

Vihreän vedyn teollisen valmistamisen perusteet

Materiaalin koostamisessa on hyödynnetty oppimateriaalia Vetyosaaja koulutuksesta. Alkuperäisen materiaalin on tuottanut Mats Borg (Novia): Vedyn tuotanto elektrolyysillä



OSAO



**Euroopan unionin
osarahoittama**

Sisältö

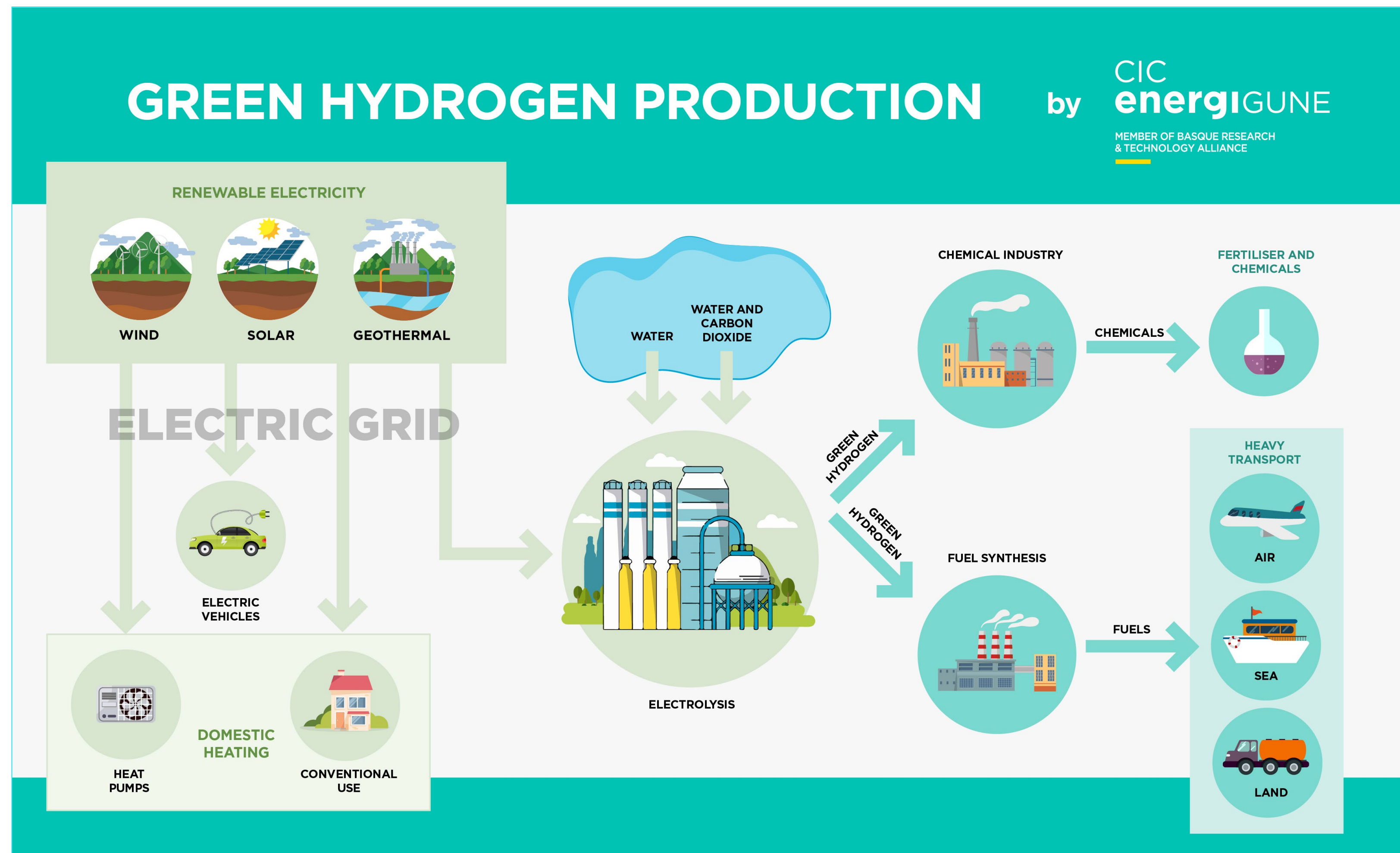
1. Vihreän vedyn tuotanto elektrolyysillä
2. Erilaiset elektrolyysit
 - 2.1 Alkalielektrolyysi, AEC
 - 2.2 Protoninvaihtokalvoelektrolyysi, PEM
 - 2.3 Kiinteäoksidielektrolyysi, SOEC
3. Vedyntuotannosta



1. Vihreän vedyn tuotanto elektrolyyssillä

Elektrolyysin perusperiaatteet

- veden elektrolyyssissä käytetään sähkövirtaa veden molekyylien hajottamiseksi
 - tämä tapahtuu elektrolyyssikennossa, jossa vesi hajoaa vedyksi ja hapeksi
- prosessi on kestävä vain, jos käytetty sähkö tulee puhtaista, uusiutuvista lähteistä, kuten aurinko- tai tuulienergiasta
 - tämä erottaa vihreän vedyn muista vedyn tuotantotavoista, kuten harmaasta vedystä, joka tuotetaan fossiilisista polttoaineista.



Euroopan unionin
osarahoittama

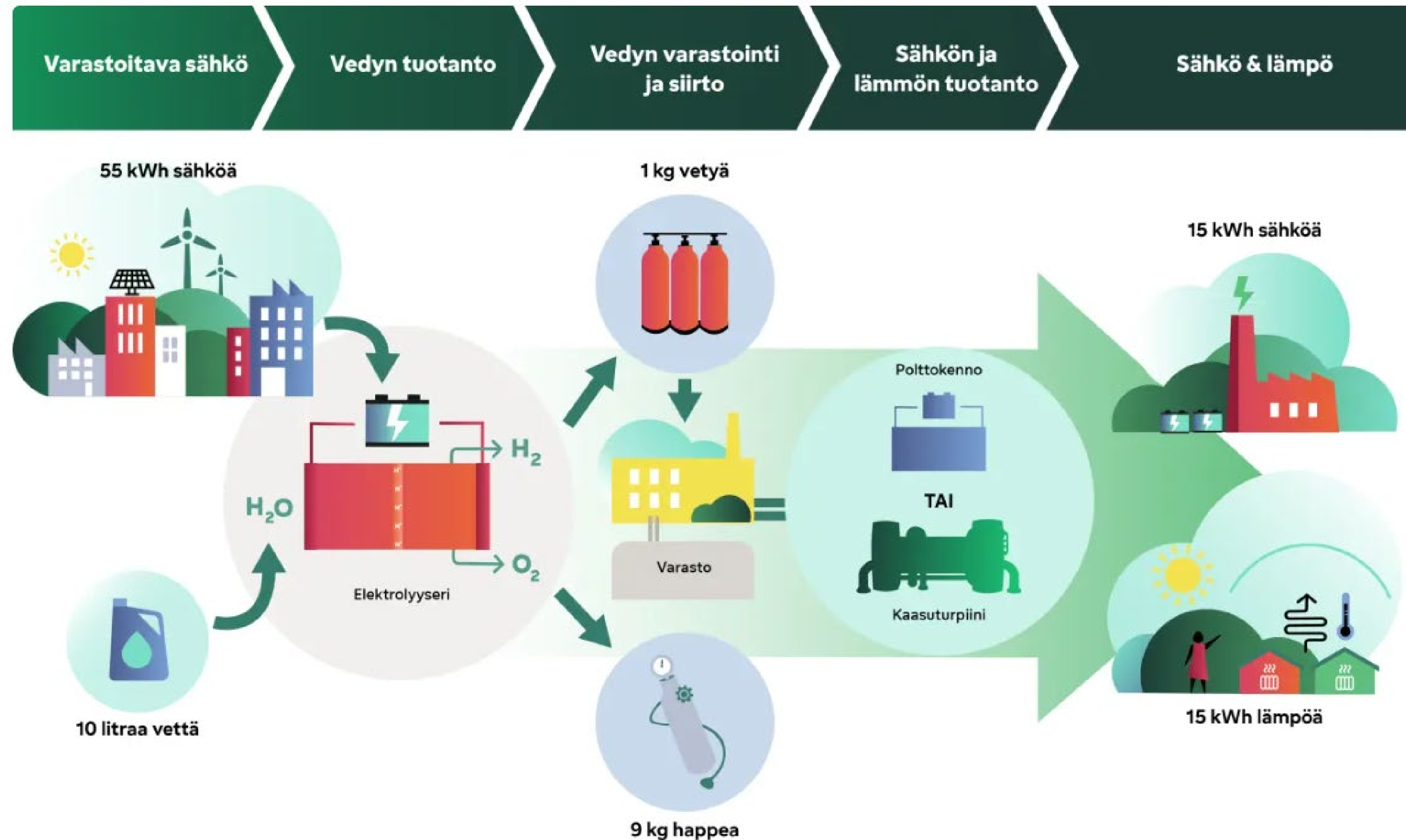
THE ELECTROLYSIS OF WATER: A SUSTAINABLE WAY TO PRODUCE GREEN HYDROGEN. JOHN KILNER

1. Vihreän vedyn tuotanto elektrolyysillä

	Väri	Teknologia	Raaka-aine/energianlähde	Päästöt
Sähköstä	Vihreä vety	Veden elektrolyysi	Uusiutuvat energianlähteet (aurinko- ja tuulivoima)	
	Pinkki vety	Veden elektrolyysi	Ydinvoima	Ydinjäte
	Purppura vety	Kemoterminen elektrolyysi	Ydinvoima	Ydinjäte
	Punainen vety	Veden katalyyttinen hajottaminen korkeassa lämpötilassa	Ydinvoima	Ydinjäte
	Valkoinen vety	Luonnon oma kaasumainen vety		
Fossiilista polttoaineista	Turkoosi vety	Pyrolyysi	Maakaasu	Hiilen talteenotto kiinteänä hiilenä
	Sininen vety	Metaanin höyryreformointi + CO ₂ talteenotto	Maakaasu	Vähän CO ₂ ja CO (suurin osa pois CCUS)
	Harmaa vety	Metaanin höyryreformointi	Maakaasu	CO ₂
	Musta vety	Hiilen kaasutus	Kivihiili	Paljon CO ₂ ja CO
	Ruskea vety	Hiilen kaasutus	Ruskea hiili	CO ₂



1. Vihreän vedyn tuotanto elektrolyyysillä



55 kWh sähköä + 10 litraa vettä tuottaa elektrolyyserissä 9 kg happea ja 1 kg vetyä

1 kg vetyä pystyy tuottamaan 15 kWh sähköä tai 15 kWh lämpöä

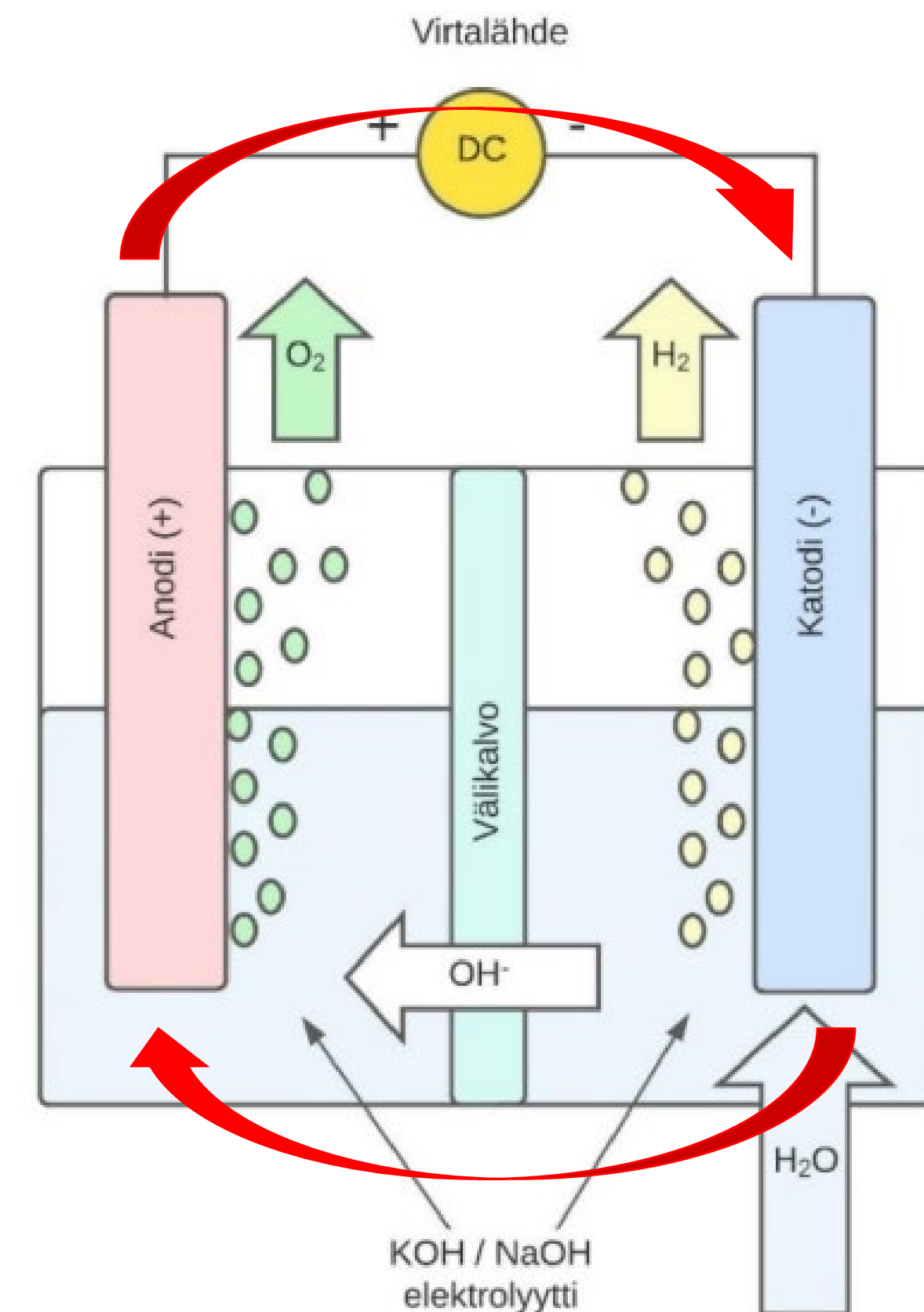


Euroopan unionin
osarahoittama

Vetytalous tulee – ennemmin tai myöhemmin. Eero Vartiainen. Fortum

1. Elektrolyysin toiminta

- kennossa on kaksi elektrodia, jotka ovat kosketuksessa elektrolyyttiin.
- elektrolyytin läpi kulkeva virta koostuu positiivisesti ja/tai negatiivisesti varautuneista ioneista.
- kun ionit reagoivat kemiallisesti elektrodien pinnoilla, elektroneja luovutetaan tai otetaan vastaan.
- elektronien ja ionien liike muodostaa yhdessä suljetun piirin
- kennon ulkopuolella virta kulkee anodilta katodille
- kennon sisällä virta kulkee katodilta anodille
- elektrolyyttikennossa anodi on positiivinen napa
- virran suunta osoittaa, kuinka positiivinen varaus liikkuu.
 - elektronit ja negatiiviset ionit liikkuvat vastakkaisiin suuntiin



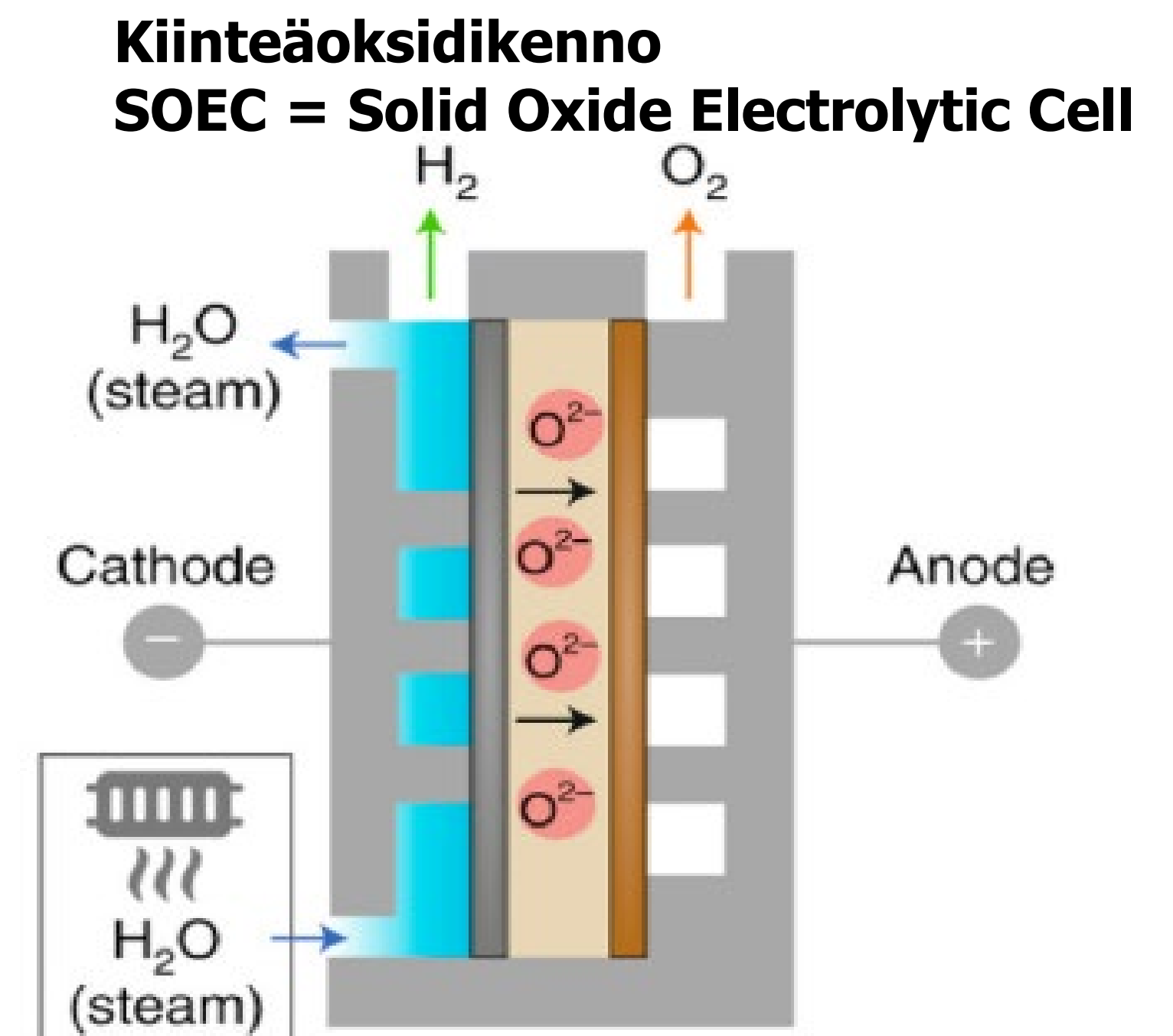
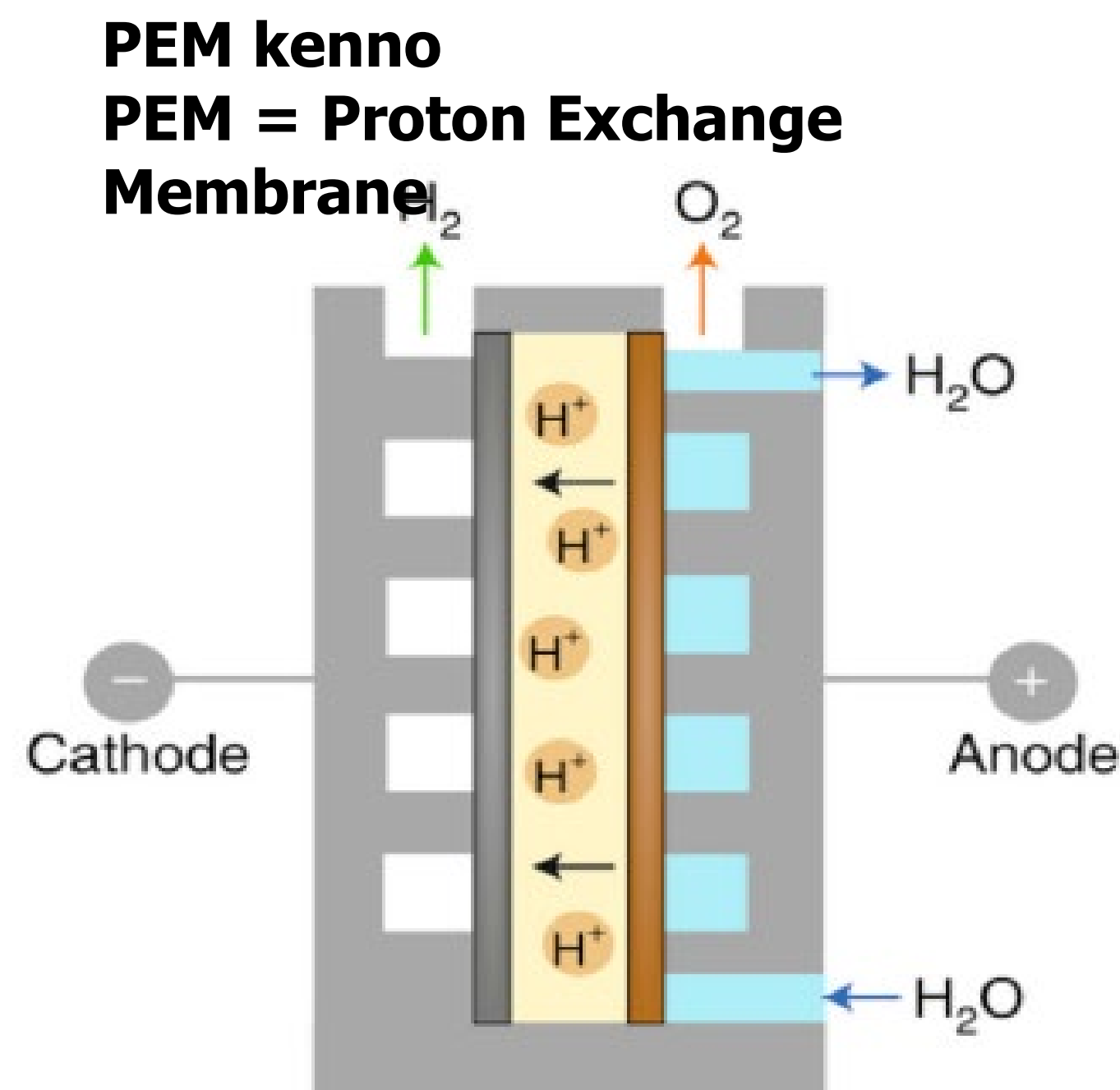
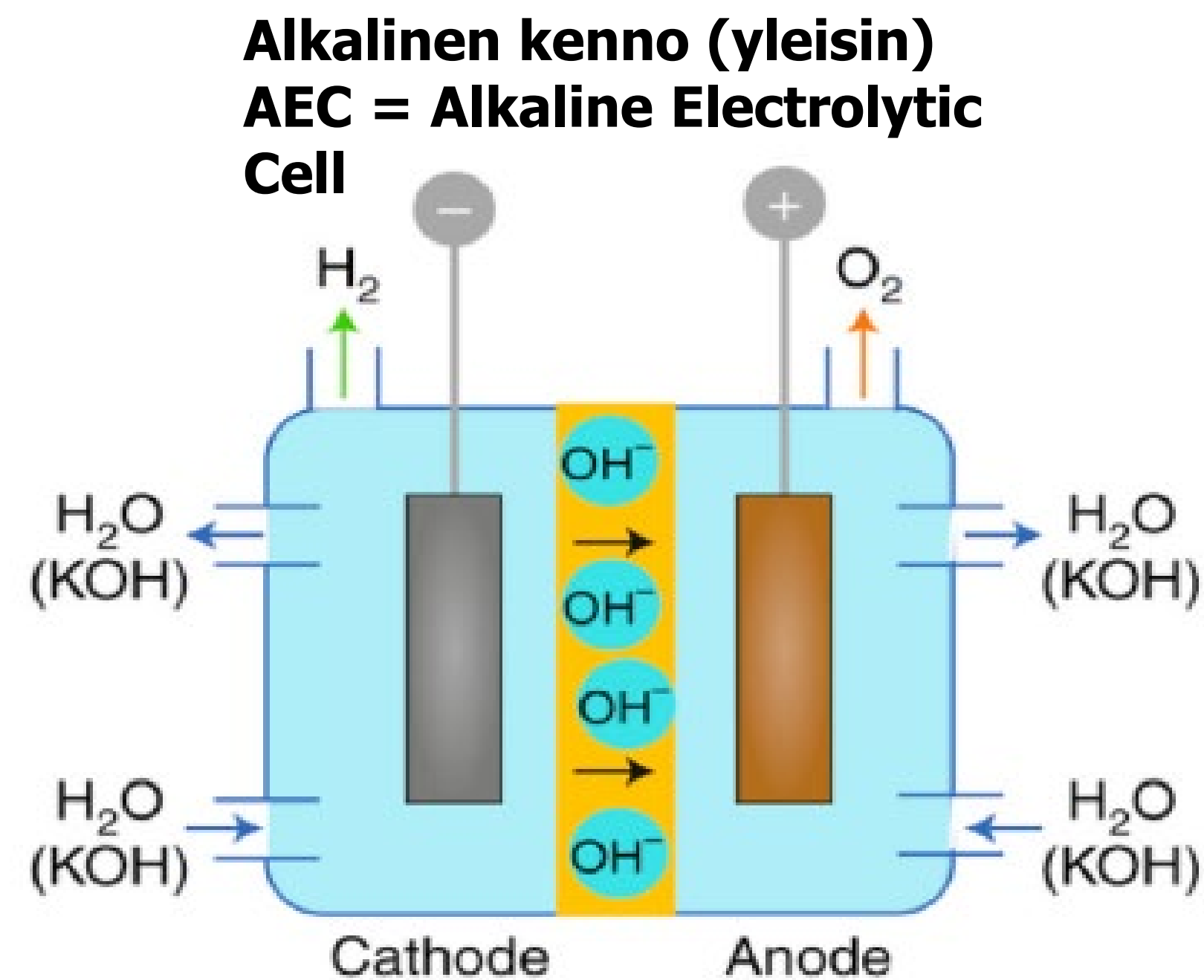
kun vesi hajoaa, reaktio on
$$2\text{H}_2\text{O} + \text{energia} \rightarrow 2\text{H}_2 (\text{g}) + \text{O}_2 (\text{g})$$

reaktion voi myös kirjoittaa
$$\text{H}_2\text{O} + \text{energia} \rightarrow \text{H}_2 (\text{g}) + \frac{1}{2}\text{O}_2 (\text{g})$$



1. Elektrolyysin toiminta

- kenno on elektrolyserin perusrakenneosa – yhdistettäessä kennoja saadaan suurempi teho ja suurempi jännite tai virta.
- yhdistettyjä kennoja kutsutaan kennostoksi – HUOM kuljetettava ioni on erilainen eri kennoissa

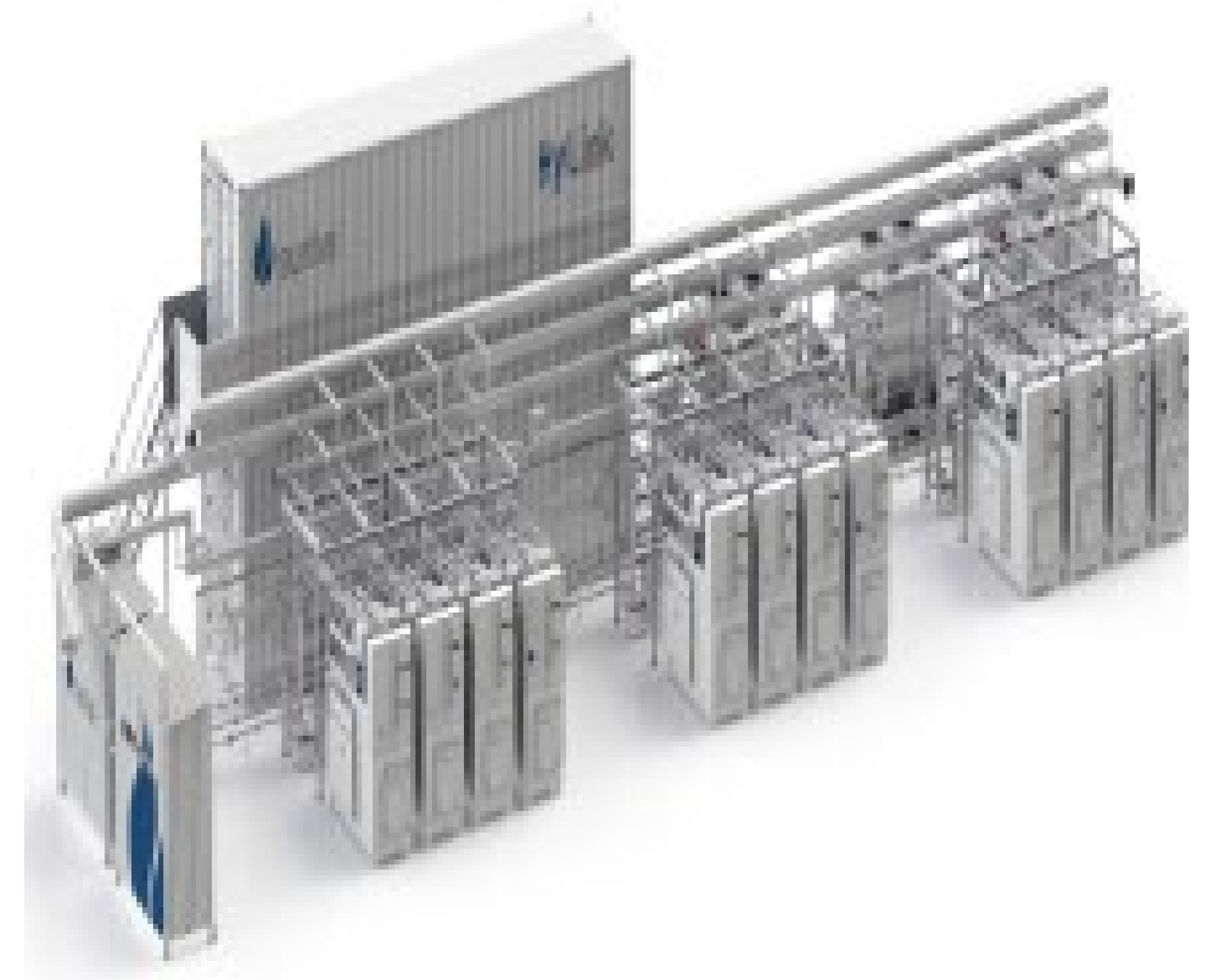


- lisäksi on AEM-kenno eli Anion Exchange Membrane, joka ei ole vielä kaupallisesti valmis



1. Elektrolyysin toiminta

- pääelektrolyysitekniikoita on 2-3 kpl AEL, PEM ja SOEC (AEL+PEM=AEM)
- jokaisessa teknologiassa omat vahvuutensa, mutta myös heikkoutensa – merkityllisen on **Levelized Cost of Hydrogen (LCoH)**
 - LCoH - mittari, jota käytetään arvioimaan vedyn tuotannon kustannuksia koko laitoksen elinkaaren aikana. Laskennassa huomioidaan investointikustannukset (CAPEX), käyttökustannukset (OPEX), polttoainekustannukset (esim. sähkö elektrolyysissä), tuotantomäärä elinkaaren aikana
- AEL on markkinajohtaja PEMin ollessa kakkonen, SOECista voi tulla haastaja. AEM ei ole vielä valmis.



AEL elektrolyysit ovat edullisimpia ja niillä on pisin käyttöhistoria - yleisin tyyppi, erityisesti suurissa laitoksissa

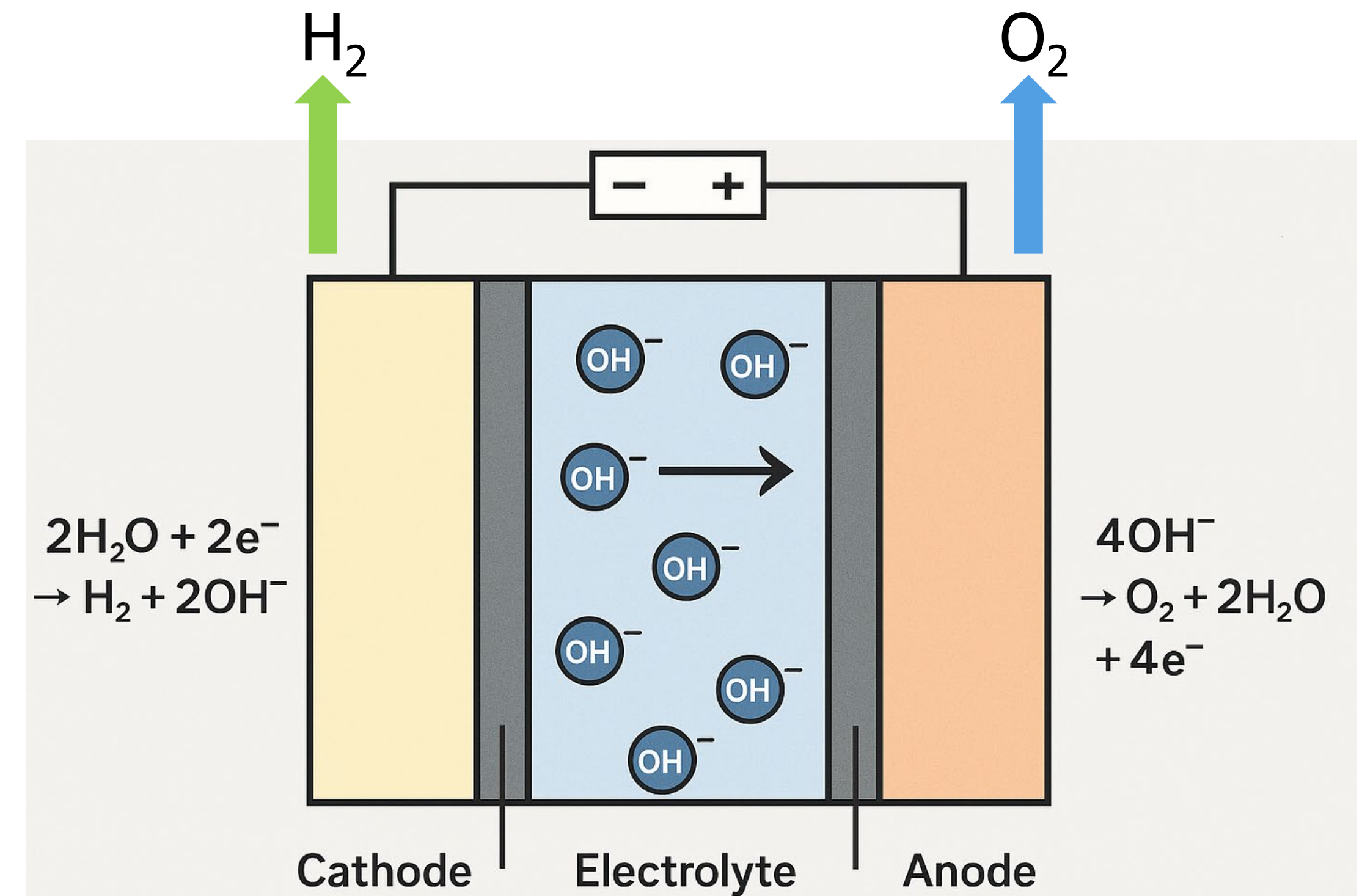
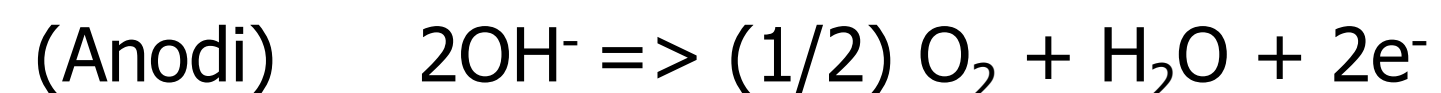
2.1 Alkalielektrolyysi

- alkalielektrolyysiprosessi koostuu kennostosta, jäähdytyksestä, puhdistuksesta, paineistuksesta, veden deionisoimisesta, sähkömuuntajasta ja kaasun poistosta.
- kennosto, jonka sisällä elektrolyysi tapahtuu koostuu kiinteästä elektrolyysikalvosta, anodista, katodista ja elektrolyysiliuoksesta
- virran kulkiessa elektrolyysiliuoksen läpi vesi pelkistyy (ottaa vastaan elektroneja) hajoten katodilla vedyksi ja hydroksidi-ioniksi.



- hydroksidi-ioni kulkee sitten kalvon läpi estääkseen niiden yhdistymisen takaisin vedeksi

- anodi puolella hydroksidi ioni hapettuu (luovuttaa elektroneja) muuttuen hapeksi, vedeksi ja elektroneiksi



Kemialliset reaktiot ns puolireaktiot anodilla ja katodilla tapahtuvat samanaikaisesti



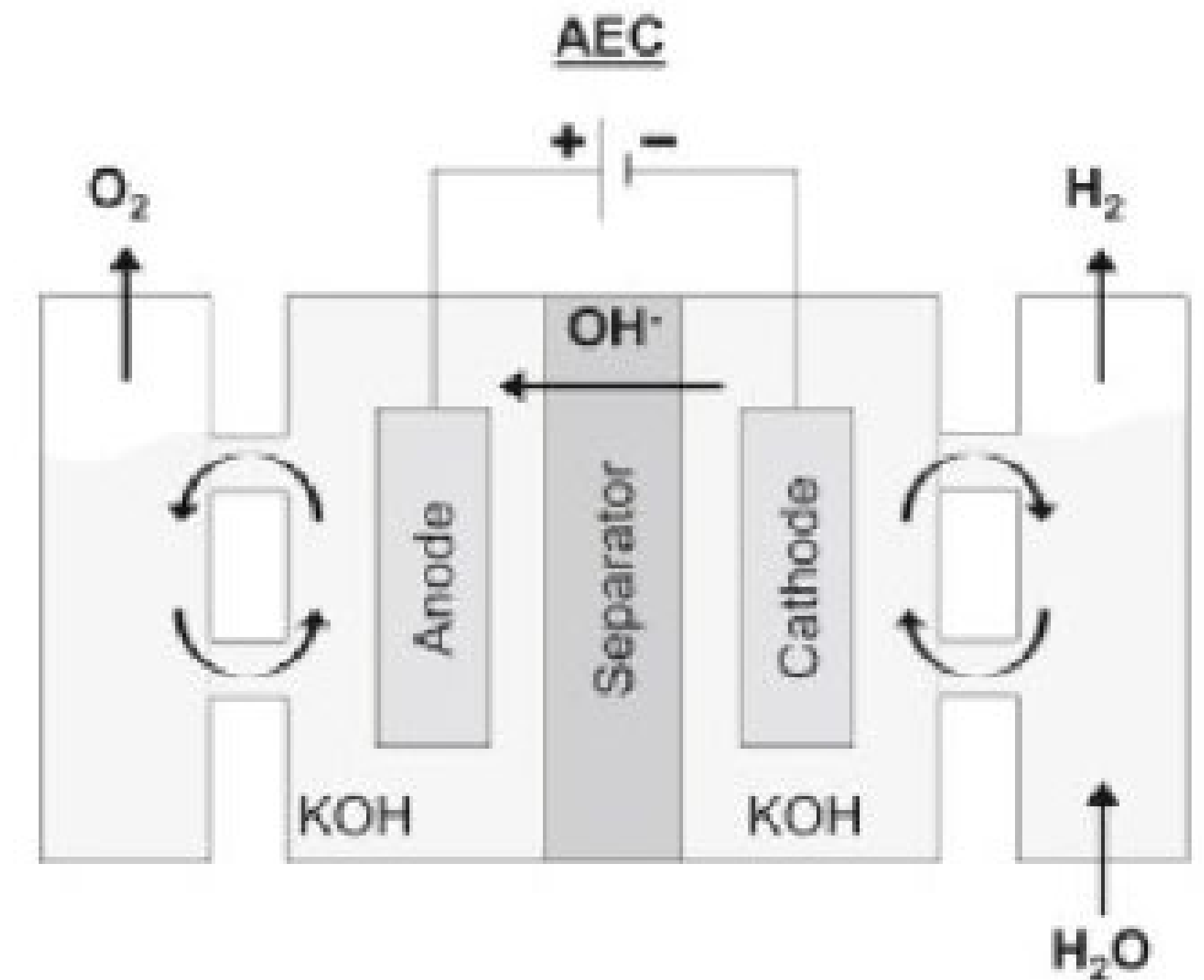
2.1 Alkalielektrolyysi - puolireaktiot

- katodin puolireaktio sisältää vedyn muodostumisen.
 - englanninkielisessä kirjallisuudessa tätä kutsutaan nimellä HER (Hydrogen Evolution Reaction).
- anodin puolireaktio sisältää hapen muodostumisen.
 - englanninkielisessä kirjallisuudessa tätä kutsutaan nimellä OER (Oxygen Evolution Reaction).

Alkalinen kenno (Alkaline Electrolytic Cell)

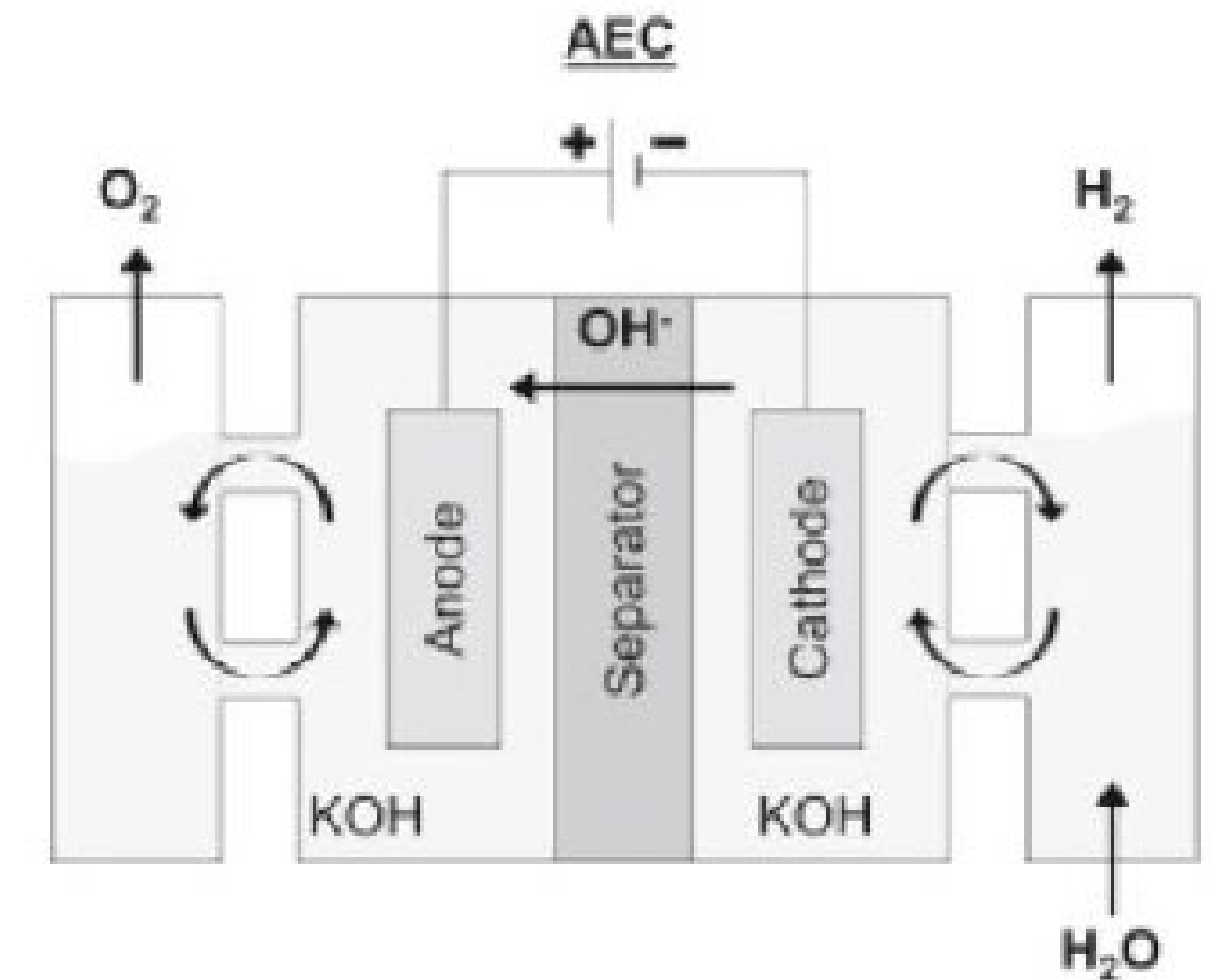
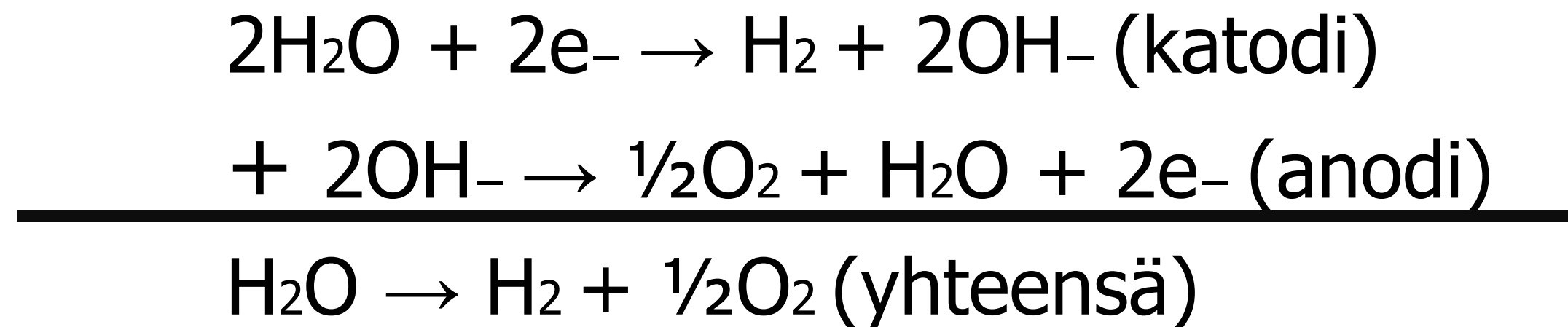
katodi $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$

anodi $2\text{OH}^- \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$



2.1 Alkalielektrolyysi - kokonaisreaktio

- alkalisen kennon puolireaktioiden yhdistäminen kokonaisreaktioksi
 - sama pätee myös muihin kennotyyppeihin



- puolireaktioissa pois jätetyt "termit" siirtyvät oikeastaan elektrodilta toiselle:
 - kaksi elektronia kulutetaan katodilla ja muodostuvat anodilla. Ne liikkuvat ulkoisen jännitteen kautta anodilta katodille.
 - OH⁻-ioni kulutetaan anodilla ja muodostuu katodilla. Se kulkee elektrolyytin läpi katodilta anodille.
 - yksi vesimolekyyli häviää katodilta ja siirtyy anodille. Tämä aiheuttaa sen, että elektrolyytti anodin puolella laimenee hieman.



2.1 Alkalielektrolyysi – elektrolyytti ja elektrodit

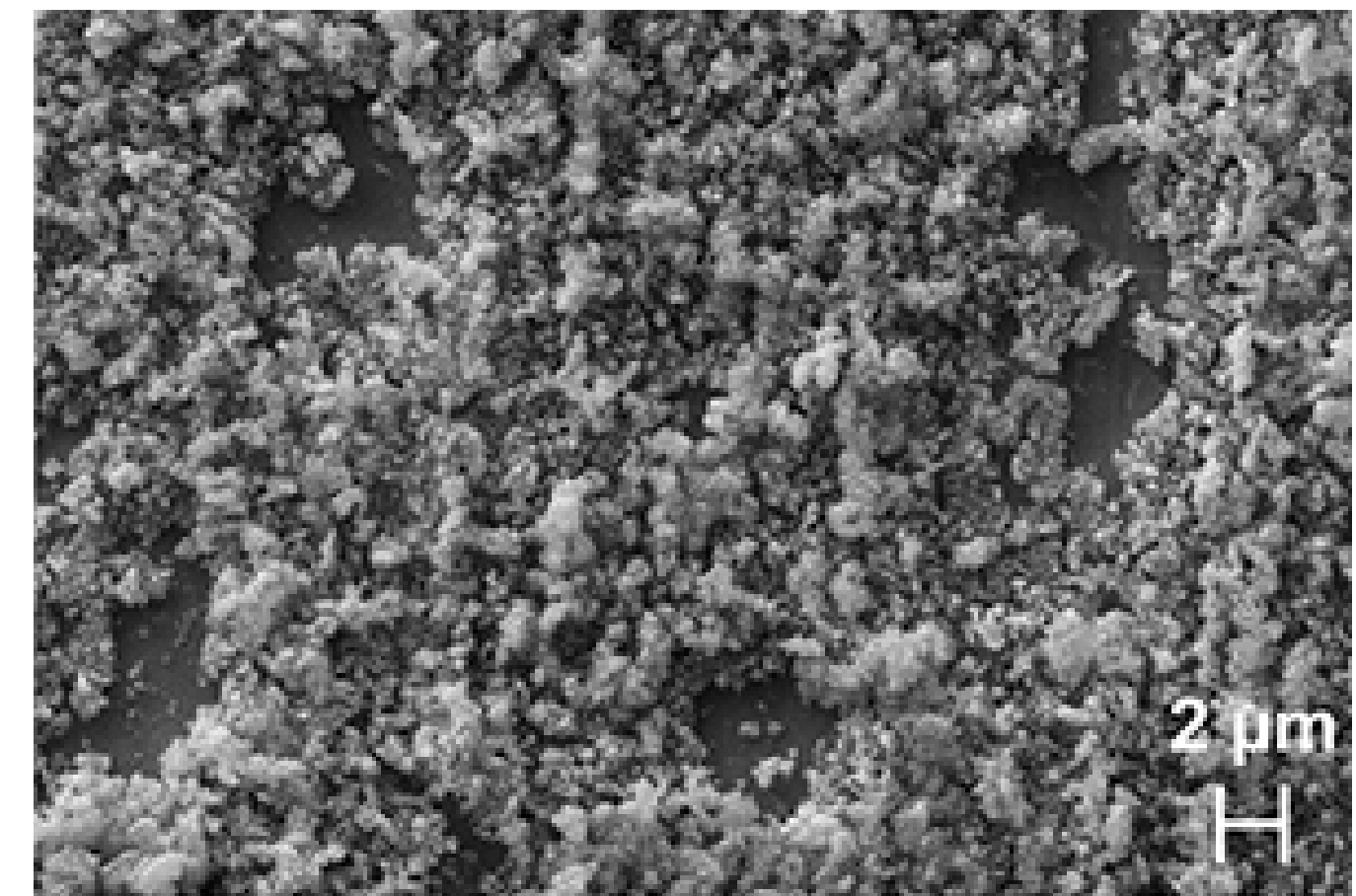
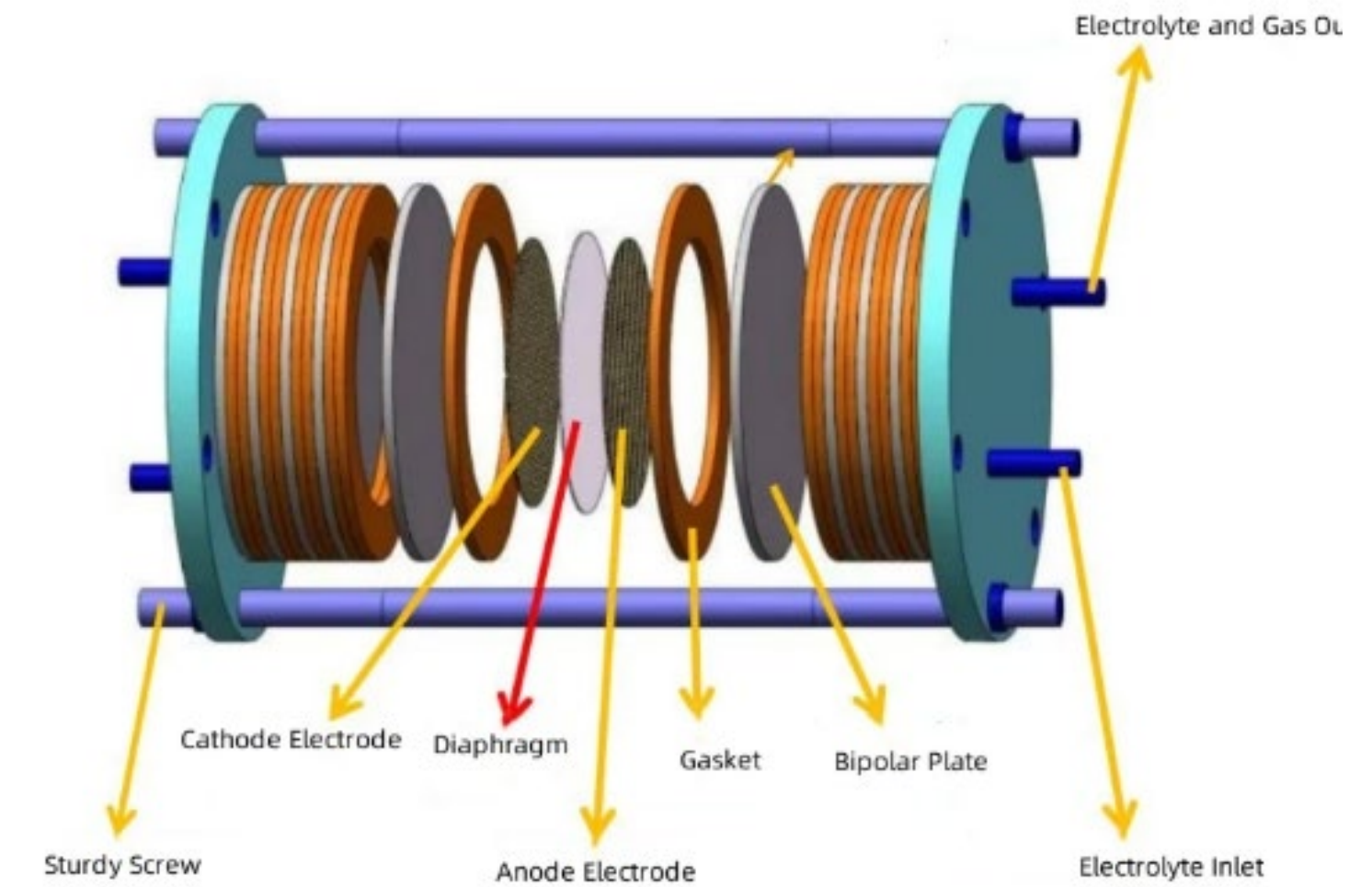
- alkalielektrolyysissä OH^- -ionien kuljetukseen tarvitaan emäksinen elektrolyytti -> alkalielektrolyysi
- kennon reaktiota tehostetaan lisäämällä sähköä johtavaa NaOH - ja KOH -liuosta elektrolyyttiin
 - kaliumhydroksidi johtaa paremmin sähköä, jonka takia sen käyttöä suositetaan enemmän
 - korkein mahdollinen sähkönjohtavuus elektrolyytissä saavutetaan 30 % konsentraatiolla kaliumhydroksidia
- elektrodien etäisyys toisistaan voi olla muutamista millimetreistä useisiin senttimetreihin
 - mitä kauempana elektrodit ovat toisistaan, sen suuremmat ovat kennon häviöt
 - elektrodien etäisyydellä on myös vaikutusta elektrolyytin määrään kennossa
- elektrolyytin aiheuttama kennon emäksinen ympäristö asettaa soveltuvuusrajoituksia elektrodeille
 - elektrodien tulee olla korroosionkestäviä, sähkönjohtavia sekä katalyyttisesti aktiivisia vedyn ja hapen muodostumisen kannalta
 - elektrolyytti löytyy koko kennosta ja aiheuttaa korroosio-ongelmia
 - elektrolyytti on otettava huomioon kaikissa materiaalivalinnoissa.



2.1 Alkalielektrolyysi – elektrolyytti ja elektrodit

Elektrodimateriaalin tulisi olla

- sähköä johtava
 - kemiallisesti stabiili valitsemassa ympäristössä
 - katalyyttisesti tehokas (nopea reaktio)
 - suuri tehokas pinta-ala (epätasainen pinta)
-
- AEC kennossa elektrodit voidaan valmistaa esim nikkelistä
 - huokoisella materiaalilla saavutetaan suuri tehokas pinta-ala, jolloin reaktioita voi tapahtua paljon
 - suuren pinta-alan mahdollistamiseksi materiaalin olisi hyvä olla huokoista tai mikroskooppisella tasolla karkeapintaista, jotta pinta-alaa olisi mahdollisimman paljon (kts mikroskooppikuva elektrodin pinnalta)



Lähde:

M Keuru: Alkali- ja PEM- teknologioiden vertailu elektrolyysiprosessissa
<https://nickelgreen.com/introduction-to-alkaline-electrolyzer-electrode/High-Efficiency Electrode Materials for Gas-Generating Reactions>



Euroopan unionin
osarahoittama

2.1 Alkalielektrolyysi - erotinkalvo

elektrolyysikennossa erotinkalvon tehtävänä on

- hapen ja vedyn pitäminen erillään
- elektrodien erottaminen sähköisesti
- kuljettaa ioneja, mutta estää kaasukuplien pääseminen läpi

alkalielektrolyyttikennossa (emäksisessä kennossa), jossa elektrolyytinä käytetään nestettä kalvo kastetaan elektrolyyttiin

PEM ja SOEC kennossa kalvo on sekä elektrolyytti että erotin - kalvo ja elektrodit muodostavat kokonaisuuden, jota kutsutaan MEA:ksi (Membrane Electrode Assembly).

on olemassa kaksi eri rakennetyyppiä riippuen siitä, onko katalyytti levitetty elektrodin vai kalvon pinnalle:

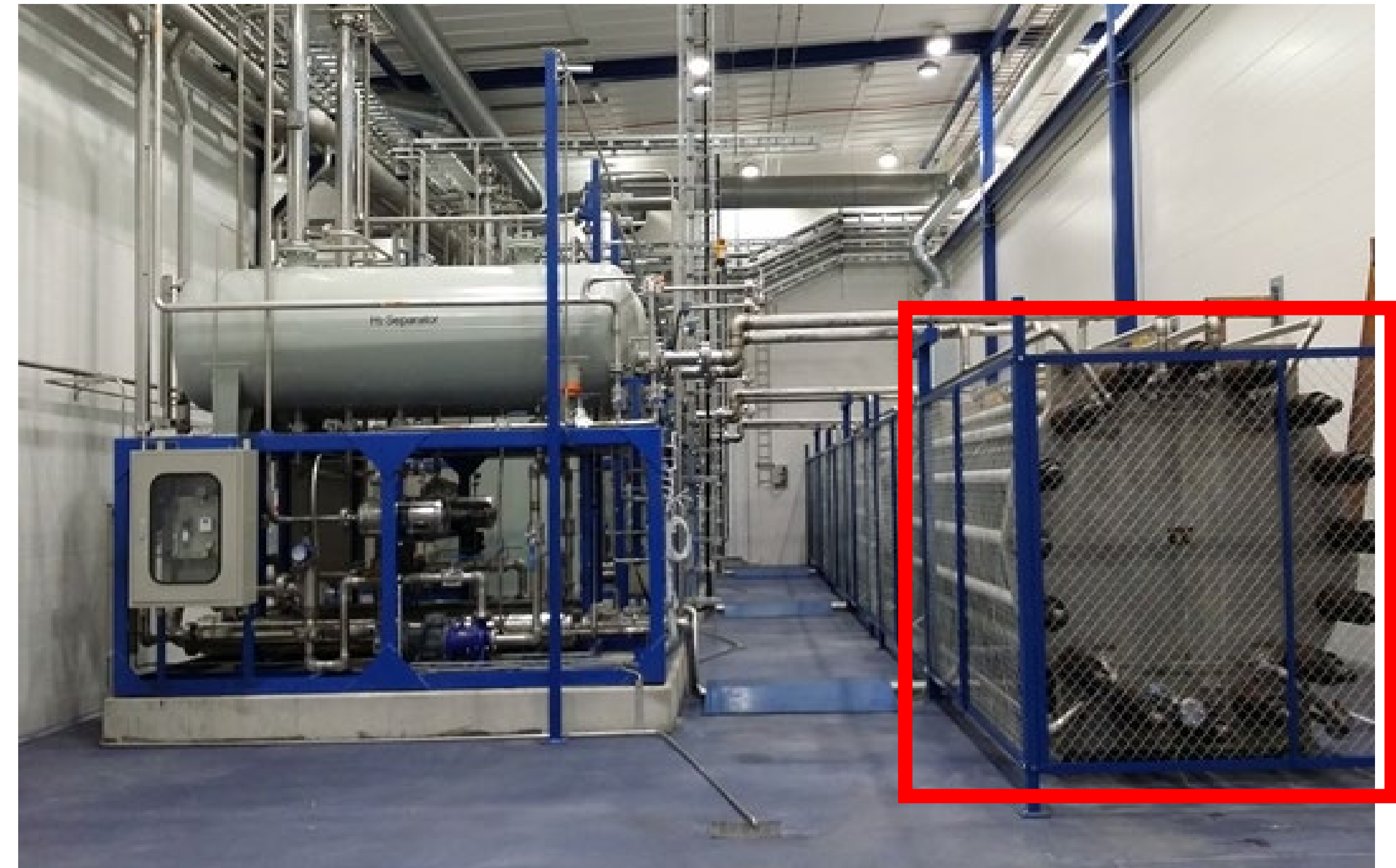
- Catalyst Coated Substrate (CCS)
- Catalyst Coated Membrane (CCM)
- substraatti (huokoinen elektrodi) voi olla esimerkiksi teräs- tai nikkeliverkko (mesh), hiilipaperi tai nikkelivaaho
- kalvo koostuu huokoisesta materiaalista, joka on kyllästetty elektrolyytillä
- vakiomateriaali on Zirfon, joka koostuu polysulfonisidotusta zirkoniumoksidista



2.1 Alkalielektrolyysi

3 MW alkalielektrolyysikkenno
600 Nm³/h, 16 bar

- alkalielektrolyysi on yleisin teollisuudessa käytetty elektrolyysiprosessi
 - prosessin energiatehokkuus on 51–60 %, käyttölämpötila 70–90 °C, paine 1–30 bar ja järjestelmän käyttöikä noin 60 tuhatta tuntia.
- joissain malleissa alkalielektrolyysilaitteistolla on kyky mennä valmiustilaan ja sammuttaa kennosto ilman katalyytin liiallista vaurioitumista, joka lisää järjestelmän joustavuutta.
- kennon sammuttamisen ja käynnistämisen huonona puolena on hitaus ja 25 % energiatarve myös valmiustilassa.



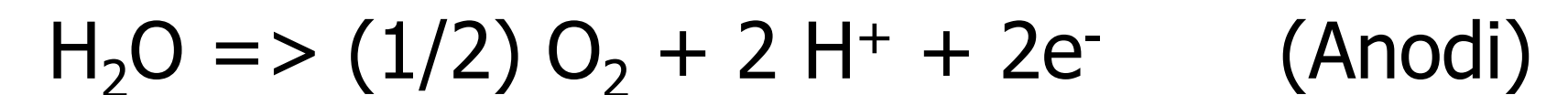
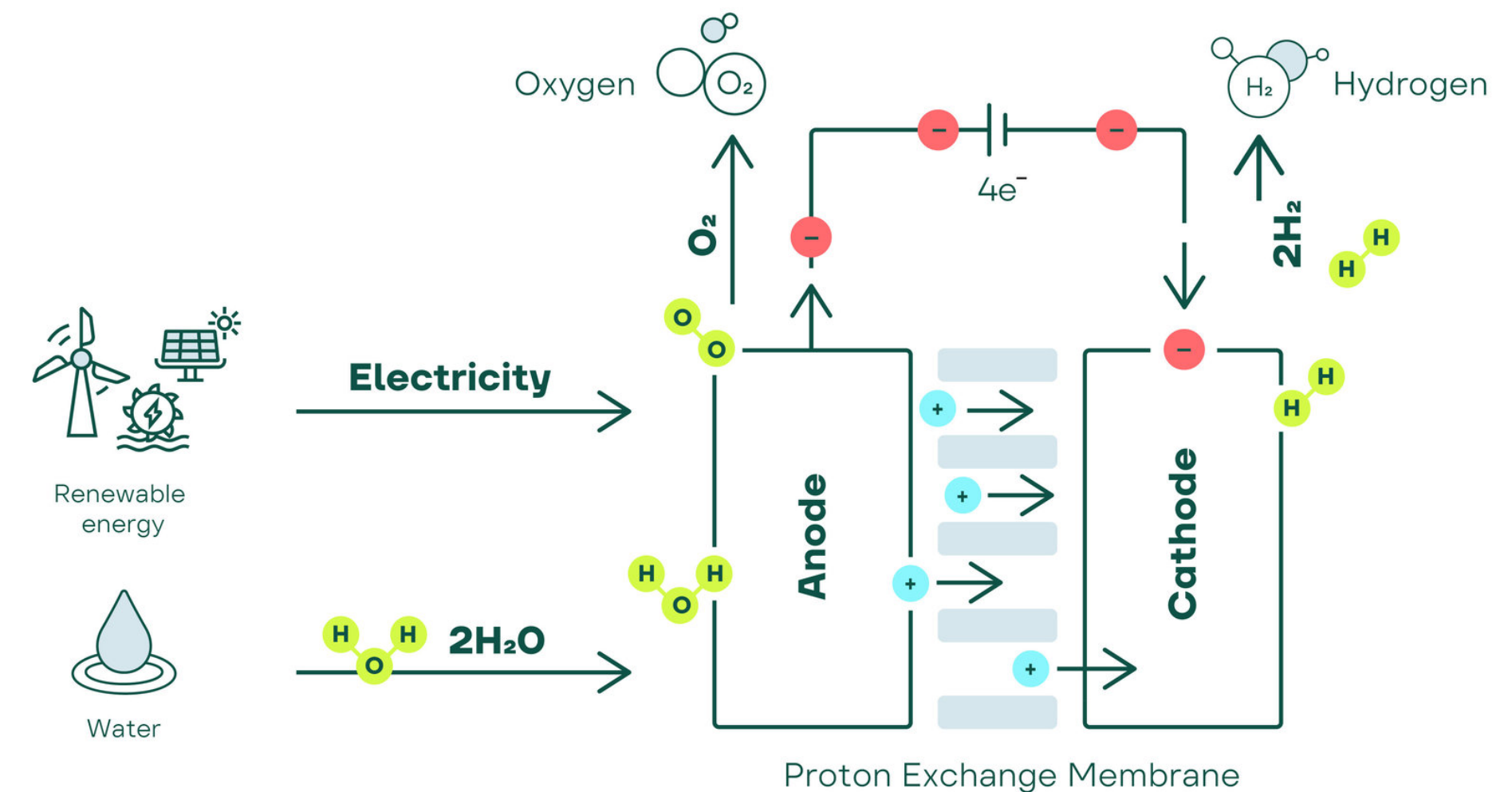
Euroopan unionin
osarahoittama

2.2 PEM-elektrolyysi

Polymeeri-elektrolyytti-membraani eli PEM

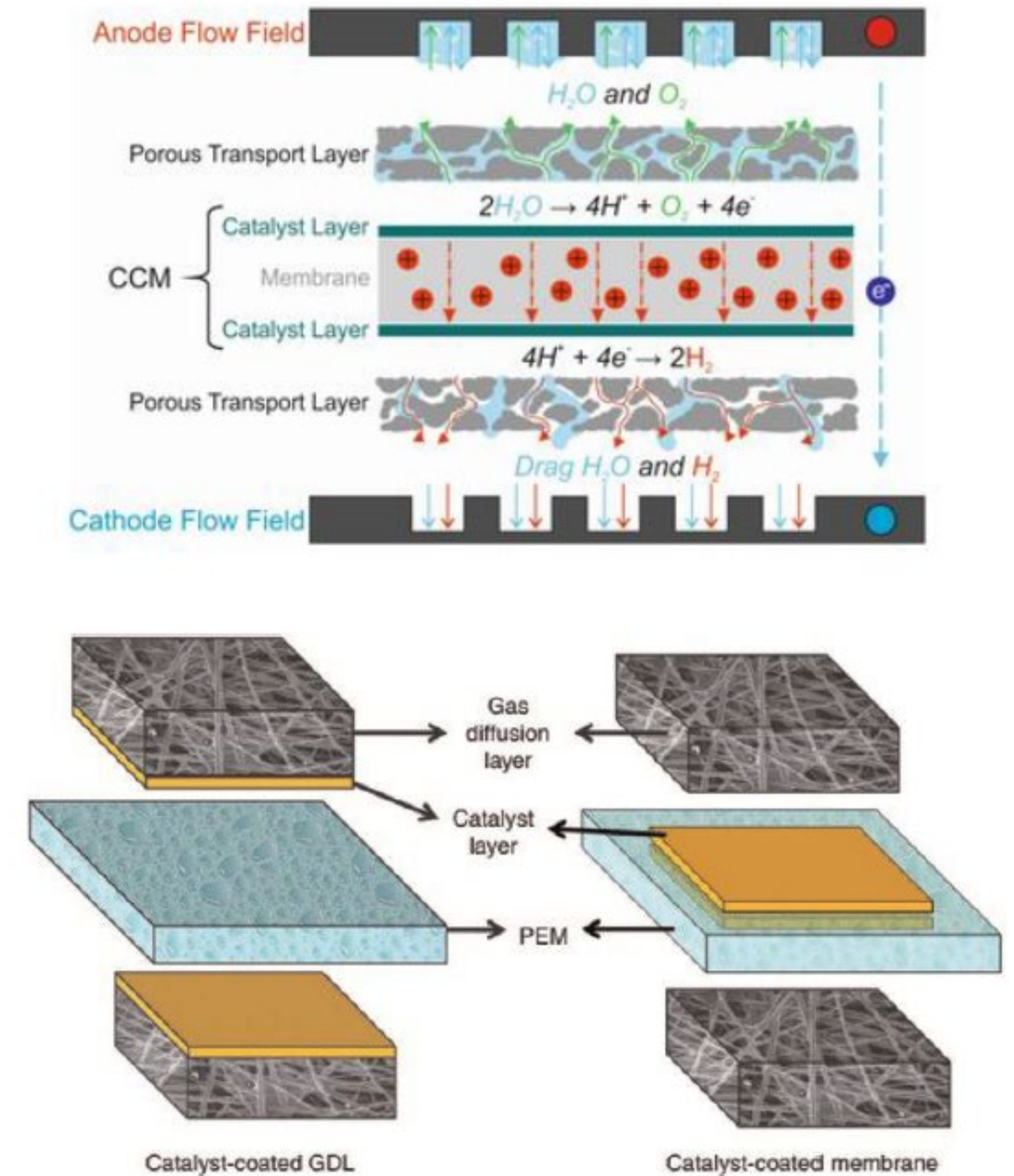
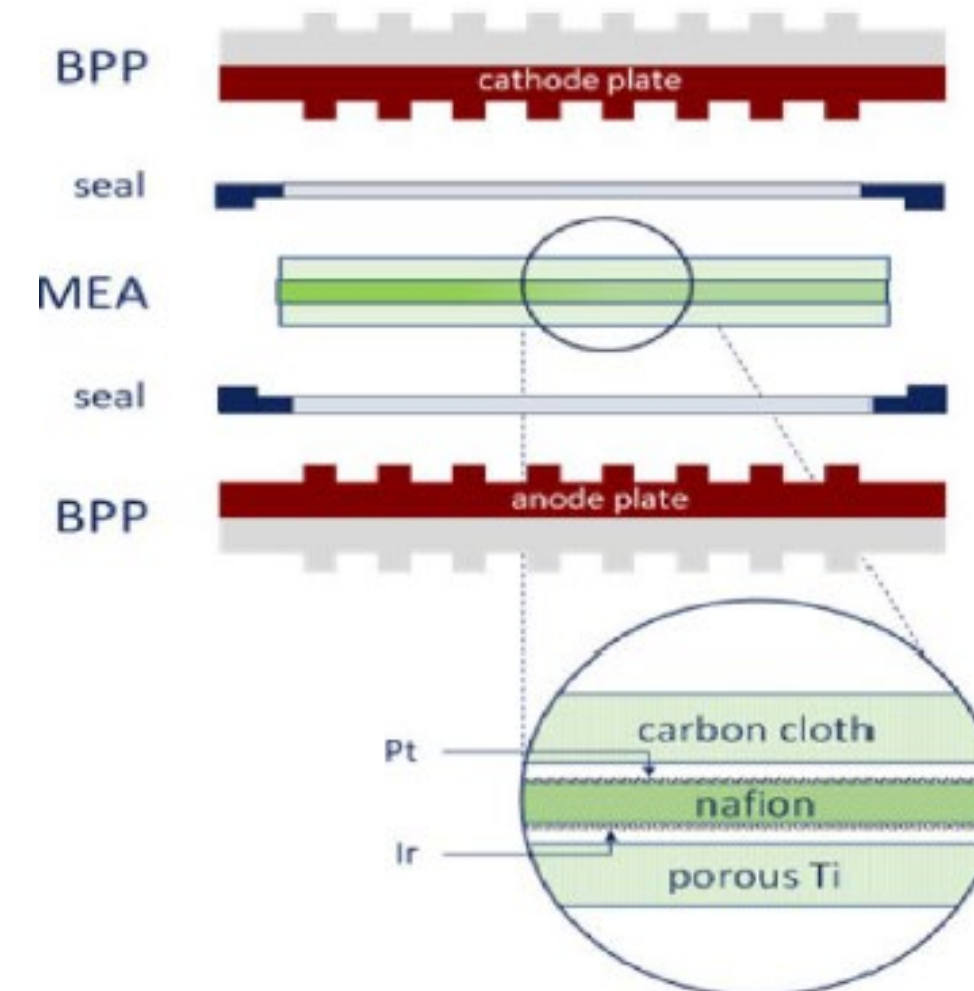
- perustuu perfluorisulfonihappokalvoon
- H⁺-ionien (protonien) kuljetukseen tarvitaan hapan elektrolyytti. – PEM-kennossa käytetään happamaa kalvoa, joka on valmistettu polymeerimateriaalista.
- kalvon kestävyys mahdollistaa paineistuksen helpottaen tuotannon skaalaamista ja paineistusta kuljetukseen
- PEM elektrolyysissä vesi hajotetaan hapeksi, vety ioneiksi ja elektroneiksi anodilla. Vety ionit ja elektronit siirtyvät kalvon läpi katodille kuvattu ja muodostuvat vedyksi katodilla
- kalvo on elektrolyytti ja erotin
- kalvon läpi pääsee myös vettä happipuolelta vetypuolelle, joka on huono puoli PEM elektrolyysissä – vesi on kaasutettava ennen palautusta happipuolelle

PROTON EXCHANGE MEMBRANE (PEM) ELECTROLYSIS



2.2 PEM-kalvon rakenne

- huokoinen kuljetuskerros (PTL) eli kaasudiffuusiokerros (GDL) kuljettaa kaasun reaktiopinnalta ulos bipolaarilevyn kanaviin
- katalyyttikerros asetetaan joko kalvon pinnalle tai kaasudiffuusiokerroksen päälle
- huokoinen kuljetuskerros on valmistettu esimerkiksi hiilipaperista, huokoisesta titaanista tai titaanisäikeistä
- kalvo ja elektrodit muodostavat yhdessä MEA:n (membrane-electrode assembly)

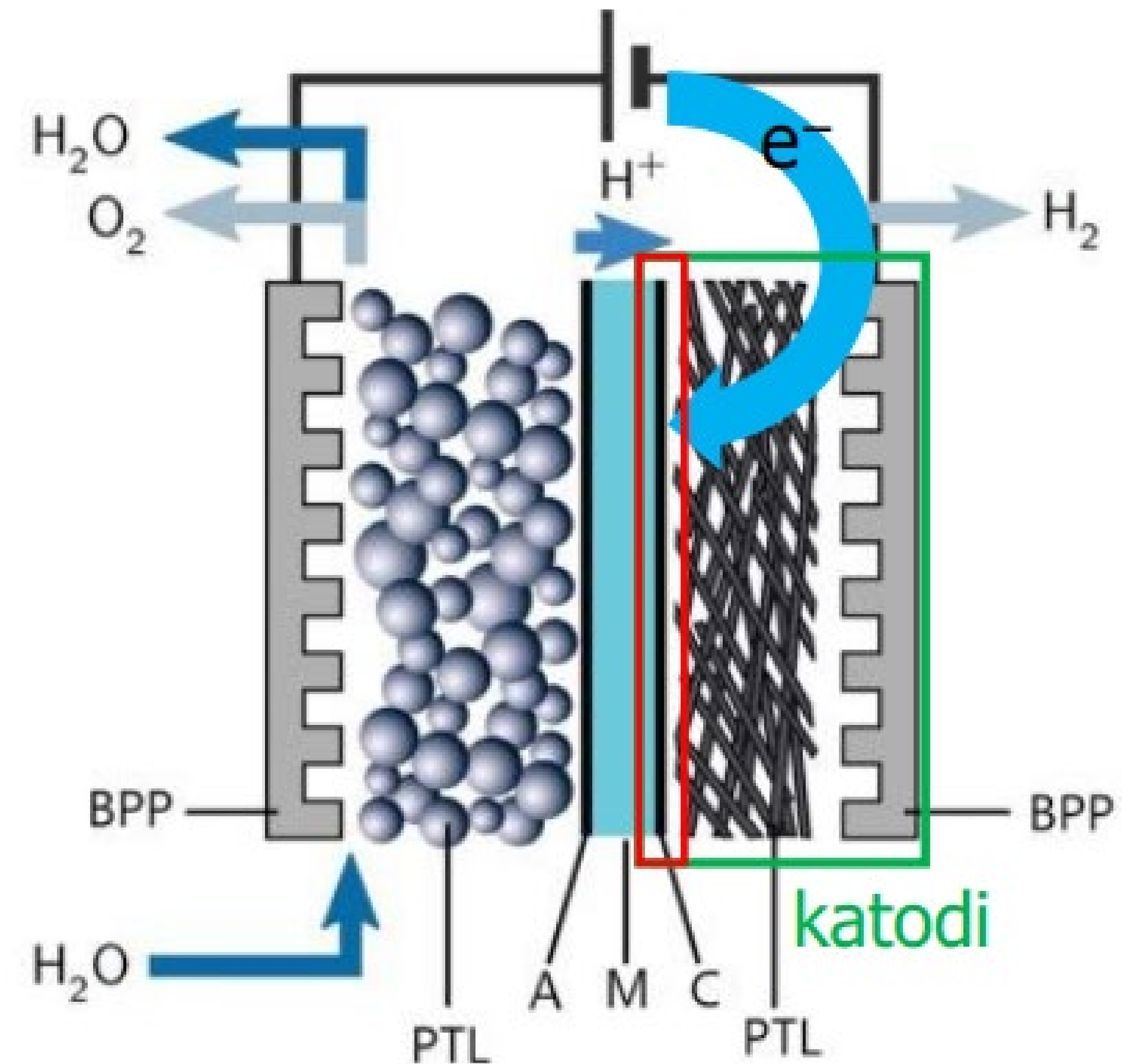


2.2 PEM-elektrolyysi

- elektrodit koostuvat kerroksista, joilla on eri tehtävät
- kerrokset ovat sähköisessä kosketuksessa toisiinsa ja muodostavat yhdessä elektrodin
- usein elektrodilla (tai katodilla tai anodilla) tarkoitetaan vain sitä sisintä kerrosta, jossa varsinainen kemiallinen reaktio tapahtuu

Kuvassa

- C = katodi - ohut kerros katalyyttistä materiaalia, joka on levitetty kalvon pinnalle. Katodireaktio $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ tapahtuu tässä kerroksessa
- PTL = huokoinen kuljetuskerros, joka läpäisee kaasun
- BPP = bipolaarilevy, jossa on kanavia kaasun poisjohtamiseen



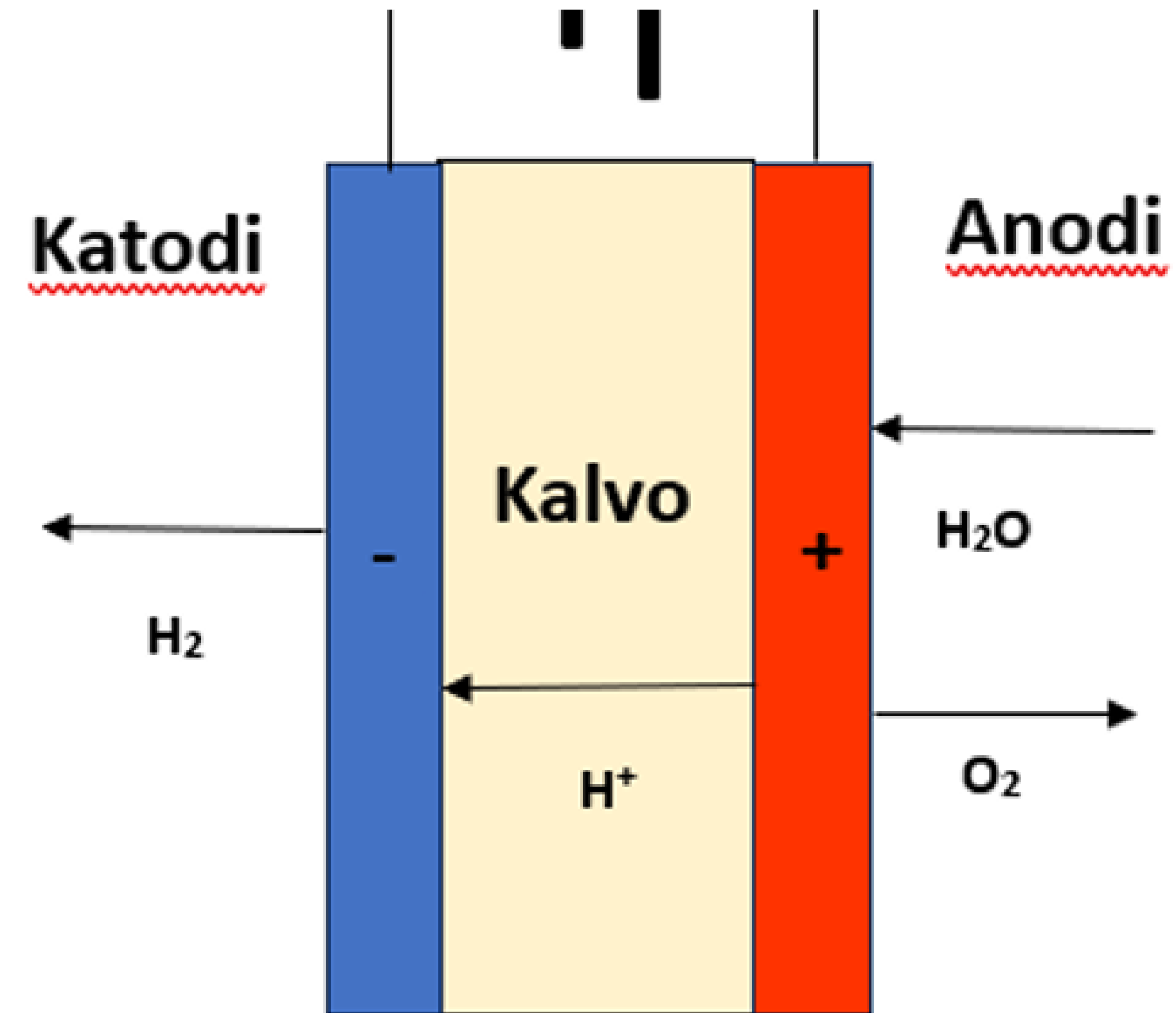
2.2 PEM-elektrolyysi

- PEM elektrolyysin suuren paineen mahdollistaa sen perfluorisulfonihappokalvon kestävyys.
- ongelmana on kalvon tuottama hapettava ympäristö, mikä vaatii titaanivalmisteisia materiaaleja, jalometallien ja suojaavienkerrosten käyttöä varmistukseen laitteen kestävyys pidemmällä aikavälillä.
 - nämä nostavat PEM kennojen hintaa huomattavasti alkalielektrolyysiin verrattuna.
- hapettava ympäristö edellyttää myös kalliimpia elektrodimateriaaleja
 - tehokkaimpia materiaaleja ovat rubidium (Ru), iridium (Ir), palladium (Pd) ja platina (Pt) - oksidit ovat stabiilimpia kuin puhtaat metallit
- IrO₂ on sekä erittäin stabiili että tehokas
 - edullisempia materiaaleja käytetään siellä, missä ne riittävät
 - kalliita materiaaleja käytetään katalyytteinä halvemman materiaalin pinnalla



2.2 PEM-elektrolyysi

- PEM - prosessin energiatehokkuus on 46–60 %, mutta sen odotetaan kasvavan 75 %:iin
- lämpötila 50–80 °C, paine 70 bar:a ja elinikä 50–80 tuhatta tuntia
- PEM:n etuja ovat korkea paine, joka auttaa madaltamaan paineistuksesta aiheutuvia kustannuksia, mahdollisuus 0 %
- energiatarpeeseen ja nopea käynnistyminen sekunneista 15 minuutteihin
- huonona puolena on sen hinta, joka on noin 59–60 % alkalielektrolyysiä kalliimpi
- PEM elektrolyysikennossa on on AEL kennoa parempi osakuorman kesto. Alkalikennoilla pienin mahdollinen osakuormitus on yleensä noin 10–40 % täydestä tehosta, kun taas PEM-kennot voivat toimia jopa 0–10 %:n kuormalla – hyötyä vaihtelevassa tuotantotarpeessa



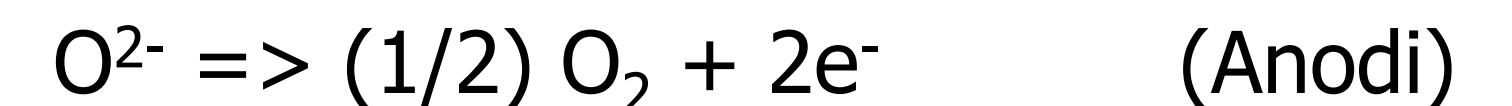
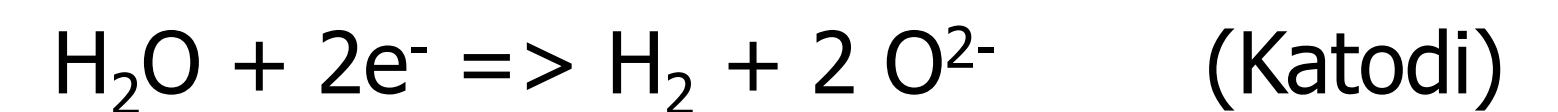
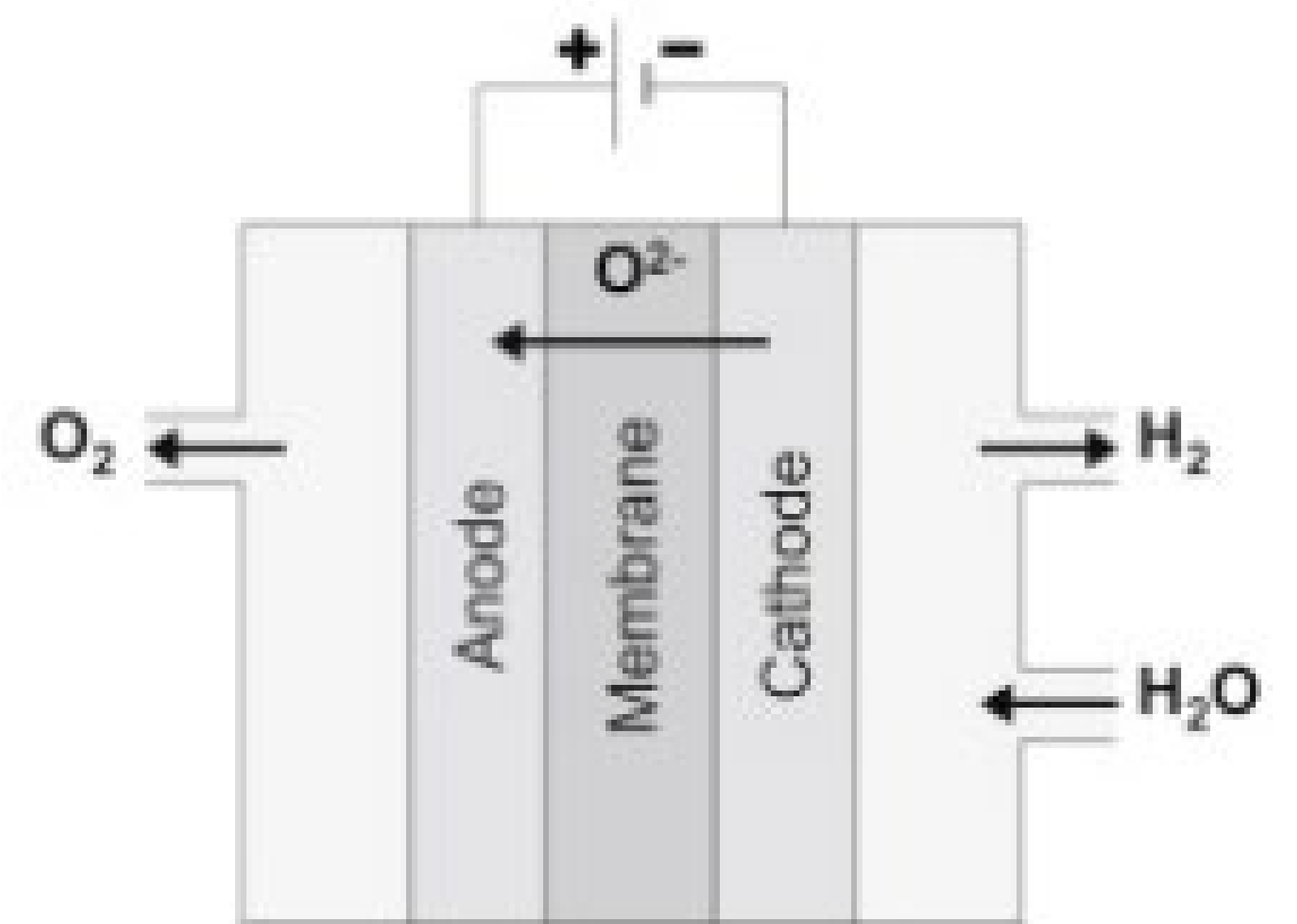
Vetyä voi vuotaa kalvon läpi happipuolelle. Vuodon merkitys korostuu osakuormalla koska kaasuvuoto on vakio riippumatta tehon laskusta. Vedyn osuus hapessa saa olla korkeintaan 2%



2.3 SOEC- elektrolyysi (solid oxide electrolytic cell)

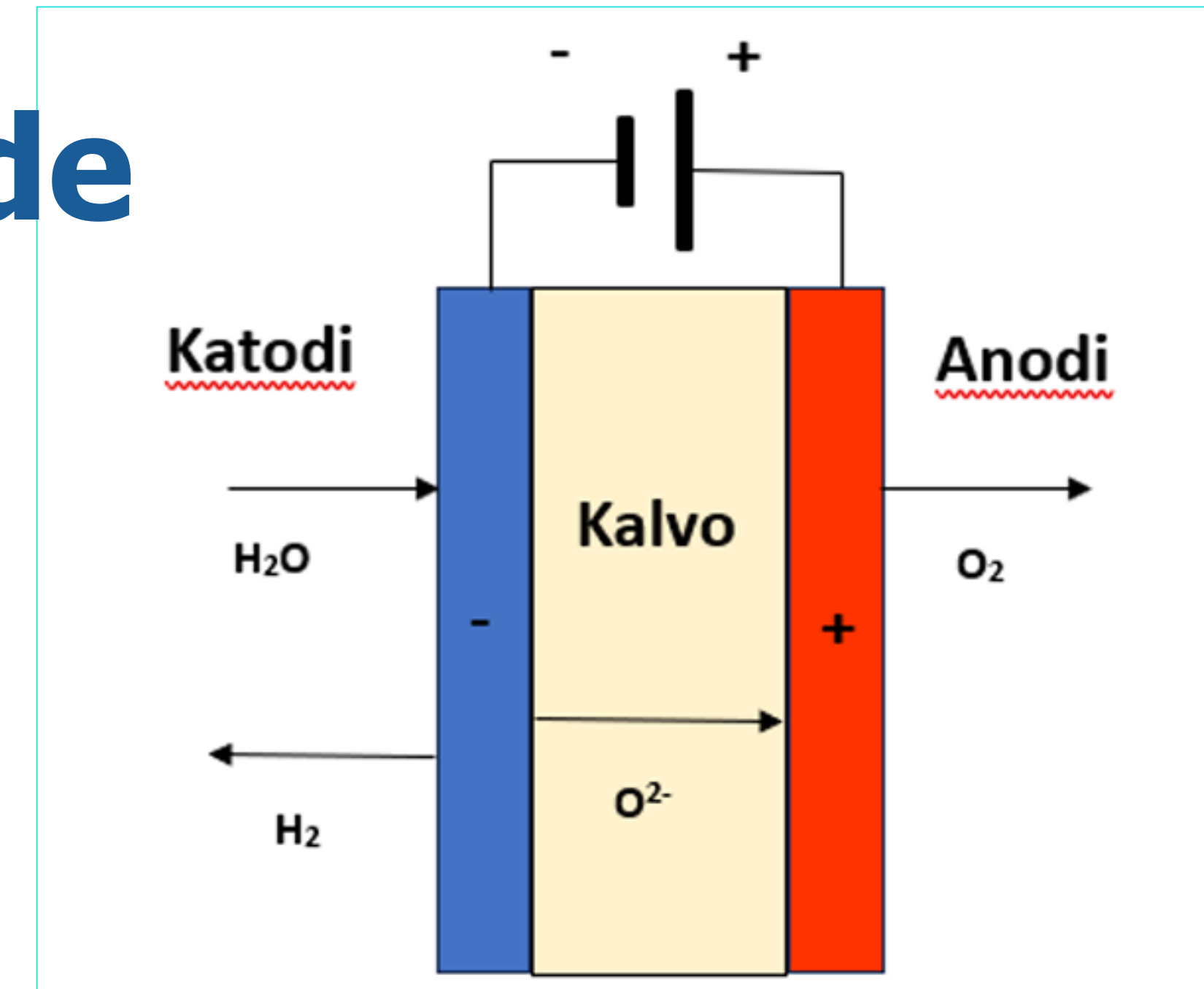
- kiinteäoksidielektrolyysikenno (Solid Oxide electrolytic cell, SOEC)) perustuu happi-ionia O^{2-} kuljettavaan elektrolyyttikalvoon
 - kalvo on elektrolyytti ja erotin
- O^{2-} kuljettaminen vaatii korkean lämpötilan, mutta mahdollistaa myös korkean tehokkuuden (lpt 600 – 1000 °C)
- korkea lämpötila sallii halvempien nikkelpohjaisten katalyyttien käytön madaltaen elektrolyysin hintaa
- prosessista syntyvää hukkalämpöä voidaan hyödyntää muissa laitoksen osissa.
- SOEC elektrolyysissä vesi muutetaan vedyksi ja happi-ioniksi katodilla
- happi-ioni kulkeutuu kalvon läpi kuvan mukaisesti ja muuttuu anodi puolella hapeksi ja elektroniksi.

Kiinteäoksidielektrolyysikenno



2.3 SOEC- elektrolyysi (solid oxide electrolytic cell)

- elektrolyytti koostuu nimensä mukaisesti kiinteästä oksidista.
 - pääasiallisesti käytetty oksidi on zirkoniumoksidi, koska se on stabiili sekä hapettumis- että pelkistymisolosuhteissa.
- hyviä puolia SOEC:ssä on sähkövarauksen joustavuus, mutta prosessi tarvitsee korkean ja tasaisen lämpötilan
 - tämä heikentää prosessin joustavuutta.
- lämpöä voi hyödyntää muissa prosessin osissa, etenkin Haber-Bosch - prosessissa.
- huonoja puolia on lämmön aiheuttamat vauriot etenkin käynnistys/sammutus vaiheessa ja sen seurauksena lyhyt käyttöikä
- hyötynä voidaan mainita se, että SOEC korkea lämpötila sallii halvempien nikkeliin perustuvien elektrodien käytön
 - tämä vähentää sähkönkulutusta ja alentaa kennojen hintaa.

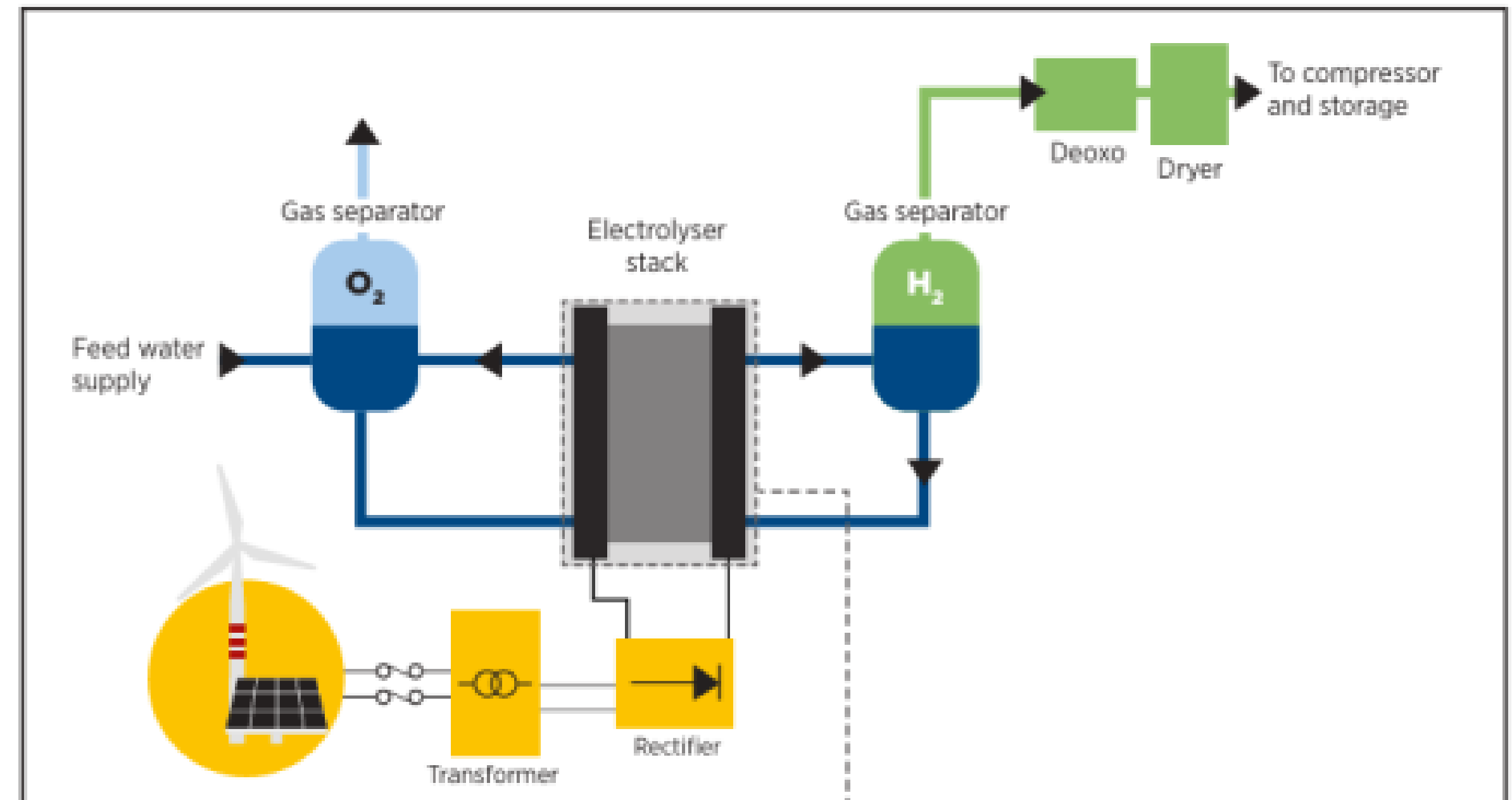


Euroopan unionin
osarahoittama

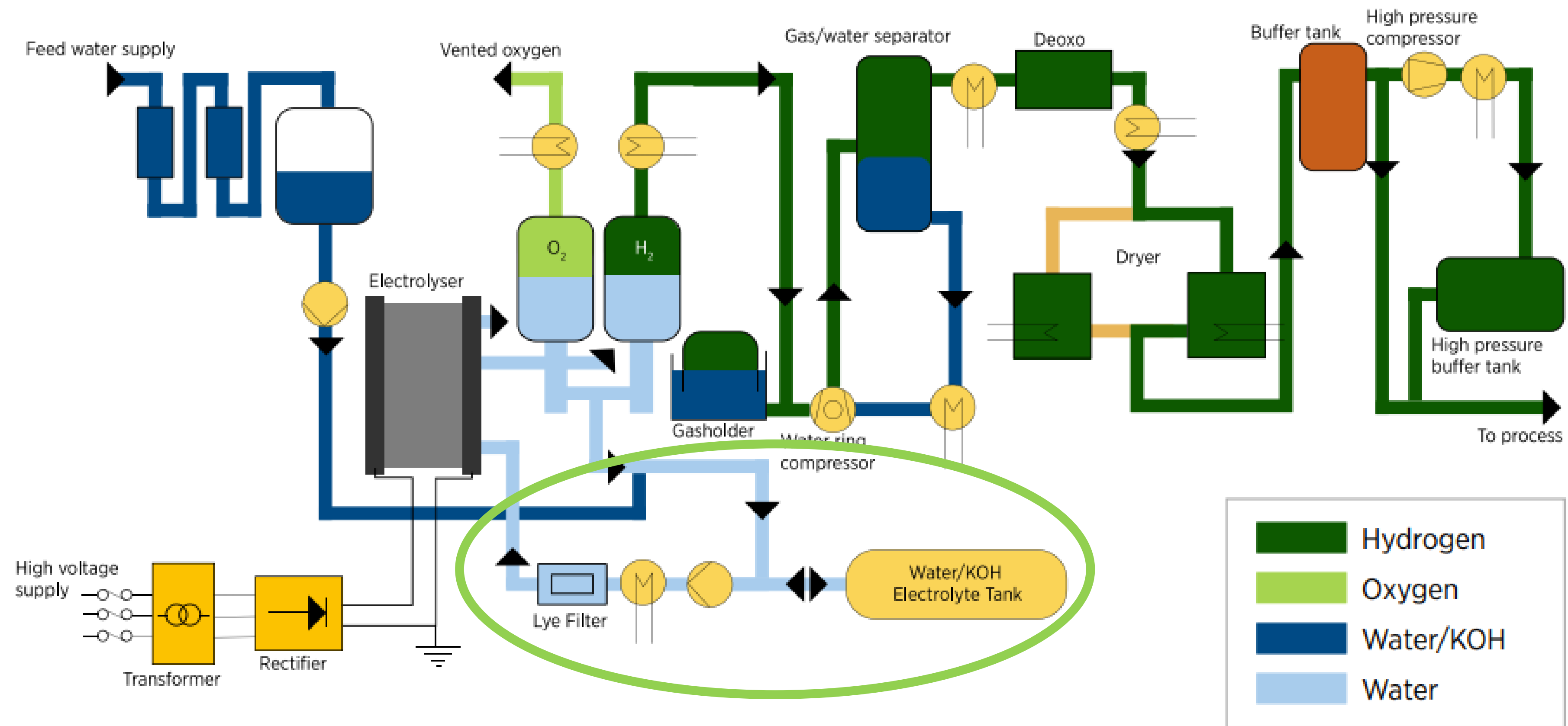
400kW class SOEC test module (Credit: Mitsubishi Heavy Industries)
SOEC- elektrolyysin toiminta

3. Elektrolyysilaitos

- Virtalähde
 - muuntaja
 - Tasasuuntaaja
- Stack – elektrolyysikenno
- Kaasunkäsittely
 - kaasun erotus elektrolyyttiliuoksesta/vedestä
 - katalyyttinen hapen poisto vedystä yhdistämällä vety ja happi vedeksi
 - kaasun kuivaus vesihöyrystä
- Kaasun komprimointi ja varastointi



3. Elektrolyytilaitos – alkalinen käsittely



3. Elektroyysilaitos – vertailu

Virrantiheys – korkein PEM elektroyyserillä.

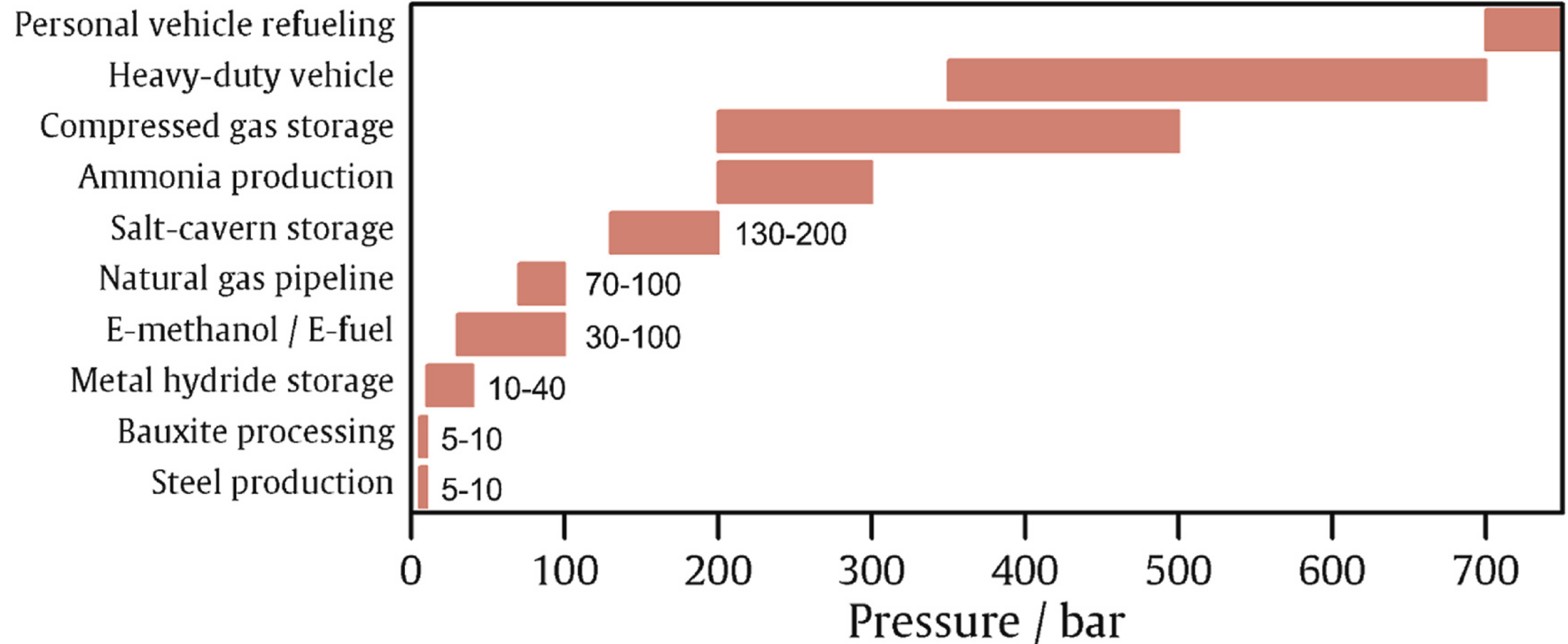
Saman kokoisesta elektroyyseristä tai kennopinosta saadaan enemmän vetyä ulos tai toisin päin, saman määrän tuottava PEM-elektroyyseri on huomattavasta AEC tai SOEC elektroyyseriä pienempi.

Property	AEC	PEM	SOEC
Operointi paine (bar)	1-30	30-80	1
Operointi lämpötila ($^{\circ}C$)	60-80	50-80	650-1000
Tyypillinen virran tiheys (A/cm^2)	0.4-1.0	0.2-4.0	0.5-1.5
Markkinatilanne (deployed MW)	>1000	>100	<10
Hyötysuhde (%)	63-70	56-60	74-81
Ikäantyminen (% per 1000-hour)	0.13	0.25	0.55-1
Käyttöikä täysi tuotanto (10000 hours)	6-10	5-9	2-5

Tarkasteltaessa tuotetun vedyn puhtautta PEM-elektroyyserit tuottavat huomattavasti puhtaampaa vetyä kuin AEC elektroyyserit. Korkean puhtausvaatimuksen kohteissa esim. polttokennot vaaditaan AEC jälkeen vedyn puhdistus



3. Vedyn paineentarve käyttökohteessa



3. Elektrolyyserin mitoituksen optimointi

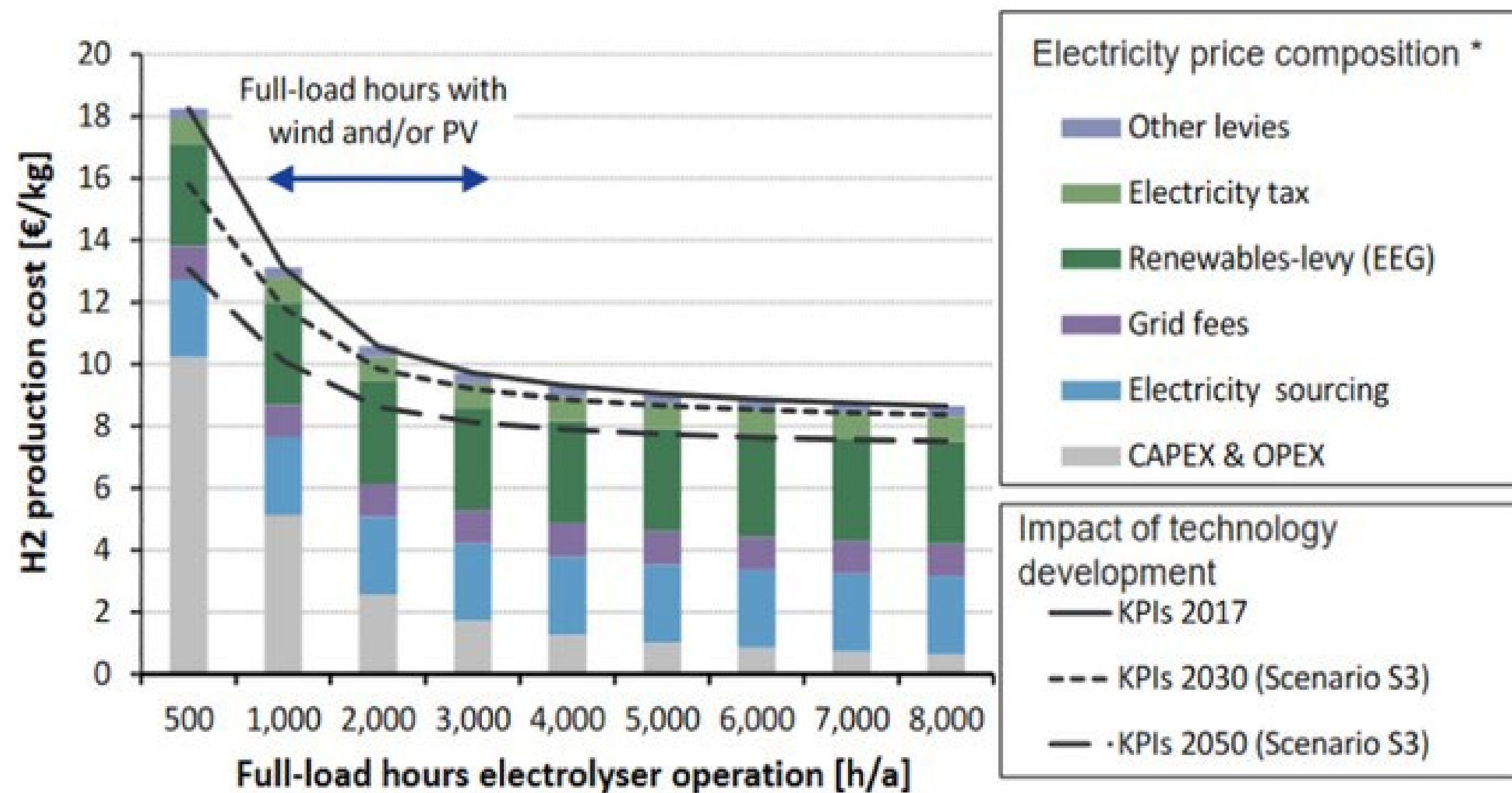


Figure 1. The impact of full-load hours on green hydrogen production costs (NOW 2020)

$$\text{Huipunkäyttöaika [h]} = \frac{\text{Vuoden aikana tuotettu energia [Wh]}}{\text{Nimellisteho [W]}}$$

Elektrolyyserin hyötysuhdetta voidaan parantaa lämpötilan, paineen tai virran nostolla.

Elektrolyyserin höytysuhde lähtee laskemaan lievästi n. 15% tehosta ylöspäin.

Näistä seikoista huolimatta **huipunkäyttöaika** on keskeisin tuotetun vetykilon hintaan vaikuttava tekijä.

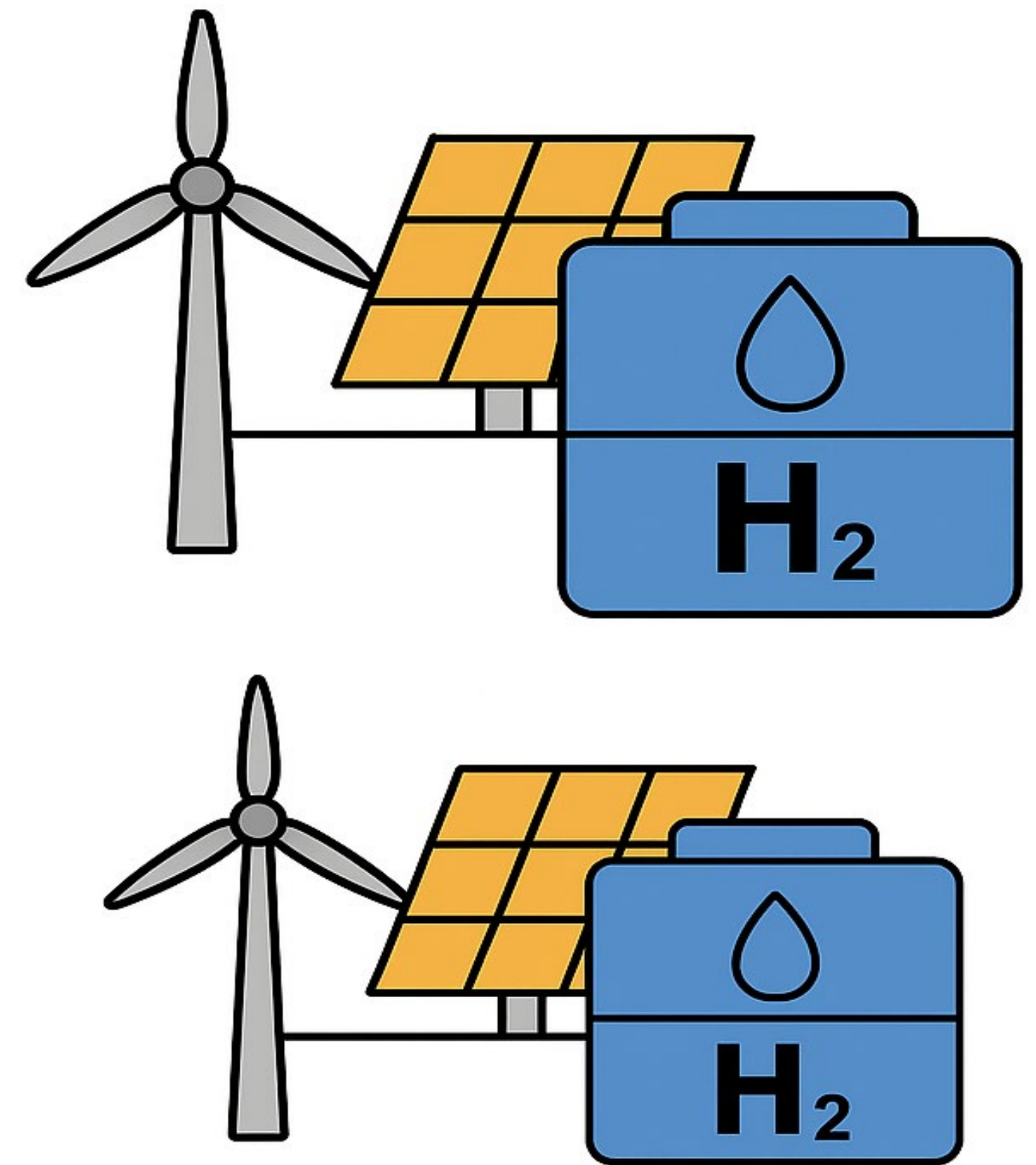
Huipunkäyttöaika ilmoitetaan tunneissa ja sillä tarkoitetaan sitä tuntimäärää, jona aikana vuoden tuotanto olisi tuotettu voimalan nimellisteholla.

Mitä pienempi on huipunkäyttöaika sitä suuremman ajan voimala on tuottamatta tehoa tai tuottaa sitä nimellistehoonsa nähden vähän.



3. Elektrolyyserin mitoituksen optimointi

- oleellinen tarkasteltava muuttuja on huipunkäyttöaika, Capacity factor, Cf
- suuri elektrolyyseri suhteessa sähkön saantiin:
 - alhainen Cf, enemmän vetyä, mutta CAPEX korkeat €/kg.
- pieni elektrolyyseri suhteessa sähkön saantiin: korkea Cf, vähemmän vetyä
 - OPEX ja Capex alhaisemmat per tuotettu vetykilo.
- hybridilaitokset (tuuli+aurinko) yleensä alhaisin vetykilon hinta ja paras kannattavuus
 - elektrolyyserin optimi koko erittäin tapauskohtainen ja riippuu tuuli ja aurinkosähkötuotannosta; esimerkkikokoonpano: 10 MW elektrolyyseri, 15 MW tuulipuisto ja 45 MW aurinkopuisto (10 vs 60 MW)
 - OPEX viittaa päivittäisiin menoihin, joita tarvitaan toiminnan ylläpitämiseen. Näihin kuuluvat esimerkiksi työntekijöiden palkat, vuokrat, sähkölaskut ja muut juoksevat kulut
 - CAPEX puolestaan tarkoittaa pitkäaikaisia investointeja, kuten rakennusten peruskorjauksia, uusien laitteiden hankintaa tai muiden fyysisten omaisuuksien ostamista, jotka parantavat suorituskykyä pitkällä aikavälillä



3. Elektrolyserin vastinajat

- Case Nelhydrogen(A-sarja, **paineistamaton**)
 - kylmäkäynnistyksestä täyteen tehoon 30 min
 - tehonlisäys 15 %:sta täyteen tehoon n. 10 min
- **Paineistettu** alkalielektrolyseri tehonlisäys 10 %:sta täyteen tehoon sekunneissa

	AEL	PEM (AEM)	SOEC
kylmäkäynnistys	10 - 60 min	5 -10 min	Yli 60 min
"warm start"	minuutteja	sekunteja	Sek/Min
Minimiteho	10-40%	0-5%	n. 5%



3. Elektrolyserin tasapaino/optimointi

- **hyötysuhde**, paljonko vetyä saadaan raaka-aineista (sähkö/vesi)
- laitteiston **elinkaaren pituus ja kestävyys** (huollon tarve, down time, kustannukset)
- **investointikulut** (Capex)
- **käyttökulut** (Opex)
- hinta vs laatu; kalliimmalla elektrolyserillä usein parempi hyötysuhde, pidempi elinkaari ja vähemmän tuotantoseisokkeja.
- tilantarve ja sijainti: PEM pienempään tilaan kuin AEL.



3. Vedyn tuotantoa Suomessa

- P2X Solutions on rakentanut Harjavaltaan 20 MW vedyntuotantolaitoksen, joka tuottaa vihreää vetyä.



- Woikoski Oy:llä on Kokkolassa 9 MW vetylaitos teollisuudessa käytettävän vedyn tuotantoon.



Euroopan unionin
osarahoittama

3. Vedyn tuotantoa maailmalla

- Tällä hetkellä maailman suurin vihreän vedyn tuotantolaitosprojekti — Sinopec's 260MW Kuqan laitos Xinjiangissa, luoteis-Kiinassa.
- Euroopan laajimpia tuotantolaitoksia on REFHYNE PEM Elektrolyysilaitos Reininmaalla Saksassa. Elektrolyyserin huipputeho on 10 MW (megawattia), ja se pystyy tuottamaan noin 1 300 tonnia vetyä vuodessa.
 - tämä hiilidioksidipäästötön vety voidaan integroida polttoaineiden valmistuksen prosesseihin kuten rikinpoistoon

