



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Tämä on alkuperäisen artikkelin rinnakkaistallenne (kustantajan versio).

Viite:

Manninen, V., Laasasenaho, K., & Spoof-Tuomi, K. (2024). Vihreän vedyn ja ammoniakin tuotannon vaikutukset ympäristöön ja huoltovarmuuteen. *Ympäristö ja terveys*, 55(2), 64–70.



Vihreän vedyn ja ammoniakkin tuotannon vaikutukset ympäristöön ja huoltovarmuuteen

Suomessa on hyvät mahdollisuudet edistää vihreän vedyn tuotantoa ja jalostamista, koska täällä on tarjolla runsaasti uusiutuvan energian tuotantokapasiteettia. Suotuisa toimintakenttä on saanut vauhtia moniin vihreän vedyn investointeihin, varsinkin rannikkokaupungeissa. Laajamittainen vetytalous on kuitenkin uutta, joten siihen liittyvät ympäristövaikutukset eivät ole kaikilta osin tiedossa. Toisaalta vetyperusteisten tuotteiden, kuten ammoniakkin uudet jalostusreitit ovat vasta kehityksessä, mikä tekee eri teknologioiden ympäristövaikutusten vertailusta haasteellista. Vihreän vedyn tuotanto ja jalostaminen eivät ole täysin päästöttömiä toimenpiteitä, vaikka niiden potentiaalista vähentää ilmastovaikutuksia puhutaan paljon. Ympäristövaikutuksiin on syytä tutustua huolella ennen investointipäätöksiä ja tunnistaa siihen liittyviä riskejä.

Ammoniakista suurin osa käytetään lannoitteiksi

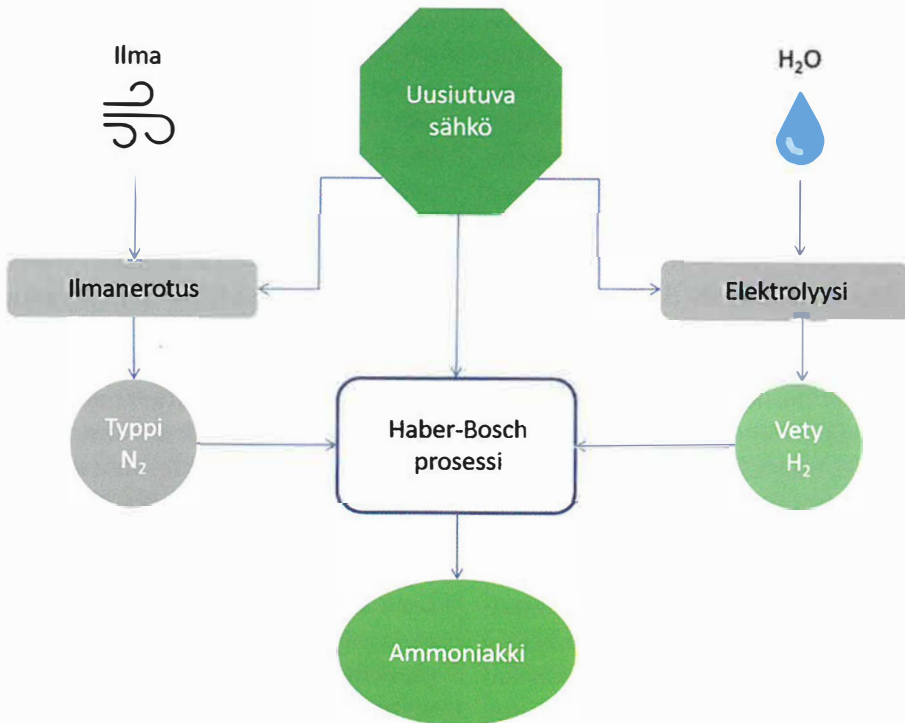
Ammoniakki on yksi tuotetuimmista synteettisistä kemikaaleista maailmassa (Pattabathula & Richardson, 2016). Noin 70 % ammoniakista käytetään lannoitteiden valmistukseen, mutta sitä hyödynnetään myös esimerkiksi räjähdeseineiden valmistuksessa, tekstiiliteollisuudessa ja metallurgiassa (Zumdahl, 2023; IEA, 2021). Ammoniakin tuotantoon tarvitaan vetyä, jonka pääasiallisena raaka-aineena käytetään maakaasua. Vedyn tuotanto maakaasusta aiheuttaa huomattavia hiilidioksidipäästöjä, jotka ovat ilmaston lämpenemisen kannalta merkittävä ongelma. Näin ollen käytetyn vedyn tuotannon ympäristövaikutuksilla on suuri vaikutus ammoniakkin ympäristövaikutuksiin.

Ammoniakkia valmistetaan Haber-Boschmenetelmällä vedystä ja typestä korkean lämpötilan ja paineen avulla (Pattabathula & Richardson, 2016). Prosessin tärkeimmän raaka-aineen, vedyn, tuottamiseen on monia erilaisia tekniikoita, mutta yksi selvästi yleisimmistä on maakaasun höyryreformointi (Steam Methane Reforming). SMR-prosessin kautta tuotetusta vedystä valmistetaan hieman yli 70 % kaikesta maailmassa tuotetusta ammoniakista (IEA, 2021). SMR-prosessissa itsessään syntyvän hiilidioksidin lisäksi kasvihuonekaasuja voi syntyä esimerkiksi prosessissa tarvittavan energian tuotannossa. Mikäli maakaasua käytetään raaka-aineen lisäksi myös polttoaineena, sitä kuluu tyypillisesti koko prosessissa noin 30–40 % polttoaineena ja 60–70 % raaka-aineena (IEA, 2019).

Euroopassa tuotetaan suurin osa typpilannoitteiden valmistamiseen tarvittavasta ammoniakista, mutta ammoniakkia myös

tuodaan Eurooppaan (Niskanen, 2022). EU-maiden ammoniakin tuotantokapasiteetti on noin 22 miljoonaa tonnia, kun tuonti on ollut noin 2–3 miljoonaa tonnia. Kuitenkin ammoniakin valmistukseen tarvittavasta vedystä suurin osa täytyy tuoda EU:n ulkopuolelta, koska omaa tuotantoa ei merkittävästi ole. Näin ollen Euroopan ammoniakin ja sitä kautta typpilannoitteiden tuotanto on nykyisillä menetelmillä ja teknologioilla riippuvainen omia maakaasuvarantoja omaavista valtioista. Vielä vuoden 2021 alkupuolelle saakka noin puolet EU:n kulluttamasta maakaasusta tuotiin Venäjältä, mutta osuus on laskenut hieman reiluun kymmeneen prosenttiin syksyyn 2022 mennessä. Erityisesti Yhdysvalloista kuljetetun nesteytetyn maakaasun osuus on kasvanut vuodesta 2021 alkaen.

Vedyn saatavuuteen, ympäristövaikutuksiin ja hintaan nykyisillä menetelmillä liittyy paljon riskitekijöitä, joihin Suomen



Kuva 1. Yksinkertaistettu prosessikaavio hiilidioksidipäästöttömästä ammoniakin tuotannosta.
Kuva: Kirsi Spoof-Tuomi.

näkökulmasta voi olla haastavaa vaikuttaa. Näin ollen mahdollisesti vahingollisten riippuvuussuhteiden riisumiseksi ja negatiivisten elinkaarivaikutusten vähentämiseksi tulisi pohtia vaihtoehtoisia tapoja vedyn tuotannolle. Ammoniakkia tai maakaasua ei vielä tuoteta Suomessa, mutta maassa jalostetaan ammoniakista typpihappoa ja siitä edelleen muita typpilannoitettuja tuotteita (Niskanen, 2022). Aiemmin noin 80 % Suomessa käytettävästä ammoniakista tuotiin Venäjältä, mutta sen osuus on vuoden 2021 alun jälkeen laskenut (Nykänen, 2023). Kuitenkin edelleen merkittävä osa Suomen ammoniakin tarpeesta tuodaan Venäjältä.

Vedyn tuotantotapa vaikuttaa ympäristövaikutuksiin

Vetyä voidaan tuottaa useilla eri tavoilla, mutta viime aikoina pinnalla on ollut erityisesti veden elektrolyysi (Wilkinson ym., 2023). Tässä menetelmässä vettä hajotetaan sähköenergian avulla elektrolyysiprosessissa vedyksi ja hapeksi. Menetelmää pidetään erityisen houkuttelevana vaihtoehtona, koska sen ilmastovaikutukset ovat pääsääntöisesti erittäin pieniä verrattuna maakaasun höyryreformointiin, mikäli elektrolyysissä käytetään uusiutuvista lähteistä peräisin olevaa sähköenergiaa. Hiilidioksidin talteenottoon yhdistetyn SMR-prosessin kautta tuotetun vedyn ilmastovaikutukset vaihtelevat 2,8–3,5 kg CO₂-ekv / kg H₂ välillä, kun taas tuulienergiaa hyödyntävän veden PEM-elektrolyysin vaikutukset vaihtelevat 0,61–1,1 kg CO₂-ekv / kg H₂. Näin ollen SMR-prosessin avulla valmistetun vedyn ilmastovaikutukset ovat tuulienergiaa käyttävään PEM-elektrolyysiin verrattuna noin 2,5–5,7-kertaiset. Jos vetyä tuotettaisiin SMR-prosessilla ilman hiilidioksidin talteenottoa, ero olisi vielä merkittävästi suurempi. Esimerkiksi Al-Qahtanin ym. (2021) mukaan SMR-prosessin ilmastovaikutukset ovat noin 11,24 kg CO₂-ekv / kg H₂

ilman hiilidioksidin talteenottoa, jolloin ero kasvaa suurimmillaan jo 18,4-kertaiseksi.

Elektrolyysin ongelmia ovat suuri energiankulutus suhteessa tuotettuun vetyyn sekä merkittävä puhtaan veden kulutus (Zhang ym., 2021). Erityisesti suuren energiankulutuksen takia elektrolyysillä tuotetun vedyn tuotantokustannukset ovat vielä olleet maakaasusta tuotettua vetyä korkeampia, minkä vuoksi se ei ole vielä merkittävässä mittakaavassa yleistynyt. Maakaasusta tuotetun vedyn tuotantoon kuluu energiaa noin 24 kWh/kg H₂, kun taas vastaavasti elektrolyysin avulla sähköenergiaa kuluu noin 50–83 kWh/kg H₂ (Komarov ym., 2021, s. 10; IRENA, 2021) Vettä elektrolyysi kuluttaa noin 11,1 kg tuotettua vetykiloa kohti. Maakaasusta höyryreformoinnilla vetyä tuotettaessa veden kulutus on 5,85–13,2 kg/kg H₂. (Saulnier ym., 2020).

Vaikka merkittävä osa vedyn tuotantoon liittyvistä elinkaaritutkimuksista liittyy ilmastovaikutuksiin, myös muita ympäristövaikutuksia on tutkittu. Wilkinson ym. (2023) kokosi ja analysoi dataa lähes sadasta vedyn tuotannon elinkaarimallinnuksiin liittyvästä tutkimusartikkelista vuosilta 2015–2022. Poimittaessa SMR-prosessiin ja tuuli- ja aurinkovoimaa hyödyntävään veden PEM-elektrolyysiin liittyviä tuloksia, tietyt vaikutusluokat korostuvat muita vahvemmin. Eräässä PEM-elektrolyysin ympäristövaikutusten tutkimuksessa maaperän happamoitumiseen ja rehevöitymiseen makeassa vedessä liittyvät arvot korostuivat merkittävästi verrattuna mediaaniin. Samassa tutkimuksessa tuulienergiaa hyödyntävän PEM-elektrolyysin makean veden rehevöitymisen arvot olivat hieman koholla mediaaniin nähden. Johtopäätöksenä artikkelissa todetaan, että yleisesti elektrolyysiin perustuvat menetelmät omaavat pienemmät ympäristövaikutukset muihin metodeihin verrattuna, ja tuulivoimaa käyttävät elektrolyysiprosessit ovat vaikutuksiltaan pienempiä verrattuna aurinko- ja

ydinvoimaa hyödyntäviin prosesseihin. Tässä kohtaa artikkelissa todetaan myös, että maaperän happamoitumisen ja makean veden rehevöitymisen arvot ovat elektrolyysiin perustuvilla metodeilla pienemmät kuin biomassaan perustuvilla metodeilla. Yleisesti ottaen muista kuin ilmastonlämpenemisvaikutuksista on kuitenkin saatavilla niukasti dataa.

Vihreän ammoniakkin ilmastovaikutuksista

Kun tarkastellaan ammoniakkin tuotannon ympäristövaikutuksia ilmastovaikutusten ja vedenkulutuksen näkökulmasta, voidaan huomata samansuuntaisia tuloksia, kuin vedyntuotannon tapauksessa. Käytettäessä vedyntuotantoon maakaasun höyryreformointia, tuotetun ammoniakkin hiilidioksidipäästöt ovat noin 2,60–2,75 t CO₂/ t NH₃ elektrolyysin avulla tuotetun vedyn tapauksessa vastaavien arvojen ollessa noin 0,24–0,70 t CO₂/ t NH₃ riippuen tuotantopaikasta, energian lähteestä ja laitoksen koosta (Boero ym., 2021). Näiden lukujen valossa ammoniakkin tuotannon ilmastovaikutukset ovat SMR-tekniikalla noin 3,7–11,5-kertaisia verrattuna ammoniakkiin, jonka tuotannossa on hyödynnetty veden elektrolyysiä.

Vedenkulutus huomioitava

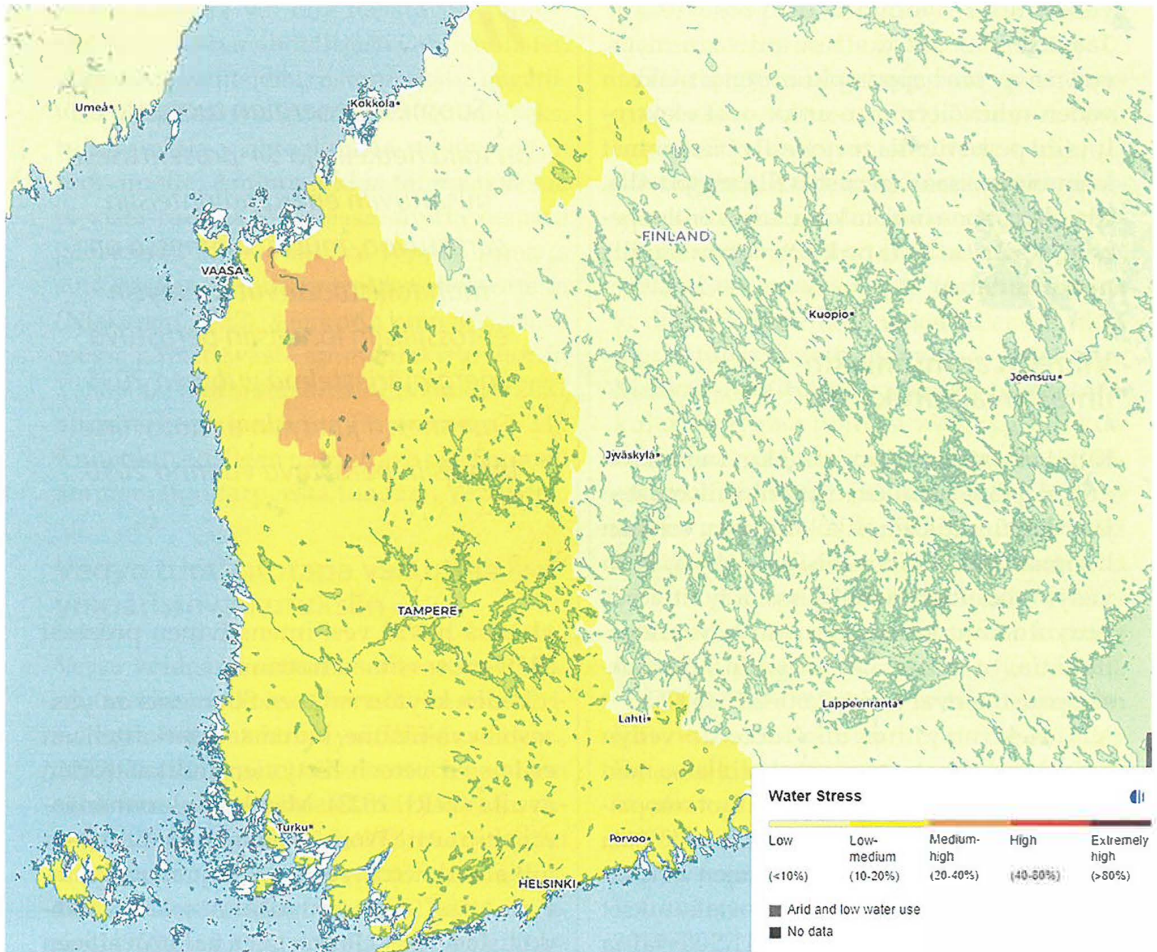
Vedenkulutus höyryreformoinnin tapauksessa on noin 656 kg H₂O / t NH₃, kun vastaava lukema veden elektrolyysillä on yli kaksinkertainen 1588 kg H₂O / t NH₃ (Ghavam ym., 2021). Tästä lähteestä jää kuitenkin epäselväksi, mitkä kaikki yksikköprosessit ammoniakkin valmistuksen elinkaarelta on huomioitu ja mitä oletuksia on tehty. Eri lähteet antavat hyvin erilaisia tietoja prosessien vedenkulutuksesta ja luvut eivät välttämättä ole vertailukelpoisia erilaisista rajauksista ja oletuksista johtuen. Voidaan kuitenkin todeta, että veden elektrolyysi on



Suomessa energian tuotanto on tällä hetkellä jo 54-prosenttisesti uusiutuviin energianlähteisiin perustuvaa, mutta Suomessa on mahdollista saavuttaa täysin ei-fossiilisiin lähteisiin perustuva energiajärjestelmä vuoteen 2035 mennessä ja täysin uusiutuviin lähteisiin perustuva vuonna 2050.

yleensä hyvin vesi-intensiivinen prosessi SMR-prosessiin verrattuna.

Veden käytön suhteen Suomessa on yleisesti hyvä tilanne, kun maata tarkastellaan erilaisten veteen liittyvien indikaattorien avulla (WRI, 2023). Maailman luonnonvarainstituutti (World Resource Institute) on julkaissut nettisivuillaan "Aqueduct Water Risk Atlas" -nimisen työkalun, jolla on mahdollista tarkastella kartasta halutun alueen veteen liittyviä riskejä. Kun tällä työkalulla tarkastellaan Suomea fyysisten riskien näkökulmasta, pääsääntöisesti Suomi on riskitasoltaan "matala" tai "matala-keskitaso". Kuitenkin kartassa nähdään selkeästi kohonneen riskin alue Suomen länsirannikon ja erityisesti Etelä-Pohjanmaan alueella Seinäjoen länsipuolella (Kuva 2). Näistä fyysisistä riskeistä mahdollisesti oleellisin tässä asiayhteydessä on veden niukkuuteen liittyvä indikaattori, sillä se ilmaisee veden kulutuksen suhteen saatavilla oleviin uusiutuviin vesivarantoihin. Pelkästään tätä indikaattoria tarkastellessa riskitaso Etelä-Pohjanmaalla ei ole niin korkeasti kohonnut kuin kaikkien fyysisten riskien tapauksessa, mutta siitä huolimatta muuhun Suomeen verrattuna suurempi.



Kuva 2. Veden niukkuus Suomessa WRI:n Aqueduct - Water risk atlas -työkalun kartta. (WRI, 2023).

Energiankulutuksessa eroja

Energiankulutus ammoniakkin tuotannossa on selvästi suurempi käytettäessä vedyn tuotantoon elektrolyysia, eli noin 12 MWh / t NH₃ höyryreformoinnin kautta vastaavan kulutuksen ollessa noin 9,5 MWh / t NH₃ (Ghavam ym., 2021). Vedyn tuotannon elektrolyysillä on oletettu tapahtuvan aurinko- tai tuulivoimalla. Suomessa energian tuotanto on tällä hetkellä jo 54-prosenttisesti uusiutuviin energianlähteisiin perustuvaa, mutta Suomessa on mahdollis-

ta saavuttaa täysin ei-fossiilisiin lähteisiin perustuva energiajärjestelmä vuoteen 2035 mennessä ja täysin uusiutuviin lähteisiin perustuva vuonna 2050 (Child ym., 2020). Vuonna 2022 sähkön nettotuonti oli Suomessa noin 15,3 %, mutta Suomi on todennäköisesti omavaraisempi sähkön suhteen tulevaisuudessa. Esimerkiksi tuulivoiman tuotanto on kasvanut viime vuosina merkittävää vauhtia tuulivoiman asennetun kapasiteetin kasvaessa edelliseen vuoteen verrattuna 76 % ja tuotannon 41 % (Liedes, 2023).

Tulevaisuudessa huoltovarmuuden rooli kasvaa?

Tulevaisuudessa on odotettavissa, että paine kasvihuonekaasujen vähentämiseen ja ilmastomuutoksen torjuntaan kasvaa entisestään. Jo tällä hetkellä kansainväliset sopimukset asettavat aikarajoitteita suorien ja epäsuorien päästöjen vähentämiseksi. Myös viimeaikaiset maailmanpoliittiset tilanteet ovat kasvattaneet tarvetta ja halua vähentää energia- ja materiaali-riippuvuuksia. Suomessa on tulevaisuudessa mahdollisuuksia tuottaa uusiutuvaa energiaa yli oman tarpeen, jolloin energian varastointiin ja muuhun kustannustehokkaaseen hyödyntämiseen liittyvät mahdollisuudet ovat tärkeässä asemassa. Vedyn tuotanto elektrolyysillä luo mahdollisuuden tähän antamalla hyvin monipuolisesti erilaisia käyttökohteita energia-, teollisuus- ja ruokasektoreilla, joissa voitaisiin korvata fossiilisia raaka-aineita ja polttoaineita erilaisissa prosesseissa. Tässä tekstissä esiteltyjen aiempien elinkaaritutkimusten perusteella vedyn tuotanto elektrolyysin avulla ja siitä vetyjalosteiden valmistaminen on selvästi ympäristövaikutuksiltaan parempi vaihtoehto nykyisiin tuotantomenetelmiin verrattuna.

Lähteet

- Al-Qahtani, A., Parkinson, B., Hellgart, K., Shah, N., & Guillen-Gosalbez, G. (2021). Uncovering the true cost of hydrogen production routes using life cycle monetization. *Applied Energy*, Vol. 281, 7, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115958>
- Boero, A.J., Kardux, K., Kovaleva, M., Salas, D.A., Mooijer, J., Mashruk, S., Townsend, M., Rouwenhorst, K., Valera-Medina, A., & Ramirez, A.D. (2021) Environmental Life Cycle Assessment of Ammonia-Based Electricity. *Energies*, 14(20), 9, <https://doi.org/10.3390/en14206721>
- Child, M., Bogdanov, D., Aghahosseini, A., & Breyer, C. (2020). The role of energy prosumers in the transition of the Finnish energy system towards 100 % renewable energy by 2050. *Futures*, Vol.124. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2020.102644>
- Ding, Y., & Alpay, E. (2000). Absorption-enhanced steam-methane reforming, *Chemical engineering science*, 55(18), 3929-3940. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(99\)00597-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(99)00597-7)
- European council (2023). Infographic - Where does the EU's gas come from? *Council of the European Union*. <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/eu-gas-supply/>
- Ghavam, S., Vahdati, M., Wilson, I. -A. -G., & Styring, P., (2021). Sustainable Ammonia Production Processes. *Frontiers in energy research*, 9:580808, 14-15, <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.580808>
- International Energy Agency (IEA), (2019). The Future of Hydrogen, *IEA*, Paris, s. 39. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- International Energy Agency (IEA), (2021). Ammonia Technology Roadmap, *IEA*, Paris, s. 14. <https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap>
- International Renewable Energy Agency (IRENA), (2021). Making the breakthrough: Green hydrogen policies and technology costs, *IRENA*, Abu Dhabi, 14, ISBN 978-92-9260-314-4, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_Hydrogen_breakthrough_2021.pdf?la=en&hash=40FA5B8AD7AB1666EECBDE30EF458C45EE5A0AA6
- Komarov, I. -I., Rogalev, A. -N., Kharlamova, D. -M., Naumov, V. -Yu., & Shabalova, S. -I. (2021). Comparative analysis of the efficiency of using

- hydrogen and steam methane reforming storage at combined cycle gas turbine for cogeneration. *Journal of physics: conference series*, 10, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2053/1/012007>
- Liedes, V-P., (2023). Energiavuosi 2022 Sähkö, *Energiateollisuus ry*, https://energia.fi/files/4428/Sahkovuosi_2022.pdf
- Niskanen, O. (2022). 2. Typen globaali-kauppa ja Venäjän tuonnin tyrehtymisen vaikutukset hintoihin, saatavuuteen ja Suomen lannoitehuoltovarmuuteen – Maatalouden typpihaaste – vaihtoehtoja ja ratkaisuja: Synteesiraportti, *Luonnonvarakeskus (Luke)*, s. 24–25, 27. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-458-6>
- Nykänen, H. (2023). Yara jatkaa ei-sanktioidun ammoniakkin tuontia Venäjältä, *Yle Uutiset*. <https://yle.fi/a/74-20026914>
- Pattabathula, V., & Richardson, J. (2016). Introduction to ammonia production. *Chem. Eng. Prog*, 112(9), 69-75. <https://www.aiche.org/sites/default/files/cep/20160969.pdf>
- Saulnier, R., Minnich, K., & Sturgess, K. (2020), Water for the hydrogen economy. *Watersmart solutions*. 4-5. https://watersmartsolutions.ca/wp-content/uploads/2020/12/Water-for-the-Hydrogen-Economy_WaterSMART-Whitepaper_November-2020.pdf
- Wilkinson, J., Mays, T., & McManus, M. (2023). Review and meta-analysis of recent life cycle assessments of hydrogen production. *Cleaner environmental systems*, Vol.9, 11., 1, 11, <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2023.100116>
- World resource institute (WRI), (2023), Aqueduct – Water risk atlas – tool, <https://www.wri.org/applications/aqueduct/water-risk-atlas/>
- Zhang, B., Zhang, S-X., Yao, R., Wu, Y-H., & Qiu, J-S., (2021), Progress and prospects of hydrogen production: Opportunities and challenges. *Journal of electronic science and technology*, 19(2), 10. <https://doi.org/10.1016/j.jnlest.2021.100080>
- Zumdahl, S. S. (2023). ammonia. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/ammonia> ■