

Vedyntuotannon yksinkertaistettu kustannusmallinnus

Eero Hirvijoki

Aalto-yliopisto

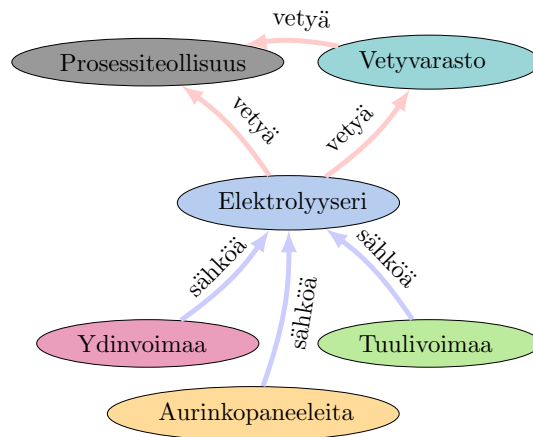
Tiivistelmä

Vety on otsikoissa ympäri maailman ja siitä odotetaan fossiilisten polttoaineiden korvaajaa vaikeasti sähköistettäviin kohteisiin. Maailman pyöriessä talouden rattaiden mukana jokainen käytetty euro lasjetaan tarkkaan. Kuinka vedyn hinta siis muodostuu ja mitkä tekijät siihen vaikuttavat? Tätä avataan oheisessa tekstissä.

Vety on energian kantaja sekä teollisuuden raaka-aine, jota tällä hetkellä kaavaillaan merkittäväksi komponentiksi siirryttäessä fossiiliperäisistä energialähteistä vähähiilisiin vaihtoehtoihin. Ensisijaiset vedyn käyttökohteet ovat prosessiteollisuudessa, jossa kysynnän voi olettaa jossain määrin heijastelevan kunkin teollisuudenalan omien suhdanteiden kulkua, mutta olevan pitkälti tasaista: prosessiteollisuus yleisesti toimii jatkuvasti, eikä juurikaan vaihtelee voimakkaasti esimerkiksi vuoden- tai vuorokaudenaikojen mukaisesti. Toisaalta tasaisesta kysynnästä voidaan tarvittaessa joustaa, mikäli hetkelliset kustannukset nousevat liian korkeiksi. Vedylle kaavaillun merkittävän roolin sekä sen kysynnän mahdollisen joustavuuden tai joustamattomuuden vuoksi vedyntuotannon tarkat analyysit tulisi toteuttaa kattavalla energiajärjestelmämallilla, joka integroi yhteen sähkön-, vedyn- ja lämmöntarpeen sekä näiden mahdollisen yhteistuotannon. Yleisesti tällaiset mallit perustuvat kokonaiskustannusten minimointiin ja ehdottavat asennettavia kapasiteetteja eri teknologioille sähkön, lämmön ja vedyn kysyntään vastaamiseksi vuoden jokaisena tuntina.

Kattavat energiajärjestelmämallit ovat kuitenkin suhteellisen raskaita simuloitavia, eikä niitä tai niiden käyttämiseen vaadittavaa ammattitaitoa ole yleisesti saatavilla tutkijayhteisöjen ulkopuolelle. Julkisuudessa käydyt keskustelut vedyntuotannosta ja sen kustannuksista keskittyvätkin elektrolyysissä käytettävän sähkön tuotantokustannuksiin. Näin yksinkertaistetuissa keskusteluissa kuitenkin unohtuu ensisijaisen käyttökohteen eli prosessiteollisuuden suhteellisen tasainen vedyn tarve, vedyn tuotannossa tarvittavan elektrolyysin kustannukset, sekä mahdolliset varastoinnin kustannukset eli komponentit, joilla haluttu vedyn saatavuus voidaan varmistaa myös vaihtelevia sähköntuotantomuotoja hyödynnettäessä.

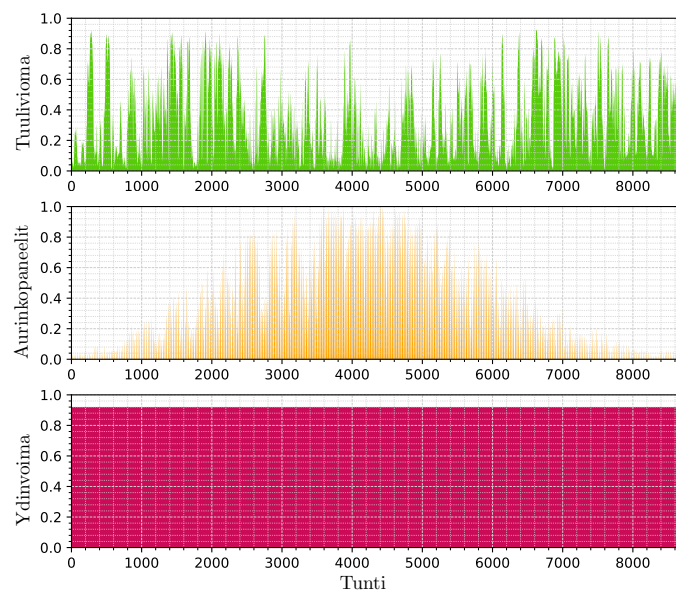
Sähkön tuotantokustannuksen ja raskaiden simulointimallien välimaastoon päästään onneksi suhteellisen pienellä vaivalla, jolloin myös yleistä keskustelua vedyn tuotannosta voidaan kehittää realistisempaan suuntaan. Voimme tarkastella esimerkiksi kuvan 1 järjestelmää, jossa vetyä kulutetaan prosessiteollisuudessa, tuotetaan elektrolyysillä puhtaalla sähköllä ja varastoidaan tarpeen vaatiessa. Asettamalla prosessiteollisuudessa tarvittavalle vedylle tuntikohtainen kysyntäprofiili, sekä ydinvoimalle, tuulivoimalle ja aurinkopaneelille tunneittainen kapasiteettikerroin, voidaan koko järjestelmän toiminta



Kuva 1: Vedyn tuotanto ja käyttö yksinkertaistetussa mallissa.

kuvata kokonaistuotantokustannuksen minimointitehtävänä. Tehtävän ratkaisuna saadaan tuotettavan vedyn hinta sekä kunkin teknologian asennettavat kapasiteetit ja tunneittainen käyttö. Yksi mahdollinen tällaisen mallin matemaattinen kuvaus on esitelty Liitteessä A.

Lähdetään selvittämään kuvan 1 vetyjärjestelmän toimintaa. Valitaan tuulle ja aurinkopaneeleille tunneittaisiksi saatavuuskertoimiksi Suomen vuoden 2019 tuntikohtaiset toteutumat ja ydinvoimalle tasainen saatavuusprofiili kapasiteettikertoimella 0.92. Nämä on esitelty kuvassa 2. Valitaan investointi- ja operointikustannukset sekä teknologioiden elinajat ja korkotasot taulukkoon 1 mukailleen kirjallisuuslähteitä [1, 2, 3, 4]. Oletetaan vedyn polttoarvoksi 121 MJ/kg ja elektrolyysin hyötysuhteeksi noin 0.66. Näin jokaista elektrolyysillä tuotettua vetykiloa kohden tarvitaan noin 50 kWh sähköä.

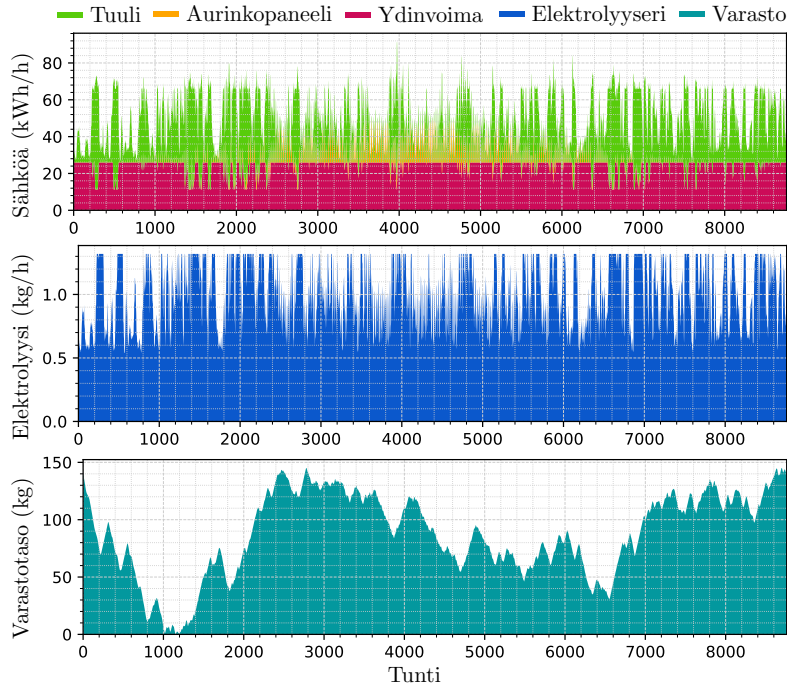


Kuva 2: Tuulen, aurinkopaneelien ja ydinvoiman oletetut tunneittaiset kapasiteettikertoimet.

	CAPEX	OPEX	POLTTOAINE	N	r
Ydin	5000 €/kW	90 €/kW	0.01 €/kWh	60	0.05
Tuuli	1200 €/kW	25 €/kW	–	25	0.05
PV	700 €/kW	10 €/kW	–	30	0.05
Elektrolyyseri	800 €/kW	40 €/kW	–	25	0.05
H ₂ varasto	130 €/kg	0 €/kg	–	40	0.05

Taulukko 1: “Overnight”-investointikustannukset (CAPEX), kiinteät operointikustannukset (OPEX), polttoainekustannukset, elinikä (N) ja korkotaso (r).

Tarkastellaan tilannetta, jossa prosessiteollisuuden vedyn tarve olisi läpi vuoden tasainen yksi kilo tunnissa. Oletetaan ydinvoimaloita voitavan säätää ylös ja alas 5% asennetusta kapasiteetista yhden tunnin aikana ja tehon minimitasoksi 40%. Nämä arvot ovat linjassa esimerkiksi Olkiluodon EPR-tyyppisen reaktorin kanssa [5, 6]. Oletetaan tuuli- ja aurinkovoiman olevan säädettävää tunneittaiseen saatavuuskertoimeen asti. Syötetään kuvan 2 aikasarjat ja taulukon 1 kustannusolettamat sisään matemaattiseen optimointimalliin ja käännetään kammesta. Algoritmi löytää kustannusoptimin, jossa tunneittainen sähköntuotanto, vedyntuotanto ja varaston taso käyttäytyvät kuvan 3 tavoin. Järjestelmään asennettaisiin kapasiteetteina ydinvoimaa 28 kW, tuulivoimaa 67 kW, aurinkopaneeleita 23 kW, elektrolyyserikapasiteettia 66 kW ja vetyvarastoa 145 kg. Tuotetun vedyn hinnaksi muodostuisi 3.23 €/kg.



Kuva 3: Sähköntuotanto, elektrolyyserin operointi ja vetyvaraston taso kuvan 2 saatavuuskertoimilla ja taulukon 1 kustannusolettamilla, kun vedyntarve on 1 kg/h ympäri vuoden.

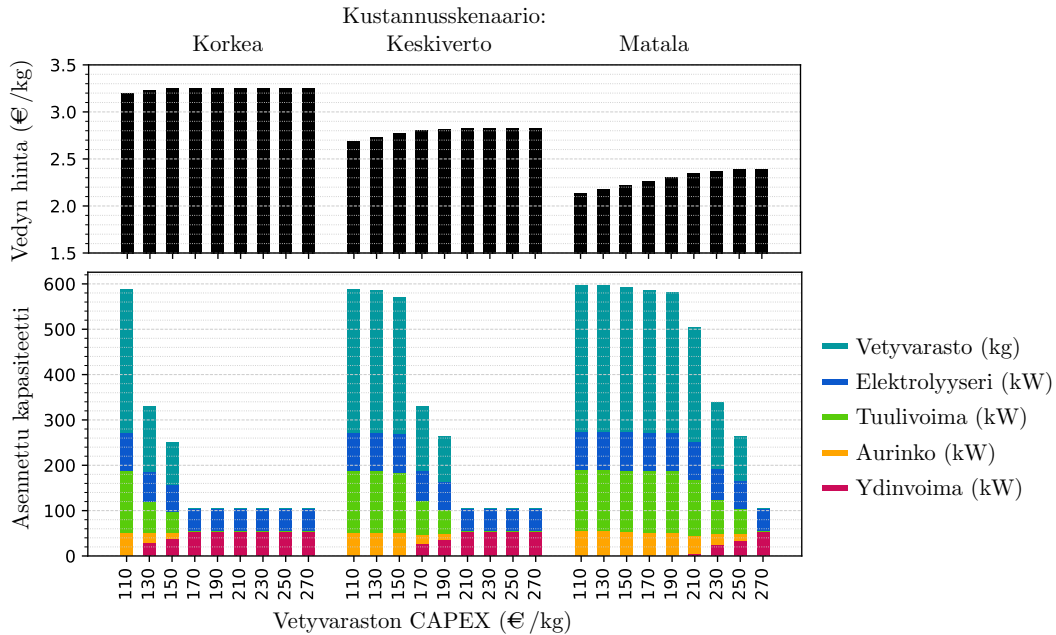
Edellinen tilanne kuvaa vain yhden esimerkin. Muuttamalla kustannusoletuksia tai eri teknologioiden tunneittaisia kapasiteettikertoimia, muuttuvat niin optimiportfolioon asennetut kapasiteetit kuin tuotetun vedyn hintakin. Tämä seikka usein unohtuu julkisesta keskustelusta. Optimiportfolio voi olla herkkä käytetyille kustannusoletuksille, joihin liittyy aina epävarmuutta, joskus suurtakin.

Tarkastellaan seuraavaksi investointikustannusten vaikutusta optimaaliseen teknologiaportfolioon. Oletetaan, että operointikustannukset, elinajat ja korjotat säilyvät samana kuin taulukossa 1. Käytetään investoinneille kolmea suuntaa antavaa kustannustasoa [1, 2, 4], jotka löytyvät listattuna taulukosta 2. Vetyvaraston investointikustannukselle pyrimme löytämään sellaisen kus-

	Korkea	Keskiverto	Matala
Ydinvoima	5000 €/kW	4000 €/kW	3000 €/kW
Tuulivoima	1200 €/kW	960 €/kW	720 €/kW
Aurinkopaneeli	700 €/kW	500 €/kW	200 €/kW
Elektrolyyseri	800 €/kW	550 €/kW	300 €/kW

Taulukko 2: “Overnight” CAPEX-arvoja eri kustannusskenaarioissa.

tannushaarukan, jolla teknologioiden asennetut kapasiteetit muuttuvat ääri-laidasta toiseen. Simulointien jälkeen voidaan kuvan 4 perusteella arvioida, että varastoinnin investointikustannusväli 110–270 €/kg antaa maksimaalisen vaihteluvälin asennettaville kapasiteeteille taulukon 2 kustannusskenaarioissa. Kuvan 4 mukaan tämä tarkoittaisi tehtyjen oletusten pohjalta, että varastoin-



Kuva 4: Asennettujen kapasiteettien ja vedyn hinnan riippuvuus varastoinnin kustannuksista taulukon 2 kustannusolettamilla ja vedyn tarpeella 1 kg/h.

tikustannuksen ylittäessä 270 €/kg, edullisin tapa tuottaa vetyä olisi asentaa pelkkää ydinvoimaa. Varastoinnin kustannuksen jäädessä alle 110 €/kg, kaikki sähkö tuotettaisiin puolestaan tuuli- ja aurinkovoimalla. Havainto pätee riippumatta siitä, tarkastellaanko taulukon 2 korkeiden, keskivertojen vai matalien investointikustannusten skenaariota. Tuoreet ennusteet vedyn laajamittaisen varastoinnin investointikustannuksille riippuvat teknologiasta: 1900 €/kg nesteytettynä varastointi, 770 €/kg paineistettuna maan päällä varastointi, 80 €/kg luonnolliseen suolaesiintymäluolaan varastointi [3]. Halutessasi voit tarkastella kustannusparametrien vaikutusta ajamalla simulaatioita myös itse. Lähdekoodi esitettyjen laskujen tekemiseen on avoimesti saatavilla [7].

Toistaiseksi maailmalla on asennettuna varsin rajoitettu kapasiteetti puhdasta vedyn tuotantoa. Kapasiteetti tulee kuitenkin lisääntymään, joka samalla lisää keskustelua vedyn hinnasta ja optimaalisista tavoista sen tuottamiseksi. Esitettyjen esimerkkien perusteella vedyntuotantoa pohdiskellessa tulisi pitää mielessä vähintään käyttökohteen tarpeet sekä tuotantoteknologioiden kustannusparametrien vaikutus. Saattaa olla, että esimerkiksi vedyn varastoinnin hintakehitys ohjaa elektrolyyserille tarvittavan sähkön tuotantoa enemmän tai vähemmän ydinvoiman tai tuulivoiman suuntaan, pienten kausivaihtelun maissa varsin todennäköisesti myös aurinkosähkön suuntaan. On myös selvää, että sähkön tuotantomuotojen ja elektrolyyserien investointikustannuksilla on merkitystä muodostuvaan optimiportfolioon sekä vedyn hintaan. Ensisijainen lähestymistapa yhteiskunnallisessa vetykeskustelussa tulisikin olla teknologia-neutraali ja koko systeemiä tarkasteleva.

Viitteet

- [1] Joint Research Centre et al. *Energy Technology Reference Indicator (ET-RI) projections for 2010-2050*. Publications Office, 2014. DOI: [doi/10.2790/057687](https://doi.org/10.2790/057687).
- [2] International Energy Agency. *Projected Costs of Generating Electricity 2020*. Paris: IEA, 2020. URL: <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>.
- [3] Zainul Abidin, Kaveh Khalilpour ja Kylie Catchpole. “Projecting the levelized cost of large scale hydrogen storage for stationary applications”. *Energy Conversion and Management* 270 (2022), s. 116241. ISSN: 0196-8904. DOI: [10.1016/j.enconman.2022.116241](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116241).
- [4] Arman Aghahosseini et al. “Energy system transition pathways to meet the global electricity demand for ambitious climate targets and cost competitiveness”. *Applied Energy* 331 (2023), s. 120401. ISSN: 0306-2619. DOI: [10.1016/j.apenergy.2022.120401](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120401).
- [5] Nuclear Energy Agency. *Technical and Economic Aspects of Load Following with Nuclear Power Plants*. Paris: OECD Publishing, 2011. URL: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_62445/technical-and-economic-aspects-of-load-following-with-nuclear-power-plants.

- [6] International Atomic Energy Agency. *Non-baseload Operation in Nuclear Power Plants: Load Following and Frequency Control Modes of Flexible Operation*. Nuclear Energy Series NP-T-3.23. Vienna: IAEA, 2018. ISBN: 978-92-0-110816-6. URL: <https://www.iaea.org/publications/11104/non-baseload-operation-in-nuclear-power-plants-load-following-and-frequency-control-modes-of-flexible-operation>.
- [7] Eero Hirvijoki. *A simple linear model for evaluating levelized cost of hydrogen*. <https://version.aalto.fi/gitlab/ehirviyo/simple-hydrogen-cost-modelling>. 2022.

A Yksinkertaistetun vedyntuotantomallin matemaattinen kuvaus

Tarkastellaan vedyn tuotantoon tähtäävää eristettyä energiajärjestelmää, joka sisältää seuraavat komponentit:

- Voimalaitoksia sähköntuotantoon
- Elektrolyyseri
- Vetyvarasto

Oletetaan, että näillä komponenteilla pyritään tuottamaan vetyä halutun tunneittaisen kysyntäprofiilin mukaan. Tehtävänä on selvittää, kuinka suuri kapasiteetti sähköntuotannon voimalaitoksia, elektrolyysereitä ja vetyvarastoa tarvitaan vedyn kysyntään vastaamiseksi ja kokonaiskustannusten minimoimiseksi. Mallin kuvaamista varten taulukkoon 3 on listattu oleellisia lyhenteitä ja näiden selityksiä.

Lyhenne	Selite
$CAPEX_t$	Teknologian t "overnight" investointikustannus
$OPEX_t$	Teknologian t kiinteä operointikustannus
$FUEL_t$	Teknologian t polttoainekustannus
$G_{t,h}$	Teknologian t tunneittainen sähkön generointi
$f_{t,h}$	Teknologian t tunneittainen saatavuuskerroin
$f_{t,up}$	Teknologian t ramp-up nopeus
$f_{t,down}$	Teknologian t ramp-down nopeus
$f_{t,min}$	Teknologian t minimi tehotaso
S_h	Vetyvaraston tunneittainen taso
E_h	Elektrolyyserin tunneittainen vedyn tuotanto
P_t	Teknologian t asennettu kapasiteetti
R_t	Teknologian t investointikustannuksen korko
D_h	Tunneittainen vedyn tarve
α	Muuntokerroin sähköenergiasta massaksi vetyä

Taulukko 3: Symbolien lyhenteet

Tutkittavan järjestelmän kokonaiskustannuksia voidaan arvioida laskemalla yhteen eri teknologioiden t vuosittaiset investointikustannukset, operointikustannukset sekä tunneittain h syntyvät polttoainekulut. Minimoitavaksi kustannusfunktioksi saadaan siis

$$C = \sum_t (CAPEX_t R_t + OPEX_t) P_t + \sum_t FUEL_t \sum_h G_{t,h}. \quad (1)$$

Kustannusfunktiossa tarvittava diskonttaustekijä lasketaan yhtälöllä

$$R_t = \frac{r_t(1+r_t)^{N_t}}{(1+r_t)^{N_t} - 1}, \quad (2)$$

jossa N_t kuvaa teknologian t elinkaariolettamaa ja r_t investoinnin korkoa. Kokonaiskustannusfunktion C lisäksi mallintamiseen tarvitaan järjestelmän toimintaa kuvaavat reunaehdot.

Tarkastellussa systeemissä ensimmäinen reunaehto liittyy vedyn tarpeeseen tunneittain:

$$E_h + S_{h-1} - S_h \geq D_h \quad \forall h \quad (3)$$

Elektrolyyserissä tapahtuvaa vedyn tuotantoa E_h on tarvittaessa pystyttävä tasapainottamaan varastosta S_h saatavalla vedyllä ja lopputuotannon on vastattava kysyntään D_h joka ainoana vuoden tuntina h . Toinen reunaehto liittyy elektrolyyserin toimintaan tarvittavaan sähköntuotantoon:

$$\alpha \sum_t G_{t,h} \geq E_h \quad \forall h \quad (4)$$

$$E_h \leq P_{\text{elektrolyyseri}} \quad \forall h \quad (5)$$

$$E_h \geq 0 \quad \forall h \quad (6)$$

Jokaisena tuntina elektrolyyserin tarvitsema sähkömäärä on pystyttävä tuottamaan voimalaitoksissa ja toisaalta elektrolyyserin hetkellinen tuotanto ei voi ylittää asennettua kapasiteettia. Viimeistä edellinen reunaehto liittyy sähkön tuotannon rajoituksiin ja saatavuuteen:

$$G_{t,h} \leq f_{t,h} P_t \quad \forall t, h \quad (7)$$

$$G_{t,h} \geq f_{t,\min} P_t \quad \forall t, h \quad (8)$$

$$G_{t,h} - G_{t,h-1} \leq f_{t,\text{up}} P_t \quad \forall t, h \quad (9)$$

$$G_{t,h-1} - G_{t,h} \leq f_{t,\text{down}} P_t \quad \forall t, h \quad (10)$$

Hetkellisesti saatavissa oleva tuotanto ei voi ylittää tarkastellun teknologian asennetusta kapasiteetista laskettua hetkellistä saatavuutta. Saatavuutta esimerkiksi tuuli- ja aurinkosähkön kohdalla rajoittavat sääolot ja ydinvoiman kohdalla ennalta suunnitellut ja suunnittelemattomat huoltokatkot. Lisäksi säästä riippumattomien voimalaitosten ylös- ja alassäätöä voivat rajoittaa laitojen tekniset ominaisuudet. Viimeinen rajoite varmistaa, että varaston taso ei ylitä varaston kapasiteettia:

$$S_h \leq P_{\text{varasto}} \quad \forall h \quad (11)$$

$$S_h \geq 0 \quad \forall h \quad (12)$$

Näin muotoiltuna alkuperäinen kysymys voidaan esittää lineaarisena optimointitehtävänä, jossa optimoitavina muuttujina ovat asennetut kapasiteetit P_t , voimalaitoksissa tunneittain tuotetut sähkötehot $G_{t,h}$, sekä elektrolyyserin E_h ja vetyvaraston S_h tunneittaiset tilat.