogen Economy

Supervisors: Saku Leskelä, Eetu Karjalainen

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2025

Number of pages: 51 + 1 appendix

The objective of this thesis was to design and implement an online course for Ramboll Finland Oy, focusing on the fundamentals of the hydrogen economy. The course was intended to complement Ramboll's existing training portfolio in the energy sector and respond to the growing demand among energy professionals for a deeper understanding of hydrogen's role and potential in today's and future energy systems.

The thesis was divided into two main parts. The first part explored the theoretical background and importance of the hydrogen economy, while the second focused on the planning and development of the online course. Topics covered included hydrogen classification, the hydrogen value chain, renewable hydrogen production, hydrogen storage and transport, safety and regulatory issues, and the use of hydrogen, including its further processing into synthetic fuels. The thesis also considered the future outlook of the hydrogen economy.

The online course was built within Ramboll's e-learning environment and designed to be consistent with Ramboll's online courses on district heating topics. Up-to-date literature sources were used throughout the content development process. The quality, functionality, and user-friendliness of the course were ensured through a pilot test, and the final version of the course was prepared based on the pilot feedback.

The outcome of the thesis was a comprehensive online course providing a solid introduction to the key concepts and fundamentals of the hydrogen economy. Based on feedback from the pilot test, the course successfully met its objectives. The course fills a clear need by providing an easily accessible and up-to-date resource on the basics of the hydrogen economy. In the future, additional online courses could be developed to focus on specific topics such as hydrogen production methods and the use of hydrogen.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
SISÄLLYS	4
1 JOHDANTO	6
2 VETYTALOUS JA SEN MERKITYS	8
2.1 Vedyn ominaisuuksia	8
2.2 Vedyn rooli energiankantajana ja raaka-aineena	9
2.2.1 Vedyn luokittelu	11
2.2.2 Vetytalouden arvoketju	13
2.3 Uusiutuvan vedyn tuotanto	13
2.3.1 Elektrolyysi	16
2.3.2 Uusiutuvan vedyn valmistuksen sivutuotteet	18
2.4 Vedyn varastointi ja kuljetus	20
2.5 Vedyn turvallisuus ja sääntely	21
2.6 Vedyn käyttö ja jatkojalostus	22
2.6.1 Vedyn käyttö	23
2.6.2 Vedyn jatkojalostus ja tuotteiden käyttökohteet	24
2.7 Vetytalouden tulevaisuuden näkymät	27
2.7.1 Vetytalous EU:ssa	28
2.7.2 Vetytalous Suomessa	29
3 VETYTALOUSAIHEISEN VERKKOKOULUTUKSEN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS	33
3.1 Verkkokoulutuksen tavoitteet ja kohderyhmä	33
3.2 Vetytalousaiheiset verkkokoulutukset Suomessa	34
3.3 Käytetyt työkalut ja oppimisympäristö	37
3.4 Kurssirakenteen suunnittelu ja sisältöjen tuottaminen	38
3.5 Palautteen kerääminen ja koulutuksen viimeistely	41
3.5.1 Palautteen kerääminen	41
3.5.2 Palautteet	43
3.5.3 Koulutuksen viimeistely	45
4 YHTEENVETO	46

LÄHTEET	48
LIITTEET.....	52

1 JOHDANTO

Vetytaloudella tarkoitetaan talousjärjestelmää, jossa fossiilisten energianlähteiden tai raaka-aineiden sijaan käytetään puhtailla tai vähähiilillä energianlähteillä tuotettua vetyä energiankantajana tai raaka-aineena. Vetytaloudella tavoitellaan energiantuotannon, liikenteen ja eri teollisuuden alojen hiilidioksidipäästöjen vähentämistä. Vetytalous on noussut merkittäväksi osa-alueeksi globaalissa energiamurroksessa. Euroopan unionin ilmastotavoitteet, kuten päästöjen vähentäminen 55 prosentilla vuoteen 2030 mennessä, korostavat vetytalouden keskeistä roolia. Vedyn kyky toimia hiilineutraalina energianlähteenä ja raaka-aineena tekee siitä tarpeellisen erityisesti teollisuussektoreille, joiden päästöjen vähentäminen muilla keinoin on haastavaa. (Hydrogen Cluster Finland 2023, 9; IEA 2023, 18–19.) Suomen tavoitteena on olla Euroopan johtava vetytalouden toimija vuoteen 2035 mennessä. Suomen erityiset kilpailuedut, kuten sähköntuotannon korkea uusiutuvan energian osuus ja vahva osaaminen energiaintensiivisillä teollisuusaloilla, tekevät Suomesta houkuttelevan toimijan vetytaloudessa. (Hydrogen Cluster Finland 2023, 9–11.)

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella ja toteuttaa Ramboll Finland Oy:lle verkkokoulutus, jonka aiheena on vetytalouden perusteet. Opinnäytetyöraportin rakenne jakautuu kahteen osaan. Työn ensimmäisessä osassa käsitellään vetytalouden teoriaa ja merkitystä, ja työn toisessa osassa keskitytään verkkokoulutuksen suunnitteluun ja toteutukseen.

Ramboll on kansainvälinen suunnittelu- ja konsultointialan yritys, joka toimii laajasti infrastruktuurin, ympäristön, kaupunkikehityksen ja energia-alan hankkeissa. Ramboll on perustettu Tanskassa vuonna 1945, ja sillä on nykyään yli 18 000 asiantuntijaa yli 35 maassa. Ramboll keskittyy kestävä kehityksen ratkaisuihin ja tukee asiakkaitaan muun muassa hiilineutraaliuden edistämässä, resurssitehokkuudessa ja kaupunkien kehittämisessä. (Ramboll 2025.) Osana kokonaisvaltaista osaamisen kehittämistä Ramboll tarjoaa erilaisia koulutusratkaisuja yrityksille ja organisaatioille (Ramboll s.a. a).

Rambollilla on koulutustarjonnassaan tällä hetkellä kolmen kurssin kaukolämpö-aiheinen verkkokoulutuskokonaisuus, joka on suunnattu kaukolämpöalalla työskenteleville henkilöille (Ramboll s.a. b). Tässä opinnäytetyössä tehtävän uuden vetytalouden verkkokoulutuksen on tarkoitus laajentaa Rambollin energia-alan koulutustarjontaa sekä palvella alan ammattilaisten kasvavaa tarvetta ymmärtää vetytalouden roolia ja mahdollisuuksia nykypäivän ja tulevaisuuden energiamarkkinoilla. Koulutuksen tavoitteena on tarjota kattava perehdytys vetytalouden perusteisiin ja merkitykseen.

2 VETYTALOUS JA SEN MERKITYS

Vetytalouden merkitys ja ajankohtaisuus kasvavat jatkuvasti, koska se tarjoaa mahdollisen ratkaisun kestäväan energialiiketoimintaan ja ilmastomuutoksen torjuntaan. Vetytalouden nousu johtuu sen kyvystä korvata fossiiliset polttoaineet päästöttömillä vaihtoehdoilla sekä sen roolista energian varastoinnissa ja siirrossa. Myös teollisuuden raaka-aineena vety voi auttaa vähentämään merkittävästi päästöjä. (Hydrogen Cluster Finland 2023, 8.)

2.1 Vedyn ominaisuuksia

Vety on maailman yleisin alkuaine, mutta vetyä ei juurikaan esiinny luonnossa puhtaana aineena, vaan lähinnä yhdisteinä. Vetykaasu on väritöntä, hajutonta, mautonta ja erittäin helposti syttyvää. Se ei ole myrkyllistä, mutta voi suurina pitoisuuksina aiheuttaa tukehtumisvaaran. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024.) Taulukossa 1 on esitetty joitakin vedyn ominaisuuksia. Vety on todella kevyttä ja sen kiehumispiste on hyvin alhainen. Alhainen kiehumispiste tarkoittaa, että vety voidaan pitää nesteinä vain jäähdytettynä.

TAULUKKO 1. Vedyn ominaisuuksia (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024)

Ominaisuus	Arvo
Moolimassa	2,016 g/mol
Tiheys (1 bar, 25 °C)	0,08 kg/m ³
Tiheys (700 bar, 25 °C)	42 kg/m ³
Kiehumispiste	-253 °C
Ylempi lämpöarvo	142 MJ/kg
Alempi lämpöarvo	120 MJ/kg

Vedyn alempi lämpöarvo on 120 MJ/kg ja ylempi lämpöarvo 142 MJ/kg. Polttoaineen alempi lämpöarvo tarkoittaa lämpö määrää, joka saadaan, kun polttoaine poltetaan. Vertailun vuoksi maakaasun alempi lämpöarvo on 47,1 MJ/kg. Näistä kahdesta kaasusta vety vapauttaa siis enemmän energiaa, kun 1 kg kaasua poltetaan. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024.)

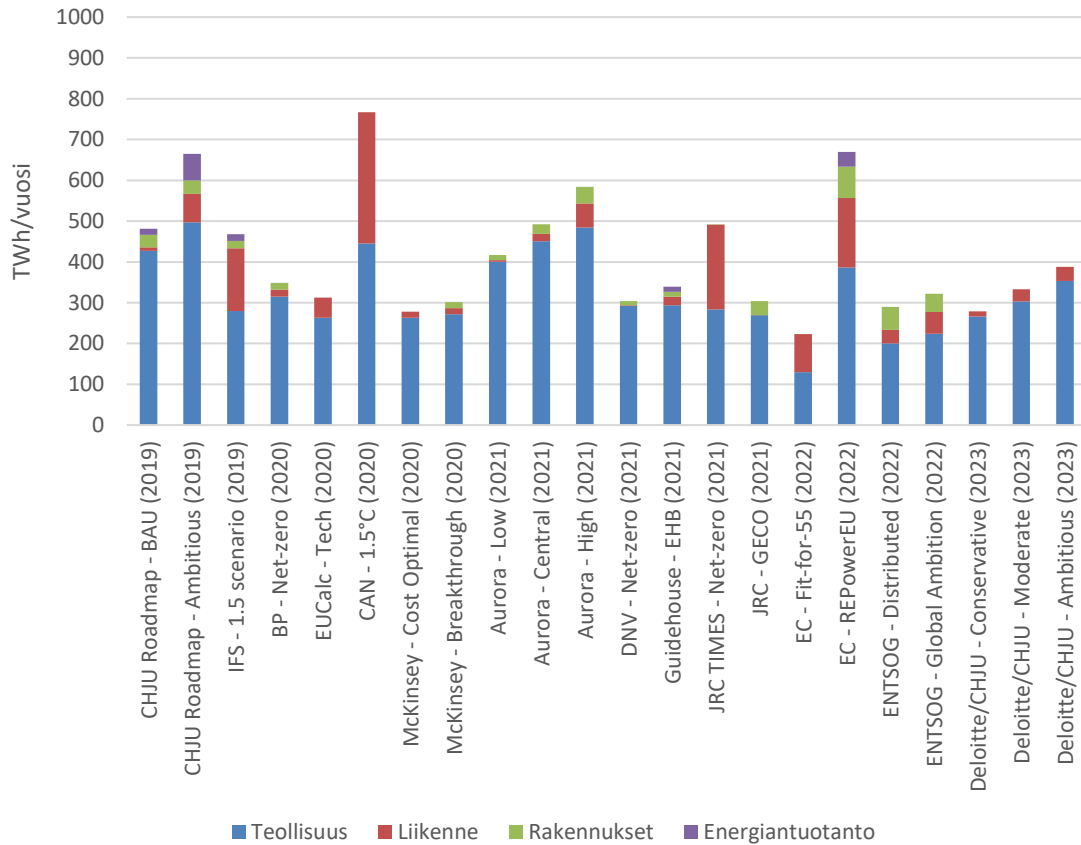
Vedyn energiatiheys tilavuutta kohti on kuitenkin vain 10,8 MJ/m³, kun metaanilla se on 35,8 MJ/m³ ja maakaasulla 36,6 MJ/m³ (The Engineering ToolBox 2003). Tämä tarkoittaa, että vedyn tilavuudellinen energiatiheys on alhainen. Alhainen tilavuudellinen energiatiheys aiheuttaa useita haasteita vedyn käytölle. Vedyn varastointi vaatii suuria tilavuuksia tai korkeaa painetta. Vedyn kuljettamiseksi vety täytyy joko paineistaa tai nesteyttää. Lisäksi vedyn varastointi ja jakelu vaativat kehittyneitä materiaaliratkaisuja, koska vety voi pienen molekyylikokonsa ansiosta diffundoitua materiaaleihin ja haurastuttaa esimerkiksi metalliputkia ja -säiliöitä. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024.)

2.2 Vedyn rooli energiankantajana ja raaka-aineena

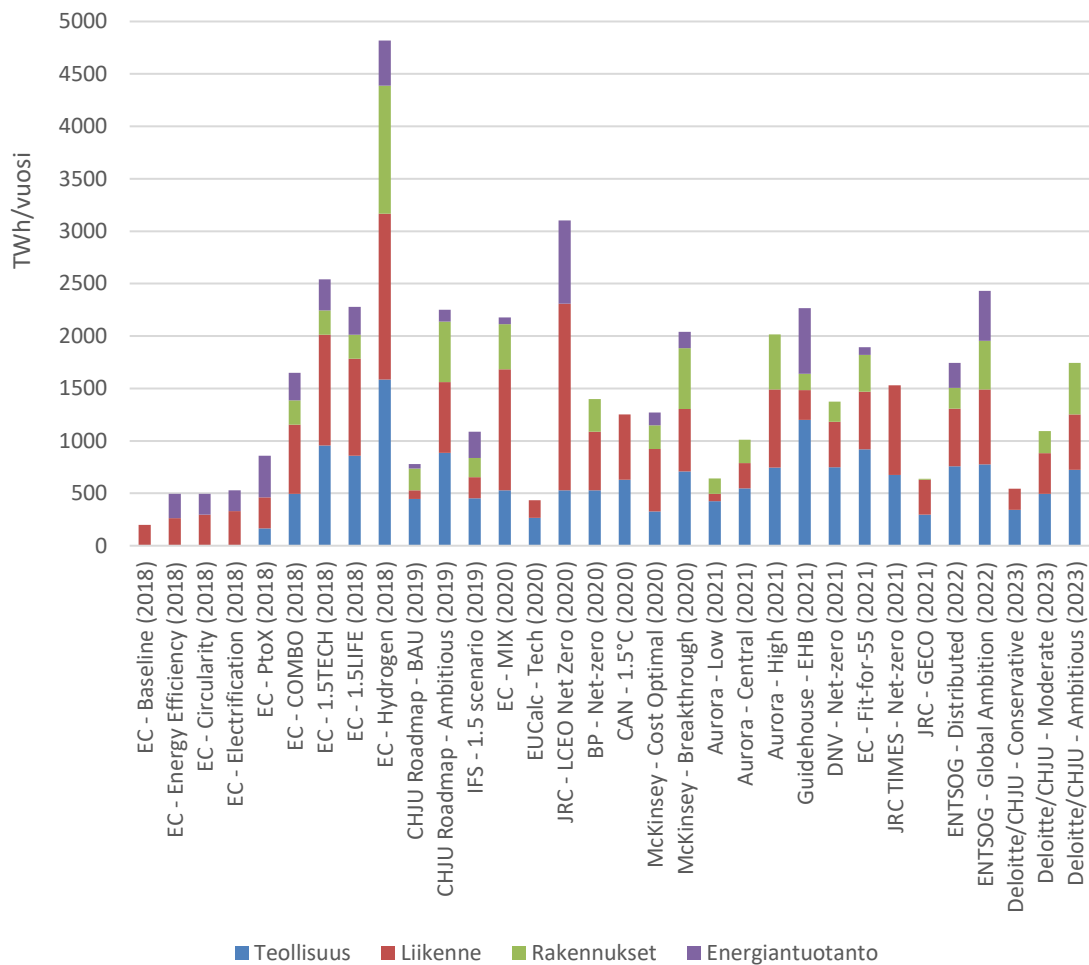
Vety on merkittävä energiankantaja ja raaka-aine, joka voi tukea teollisuuden ja energiajärjestelmien hiilidioksidipäästöjen vähentämistä. Vihreän vedyn ja siitä valmistettujen polttoaineiden käyttö vähentää päästöjä etenkin niissä teollisuusprosesseissa, joissa nykyisin käytetään fossiilisia polttoaineita. Vedyn tarpeen on ennustettu kasvavan tulevana vuosikymmeninä merkittävästi. Kuvissa 1 ja 2 on esitetty eri tahojen laatimia ennusteita vedyn tarpeelle Euroopassa vuosille 2030 ja 2050. Vuodelle 2030 ennustetun vedyntarpeen mediaani on 344 TWh vuodessa, ja ennusteiden vaihteluväli on 223–767 TWh vuodessa. Vuodelle 2050 ennusteiden mediaani on 1386 TWh vuodessa, ja ennusteet vaihtelevat välillä 198–3102 TWh vuodessa. (European Hydrogen Observatory s.a.)

Vuonna 2030 vedyn käytön ennustetaan vielä painottuvan vahvasti teollisuuteen, mutta vuoden 2050 ennusteessa muiden sektoreiden suhteelliset osuudet ovat nousseet ja vetyä ennustetaan käytettävän enemmän myös liikenteessä, rakennuksissa ja energiantuotannossa. Ennusteiden suuret vaihteluvälit osoittavat, että kysyntäennusteissa on huomattavaa epävarmuutta. Eri ennusteiden

oletukset esimerkiksi teknologian kehityksestä, poliittisista linjauksista ja eri sektoreiden vedyntarpeesta vaikuttavat vahvasti ennusteisiin. (European Hydrogen Observatory s.a.)



KUVA 1. Vedyn tarve Euroopassa vuonna 2030 eri tahojen laatimien ennusteiden mukaan (European Hydrogen Observatory s.a.)



KUVA 2. Vedyn tarve Euroopassa vuonna 2050 eri tahojen laatimien ennusteiden mukaan (European Hydrogen Observatory s.a.)

2.2.1 Vedyn luokittelu

Vedyn tuotannossa voidaan käyttää useita erilaisia menetelmiä. Vedyn tuotantomenetelmiä on tapana luokitella värikoodeilla. Vedyn värit – kuten harmaa, sininen ja vihreä – eivät viittaa vedyn fysikaalisiin ominaisuuksiin, vaan niiden avulla erotellaan vedyn tuotantotavat ja tuotantotapojen vaikutukset hiilidioksidipäästöihin. Harmaa vety on yleisin vedyn muoto, ja sitä tuotetaan pääasiassa maakaasusta höyryreformoinnilla. Harmaan vedyn valmistuksessa vapautuu huomattavia määriä hiilidioksidipäästöjä, joita ei oteta talteen. Harmaa vety on tuotantokustannuksiltaan edullisin, mutta ympäristövaikutuksiltaan haitallisin vedyn muoto. Sininen vety tuotetaan samalla tavalla kuin harmaa vety, mutta tuotannon

aikana syntyviä hiilidioksidipäästöjä pyritään vähentämään hiilidioksidin talteenotolla ja varastoinnilla (Carbon Capture and Storage, CCS). (Ramboll 2024, 9.)

Vihreä vety tuotetaan elektrolyysillä, jossa vesi hajotetaan vedyksi ja hapeksi käyttämällä uusiutuvaa energiaa, kuten tuuli-, aurinko- tai vesivoimaa. Pinkki tai violetti vety puolestaan viittaa vetyyn, joka tuotetaan ydinvoimasta saatavalla energialla. Vihreän ja pinkin vedyn tuotannosta ei synny hiilidioksidipäästöjä. (Ramboll 2024, 9.)

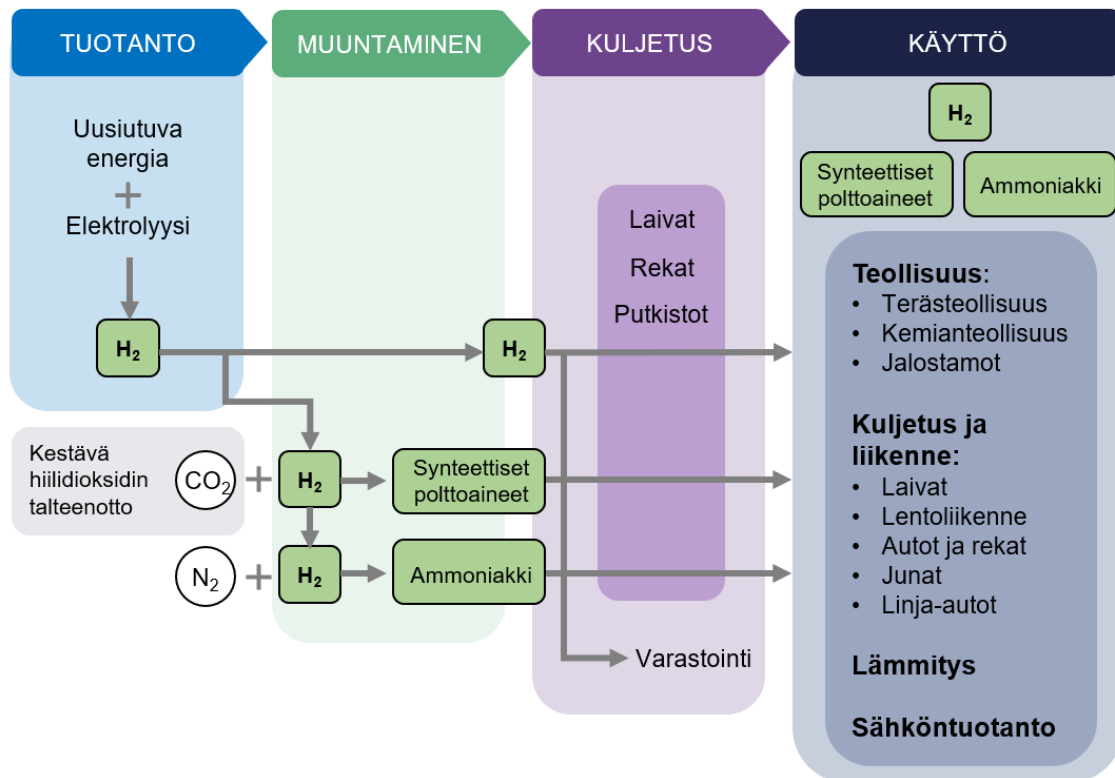
Turkoosia vetyä tuotetaan metaanipyrolyysillä, jossa maakaasu hajotetaan vedyksi ja kiinteäksi hiileksi. Kiinteä hiili voidaan varastoida tai käyttää muissa teollisissa prosesseissa. Jos prosessiin käytettävä energia on tuotettu uusiutuvilla energialähteillä, voi turkoosi vety olla lähes päästötöntä. Vetyä on löydetty myös luonnosta geologisista esiintymistä. Tällaista vetyä kutsutaan valkoiseksi vedyksi. (Ramboll 2024, 9.) Kuvassa 3 on esitetty vedyn eri värien raaka-aineet ja tuotantotavat.

Vedyn väri	Raaka-aine	Tuotantotapa
Vihreä vety	Vesi	Elektrolyysi uusiutuvan energian avulla
Pinkki vety	Vesi	Elektrolyysi ydinenergian avulla
Turkoosi vety	Maakaasu	Pyrolyysi
Sininen vety	Fossiiliset raaka-aineet	Esimerkiksi höyryreformointi, hiilidioksidin talteenotolla
Harmaa vety	Fossiiliset raaka-aineet, pääasiassa maakaasu	Höyryreformointi, syntyvää hiilidioksidia ei oteta talteen
Valkoinen vety	Luonnon geologisten esiintymien vety	

KUVA 3. Vedyn luokittelu värikoodeilla (mukaillen Ramboll 2024, 9)

2.2.2 Vetytalouden arvoketju

Kuvassa 4 on havainnollistettu vetytalouden arvoketjua neljään päävaiheeseen jaettuna. Vetytalouden arvoketjuun sisältyy vedyn tuotanto elektrolyysillä, vedyn varastointi, kuljetus, jatkojalostus ja käyttö. Vetytalous mahdollistaa eri sektoreiden, kuten sähköntuotannon, teollisuuden ja liikenteen, integroimisen toisiinsa, mikä tukee mm. energian varastointia ja järjestelmän tasapainottamista.



KUVA 4. Vetytalouden arvoketjun päävaiheet (mukaillen IRENA 2022, 55)

2.3 Uusiutuvan vedyn tuotanto

Vetyä voidaan valmistaa useilla eri menetelmillä. Tällä hetkellä suurin osa vedyn tuotannosta tapahtuu lämpökemiallisilla menetelmillä maakaasusta ja hiilestä, mikä aiheuttaa merkittäviä hiilidioksidipäästöjä. Vedyn tuotannossa ollaan kuitenkin siirtymässä yhä enemmän kohti uusiutuvan vedyn tuotantoa. Uusiutuvaa vetyä, eli ns. vihreää vetyä, voidaan tuottaa hajottamalla vettä elektrolyysillä

käyttäen uusiutuvaa sähköenergiaa. Elektrolyysillä tuotettu vety ei kuitenkaan automaattisesti täytä uusiutuvan vedyn kriteerejä. Vedyn luokitteluun vaikuttaa EU:n uusiutuvan energian direktiivi RED III (Renewable Energy Directive) ja sen täydentävät säädökset, jotka määrittelevät, milloin vety ja vetypohjaiset polttoaineet lasketaan ei-biologista alkuperää oleviksi uusiutuviksi polttoaineiksi (Renewable Fuels of Non-Biological Origin, RFNBOs). Kriteerien avulla varmistetaan, että elektrolyysillä tuotettu vety ja RFNBO-polttoaineet ovat aidosti uusiutuvia ja täyttävät ilmastotavoitteet. (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2023/2413 direktiivin (EU) 2018/2001, asetuksen (EU) 2018/1999 ja direktiivin 98/70/EY muuttamisesta uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisen osalta sekä neuvoston direktiivin (EU) 2015/652 kumoamisesta; Komission delegoitu asetus (EU) 2023/1184, Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin (EU) 2018/2001 täydentämisestä ottamalla käyttöön unionin menetelmä, jossa vahvistetaan muuta kuin biologista alkuperää olevien uusiutuvien nestemäisten ja kaasumaisten liikenteen polttoaineiden tuotantoa koskevat yksityiskohtaiset säännöt, L 157/11.)

RFNBO:t ovat uusiutuvia nestemäisiä tai kaasumaisia polttoaineita, joiden energiasältö ei perustu biologisiin lähteisiin. Yksinkertaisin RFNBO-polttoaine on uusiutuva vety. Muita uusiutuvia polttoaineita voidaan valmistaa yhdistämällä uusiutuvaa vetyä hiilidioksidin kanssa, jolloin saadaan esimerkiksi synteettistä metaania, metanolia, bensiiniä, kerosiinia tai dieseliä. Lisäksi uusiutuvasta vedystä ja tyydestä voidaan valmistaa uusiutuvaa ammoniakkia Haber-Bosch-prosessin avulla. EU:n säädösten mukaan RFNBO-polttoaineen on täytettävä useita vaatimuksia. Sen käytön on vähennettävä kasvihuonekaasupäästöjä vähintään 70 % verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin. Lisäksi tuotantoprosessissa käytetyn sähkön on täytettävä uusiutuvan sähkön kriteerit ja polttoaineen valmistuksessa käytetyn hiilidioksidin on oltava peräisin hyväksytyistä lähteistä. (Ramboll 2024, 11, 23.)

Regulaatio määrittää ehdot, joiden täytyessä uusiutuvan energian tuotantolaitosten, kuten esimerkiksi tuuli- tai aurinkovoimaloiden, sähköllä tuotettu vety voidaan luokitella vihreäksi. Tämä perustuu sähköntoimittajan kanssa solmittavaan sähköntoimitussopimukseen (Power Purchase Agreement, PPA). Lisäksi kolmen

kumulatiivisen ehdon on täytyttävä: lisäisyysperiaatteen, ajallisen korrelaation ja maantieteellisen korrelaation. (Ramboll 2024, 11, 23.)

EU:n regulaation mukaan vedyn tuotantolaitokset voivat täyttää vihreän vedyn kriteerit esimerkiksi yhdistämällä uusiutuvan energian tuotantolaitoksen suoraan vedyn tuotantolaitokseen. Tässä tapauksessa kaikki tuotettu vety luokitellaan vihreäksi, jos tuotantolaitos on otettu käyttöön enintään 36 kuukautta ennen vedyn tuotantolaitosta. Lisäisyysperiaatteen mukaan uusiutuvan energian tuotantolaitoksen on oltava otettu käyttöön enintään 36 kuukautta ennen vedyn tuotantolaitosta. Tämä varmistaa, että vihreä vety tuotetaan uusilla kapasiteeteilla eikä jo ennestään olemassa olevilla uusiutuvan energian laitoksilla. Ajatuksena on, että olemassa olevien laitosten energian mennessä uusiutuvan vedyn tuotantoon laitosten energian aiemmat käyttäjät saattaisivat turvautua fossiilisiin polttoaineisiin. Tämä voisi johtaa jopa suurempiin hiilidioksidipäästöihin kuin perinteinen vedyn tuotanto maakaasusta. (Komission delegoitu asetus (EU) 2023/1184, Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin (EU) 2018/2001 täydentämisestä ottamalla käyttöön unionin menetelmä, jossa vahvistetaan muuta kuin biologista alkuperää olevien uusiutu-vien nestemäisten ja kaasumaisten liikenteen polttoaineiden tuotantoa koskevat yksityiskohtaiset säännöt, L 157/11; Ramboll 2024, 11, 23.)

Toinen lisäisyysvaatimukseen liittyvä ehto on, että uusiutuvan energian tuotantolaitos ei saa olla saanut toimintatukea tai investointitukea, paitsi tietyissä poikkeustapauksissa, esimerkiksi jos tuki on maksettu takaisin kokonaan. Siirtymäaikana vedyn tuotantolaitokset, jotka otetaan käyttöön ennen 1. tammikuuta 2028, voivat tuottaa vihreää vetyä vuoteen 2038 asti olemassa olevilla uusiutuvan energian tuotantolaitoksilla, vaikka nämä olisivat saaneet tukia. (Komission delegoitu asetus (EU) 2023/1184, Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin (EU) 2018/2001 täydentämisestä ottamalla käyttöön unionin menetelmä, jossa vahvistetaan muuta kuin biologista alkuperää olevien uusiutuvien nestemäisten ja kaasumaisten liikenteen polttoaineiden tuotantoa koskevat yksityiskohtaiset säännöt, L 157/11.)

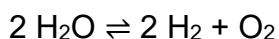
Vety voidaan myös luokitella uusiutuvaksi, jos käytetään verkkosähköä, jonka voidaan osoittaa olevan uusiutuvaa. Vihreän vedyn tuotanto voi olla mahdollista, jos verkon päästöintensiteetti on alle 18 gCO₂eq/MJ ja ajallisen ja

maantieteellisen korrelaation ehdot täyttyvät. Ajallisen korrelaation mukaan vety voidaan luokitella vihreäksi, jos se tuotetaan samalla tunnilla kuin uusiutuvan energian sähköä tuotetaan PPA:n mukaisesti. Siirtymäjärjestely sallii kuitenkin kuukausittaisen korrelaation käytön tuntikohtaisen korrelaation sijaan 1. tammi-kuuta 2030 asti. (Komission delegeoitu asetus (EU) 2023/1184, Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin (EU) 2018/2001 täydentämisestä ottamalla käyttöön unionin menetelmä, jossa vahvistetaan muuta kuin biologista alkuperää olevien uusiutuvien nestemäisten ja kaasumaisten liikenteen polttoaineiden tuotantoa koskevat yksityiskohtaiset säännöt, L 157/11; Ramboll 2024, 11, 23.)

Maantieteellisen korrelaation mukaan uusiutuvan energian tuotantolaitoksen ja vedyn tuotantolaitoksen on sijaittava samalla tarjousalueella. Jos tarjousalueen sähkön uusiutuvan energian osuus oli yli 90 % edellisenä kalenterivuonna, voidaan verkkosähköä käyttää suoraan vihreän vedyn tuotantoon. Tällöin vedyn tuotantolaitos voi kuitenkin toimia vain suhteessa sähköverkon uusiutuvan energian osuuteen. (Komission delegeoitu asetus (EU) 2023/1184, Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin (EU) 2018/2001 täydentämisestä ottamalla käyttöön unionin menetelmä, jossa vahvistetaan muuta kuin biologista alkuperää olevien uusiutuvien nestemäisten ja kaasumaisten liikenteen polttoaineiden tuotantoa koskevat yksityiskohtaiset säännöt, L 157/11.)

2.3.1 Elektrolyysi

Veden elektrolyysi on prosessi, jossa vesi (H_2O) hajotetaan sähkövirran avulla vedyksi (H_2) ja hapeksi (O_2). Tämä tapahtuu elektrolyysikennossa, jossa vesi reagoi kahden elektrodin (anodin ja katodin) välillä olevan elektrolyytin avulla. Elektrolyytti voi olla nestemäinen tai kiinteä, ja se mahdollistaa ionien kulkeutumisen anodilta katodille. Kun sähkövirta kulkee elektrodien läpi, se aiheuttaa kemiallisia reaktioita, jotka erottavat veden molekyylit niiden perusosiksi vedyksi ja hapeksi:



Anodilla, eli positiivisesti varautuneella elektrodilla, tapahtuu hapettumisreaktio, jossa vapautuu happea (O_2). Katodilla, eli negatiivisesti varautuneella elektrodilla tapahtuu puolestaan pelkistysreaktio, jossa vapautuu vetykaasua (H_2).

Elektrolyysikennossa on kalvo tai muu erotusmekanismi, joka estää tuotettujen vety- ja happikaasujen sekoittumisen. Elektrolyysiteknologioita on olemassa useita. Tällä hetkellä kolme yleisintä elektrolyysityyppiä ovat alkalielektrolyysi (AEL), protoninvaihtomembraanielektrolyysi (PEM) ja kiinteäoksidielektrolyysi (SOEC). Näillä kaikilla elektrolyysiteknologioilla on sama perusreaktio, mutta ne eroavat elektrodireaktioidensa, materiaaliensa ja toimintaperiaatteidensa osalta toisistaan. Eri elektrolyysiteknologioiden elektrodeilla tapahtuvat osareaktiot on esitetty taulukossa 2. (Bernuy-Lopez, Jøkladal, Silva, Nielsen & Krasowski 2024, 25–26.)

TAULUKKO 2. Alkalielektrolyysin (AEL), protoninvaihtomembraanielektrolyysin (PEM) ja kiinteäoksidielektrolyysin (SOEC) elektrodireaktiot (Bernuy-Lopez, Jøkladal, Silva, Nielsen & Krasowski 2024, 25)

Elektrolyysi- teknologia	Reaktio katodilla	Reaktio anodilla
AEL	$2 \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	$2 \text{OH}^- \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$
PEM	$2 \text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2 \text{e}^- + 2 \text{H}^+$
SOEC	$2 \text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2 + 2 \text{O}^{2-}$	$2 \text{O}^{2-} \rightarrow \text{O}_2 + 4 \text{e}^-$

Elektrolyysi kuluttaa merkittävästi sähköä. Yhden vetykilon valmistaminen vaatii noin 45–55 kWh sähköä ja noin 9 litraa ultrapuhdasta vettä. Elektrolyysiin käytetystä sähköstä noin 30 % muuttuu hukkalämmöksi. Sähkön kulutus ja hukkalämmön määrä vaihtelevat eri elektrolyysiteknologioiden välillä. (Bernuy-Lopez, Jøkladal, Silva, Nielsen & Krasowski 2024, 118–120.)

Kaupallisesti kypsimmät elektrolyysiteknologiat ovat alkalielektrolyysi (AEL) ja protoninvaihtomembraanielektrolyysi (PEM). Alkalielektrolyysereissä käytetään nikkelpohjaisia elektrodeja ja väkevää emäksistä liuosta (25–35 % kaliumhydroksidi). Alkalielektrolyysereit ovat hyvin kehittyneitä, ja niiden kustannusten vähenemispotentiaali on pienempi kuin muilla elektrolyysiteknologioilla. Ne ovat tällä hetkellä kypsä ja edullisin elektrolyysiteknologia. PEM-ektrolyysereissä käytetään elektrolyyttinä protoneja johtavaa kiinteää polymeerikalvoa. PEM-

elektrolyysilaitteilla on huomattavasti suurempi kustannusten vähenemispotentiali sekä muita etuja, kuten suurempi joustavuus, korkeampi toimintapaine, pienempi tilantarve, nopeampi reagointikyky ja pienempi kuormitusvaihtelujen aiheuttama heikkenemisaste alkalielektrolyysereihin verrattuna. PEM-elektrolyysereissä käytetään kuitenkin kalliita kalvomateriaaleja ja elektrodikatalyyttejä (platina ja iridium). Tällä hetkellä PEM- ja alkalielektrolyysilaitteiden käyttöikä on keskenään samankaltainen. (IEA s.a.)

Kiinteäoksidi-elektrolyysit (SOEC) ovat elektrokemiallisia järjestelmiä, jotka toimivat korkeissa lämpötiloissa (600–900 °C). Niissä höyry hajotetaan vedyksi (H₂) ja hapeksi (O₂) käyttämällä keraamista kiinteäoksidikalvoa, jonka läpi katodilla muodostuneet O₂⁻-ionit ja H₂ kulkeutuvat anodille. SOEC on tehokas teknologia vedyn tuotantoon, koska se hyödyntää suoraa höyryn muuntamista, mutta se ei ole vielä niin kypsä teknologia kuin alkali- ja PEM-elektrolyysit. SOEC-elektrolyysit ovat vähemmän joustavia kuin PEM-elektrolyysit käynnistys- ja pysäytystilanteissa. (IEA s.a.)

2.3.2 Uusiutuvan vedyn valmistuksen sivutuotteet

Uusiutuvan vedyn valmistuksessa syntyy sivutuotteina happea ja lämpöä, joilla voi olla merkittävää taloudellista ja energiatehokkuutta parantavaa arvoa. Elektrolyysin seurauksena tuotettu happi on erittäin puhdasta, ja sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi teräs-, kemian-, elintarvike- ja paperiteollisuudessa (Assunção, Eckl, Ramos, Correia & Neto 2024, 110). Hapen kaupallinen arvo riippuu sen tuotantomäärästä, kuljetus- ja varastointivaatimuksista sekä markkinoiden kysynnästä.

Elektrolyysissä käytetystä sähköstä noin 30 % muuttuu hukkalämmöksi, jonka hyödyntäminen voi parantaa laitoksen kokonaisyötysuhdetta. Vedyn tuotannossa syntyvää hukkalämpöä voidaan hyödyntää esimerkiksi kaukolämpöjärjestelmissä, mikä edistää energiatehokkuutta ja vähentää energiankulutuksen kustannuksia. (Rieksta, Zarins & Bazbauers 2023, 549.) Matalan lämpötilan elektrolyysitekniikoiden, eli alkalielektrolyysin (AEL) ja protoninvaihtomembraanielektrolyysin (PEM), hukkalämpö voidaan integroida suoraan kaukolämpöverkkoon,

erityisesti paluulinjaan, jossa lämpötilatasot ovat alhaisempia. Vaihtoehtoisesti hukkalämmön lämpötilaa voidaan nostaa lämpöpumpun tai sähkökattilan avulla, jolloin hukkalämpöä on mahdollista hyödyntää myös kaukolämmön menopuolella. Lämpötilan nosto lämpöpumpulla tai sähkökattilalla kuitenkin lisää energiankulutusta ja kustannuksia. (Böhm, Moser, Puschnigg & Zauner 2021, 11.)

Käytännön kysymykset, jotka vaikuttavat suoraan vedyn tuotantoprosessin hukkalämmön käytettävyyteen kaukolämpöverkossa, liittyvät ensisijaisesti taloudellisiin näkökohtiin. Tällaisia kysymyksiä ovat esimerkiksi vetylaitoksen sijainti, elektrolyysin toimintalämpötilat, kaukolämmön kysyntä ja elektrolyysin toiminnan ennakoitavuus. (Böhm, Moser, Puschnigg & Zauner 2021, 10.)

Vedyntuotantolaitoksen sijainti on yksi keskeisimmistä tekijöistä, jotka vaikuttavat hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksiin kaukolämpöverkossa. Elektrolyysin on sijaittava riittävän lähellä kaukolämpöverkkoa, jotta hukkalämmön siirtäminen on teknisesti ja taloudellisesti kannattavaa. Pitkät siirtomatkat lisäävät merkittävästi kustannuksia johtuen lämpöhäviöistä ja siirtoverkoston rakentamisesta aiheutuvista investoinneista. Sijoittamalla elektrolyysit teollisuusalueille tai kaupunkikeskusten lähelle, joissa kaukolämpöverkko on jo olemassa, voidaan minimoida investointikustannuksia ja optimoida lämmön hyödyntäminen. (Böhm, Moser, Puschnigg & Zauner 2021, 14–15.)

Kaukolämmön kysyntä vaihtelee merkittävästi vuodenajan mukaan, ja elektrolyysin toiminta ei välttämättä ajoitu täysin yhteen tämän kysynnän kanssa. Kesällä hukkalämmön tarve on vähäinen talveen verrattuna, joten hukkalämmön hyödyntäminen saattaa jäädä kesällä vajaaksi. Kaukolämmön kysyntä vaihtelee myös kaupungin tai kunnan koon mukaan. Jos hukkalämpöä hyödynnetään ennestään olemassa olevassa kaukolämpöverkossa, on kaukolämpöverkon pystyttävä myös mitoitukseksi vastaanottamaan hukkalämpö. Elektrolyysin toiminnan ennakoitavuus on tärkeää, jotta kaukolämpöverkon lämmönsaanti on tasaista. Elektrolyysit toimivat usein uusiutuvalla sähköllä, jonka tuotanto voi vaihdella merkittävästi esimerkiksi tuuli- ja aurinkoenergian saatavuuden mukaan. (Böhm, Moser, Puschnigg & Zauner 2021, 13–14.)

2.4 Vedyn varastointi ja kuljetus

Vedyn varastointi ja kuljetus on haastavaa vedyn ominaisuuksien vuoksi. 1 kg vetyä vaatii 11 m³:n varastointitilan normaalissa ilmanpaineessa ja lämpötilassa. Tämä tarkoittaa, että suurten vetymäärien varastointi vaatii joko korkeapainesäiliöitä, vedyn nesteyttämistä tai vedyn sitomista yhdisteisiin tai materiaaleihin. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024.)

Vedyn varastointi ja kuljetus ovat keskeisiä haasteita sen laajamittaisessa käytössä. Vety on kaasuna hyvin kevyttä ja sen energiatiheys tilavuuteen nähden on alhainen, mikä tekee varastoinnista ja kuljetuksesta teknisesti vaativaa. Yksi yleisimmistä varastointimenetelmistä on paineistaminen, jossa vety säilötään korkeapaineisiin säiliöihin (200–700 bar). Tämä mahdollistaa vedyn tiiviimmän varastoinnin, mutta edellyttää erikoismateriaaleja ja huolellista tiivistystä, sillä vedyn pieni molekyylikoko tekee siitä alttiin vuodoille. Komposiittimateriaalista valmistetut kevyet säiliöt soveltuvat erityisesti liikennekäyttöön, kun taas terässäiliöt ovat yleisiä teollisuudessa. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024.)

Vedyn varastointi nesteytettynä mahdollistaa suuremman energiatiheyden, mutta prosessi on hyvin energiaintensiivinen. Nesteytys vaatii lämpötilan laskemista -253 °C:een, mikä kuluttaa huomattavan määrän energiaa. Varastointi nesteytettynä vaatii myös erittäin hyvin eristettyjä säiliöitä, jotta höyrystymishäviöt (boil-off) pysyvät mahdollisimman pieninä. Nestemäistä vetyä käytetään erityisesti soveluksissa, joissa tarvitaan korkeaa energiatiheyttä pienessä tilassa, kuten esimerkiksi avaruusteknologiassa ja suurten vetymäärien varastoinnissa. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024.)

Kolmas fysikaalinen vedyn varastoinnin muoto on paineistettu nestemäinen vety. Paineistetun nestemäisen vedyn etuna on korkea varastointitiheys ja vähäiset höyrystymishäviöt, mutta se vaatii paljon energiaa ja asettaa kovia vaatimuksia säiliöiden materiaaleille. Ympäristön lämpötilan vaihtelut voivat aiheuttaa vedyn höyrystymistä ja karkaamista varastosta herkemmin kuin nestemäisellä vedyllä. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024.)

Kemiallinen varastointi tarjoaa vaihtoehdon fysikaalisille menetelmille. Vety voidaan sitoa erilaisiin yhdisteisiin, kuten metaaniin, ammoniakkiin tai nestemäisiin orgaanisiin vedynkantajiin (Liquid Organic Hydrogen Carrier, LOHC), jolloin se voidaan varastoida ja kuljettaa turvallisemmin ilman korkeita paineita tai matalia lämpötiloja. Näiden yhdisteiden avulla vety voidaan integroida olemassa olevaan infrastruktuuriin, kuten maakaasuverkostoihin ja nykyisiin nesteytetyn maakaasun (Liquefied Natural Gas, LNG) terminaaleihin. Haittana on kuitenkin se, että vedyn vapauttaminen näistä yhdisteistä vaatii energiaa ja lisäprosesseja. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024.)

Vedyn kuljetus voidaan toteuttaa useilla eri tavoilla. Putkistot ovat tehokkain ja edullisin tapa siirtää vetyä suuria määriä, ja niitä on jo käytössä (IEA 2024, 104). Suomessa ja muissa Pohjoismaissa suunnitellaan vedynsiirtoverkostoja, jotka yhdistäisivät tuotantoalueet ja kuluttajat (Gasgrid Finland Oy 2025). Pitkillä etäisyyksillä vety voidaan kuljettaa myös laivoilla, jolloin se joko nesteytetään tai muokataan vedynkantajaksi, kuten ammoniakiksi. Tämä mahdollistaa vedyn kuljetuksen mantereelta toiselle, mutta edellyttää merkittäviä investointeja nesteytys- ja purkulaitteisiin. Säiliörekkoja käytetään lyhyempien matkojen vedyn kuljetuksessa, mutta niiden kapasiteetti on rajallinen. (IEA 2024, 104–105.)

Vedyn siirron ja varastoinnin kehitys vaatii mittavia investointeja ja pitkäjänteistä suunnittelua. Olemassa olevan infrastruktuurin hyödyntäminen ja uusien teknologioiden kehittäminen ovat avainasemassa vedyn kilpailukyvyyn parantamisessa.

2.5 Vedyn turvallisuus ja sääntely

Vedyn turvallisessa käytössä korostuvat sen erityispiirteet, jotka erottavat sen selvästi muista polttoaineista, kuten bensiinistä ja maakaasusta. Vedyn ominaisuuksien ymmärtäminen sekä niihin mukautettujen ratkaisujen ja käytäntöjen noudattaminen ovat tärkeitä turvallisessa vedyn käytössä. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024.)

Vety on hajuton ja väritön kaasu. Se ei ole myrkyllistä, mutta suurina pitoisuuksina vetykaasu voi kuitenkin aiheuttaa tukehtumisvaaran. Vety on hyvin kevyttä ja haihtuu nopeasti ilmaan, mikä vähentää syttyvien kaasuseosten

muodostumisen riskiä avoimissa tiloissa. Vedyn laaja syttymisalue ja matala syttymisenergia tekevät siitä kuitenkin herkästi syttyvän, minkä vuoksi sytytyslähteiden poistaminen ja ilmanvaihdon optimointi ovat välttämättömiä turvatoimia. Vedyn liekki on lähes näkymätön ja sen lämpösäteily on vähäistä, mikä voi vaikeuttaa tulipalojen havaitsemista. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024.)

Vetyä voidaan käyttää turvallisesti, kun sen erityispiirteet, kuten nopea hajaantuminen ja herkkä syttyvyys, otetaan huomioon infrastruktuurin suunnittelussa, laitteiston materiaalivalinnoissa ja käyttöprotokollissa. Kehittyneet havaitsemisjärjestelmät, tiukat turvallisuusstandardit ja käyttäjien koulutus takaavat vedyn turvallisuuden laajamittaisessa käytössä. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024.)

Vedyn käyttöä säädellään useilla eri lainsäädännön osa-alueilla, jotka kattavat sen tuotannon, varastoinnin, siirron ja käytön. Vety luokitellaan vaaralliseksi kemikaaliksi. Keskeisimmät vedyn käyttöön liittyvät lainsäädännön osa-alueet ovat kemikaaliturvallisuuslainsäädäntö, painelaitelainsäädäntö, räjähdysvaarallisia tiloja koskeva lainsäädäntö (ATEX), ympäristölainsäädäntö, rakennus- ja maankäyttölainsäädäntö sekä pelastuslainsäädäntö. Vedyn käsittelyssä ja varastoinnissa noudatetaan kansainvälisiä standardeja, kuten ISO-standardeja vedyn laatuvaatimuksille ja teknisille laitteistoille. Kansainväliset sääntelyjärjestelmät ovat edelleen kehittymässä, erityisesti yhtenäisten standardien ja sertifiointien osalta. Näiden kehittäminen on olennaista vedyn laajamittaiselle käyttöönotolle. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024.)

2.6 Vedyn käyttö ja jatkojalostus

Vety on monikäyttöinen energianlähde ja teollisuuden raaka-aine, jonka merkitys kasvaa siirryttäessä kohti vähähiilistä taloutta. Vetyä voidaan käyttää sellaiseenaan esimerkiksi polttokennoissa ja energian varastoinnissa tai jatkojalostaa synteettisiksi polttoaineiksi ja kemikaaleiksi. Vedyn avulla voidaan myös korvata fossiilisia polttoaineita teollisuuden prosesseissa, kuten teräksen ja kemikaalien tuotannossa. (IEA 2019, 17–18.)

2.6.1 Vedyn käyttö

Perinteisesti vetyä on hyödynnetty erityisesti teollisuudessa, jossa se on ollut pitkään välttämätön raaka-aine. Öljynjalostuksessa vetyä käytetään hydrokäsittelyssä ja krakkausprosessissa poistamaan epäpuhtauksia, kuten rikkiä, öljytuotteista. (IEA 2019, 90–92.) Kemianteollisuudessa suurin osa vedystä kuluu ammoniakkin tuotantoon Haber-Bosch-prosessissa, mikä tekee siitä keskeisen raaka-aineen lannoiteteollisuudelle. Lisäksi vetyä hyödynnetään metanolin valmistuksessa, mikä mahdollistaa sen jatkokäytön muun muassa muovien ja polttoaineiden tuotannossa. (IEA 2019, 99–101.) Muita teollisuussovelluksia ovat erikoistuneet prosessit, esimerkiksi elektroniikkateollisuudessa ja lasinvalmistuksessa, joissa vedyn kemialliset ominaisuudet ovat välttämättömiä (IEA 2019, 32).

Vedyn uudet käyttökohteet korostavat sen merkitystä puhtaana energiantantajana ja keskeisenä ratkaisuna globaalissa energiasiirtymässä. Raskaassa teollisuudessa vetytelkistys mahdollistaa terästeollisuuden hiilidioksidipäästöjen vähentämisen korvaamalla perinteiset kivihiihlopohjaiset prosessit vedyn avulla. Lisäksi vety voi toimia fossiilisten polttoaineiden korvikkeena korkealämpöisissä teollisuusprosesseissa, kuten sementin valmistuksessa. (IEA 2019, 90–91.) Liikenne sektorilla vetyä käytetään polttokennoajoneuvojen polttoaineena. Vety mahdollistaa pitkän toimintasäteen ja nopean tankkauksen, mikä tekee vetyajoneuvoista kilpailukykyisen vaihtoehdon sähköisille ajoneuvoille, erityisesti raskaassa liikenteessä, kuten kuorma-autoissa, linja-autoissa ja junissa. Myös meriliikenteessä ja ilmailussa vedyn ja siitä valmistettavien synteettisten polttoaineiden käyttö on kasvava tutkimusalue. (IEA 2019, 125.)

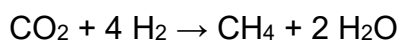
Energian varastoinnissa ja sähköntuotannossa vety toimii ratkaisuna uusiutuvan energian tuotannon vaihteluiden tasaamiseen. Elektrolyysereillä tuotettu vety voidaan varastoida ja hyödyntää sähköntuotannossa silloin, kun tuuli- tai aurinkoenergiaa ei ole saatavilla. Lisäksi vetyä voidaan käyttää polttoaineena kaasuturbiineissa sähköntuotantoon. (IEA 2019, 150–151.)

2.6.2 Vedyn jatkojalostus ja tuotteiden käyttökohteet

Vedystä ja hiilidioksidista tai typestä voidaan uusiutuvan sähkön avulla valmistaa RNFBO-polttoaineita sekä muita synteettisiä kemikaaleja. Uusiutuvan sähkön avulla tuotettuja polttoaineita voidaan kutsua myös sähköpolttoaineiksi (electro-fuels, e-fuels). Tällaisia polttoaineita ja kemikaaleja ovat esimerkiksi e-metaani, e-metanoli, e-ammoniakki sekä Fischer-Tropsch-prosessilla tuotetut nestemäiset hiilivedyt, kuten e-diesel ja e-kerosiini. Vedyn jatkojalostustuotteilla voidaan vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja edistää vähäpäästöisiä energiaratkaisuja liikenteessä, energiantuotannossa ja teollisuudessa. (IEA 2019, 56; Nemmour, Inayat, Janajreh & Ghenai 2023, 29011–29014; Reddy, Hariram, Maity, Ghazali & Kumarasamy 2023, 2–3.)

E-metaani

E-metaani on synteettistä metaania, jota voidaan käyttää korvaamaan maakaasua energiantuotannossa ja liikenteessä. E-metaanin tuotanto perustuu Sabatier-reaktioon, jossa vety (H_2) reagoi hiilidioksidin (CO_2) kanssa muodostaen metaania (CH_4) ja vettä (H_2O):

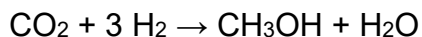


Reaktio on eksotermisen, eli se vapauttaa lämpöä ja tasapaino siirtyy tuotteiden suuntaan alhaisemmissa lämpötiloissa, joten reaktoreissa tarvitaan lämmönpoistojärjestelmä optimaalista toimintaa varten. Prosessin sivutuotteina syntyy siis vettä ja lämpöä. (Nemmour ym. 2023, 29025.) Prosessi voidaan toteuttaa joko kemiallisesti katalyyttien avulla tai biologisesti mikro-organismien avulla. Katalyyttinen metanointi on tällä hetkellä kehittyneempi ja tehokkaampi menetelmä. (IEA 2019, 57.) Katalyyttisessä metanoinnissa käytetään yleisimmin kiinteäpeti-reaktoreita. Tyypillisesti prosessilämpötila on 250–400 °C ja prosessipaine on 5–50 bar (Nemmour ym. 2023, 29025). Metaani on normaaleissa olosuhteissa kaasua, mutta se voidaan tarvittaessa myös nesteyttää.

E-metanoli

E-metanoli on synteettinen metanoli, joka valmistetaan vedystä ja hiilidioksidista. Se on monikäyttöinen kemikaali ja polttoaine, jota voidaan hyödyntää

liikenteessä, kemianteollisuudessa ja energiantuotannossa. E-metanolin tuotanto perustuu metanolisynteesiin, jossa vety ja hiilidioksidi reagoivat muodostaen metanolia ja vettä seuraavan reaktion mukaisesti:

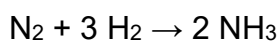


Tämä reaktio on eksoterminen, eli se vapauttaa lämpöä. Metanolisynteessin jälkeen syntynyt raakametanoli johdetaan vielä tislaukseen, jossa metanoli erotellaan muista alkoholeista. Metanolisynteesisissä reaktoreina käytetään yleensä kiinteäpetireaktoreita. Synteesilämpötila on tyypillisesti 200–300 °C, mutta lämpötila riippuu käytetystä katalyytistä. Yleisimmin käytettyjä katalyyttejä ovat kuparin, sinkin ja alumiinin yhdistelmät. (Nemmour ym. 2023, 29017.)

E-metanoli on erittäin monipuolinen kemikaali ja polttoaine, jota voidaan hyödyntää moniin tarkoituksiin. Kemianteollisuudessa metanolia käytetään liuottimena ja raaka-aineena monien kemikaalien valmistuksessa. Uusiutuvaa e-metanolia voidaan käyttää myös biodieselin tuotannossa korvaamaan fossiilipohjainen metanoli, mikä vähentää biodieselin hiilijalanjälkeä. Metanolia voidaan käyttää meriliikenteessä polttoaineena, ja monissa rahtialuksissa onkin jo kaksoispolttoainemoottoreita, jotka voivat käyttää metanolia perinteisten meripolttoaineiden rinnalla. Metanoli voi toimia polttomoottoreissa bensiinin lisäaineena tai sen korvaajana. (Nemmour ym. 2023, 29017; Reddy ym. 2023, 21–23.)

E-ammoniakki

E-ammoniakin tuotanto perustuu Haber-Bosch-prosessiin, jossa typpi (N₂) ja vety (H₂) reagoivat metallikatalyytin avulla korkean lämpötilan ja paineen alaisuudessa muodostaen ammoniakkia seuraavan reaktion mukaisesti:



Tämä reaktio on eksoterminen, eli se vapauttaa lämpöä. Tyypilliset reaktio-olosuhteet ovat 400–500 °C:n lämpötila ja yli 100 barin paine, mutta tietyillä katalyyteillä ja prosessimuutoksilla voidaan saavuttaa myös muita olosuhteita. Haber-Bosch-prosessissa käytetään tyypillisimmin rautapohjaisia katalyyttejä. (Nemmour ym. 2023, 29018.)

E-ammoniakki on monipuolinen kemikaali ja energian kantaja. Ammoniakki on keskeinen raaka-aine typpilannoitteiden tuotannossa, ja tällä hetkellä suurin osa tuotetusta ammoniakista päätyy tähän käyttöön. Siirtyminen fossiilisista raaka-aineista valmistetusta ammoniakista uusiutuvaan e-ammoniakkiin voi merkittävästi vähentää maatalouden hiilijalanjälkeä. (Nemmour ym. 2023, 29018; Reddy ym. 2023, 11–12.)

Ammoniakkia voidaan käyttää vedyn kantajana, sillä se voidaan nesteyttää helpommin ja alhaisemmassa paineessa kuin vety. Ammoniakki voidaan hajottaa takaisin vedyksi, jolloin se toimii vedyn varastointi- ja kuljetusratkaisuna. Ammoniakkia voidaan käyttää myös suoraan polttokennoissa, mikä mahdollistaa sähköntuotannon ilman hiilidioksidipäästöjä. (Nemmour ym. 2023, 29018; Reddy ym. 2023, 11–12)

E-ammoniakkia voidaan mahdollisesti tulevaisuudessa käyttää meriliikenteen polttoaineena. Ammoniakki on houkutteleva polttoainevaihtoehto, koska se ei tuota hiilidioksidipäästöjä palamisen aikana. Monet laivamoottorivalmistajat kehittävät jo ammoniakkikäyttöisiä moottoreita, mutta teknologia ei ole vielä kaupallisesti kypsää. (Nemmour ym. 2023, 29018; Reddy ym. 2023, 11–12.)

Synteettiset hiilivedyt

Synteettisiä hiilivetyjä voidaan valmistaa esimerkiksi Fischer-Tropsch-synteesillä. Fischer-Tropsch-synteesi on kemiallinen reaktio, jossa hiilimonoksidista (CO) ja vedystä (H₂) valmistetaan pitkäketjuisia hiilivetyjä, kuten synteettistä dieseliä, kerosiinia ja muita nestemäisiä polttoaineita. Fischer-Tropsch -tuotteet vaativat jatkokäsittelyä, kuten hydrokrakkausta, isomerointia ja tislausta, jotta ne täyttävät polttoainestandardit. Fischer-Tropsch-prosessin etuna on, että syntetisoidut polttoaineet ovat "drop in"-yhteensopivia, eli niitä voidaan käyttää olemassa olevissa moottoreissa ja jakeluinfrastruktuurissa. (Batteiger ym. 2022, 13–14; European Commission s.a. a.)

Fischer-Tropsch-prosessilla voidaan valmistaa e-kerosiinia (eSAF, electro Sustainable Aviation Fuel), joka on tärkeänä pidetty ratkaisu lentoliikenteen päästövähennyksiin. SAF (Sustainable Aviation Fuel) tarkoittaa kestävästä lentopolttoainetta, joka on valmistettu uusiutuvista raaka-aineista, kuten kasviöljyistä,

jätteistä, biomassasta tai synteettisesti vedystä ja hiilidioksidista. Synteettisesti vedystä ja hiilidioksidista valmistetusta polttoaineesta käytetään nimitystä eSAF (electro Sustainable Aviation Fuel). (Batteiger ym. 2022, 13–14; European Commission s.a. a.)

EU on asettanut ReFuelEU Aviation -asetuksella vähimmäisvelvoitteen kestävien lentopolttoaineiden (SAF) tarjonnalle Euroopassa, alkaen 2 %:sta vuonna 2025 ja nousten 70 %:iin vuoteen 2050 mennessä. Synteettisille e-polttoaineille (eSAF) on asetettu alavelvoite, joka alkaa 1,2 %:sta vuonna 2030 ja kasvaa 35 %:iin vuoteen 2050 mennessä. Kaikkien ReFuelEU Aviation -asetuksen mukaisesti toimitettavien SAF-polttoaineiden on täytettävä uusiutuvan energian direktiivissä (RED) määritellyt kestävyyttä ja kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistä koskevat kriteerit. (European Commission s.a. a.)

2.7 Vetytalouden tulevaisuuden näkymät

Vuonna 2023 globaali vedyn kysyntä ylitti 97 miljoonaa tonnia, ja sen odotetaan kasvavan edelleen. Kysyntä painottuu yhä öljynjalostukseen ja teollisiin sovelluksiin, joissa vetyä on käytetty jo vuosikymmeniä. Vuonna 2023 tuotetusta 97 miljoonasta tonnista alle 1 % oli vähäpäästöistä vetyä. Julkaistujen hankkeiden perusteella vähäpäästöisen vedyn tuotanto voisi nousta 49 miljoonaan tonniin vuodessa vuoteen 2030 mennessä. Vuoden 2023 lopussa maailmanlaajuisesti asennettu elektrolyysikapasiteetti oli 1,4 gigawattia. Vuoteen 2024 mennessä julkaistujen hankkeiden mukaan kapasiteetti voisi kasvaa lähes 520 gigawattiin vuoteen 2030 mennessä. (IEA 2024, 60–61, 67.)

Kansainvälinen kilpailu vedyn osaamisesta ja tuotantokapasiteetista on kovaa. Kilpailu kannustaa innovaatioihin, parantaa teknologioiden tehokkuutta ja alentaa kustannuksia. Samalla se luo paineita maiden investoinneille tutkimukseen, kehitykseen ja infrastruktuurin rakentamiseen. Vetytalous voi muuttaa merkittävästi energian tuottaja- ja kuluttajamaiden rooleja maailmantaloudessa. Siirtymä öljy- ja kaasuperusteisesta taloudesta uusiutuvan vedyn tuotantoon voi vähentää fossiilisten polttoaineiden tuottajien hallitsevaa asemaa energiakaupassa. Samalla

vedyn tuottajamaiden, joilla on runsaasti uusiutuvaa energiaa, asema voi vahvistua. (IRENA 2022, 38–67.)

Vedyn kansainvälinen kauppa vaatii uusia kauppasopimuksia ja infrastruktuuri-investointeja. Putkistojen, satamien ja vihreän ammoniakkin kuljetusjärjestelmien rakentaminen on välttämätöntä vedyn globaalille jakelulle. Lisäksi maiden väliset kauppasopimukset vedyn standardoimiseksi ja turvallisen kaupan edistämiseksi ovat keskeisiä. Yhteiset pelisäännöt ja standardit ovat tärkeitä vetymarkkinoiden kasvulle. Kansainvälinen standardisointi helpottaa vedyn kaupankäyntiä, turvallista käyttöä ja teknologioiden yhteensopivuutta. Yhteiset standardit vähentävät esteitä markkinoille pääsemiselle ja edistävät globaalia vedyn kaupankäyntiä. (IRENA 2022, 70–76.)

2.7.1 Vetytalous EU:ssa

Vetytalous on noussut keskeiseksi osaksi Euroopan unionin ilmastoneutraalitus-tavoitteita. Vety on keskeinen osa EU:n energiasiirtymää, nettonollapäästöjen tavoittelua ja kestävästä kehitystä. EU:n nykyinen vedyn kysyntä on edelleen keskittynyt perinteisiin sovelluksiin, kuten öljynjalostukseen ja lannoitteiden tuotantoon. Vaikka uusiutuvan vedyn tuotanto kasvaa, sen kustannuskilpailukyky fossiiliseen vetyyn nähden on vielä haaste. Vuonna 2022 noin 96 % Euroopassa käytetystä vedystä tuotettiin maakaasusta. (European Commission s.a. b.)

Euroopan komissio julkaisi EU:n vetystrategian heinäkuussa 2020 ja päivitti sitä vuonna 2022 REPowerEU-suunnitelmalla. REPowerEU-suunnitelmassa asetettiin EU:n tavoitteeksi tuottaa 10 miljoonaa tonnia uusiutuvaa vetyä ja tuoda toiset 10 miljoonaa tonnia uusiutuvaa vetyä vuoteen 2030 mennessä. Vuoteen 2050 mennessä uusiutuvan vedyn on määrä kattaa noin 10 % EU:n energiantarpeesta. EU:n vetystrategian ydin keskittyy puhtaaseen, uusiutuvaan vetyyn ja sen rooliin päästöttömässä energiajärjestelmässä. Tavoitteena on lisätä uusiutuvan vedyn tuotantoa, erityisesti tuuli- ja aurinkosähkön avulla valmistettavaa vihreää vetyä. Samalla kehitetään vetymarkkinoita ja pyritään harmonisoimaan sääntelyä EU-tasolla. Myös vedyn siirto- ja varastointiverkostoja kehitetään. EU panostaa

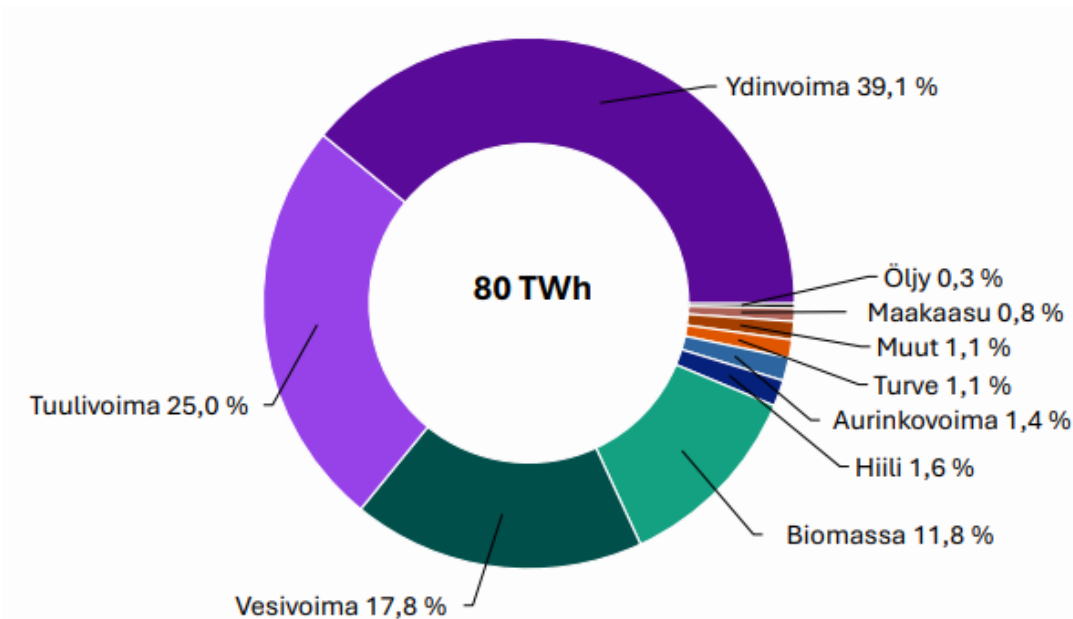
lisäksi kansainvälisiin vetykumppanuuksiin ja teolliseen yhteistyöhön. (European Commission s.a. b.)

2.7.2 Vetytalous Suomessa

Suomi on yksi niistä maista, joilla on erityisen hyvät edellytykset hyödyntää vetytaloutta niin kotimaassa kuin vientimarkkinoillakin. Suomi on sitoutunut saavuttamaan hiilineutraaliuden vuoteen 2035 mennessä. (Hydrogen Cluster Finland 2023, 10.)

Suomella on monia kilpailuetuja, jotka tukevat sen asemaa vetytaloudessa. Näihin kuuluvat vakaa ja vähäpäästöinen sähköjärjestelmä, kustannustehokas uusiutuvan energian tuotantopotentiaali sekä runsaat luonnonvarat, kuten metsät, biogeeninen hiilidioksidi, metallit ja makea vesi. Lisäksi Suomen vahvuuksia ovat vakaa toimintaympäristö, hallituksen tuki puhtaille ratkaisuille, korkea teknologinen kehitysaste sekä vahva osaaminen aloilla, joilta odotetaan ratkaisuja ja palveluita vetytalouden tarpeisiin. (Hydrogen Cluster Finland 2023, 10–14.)

Suomi on jo nyt yksi maailman vähäpäästöisimmistä sähköntuottajista, mikä antaa kilpailuedun puhtaan vedyn tuotannossa. Kuvassa 5 on esitetty Suomen sähkön tuotanto energialähteittäin. Vuonna 2024 Suomen sähköntuotannosta jo 56 % oli uusiutuvista lähteistä ja 95 % oli hiilidioksidineutraalia. (Energiateollisuus ry 2025.)



KUVA 5. Suomen sähköntuotanto energialähteittäin vuonna 2024 (Energiateollisuus ry 2025)

Sähkön hinta Suomessa on ollut ajoittain negatiivinen suuren puhtaan sähköntuotannon ylijäämän vuoksi. Tämä ylijäämä voidaan ohjata vedyn tuotantoon. Vuoteen 2035 mennessä Suomessa voidaan tuottaa arviolta 12–98 terawattituntia vetyä vuodessa. Vuoteen 2045 mennessä määrä voi nousta jopa 212 terawattituntiin vuodessa. Näillä määrillä Suomella on mahdollisuus nousta merkittäväksi vetyviejäksi. (Hydrogen Cluster Finland 2023, 12.)

Suomen sähköverkko on vakaa ja moderni. Se mahdollistaa suuren mittakaavan puhtaan sähköntuotannon integroinnin ja vedyn tuotannon päästöjen tarkkuusmittauksen. Lisäksi elektrolyysin hukkalämpö voidaan hyödyntää kaukolämmössä, mikä on Suomen kylmässä ilmastossa selvä etu. (Hydrogen Cluster Finland 2023, 12.)

Luonnonvarat tukevat Suomen asemaa vetytaloudessa. Maa on rikas vesivaroiltaan, joten vedyntuotannossa ei tarvita kallista veden suolanpoistoa. Lisäksi Suomella on merkittäviä mineraalivaroja, kuten kobolttia, litiumia ja harvinaisia maametalleja, joita tarvitaan vetytalouden arvoketjussa. (Hydrogen Cluster Finland 2023, 12.)

Vedyn kuljetusjärjestelmien rakentaminen on välttämätöntä vedyn jakelulle. Kaasun siirtoverkkoyhtiö Gasgrid Finland Oy suunnittelee Suomeen kansallista

vedynsiirtoverkkoa, jonka tavoitteena on yhdistää vedyn tuotanto- ja kulutuskohteet sekä mahdollistaa vedyn vienti Eurooppaan. Kuvassa 6 on esitetty kansallisen vetyverkon alustavat reittivaihtoehdot. (Gasgrid Finland Oy, 2025.)



KUVA 6. Suomen kansallisen vetyverkon alustavat reittivaihtoehdot (Gasgrid Finland Oy, 2025)

Gasgrid Finland Oy on myös mukana Itämeren alueen kehityshankkeissa, joiden tavoitteena on Itämeren alueen vetyverkon kasvattaminen jopa 5 000 kilometriin vuoteen 2030 mennessä. Nämä hankkeet liittäisivät Suomen vedyn tuotanto- ja kulutuskohteet osaksi Euroopan vetyverkostoa. Kuvassa 7 on esitetty näiden hankkeiden suunnitellut reitit. Nordic Hydrogen Route on Gasgrid Finlandin ja Nordion Energin yhteinen hanke. Noin tuhannen kilometrin pituinen putkisto

yhdistäisi Suomen ja Ruotsin, myötäillen Perämeren kaarta ja ulottuen Kiirunaan asti. Nordic-Baltic Hydrogen Corridor -hankkeen vedyn siirtoputki kulki puolestaan Suomesta Viron, Latvian, Liettuan ja Puolan kautta Saksaan, mahdollistaen vedyn viennin Keski-Euroopan markkinoille vuoteen 2030 mennessä. Hankkeen osapuolina ovat näiden maiden kaasun siirtoverkonhaltijat. Baltic Sea Hydrogen Collector -hankkeen tavoitteena on rakentaa merenalainen vetyputki Suomen, Ruotsin ja Saksan välille hyödyntämään Itämeren alueen merituulivoimapotentiaalia. (Gasgrid Finland Oy, 2025.)



KUVA 7. Nordic Hydrogen Route, Nordic-Baltic Hydrogen Corridor ja Baltic Sea Hydrogen Collector -hankkeet kartalla (Gasgrid Finland Oy, 2025)

3 VETYTALOUSAIHEISEN VERKKOKOULUTUKSEN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS

Tässä luvussa käsitellään työssä rakennetun verkkokoulutuksen suunnittelua ja toteutusta. Aluksi määritellään koulutuksen tavoitteet ja kohderyhmä. Lisäksi tarkastellaan Suomessa järjestettyjä ja järjestettäviä vetytalousaiheisia koulutuksia, mikä antaa kokonaiskuvan alan koulutustarjonnasta ja auttaa hahmottamaan uuden koulutuksen asemaa. Verkkokoulutuksen toteutukseen liittyen käydään läpi käytetyt työkalut ja oppimisympäristö. Kurssirakenteen suunnittelussa keskitytään oppimiskokonaisuuden rakentamiseen ja sisältöjen tuottamiseen. Lopuksi käsitellään koulutuksen testikäyttöä ja viimeistelyä.

3.1 Verkkokoulutuksen tavoitteet ja kohderyhmä

Tässä opinnäytetyössä tehtävän vetytalouden verkkokoulutuksen on tarkoitus laajentaa Rambollin energia-alan koulutustarjontaa sekä palvella energia-alan ammattilaisten kasvavaa tarvetta ymmärtää vetytalouden roolia ja mahdollisuuksia nykypäivän ja tulevaisuuden energiamarkkinoilla. Verkkokoulutus on suunnattu erityisesti energia-alalla työskenteleville henkilöille, jotka haluavat perehtyä vetytalouden perusteisiin ja merkitykseen. Koulutus soveltuu niin uusille alalle tulijoille, kokeneille ammattilaisille, kuin henkilöille, jotka siirtyvät uusiin tehtäviin, joissa tarvitaan perustietoa vetytaloudesta ja sen vaikutuksista energiasektoriin.

Koulutuksen tavoitteena on antaa selkeä ja tiivis johdanto vetytalouteen. Suoritettuaan koulutuksen osallistuja ymmärtää vetytalouden keskeiset periaatteet ja osa-alueet sekä osaa kuvata vedyn tuotannon, varastoinnin, kuljetuksen ja käytön perusprosessit. Lisäksi kurssilla tarkastellaan vedyn jatkojalostusta, tulevaisuudennäkymiä sekä vetytalouden merkitystä osana energiajärjestelmän hiilidioksidipäästöjen vähentämistä. Kurssi antaa myös valmiudet hahmottaa vedyntuotannon hukkalämpöjen hyödyntämismahdollisuuksia kaukolämpöjärjestelmissä.

Verkkokoulutuksen tekemiseen kuluva kokonaisaika on noin kaksi tuntia. Verkkokoulutusta ei tarvitse suorittaa kerralla kokonaan, ja koulutus koostuu pienemmistä osioista, jotta opiskelua on helppo rytmittää pienempiin osiin. Tällä pyritään varmistamaan koulutuksen soveltuvuus ja käytännöllisyys työelämän tarpeisiin.

3.2 Vetytalousaiheiset verkkokoulutukset Suomessa

Suomessa vetytalouden verkkokoulutustarjonta on monipuolistunut vastauksena kasvavaan tarpeeseen. Vetytalouden verkkokoulutuksia ovat järjestäneet sekä yksityiset yritykset että julkiset oppilaitokset. Koulutusmuotoina koulutuksissa on ollut esimerkiksi reaaliaikaisia etäopetuksia, tallennettuja luentoja sekä webinaareja. Seuraavaksi tarkastellaan Suomessa järjestettyjä ja järjestettäviä vetytalouteen liittyviä verkkokoulutuksia.

Ramboll

Ramboll järjesti vetytalouskoulutuksen etäopetuksena syksyllä 2023 ja keväällä 2024, ja se herätti laajaa kiinnostusta eri toimialoilla. Koulutukseen osallistui yli 450 henkilöä. Koulutuksen tavoitteena oli lisätä ymmärrystä vetytalouden mahdollisuuksista ja haasteista sekä edistää alan toimijoiden välistä yhteistyötä. (Ramboll s.a. c.)

Koulutus oli suunniteltu erityisesti työssäkäyville, ja se toteutettiin etäopiskeluna. Osallistujat saattoivat seurata opetustilaisuuksia reaaliajassa tai katsoa tallenteita myöhemmin Rambollin verkko-oppimisympäristössä. Koulutus kiinnosti monenlaisia yrityksiä, joista osa toimii jo vetytaloudessa ja osa vasta kartoittaa liiketoimintamahdollisuuksiaan. (Ramboll s.a. c.)

Vetytalouskoulutus toteutettiin 5 opintopisteen kurssikokonaisuuksina. Koulutusohjelmaan kuuluivat eri osa-alueisiin keskittyvät kurssit, kuten vetytalouden talous ja politiikka, hiilidioksidin talteenotto ja hyödyntäminen (CCS ja CCU), Power-to-X-teknologiat sekä vedyn jalostusprosessit. Koulutuksen rahoituksesta vastasi Jatkuvan oppimisen ja työllisyyden palvelukeskus (JOTPA). (Ramboll s.a. c.)

FITech

FITech (Finnish Institute of Technology) on vuonna 2017 perustettu tekniikan alan verkostoyliopisto, jonka tavoitteena on edistää yhteistyötä suomalaisessa insinöörikoulutuksessa ja vastata kasvualojen osaajatarpeisiin. Verkostoon kuuluvat kaikki suomalaiset tekniikan alan yliopistot, Teknologiateollisuus ry ja Tekniikan Akateemiset ry (TEK). FITech tarjoaa maksuttomia opintoja erityisesti työelämässä oleville asiantuntijoille. Suurin osa opinnoista on avoinna myös tutkinto-opiskelijoille suomalaisissa korkeakouluissa. (FITech s.a.)

FITech Hydrogen on opintokokonaisuus, joka kokoaa yhteen kaikkien suomalaisten tekniikan alan yliopistojen tarjoaman vedyn arvoketjuun liittyvän koulutustarjonnan. Opintokokonaisuudessa on tarjolla opintoja muun muassa vedyn tekniistä, taloudellisista ja poliittisista ulottuvuuksista sekä sen roolista osana energijärjestelmää. Lisäksi opinnot kattavat vedyn käytön koneissa ja energiantuotannossa, vetyjohdannaisten kemialliset tuotteet sekä elinkaarianalyysin ja vedyn geopoliittisen merkityksen. (FITech s.a.)

Vaasan AMK ja Turun AMK

Vaasan ammattikorkeakoulu ja Turun ammattikorkeakoulu järjestivät syksyllä 2024 yhteistyössä Vedyntuotanto ja vetytalouden arvoketjut -koulutuksen. Koulutus oli maksuton ja toteutettiin täysin verkossa. Opintojen kokonaislaajuus oli 30 opintopistettä, joista Vaasan AMK ja Turun AMK tarjosivat kumpikin 15 opintopistettä. Suoritetut opinnot oli mahdollista hyväksi lukea soveltuvien osien ammattikorkeakoulututkintoon. (VAMK 2023.)

Koulutuskokonaisuus koostui kuudesta viiden opintopisteen kurssista, joilla käsiteltiin vedyn arvoketjun keskeisiä osa-alueita. Opintojaksot kattoivat vedyn valmistuksen, sähköenergian tuotannon ja hankinnan, vetyliiketoiminnan ja ympäristövaikutukset, vedyn kuljetuksen ja varastoinnin, vedyn käytön sekä synteettisten polttoaineiden valmistuksen vedystä. Koulutuksen rahoituksesta vastasi Jatkuvan oppimisen ja työllisyyden palvelukeskus (JOTPA). (VAMK 2023.)

Kiwa

Kiwa tarjoaa Vety – turvallisesti tuotantoon ja käyttöön -koulutuksen, jonka tavoitteena on antaa osallistujille perusvalmiudet tunnistaa ja hallita vedyn tuotantoon, varastointiin, kuljetukseen ja käyttöön liittyviä turvallisuushaasteita. Koulutus keskittyy vedyn erityisominaisuuksiin, sääntelyyn ja turvallisuuteen sekä tuotantotekniikoihin ja niiden turvallisuusnäkökohtiin. Lisäksi koulutuksessa käsitellään vetyyn liittyviä laiteratkaisuja, materiaalivalintoja, mahdollisia vauriomekanismeja ja niiden arviointikriteerejä. (Kiwa s.a.)

Koulutus on suunnattu henkilöille, jotka vastaavat vedyn tuotannon, varastoinnin, kuljetusten, jakelun tai käytön turvallisuudesta, sekä asiantuntijoille, jotka kehittävät vetytekniikkaa ja sen sääntelyä. Koulutuksen kesto on noin 2,5 tuntia, ja siihen sisältyvät luennot sekä palautekeskustelu. Kouluttajana toimii Kiwa Inspection asiantuntija. Koulutuksen hinta on 259 euroa. (Kiwa s.a.)

Ratekoulutus

Ratekoulutus järjesti Vetypäivä-koulutuksen 24.9.2024. Vetypäivä oli yhden päivän koulutus, jossa käsiteltiin vedyn roolia ilmastotavoitteiden saavuttamisessa, vedyn erilaisia käyttötapoja sekä mahdollisuuksia vahvistaa Suomen kilpailukykyä vetytalouden keinoin. Lisäksi tarkasteltiin vetylaitosten investointiprosessia, tuotantoa sääteleviä EU-direktiivejä, vedyn siirtoinfrastruktuurin kehittämistä ja eurooppalaisen vetymarkkinan luomista. Koulutuksessa käsiteltiin myös vetyhankkeiden luvitusta, rahoituskriteerejä, etenemistä sekä niihin liittyviä riskejä. Koulutus oli suunnattu vedyn potentiaalista kiinnostuneiden yritysten ja kuntien asiantuntijoille, päättäjille ja neuvonantajille sekä viranomaisille. (Ratekoulutus s.a.)

Jyväskylän ammattikorkeakoulu ja Jyväskylän yliopisto

VetyVartti-webinaarisarja on osa EU:n osarahoittamaa Lisäarvoa uusilla vihreillä vetyteknologioilla energiantuotantoon, siirtoon ja hyödyntämiseen (gH2ADDVA) -projektia, jonka toteuttavat Jyväskylän ammattikorkeakoulu ja Jyväskylän yliopisto. VetyVartti on lyhyiden, noin 15 minuutin mittaisten webinaarien sarja, jossa käsitellään vetyyn liittyviä teemoja. Webinaarit tarjoavat tietoa vedystä eri

näkökulmista, kuten liikenne, teollisuus, turvallisuus ja tekoäly. Sarjan jaksoissa tarkastellaan myös Keski-Suomen alueellista vetypotentiaalia. Webinaarit järjestetään noin viikon tai kahden viikon välein kevään ja alkukesän 2025 aikana. (Jyväskylän ammattikorkeakoulu s.a.)

3.3 Käytetyt työkalut ja oppimisympäristö

Rambollin käyttämä verkkokoulutusympäristö, jonne koulutus rakennettiin, on Totara. Totara on avoimeen lähdekoodiin perustuva oppimisenhallintajärjestelmä (LMS, Learning Management System), joka on suunniteltu erityisesti yritysten, julkisen sektorin ja muiden organisaatioiden työelämän koulutustarpeisiin. (Totara Learning Solutions 2025.)

Totara mahdollistaa kaiken koulutussisällön keskittämisen yhdelle ja samalle alustalle, mikä tuo selkeyttä sekä koulutuksen osallistujille että koulutuksen järjestäjille. Totarassa kaikki osiot, eli esimerkiksi tekstit, tehtävät, tentit ja palautelomakkeet, voidaan integroida saumattomasti yhdelle alustalle. Verkko-opiskelija näkee yhdellä silmäyksellä, mitä hänen tulee oppia, mitä hän on jo tehnyt ja mitä on vielä tekemättä. Kouluttajan näkökulmasta Totara mahdollistaa koulutuksen hallitsemisen kokonaisuutena yhdellä alustalla. Kouluttaja voi rakentaa kurssimoduulit, lisätä oppimateriaalit ja luoda tehtävät ilman erityistä teknistä osaamista.

Koulutuksessa hyödynnettiin verkkokoulutusympäristössä saatavilla olevia H5P-työkaluja. H5P-työkaluilla voidaan luoda interaktiivisia sisältöjä verkkokoulutusympäristöön. Erilaisia sisältötyyppivaihtoehtoja on runsaasti ja sisältöjen luominen työkaluilla on helppoa eikä vaadi erityisosaamista. (H5P 2025.) Verkkokoulutuksessa käytettiin esimerkiksi "Image Hotspots" -työkalua, jonka avulla kuvaan voidaan lisätä interaktiivisia painikkeita (hotspotteja). Painikkeet voivat paljastaa tekstiä, kuvia tai videoita, kun niitä klikataan. Kuvassa 8 on esimerkki "Image Hotspots"-työkalun käytöstä verkkokoulutuksessa. Muita koulutuksessa käytettyjä H5P-työkaluja olivat esimerkiksi "Game Map" eli pelikartta, "Accordion" eli avautuva alasvetovalikko, "Drag and drop" eli raahaa ja pudota -tehtävä, "Course presentation" eli esitystyökalu sekä "Dialog cards" eli käännettävät kortit, joissa

voi olla kuvia ja tekstiä. Näiden työkalujen avulla pystytään aktivoimaan oppijaa ja jaottelemaan oppimismateriaalia sopiviksi kokonaisuuksiksi.



KUVA 8. Kuvakaappaus Image Hotspots H5P-työkalun käytöstä verkkokoulutuksessa. Pyöreistä painikkeista (hotspoteista) painamalla avautuu lisätietoa kustakin vedyn kuljetusmenetelmästä.

Verkkokoulutukseen tarvittavia kuvia ja kaavioita piirrettiin ja luotiin PowerPoint-ohjelmalla. Kuvia käytettiin esimerkiksi "Game map" ja "Image hotspot" -sisältöjen pohjina sekä havainnollistamaan koulutuksen etenemistä ja sisältöjä.

3.4 Kurssirakenteen suunnittelu ja sisältöjen tuottaminen

Verkkokoulutuksen suunnittelu ja toteutus vaatii huolellista harkintaa ja systemaattista lähestymistapaa, jotta verkko-opiskelijat voivat saavuttaa koulutuksen avulla toivotut oppimistulokset. Tässä kappaleessa käsitellään opinnäytetyössä toteutetun verkkokoulutuksen kurssirakenteen suunnittelua ja sisältöjen tuottamista.

Rambollilla oli koulutustarjonnassaan ennestään kolme kaukolämpöaiheista verkkokoulutusta (Ramboll s.a. b). Koska tässä opinnäytetyössä toteutettu verkkokoulutus tuli osaksi samaa koulutuskokonaisuutta kaukolämpöaiheisten verkkokoulutusten kanssa, työ aloitettiin tutustumalla näihin kaukolämpöaiheisiin verkkokoulutuksiin. Vetytalouskoulutuksen rakenne pyrittiin tekemään samankaltaiseksi kuin kaukolämpöaiheisissa verkkokoulutuksissa. Näin verkko-opiskelijoiden on helppo suorittaa useita koulutuksia, kun niiden toiminta ja käyttö tulee tutuksi jo ensimmäisessä koulutuksessa. Sisällöllisesti kaukolämpökoulutusten ja vetytalouskoulutuksen välille muodostettiin yhteys käsittelemällä vetytalouskoulutuksessa elektrolyysin hukkalämpöjen hyödyntämistä erityisesti kaukolämmössä.

Karjalainen (2024) on kuvannut diplomityössään Rambollin kaukolämpöaiheisten verkkokoulutusten suunnittelu- ja rakentamisprosessin. Tässä opinnäytetyössä toteutetun vetytalousaiheisen verkkokoulutuksen suunnittelemisen ja rakentamisen vaiheet ja periaatteet olivat pääpiirteittäin samat kuin kaukolämpöaiheisilla verkkokoulutuksilla. Verkkokoulutuksen sisällön rakentaminen aloitettiin tiedonhauilla ja lähteiden kartoittamisella. Lähteiden valinnassa on tärkeää, että lähteet ovat luotettavia ja tuoreita, koska vetytalous on nopeasti kehittyvä kokonaisuus ja koulutuksen asiasisällön halutaan olevan ajankohtaista.

Seuraavaksi verkkokoulutukselle suunniteltiin rakenne ja sisällön jaottelu. Vetytalous on laaja aihe. Jotta verkko-opiskelijoille muodostuisi selkeä kokonaiskuva opiskeltavasta kokonaisuudesta, aihetta päädyttiin käsittelemään vetytalouden arvoketjun kautta. Kaukolämpöaiheisten koulutusten tapaan koulutus jaettiin osioihin. Koulutuksen osioiksi nimettiin:

- Johdanto vetytalouteen
- Vedyn tuotanto elektrolyysillä
- Vedyn varastointi, kuljetus ja käyttö
- Vedyn jatkojalostus
- Vetytalouden tulevaisuuden näkymät

Koulutuksen nimeksi päätettiin ”Vetytalouden perusteet”, joka kuvaa hyvin koulutuksen tavoitetta olla vetytalousaiheeseen johdatteleva koulutus. Koulutusta

varten laadittiin kuva vetytalouden arvoketjusta ja sen vaiheista. Koulutuksen etenemistä havainnollistetaan koulutuksen jokaisen osion alussa korostamalla arvoketjukuvasta kyseisessä osiossa käsiteltävä aihe poikkeavalla värillä. Kuvassa 9 on esimerkkinä kuvakaappaus Vedyn varastointi, kuljetus ja käyttö -osion aloituskuvasta.

^ Vedyn varastointi, kuljetus ja käyttö

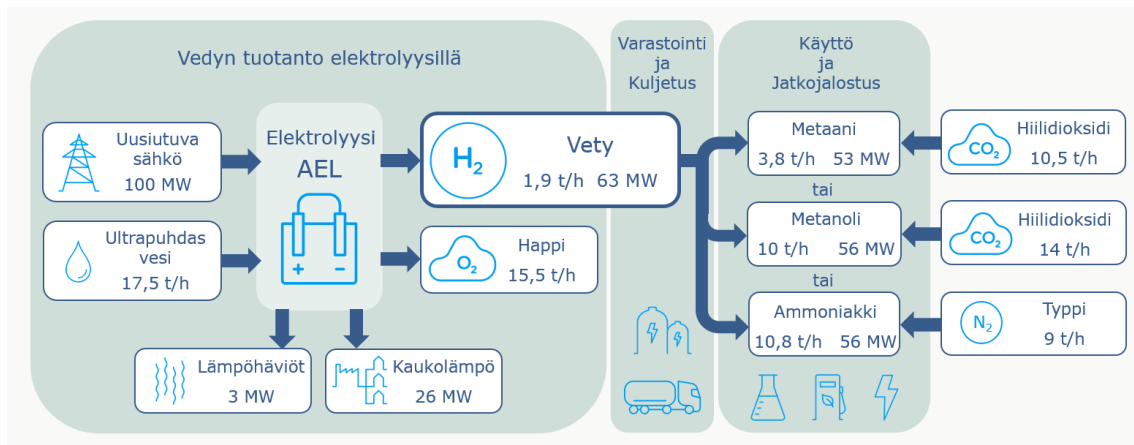


KUVA 9. Kuvakaappaus Vetytalouden perusteet -verkkokoulutuksen Vedyn varastointi, kuljetus ja käyttö -osion aloituskuvasta Rambollin verkkokoulutusympäristössä.

Verkkokoulutuksen osioiden määrittämisen jälkeen niiden rakenteita alettiin suunnitella tarkemmin ja koulutuksen teoriasisältö koostettiin yhdeksi materiaaliksi Word-dokumenttiin. Sisältöä koostettaessa suunniteltiin jo alustavasti kunkin teoriasisällön esittämiseen soveltuvia H5P-työkaluja ja muita ratkaisuja.

Verkkokoulutuksen materiaalin koostamiseen liittyi myös vetytalouden arvoketjuja kuvaavien tasekuvien tekeminen. Koulutuksessa käytettiin tasekuvia havainnollistamaan esimerkiksi vedyn ja vedyn jatkojalosteiden tuotannon lähtöaineita sekä sivu- ja lopputuotteita. Tasekuvien arvot laskettiin Excel-taulukkolaskentaohjelmalla käyttäen kemiallisten reaktioiden stoikiometrisia suhteita, lähtöaineiden ja lopputuotteiden lämpöarvoja sekä teknologioille lähteistä löydettyjä

hyötysuhteita. Excel-laskelma on esitetty liitteenä (Liite 1). Kuvassa 10 on esimerkki tasekuvasta.



KUVA 10. Esimerkki verkkokoulutusta varten tehdystä vetytalouden prosesseja kuvaavasta tasekuvasta

Kun verkkokoulutuksen kunkin osion materiaali oli saatu koottua, se siirrettiin verkko-oppimisympäristöön. Tässä vaiheessa materiaalia vielä tarvittaessa muokattiin paremmin verkko-oppimisympäristöön ja sen rakenteisiin sopivaksi. Lisäksi kiinnitettiin vielä huomiota koulutuksen osioiden sopiviin pituuksiin, jotta opiskelusta ei tule liian raskasta verkko-opiskelijalle ja opiskelua on helpompi rytmittää.

3.5 Palautteen kerääminen ja koulutuksen viimeistely

Kun ensimmäinen versio verkkokoulutuksesta oli valmis, koulutukselle järjestettiin testikäyttö. Koulutuksesta pyydettiin palautetta testikäyttäjiltä ja koulutus viimeisteltiin palautteet huomioiden. Tällä pyrittiin varmistamaan koulutuksen toimivuus, käyttäjäystävällisyys ja laatu.

3.5.1 Palautteen kerääminen

Verkkokoulutuksen testaajina oli Oulun ammattikorkeakoulun energiatekniikan tutkinto-ohjelman opiskelijoita ja opettajia. Testaajiksi valittiin opiskelijoita, jotka olivat tekemässä vetyaiheista projektia opintoihinsa kuuluvalla projektikurssilla.

Koulutusta testaamaan kutsuttiin 14 opiskelijaa ja 3 opettajaa, joista koulutuksen lopulta teki 11 opiskelijaa ja 1 opettaja.

Testaajat suorittivat verkkokoulutuksen ja vastasivat koulutuksen lopputestin yhteydessä viiteen palautekysymykseen. Palautteen keräämisellä pyrittiin saamaan kokonaisvaltainen kuva koulutuksen toimivuudesta sekä tunnistamaan kehityskohteita, joita voitaisiin hyödyntää koulutuksen viimeistelyvaiheessa. Kysymysten määrä rajattiin viiteen, jotta kysymyksiin vastaaminen ei olisi liian aikaa vievää tai kuormittavaa testaajille. Palautekysymykset olivat:

1. Vastasiko koulutuksen sisältö odotuksiasi? Jos ei, mitä puuttui? Tai oliko koulutuksessa jotain turhaa?
2. Oliko koulutuksen sisältö selkeää ja ymmärrettävää?
3. Olisiko sinulla ehdotuksia koulutuksen kehittämiseksi?
4. Minkä arvosanan antaisit koulutukselle asteikolla yhdestä viiteen?
5. Kauanko sinulla meni koulutuksen suorittamiseen?
 - Alle tunti
 - 1–2 tuntia
 - 2–3 tuntia
 - yli 3 tuntia

Ensimmäisellä kysymyksellä pyrittiin selvittämään, vastasiko verkkokoulutuksen sisältö osallistujien odotuksia ja puuttuiko koulutuksen sisällöstä mahdollisesti jostain olennaista tai oliko koulutuksen sisällössä jotain tarpeetonta. Kysymys auttoi varmistamaan, että koulutus sisältää asiat, jotka ovat oleellisia oppimistavoitteiden saavuttamiselle. Toisella kysymyksellä varmistettiin koulutuksen selkeys ja ymmärrettävyys. Selkeys ja ymmärrettävyys ovat perusedellytyksiä sille, että koulutuksen sisältö voi palvella oppimista.

Kolmannessa kysymyksessä pyydettiin kehitysehdotuksia, jotta vastaajilla oli mahdollisuus antaa konkreettisia parannusideoita koulutuksen kehittämiseksi. Neljäs kysymys antoi yleiskuvan koulutuksen onnistumisesta ja kertoi, miten testaajat kokivat koulutuksen laadun kokonaisuutena.

Viides kysymys koulutuksen suoritusajasta auttoi arvioimaan, oliko koulutuksen laajuus tavoiteltuun suoritusaikaan nähden sopiva. Ajan käyttö on erityisen tärkeä

kriteeri silloin, kun koulutus on tarkoitettu työelämässä oleville ammattilaisille, joilla on rajallisesti aikaa käytettävissään koulutuksen suorittamiseen.

3.5.2 Palautteet

Verkkokoulutuksesta saatiin hyvin palautetta sitä testanneilta henkilöiltä. Verkko-koulutuksen testikäytön palautteissa näkyi selkeä kuva koulutuksen onnistumisesta. Yleisesti testaajat kokivat, että koulutus sisälsi kaikki keskeiset asiat ja että koulutus loi laaja-alaisen ymmärryksen vetytalouden perusteista. Lisäksi koulutuksen esitystapa, jossa kuvat ja välietapit auttoivat sisällön omaksumisessa, sai kiitosta. Seuraavassa esitetään yhteenveto testikäytöllä saadusta palautteesta palautekysymyksittäin.

1. Kysymys: Vastasiko koulutuksen sisältö odotuksiasi? Jos ei, mitä puuttui? Tai oliko koulutuksessa jotain turhaa?

Lähes kaikki testaajat kokivat, että koulutuksen sisältö vastasi pääosin heidän odotuksiaan. Monet kokivat, että kaikki olennaiset asiakokonaisuudet saatiin hyvin katettua, ja osa kehui koulutuksen laajuutta ja sen tarjoamaa perustaa vetytalouden osaamiselle. Vaikka sisältöä pidettiin pääosin kattavana, eräässä kommentissa toivottiin havainnollistavia kuvia elektrolyysin ja polttokennon rakenteesta ja toimintaperiaatteista.

2. Kysymys: Oliko koulutuksen sisältö selkeää ja ymmärrettävää?"

Testaajat kokivat verkkokoulutuksen sisällön selkeäksi ja helposti ymmärrettäväksi. Koulutuksessa hyödynnetyt visuaaliset elementit ja välietapit auttoivat sisällön omaksumisessa.

3. Kysymys: Olisiko sinulla ehdotuksia koulutuksen kehittämiseksi?

Testaajilta saatiin useita kehittämissuhteita niin sisällön kuin esitystavankin kehittämiseen. Testaajat toivoivat muun muassa, että tekniset lyhenteet, kuten RFNBO (Renewable Fuels of Non-Biological Origin), avattaisiin aina niiden toistuessa, jotta opiskellessa välttyttäisiin tarpeettomalta palaamiselta aiempiin osioihin. Sisällön osalta joissakin palautteissa toivottiin lisätietoa tai syvempää

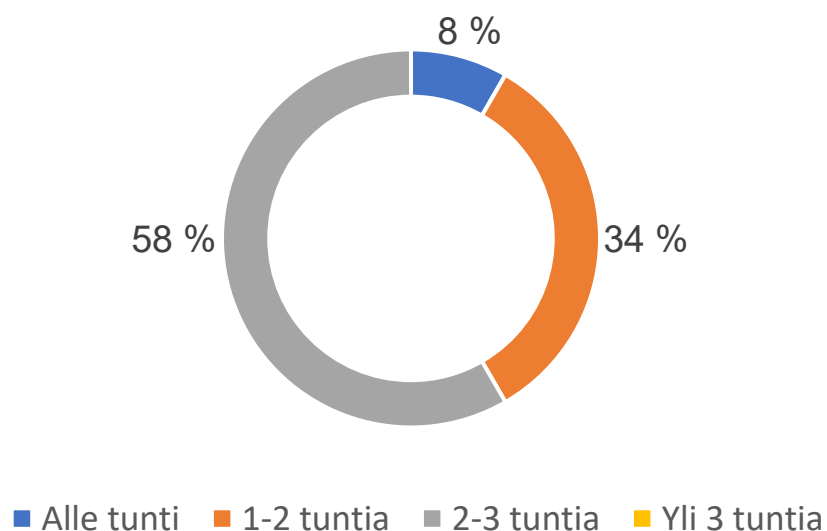
paneutumista tiettyihin aihealueisiin. Tällaisia aihealueita olivat esimerkiksi elektrolyyssiteknologiat sekä vedyn jatkojalostusprosesseissa syntyvät hukkalämmöt ja niiden hyödynnettävyys esimerkiksi kaukolämmityksessä. Koulutuksen ulkoasun osalta toivottiin joidenkin fonttikokojen suurentamista sekä opiskeluikkunoiden avautumista suurempina. Lisäksi ehdotettiin välikysymysten lisäämistä oppijan aktivoimiseksi, mutta toisaalta oli myös koettu, että kaikki tehtävät voisivat olla vasta osioiden lopussa.

4. Kysymys: Minkä arvosanan antaisit koulutukselle asteikolla yhdestä viiteen?

Kymmenen testaaajaa oli antanut verkkokoulutukselle arvosanan viisi ja kaksi testaaajaa oli antanut arvosanan neljä. Testaajien antaman arvosanan keskiarvo oli siis 4,83.

5. Kysymys: Kauanko sinulla meni koulutuksen suorittamiseen?

Kuvassa 11 on esitetty testaajien vastaukset kysymykseen, joka koski verkko-koulutuksen suorittamiseen kulutettua aikaa. Yli puolella testaajista oli kulunut koulutuksen suorittamiseen 2–3 tuntia, eikä yhdelläkään testaajalla ollut kulunut yli kolmea tuntia.



KUVA 11. Testaajien vastaukset palautekyselyn kysymykseen "Kauanko sinulla meni koulutuksen suorittamiseen?"

3.5.3 Koulutuksen viimeistely

Koulutuksen viimeistelyssä huomioitiin testikäytön perusteella saatu palaute, ja koulutuksen oppimistavoitteita tukevat ja toteutettavissa olevat kehitysehdotukset toteutettiin. Koulutuksen ulkoasun suhteen tehtiin muutoksia fonttikokoihin, jos se oli mahdollista, koska haluttiin varmistaa, että materiaali on mahdollisimman luettavaa ja käyttäjäystävällistä. Totara-oppimisympäristö asettaa teknisiä rajoitteita esimerkiksi oppimisikkunoiden koon suhteen, joten niiden muokkausmahdollisuudet olivat rajalliset.

Lisäksi lyhenteitä avattiin uudelleen, vaikka lyhenne olisikin jo aiemmin koulutuksessa esitetty, jotta opiskelijan ei tarvitsisi palata takaisin tarkistaakseen lyhenteen merkitystä. Myös koulutuksen suorittamisen liittyvät ohjeistukset käytiin vielä läpi, ja pyrittiin selkeyttämään mahdollisesti epäselviä kohtia, jotta ohjeet tukisivat sujuvaa ja itsenäistä opiskelua.

Sisällöllisesti joissakin palautteissa oli toivottu laajemmin tietoa elektrolyysitekno- logioista, mutta elektrolyysitekno- logioita käsittelevä osio päädyttiin kuitenkin pitämään ennallaan. Elektrolyysitekno- logiat ja niiden toimintaperiaatteet ovat laaja aihe, ja osio oli tarkoituksella pidetty hyvin rajattuna, jottei koulutuksen kokonais- pituus kasvaisi liian suureksi. Testaajien koulutuksen suorittamiseen käyttämän ajan perusteella koulutuksen suoritus- aika-arvio päädyttiin pitämään kahdessa tunnissa.

Palautteiden perusteella päädyttiin kuitenkin lisäämään lyhyet osiot vedyn jatko- jalostusprosesseissa syntyvästä hukkalämmöstä, ja sen käyttömahdollisuuksista, vedyn jatkojalostuksesta kertovaan osioon. Tähän päädyttiin, koska koulutusta tullaan tarjoamaan yhdessä Rambollin kaukolämpöaiheisten koulutusten kanssa, jolloin hukkalämpöjen hyödyntämismahdollisuudet todennäköisesti kiinnostavat monia koulutuksen osallistujia.

Testikäytöllä varmistettiin koulutuksen toimivuus, käyttäjäystävällisyys ja sisällön korkea laatu. Palautteen perusteella verkkokoulutuksen katsottiin vastaavan sille asetettuja tavoitteita, joten viimeistelyn jälkeen koulutus voitiin julkaista.

4 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa Ramboll Finland Oy:lle verkkokoulutus, jonka aiheena on vetytalouden perusteet. Opinnäytetyön rakenne jakautui kahteen osaan. Työn ensimmäisessä osassa käsiteltiin vetytalouden teoriaa ja merkitystä, ja työn toisessa osassa keskityttiin verkkokoulutuksen suunnittelun ja toteutuksen kuvaamiseen.

Vetytalouden perusteet -verkkokoulutus toteutettiin Totara-oppimisympäristöön ja siitä tehtiin rakenteeltaan yhdenmukainen Rambollin kaukolämpöaiheisten verkkokoulutusten kanssa. Totara-alustan etuna on mahdollisuus keskittää kaikki oppimissisällöt yhteen paikkaan, mikä helpottaa sekä oppijoiden että kouluttajien työtä. H5P-työkalujen avulla koulutukseen voitiin lisätä visuaalisia ja interaktiivisia elementtejä, jotka tukevat verkko-oppijan itsenäistä opiskelua. Testikäytöstä saatu palaute vahvisti sen, että oppijat kokivat koulutuksen sisällön selkeäksi ja oppimiskokemuksen toimivaksi.

Verkkokoulutuksen suunnittelu osoitti, että vetytalous on erittäin laaja, nopeasti kehittyvä ja monitieteinen aihealue. Verkkokoulutuksen sisällön suunnittelussa jouduttiin tekemään tietoisia rajoituksia, jotta koulutus pysyi riittävän tiiviinä. Erityisesti teknologisia yksityiskohtia, kuten elektrolyysimenetelmiä tai vedyn jatkojalostusprosesseja, olisi voitu käsitellä laajemminkin, mutta tällöin koulutuksen kokonaispituus olisi venynyt merkittävästi.

Koulutuksen testikäyttö osoittautui tärkeäksi osaksi koulutuksen kehitysprosessia. Testikäyttäjien antama palaute oli rakentavaa ja toi esiin sekä vahvuuksia että kehityskohteita. Esimerkiksi toiveet suuremmasta fonttikoosta ja teknisten lyhenteiden avaamisesta uudelleen otettiin huomioon koulutuksen viimeistelyssä. Lisäksi palautteiden perusteella koulutusta täydennettiin lyhyillä osiolla vedyn jatkojalostuksen yhteydessä syntyvistä hukkalämmöistä ja niiden hyödyntämismahdollisuuksista, mikä lisäsi koulutuksen yhteyttä Rambollin kaukolämpöaiheisiin verkkokoulutuksiin.

Vaikka Suomessa on järjestetty useita vetytalouden verkko-opintokokonaisuuksia, tässä opinnäytetyössä tuotettu koulutus erottuu edukseen lyhyenä, itsenäisesti opiskeltavana kokonaisuutena. Koulutus täyttää selkeän tarpeen tarjoamalla helposti saavutettavan ja ajantasaisen tietopaketin vetytalouden perusteista. Jatkossa vetytalouteen liittyvistä aiheista voisi tarjota myös syventäviä koulutusmoduuleja. Testikäytön palautteiden perusteella kiinnostusta voisi olla esimerkiksi vedyn tuotannon ja käytön tarkempaan käsittelyyn.

Opinnäytetyö vahvisti käsitystä siitä, että vetytalous on olennainen osa tulevaisuuden energiajärjestelmää, ja sen ymmärtäminen on entistä tärkeämpää kaikille energia-alan toimijoille.

LÄHTEET

Assunção, R., Eckl, F., Ramos, C., Correia, C. & Neto, R. 2024. Oxygen liquefaction economical value in the development of the hydrogen economy. *International journal of hydrogen energy*, 62, s.109–118. Luettavissa: Elsevier ScienceDirect. Vaatii käyttöoikeuden. Luettu: 28.2.2025.

Batteiger, V., Schmidt, P., Weindorf, W., Ebner, K., Habersetzer, A., Moser, L. & Raksha, T. 2022. Power-to-Liquids - A scalable and sustainable fuel supply perspective for aviation. German Environment Agency. München. Luettavissa: https://www.researchgate.net/publication/360561366_Power-to-Liquids_-_A_scalable_and_sustainable_fuel_supply_perspective_for_aviation

Bernuy-Lopez, C., Jøkladal, S., Silva, H., Nielsen E.R. & Krasowski, E. 2024. Water electrolysis. Teoksessa Danish Energy Agency (toim.). *Renewable fuels: Technology descriptions and projections for long-term energy system planning*. s. 22–53. Kööpenhamina. Luettavissa: <https://ens.dk/en/analyses-and-statistics/technology-data-renewable-fuels>. Luettu: 9.4.2025.

Böhm, H., Moser, S., Puschnigg, S. & Zauner, A. 2021. Power-to-hydrogen & district heating: Technology-based and infrastructure-oriented analysis of (future) sector coupling potentials. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 4, s. 31938–31951.

Energiateollisuus ry 2025. Energiavuosi 2024 Sähkö, Sähkön ennakkotiedot 2024. Luettavissa: https://energia.fi/wp-content/uploads/2025/01/Sahkovuosi-2024_20250115.pptx. Luettu: 14.2.2025.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2023/2413, annettu 18 päivänä lokakuuta 2023, direktiivin (EU) 2018/2001, asetuksen (EU) 2018/1999 ja direktiivin 98/70/EY muuttamisesta uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisen osalta sekä neuvoston direktiivin (EU) 2015/652 kumoamisesta. Euroopan unionin virallinen lehti 31.10.2023. Luettavissa: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202302413. Luettu: 6.11.2024.

European Commission s.a. a. ReFuelEU Aviation. Luettavissa: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/environment/refueleu-aviation_en. Luettu: 4.4.2025.

European Commission s.a. b. Hydrogen. Luettavissa: https://energy.ec.europa.eu/topics/eus-energy-system/hydrogen_en. Luettu: 18.4.2025.

European Hydrogen Observatory s.a. Scenarios for future hydrogen demand. Luettavissa: <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/tools-reports/scenarios-future-hydrogen-demand>. Luettu: 6.11.2024.

FITech s.a. Opiskele vetytalouden asiantuntijaksi. Luettavissa: https://www.esitteemme.fi/fitech_h2/WebView/. Luettu: 27.3.2025.

Gasgrid Finland Oy 2025. Suomesta maailman houkuttelevin vetytalousmaa. Luettavissa: <https://gasgrid.fi/kehitys/suomesta-maailman-houkuttelevin-vetytalousmaa/#kehityshankkeet>. Luettu: 27.3.2025.

H5P 2025. Examples and Downloads. Luettavissa: <https://h5p.org/content-types-and-applications>. Luettu: 3.4.2025.

Hydrogen Cluster Finland 2023. Clean hydrogen economy strategy for Finland. Luettavissa: <https://h2cluster.fi/wp-content/uploads/2023/06/H2C-H2-Strategy-for-Finland.pdf>. Luettu: 1.11.2024.

IEA 2019. The Future of Hydrogen, Seizing today's opportunities. Luettavissa: https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf. Luettu: 27.3.2025.

IEA 2023. Global Hydrogen Review 2023. Luettavissa: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ecdfc3bb-d212-4a4c-9ff7-6ce5b1e19cef/GlobalHydrogenReview2023.pdf>. Luettu: 1.11.2024.

IEA 2024. Global Hydrogen Review 2024. Luettavissa: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/89c1e382-dc59-46ca-aa47-9f7d41531ab5/GlobalHydrogenReview2024.pdf>. Luettu: 27.3.2025.

IEA s.a. Electrolysers. Luettavissa: <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/electrolysers#tracking>. Luettu: 6.11.2024.

IRENA 2022. Geopolitics of the Energy Transformation, The Hydrogen Factor. Luettavissa: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jan/IRENA_Geopolitics_Hydrogen_2022.pdf?rev=1cfe49eee979409686f101ce24ffd71a. Luettu: 6.11.2024.

Jyväskylän ammattikorkeakoulu s.a. VetyVartti: Perustietoa vedystä. Luettavissa: <https://www.jamk.fi/fi/tapahtuma/vetyvartti-perustietoa-vedysta>. Luettu: 31.3.2025.

Kiwa s.a. Koulutus: Vety - turvallisesti tuotantoon ja käyttöön. Luettavissa: <https://www.kiwa.com/fi/fi/palvelumme2/koulutus/etakoulutus-vety--turvallisesti-tuotantoon-ja-kayttoon/>. Luettu: 27.3.2025.

Komission delegoitu asetus (EU) 2023/1184, annettu 10 päivänä helmikuuta 2023, Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin (EU) 2018/2001 täydentämisestä ottamalla käyttöön unionin menetelmä, jossa vahvistetaan muuta kuin biologista alkuperää olevien uusiutuvien nestemäisten ja kaasumaisten liikenteen polttoaineiden tuotantoa koskevat yksityiskohtaiset säännöt. Euroopan unionin virallinen lehti 20.6.2023. Luettavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1184>. Luettu 6.11.2024.

Nemmour, A., Inayat, A., Janajreh, I. & Ghenai, C. 2023. Green hydrogen-based E-fuels (E-methane, E-methanol, E-ammonia) to support clean energy transition: A literature review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48, 75, s. 29011–29033. Luettavissa: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.240>. Vaatii käyttöoikeuden. Luettu: 8.4.2025.

Ramboll 2024. Vety- ja Power-to-X-hankkeet, kaavoittajan ja hanketoimijan käsikirja. Luettavissa: https://greenreality.loopy.fi/sites/default/files/2024-06/Kaavoittajan_kasikirja.pdf. Luettu: 1.11.2024.

Ramboll 2025. Ramboll yrityksenä. Luettavissa: <https://www.ramboll.com/fi/fi/ramboll-yrityksena>. Luettu: 18.4.2025.

Ramboll s.a. a. Ramboll koulutukset. Luettavissa: <https://courses.digitaledu.ramboll.fi/>. Luettu: 18.4.2025.

Ramboll s.a. b. Kaukolämpö – koulutuskokonaisuus kaukolämpöalalla työskenteleville. Luettavissa: <https://courses.digitaledu.ramboll.fi/courses/kaukolampo-koulutuskokonaisuus-kaukolampoalalla-tyoskenteleville/>. Luettu: 3.4.2025

Ramboll s.a. c. Vetytalous: Suositettu koulutus rohkaisi uusien ekosysteemien syntyä. Luettavissa: <https://digitaledu.ramboll.fi/ajankohtaista/vetytalous-suositettu-koulutus-rohkaisi-uusien-ekosysteemien-syntya/>. Luettu: 27.3.2025.

Ratekoulutus s.a. Vetypäivä -koulutus (1 pv). Luettavissa: <https://www.ratekoulutus.fi/koulutus/vetypaiva-koulutus-1-pv/>. Luettu: 31.3.2025

Reddy, V. J., Hariram, N. P., Maity, R., Ghazali, M. F. & Kumarasamy, S. 2023. Sustainable E-Fuels: Green Hydrogen, Methanol and Ammonia for Carbon-Neutral Transportation. *World Electric Vehicle Journal*, 14, 12, s. 1–29. Luettavissa: <https://doi.org/10.3390/wevj14120349>. Luettu: 8.4.2025.

Rieksta, M., Zarins, E. & Bazbauers, G. 2023. Potential Role of Green Hydrogen in Decarbonization of District Heating Systems: A Review. *Environmental and Climate Technologies*, 27, 1, s. 545–558.

The Engineering ToolBox 2003. Higher Calorific Values of Common Fuels: Reference & Data. Luettavissa: https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html. Luettu: 27.3.2025.

Totara Learning Solutions 2025. Your LMS. Your way. Luettavissa: <https://www.totara.com/>. Luettu: 3.4.2025.

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024. Vedyn käsittelyn ja varastoinnin turvallisuus. Luettavissa: <https://tukes.fi/vedyn-kasittelyn-ja-varastoinnin-turvallisuus>. Luettu: 1.11.2024.

VAMK 2023. Vetytalous tulee – VAMK ja Turun AMK kouluttavat vetyteknologian osaajia. Luettavissa: <https://www.vamk.fi/ajankohtaista/vetytalous-tulee-vamk-ja-turun-amk-kouluttavat-vetyteknologian-osaajia>. Luettu: 27.3.2025.

LIITTEET

Liite 1 Vetytalouden taseiden laskentataulukko

LIITE 1

VETYTALOUDEN TASEIDEN LASKENTATAULUKKO

	M (g/mol)
CH ₄	16
H ₂	2
CO ₂	44

3600 MJ/MWh

	LHV [MJ/kg]	LHV [MWh/kg]
Vety	120,0	0,0333333
Metaani	50,0	0,0138889
Metanoli	19,9	0,0055278
Ammoniakki	18,8	0,0052222

Elektrolyysiteknologia	Sähkö [MW]	Vesi [kg/h]	Vety [kg/h]	Happi [kg/h]	Lämpöhäviöt [MW]	Kaukolämpö [MW]
AEL	10	1 750	194	1555	0,3	2,6
	100	17 496	1944	15552	3	26,4
PEM	10	1 671	186	1486	0,3	3,1
	100	16 712	1857	14855	3	30,7
SOEC	10	2 282	254	2029	1,7	-
	100	22 821	2536	20285	17,1	-

Elektrolyysiteknologia	Sähkö [MW]	Metaani [kg/h]	CO ₂ [kg/h]	Metanoli [kg/h]	CO ₂ [kg/h]	Ammoniakki [kg/h]	Typpi [kg/h]
AEL	10	389	1069	1023	1432	1080	906
	100	3888	10692	10232	14324	10800	9061
PEM	10	371	1021	977	1368	1032	866
	100	3714	10213	9773	13683	10316	8655
SOEC	10	507	1395	1335	1868	1409	1182
	100	5071	13946	13346	18684	14087	11819

AEL 100 MW	
	MW
Vety	63
Metaani	53
Metanoli	56
Ammoniakki	56