

Kütuseelemendid – *quo vadis?*

Enn Lust

Viimastel aastatel on kogu maailmas hakatud pöörama väga palju tähelepanu alternatiivsete energeetiliste ressursside nagu tuule-, geotermaal-, hüdro-, biomassi- ja päikeseenergiale ning teiste tõhusamate energiaallikate kasutamisele. Selle peamiseks põhjuseks on ühelt poolt nafta- ja gaasivarude ammendumine ning teiselt poolt tarbimise plahvatuslik kasv Aasias, eeskätt Hiinas, Indias, Indoneesias.

Nii USA-s, Jaapanis, Kanadas kui ka Euroopas on käivitatud ulatuslikud riiklikud vesinikuenergeetika ja kütuseelementide uurimis- ja arendusprogrammid.

Esmakordselt väga pika ajavahemiku järel ületavad USA-s kütuseelementide arendamiseks eraldatavad riiklikud vahendid biokeemiale eraldatud ressursse. 2003. aastal allkirjastasid Euroopa Liit ja USA memorandumini nn vesinikuühiskonna rajamiseks, tuginedes veendumusele, et 21. sajandi põhilisteks energiakandjateks kujunevad vesinik ja metaan, mida toodetakse kas fotoelektrokeemiliste, elektrokeemiliste, juhitava termotuumareaktsiooni, anaeroobse biodegradatsiooni, söe gaasistamise ja muulgi viisil. Vesiniku kui ühe põhilise energiaallika tootmise, transpordi ja käitlemise infrastruktuuri väljaarendamine kujul, mis oleks majanduslikult põhjendatud, võimaldaks laialdaselt kasutusele võtta kütuseelemendid.

Kütuseelementide arendamine eeldab väga põhjalikke uuringuid nii materjaliteaduse kui ka füüsika ja keemia, eriti aga elektrokeemia vallas. Nanopoorsete elektrootodide kasutamine kütuseelementides võimaldab oluliselt tõsta optimaalset voolutihedust ning kogu ühikraku energia- ja võimsustihedust. Seoses nanostruktuursete ja nanopoorsete materjalide üha suurema kättesaadavuse ning omahinna alanemisega on hädavajalik uurida nende füsikokeemilisi omadusi, samuti lahendada nanopoorsete süsteemide pikaajalise eksploatatsiooni probleeme.

Loetletud küsimuste ring on olnud aktuaalne ka Tartu ülikooli füüsikalise keemia instituudis, ning uuringute teostamiseks on kasutatud nii Eesti Teadusfondi toetusi kui ka raha sihtfinantseeritavatele teadusteamadele, samuti Eesti ja rahvusvahelise erakapitali (AS Elcogen, AS Tartu Tehnoloogiad) ressursse.

Mis on kütuseelement?

Esimese kütuseelemendi koostas sir William Grove Inglismaalt juba 1839. aastal. Selles kasutati kahte suhteliselt suurepinnalist plaatinaelektroodi, millest ühel (katoodil) toimus hapniku redutseerumine ja teisel anoodil vesiniku kui kütuse oksüdeerumine. Elektrokeemilise redoksprotsessi tulemusena tekkis elektronide suunatud voog anoodilt katoodile ehk elektrivool, ning eraldus soojust. Elektrolüüdina kasutas Grove lahjat väävelhappe (H_2SO_4) vesilahust. 1896. aastal sõnastas rohelise energeetika üks pioneere, Tartu ülikooli kasvandik Wilhelm Ostwald (Nobeli keemiapreemia laureaat 1909) kütuseelemendi termodünaamilised alused ja näitas, et kütuseelemendid on oluliselt tõhusamad keemilise energia elektriks ja soojuseks muundamise seadmed, kui Carnot' termodünaamilisel soojusmasinal põhinevad süsteemid.

Nüüdisajal võib elektrokeemilised vooluallikad jagada kolmeks: primaarpatareid, mida pole võimalik uuesti laadida, sekundaarpatareid ehk akumulaatorid, mida saab perioodiliselt laadida, ning pidevalt töötavad kütuseelemendid, kus oksüdeerija ja redutseerija juurdevool ning reaktsiooniproductide – elektrivoolu, soojuse, vee ja süsihappegaasi pidev eemaldamine süsteemist tagab seadme pideva töö.

Ehituse poolest on kütuseelemendid väga lihtsad, koosnedes teineteisest eraldatud anoodist ja katoodist. Lahuti hoiab ära anoodi ja katoodi mehaanilise kokkupuutumise (lühistumise) ning täidab sageli ka ioonjuhi rolli (vt joonis 1). Kütuseelemendid on vastavalt töötemperatuurile madaltemperatuursed (kuni 80 °C), keskmise- (kuni 500 °C) ja kõrgtemperatuursed (600–1200 °C) (tabel 1). Vastavalt tööprintsibile ja elektrolüüdi keemilisele koostisele on tänapäeva kütuseelemendid jaotatavad neljaks põhitüübiks: polümeerelektrolüütmembraaniga kütuseelement (PEKE), fosforhappe kütuseelement (PHKE), sulatatud karbonaatkütuseelement (SKKE) ja tahke oksiidkütuseelement (TOKE).

Tabel 1. Erinevate kütuseelementide karakteristikud.

Tüüp / Omadused	PEKE (PEM*)	PHKE (PAFC*)	SKKE (MCFE*)	TOKE (SOFC*)
Töö-temperatuur	70–80 °C	200 °C	650–700 °C	900–1100 °C (600–700 °C)

Elektrolüüt	Nafion (polü[perfluorosulfoonhape], H ⁺ -juht)	H ₃ PO ₄	Na ₂ CO ₃ - Li ₂ CO ₃	ZrO ₂ -Y ₂ O ₃ (CeO ₂ - Gd ₂ O ₃)
Kasutatav kütus	H ₂	H ₂	H ₂ , CH ₄ , CO	H ₂ , CH ₄ , CO, CH ₃ OH, C ₃ H ₈ , C ₄ H ₁₀ , bensiin, diislikütus
Saavutatud efektiivsus	35–40%	40%	45%	50%, (45–60%)
Võimsus	10–15 kW	35–42% kW	45–60 kW	50–80 kW
Maksimaalne efektiivsus	30–40 %	35–42%	45–60%	50–80%

* Rahvusvaheliselt enamkasutatud tähised.

Tabelist on näha, et nii saavutatud kui ka teoreetiliselt arvatud efektiivsused on kütuseelementide korral väga erinevad ning paremad tulemused on saadud tahkeoksiid-kütuseelementide korral. Kõrgtemperatuursete kütuseelementide põhiliseks eeliseks madaltemperatuursetega võrreldes on võimalus kasutada keerulisema molekulaarstruktuuriga energiakandjaid ja seega ka nn entroopiafaktorit kasuliku töö tegemiseks. See tõstab süsteemis kütuse oksüdeerumise summaarset kasutegurit olulisel määral. Millist kütuseelementi eelistada, see oleneb loomulikult rakendusala. Kui näiteks kütuseelement on mõeldud maja kütmiseks, saab ka elektrienergia kõrval eralduva soojuse ära kasutada. Autodes aga on madaltemperatuursete energiaallikad sobivamad. Ent üldiselt on oluline kütuseelemendi kasuteguri ja omahinna suhe.

Kuidas kütuseelement töötab?

Madaltemperatuursete PEKE skeem on toodud joonisel 1. Poorses anoodis toimub vesiniku oksüdeerumine ($2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$) elektrolüütmembraanis – anoodil moodustunud prootonite suunatud liikumine katoodile ning poorses katoodis toimub hapniku redutseerumine, antud juhul hapniku ühinemine katoodilt saabunud prootonitega: $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{H}_2\text{O}$. Tänapäevastes kütuseelementides on kasutatud

10–25 µm paksusi membraane (Nafion™ e polüperfluorosulfoonhape või tema erinevad modifikatsioonid, fosforhappega modifitseeritud polümeerid või erinevad vesiniksoolad, näiteks CsHSO₄), millele on kantud ~10 µm paksune nanopoorse süsiniku kiht, mida on aktiveeritud plaatina või platinasulami (Pt-Co, Pt-Ru jt) nanoosakestega. Sellise poorse aktiivkihi katalüütiline aktiivsus peab säiluma väga pika ajavahemiku jooksul (loodetavasti kuni 5500 tundi).

Kuna tegemist on klassikalise O₂-st ja H₂-st vee moodustumise elektrokatalüütilise protsessiga, siis antud üksikelemendi maksimaalne termodünaamiline potentsiaalide erinevus on 1,229 V (joonis 2).

Seejuures on tegemist isevoolulise protsessiga, kus keemiline energia muundatakse otse elektriks ja eralduvaks soojuseks.

Nüüdisaegse PEKE võimsustihedus 350–500 mWcm⁻² (millivatti ruutsentimeetritele) sõltub väga paljudest konstruktsioonilistest nüanssidest. PEKE põhiprobleemiks on nafionmembraani ja katalüütiliselt aktiivsete kihtide suhteliselt kõrge omahind ja lühike eluiga, seda eriti elemendi reaalse eksploatatsiooni tingimustes transpordivahenditel, kus gaaside lisanditest tingitud ja reaktsiooni käigus moodustunud vaheühendite saastavale mõjule lisandub ka vibratsiooni põhjustatud katalüütiliselt aktiivsete kihtide delamineerumine (kasvab kontakttakistus nafionmembraani ja plaatina vahelisel piirpinnal). PEKE eluiga vähendab ka tippvoolude esinemine elektrokeemilises süsteemis (koormuse kasv auto startimisel ja kiirendusel).

USA-s on välja arvatud, et oma keskmise loodetava eluea jooksul (5500 tundi) peab PEKE taluma kuni 300 000 piirkoormuse tsüklit. Seetõttu püütaksegi välja töötada “tõelist” hübriidelektriautot, kus lisaks kütuseelemendile on tippvoolutiheduste (tippkoormuste) saavutamiseks kasutusel elektrilise kaksikkihi kondensaator (nn superkondensaator). Superkondensaatorid on väga efektiivsed impulssvooluallikad/salvestid, mille elektriline kasutegur on 93–95 protsenti. Kombineerides koormusjaotust kütuseelemendi ja superkondensaatori vahel, on tõenäoliselt võimalik pikendada kütuseelementide eluiga transpordivahenditel. Esimesed süstemaatilised katsetused (Toyota, General Motors, BMW, Mercedes Benz) kinnitavad antud meetodi kasutamiskõlblikkust.

Madaltemperatuurised kütuseelemendid (põhiliselt PEKE ja tema modifikatsioonid) on sobivad väiketarbijatele, kuna nende optimaalne võimsus jääb

10–15 kW vahemikku. Arvestades PEKE madalat töötemperatuuri, on ta kiiresti käivitav ning seega sobiv elektriliste transpordivahendite – elektriautode, busside, mootorrataste ning skautrite puhul. Aga ka võimsate arvutussüsteemide, mobiilsete translatsioonijaamade, raadiomajakate jne varustamiseks elektriga väheasustatud piirkondades, samuti pikemaegsete elektrikatkestuste puhul.

Kõrgtemperatuursed kütuseelemendid

Kõrgtemperatuursetele kütuseelementidele pani aluse W. Ostwaldi õpilane Walter Nernst, kes 1899. a avastas ütriumoksiidiga dopeeritud tsirkooniumoksiidis ($ZrO_2-Y_2O_3$) kõrgtemperatuurse ioonjuhtivuse. Seega sünteesis ta esimese kõrgtemperatuurse ioonjuhi. Kõrgtemperatuursed kütuseelemendid on kindlasti oluliselt efektiivsemad fossiilides sisalduva energia ja biokütuste elektrienergiaks muundamise süsteemid kui tavalised Carnot' termodünaamilisel tsüklil põhinevad soojusmasinad (tavaliste soojuselektrijaamade kasutegur on 33–35 protsenti). Kui kõrgtemperatuurset kütuseelementi kasutada nii elektri kui ka soojuse koostootmiseks, siis on tema arvestuslik kasutegur üle 80 protsenti.

Kõigi tänapäeva automootorite, peamiselt sise põlemismootorite kasutegur on alla 30 protsenti, samas kui vesiniku baasil töötava kütuseelemendiga (tavaliselt PEKE) varustatud elektriautode kasutegur on 40–45 protsenti. Lisaks sellele on elektriautod ökoloogiliselt puhtad, ning kui kütusena kasutada vesinikku, siis eraldub protsessis ainult vesi, kuid mitte SO_x , NO_x , CO_x , ära reageerimata orgaanilisi ühendeid jt põlemisjääke. Katsed näitavad, et isegi sellises kütuseelemendis, kus toimub kütuse (CH_4 , C_3H_8 , CH_3OH , C_2H_5OH) sisemine ehk vahetu reformimine (joonis 3a), mille tulemusena moodustub H_2 , CO_2 , CO ja H_2O segu, on kasutegur üle 40 protsenti. Joonisel 3b on toodud enam kasutatava reformeri tööpõhimõte.

Konstruksioonilt on kõrgtemperatuurne kütuseelement TOKE kas torukujuline või planaarne. Torukujulise kütuseelemendi väga suureks eeliseks on termilisel tsüklerimisel tekkivate termiliste pingete parem taluvus. Planaarsed kütuseelemendid võimaldavad saavutada oluliselt suuremaid voolutihedusi ($0,5-0,7 A cm^{-2}$), kuid nende puhul esinevad tõsised probleemid termilisel tsüklerimisel.

Sõltuvalt TOKE elektrodide ehitusest on nende põhiosaks mehaaniliselt tugev katood, elektrolüüt või anood. On tehtud kindlaks, et ei kandval elektrolüüdil ega ka katoodil baseeruvad TOKE-d ei suuda rahuldada võimsustiheduse kriteeriumi ($0,2-0,4 A cm^{-2}$), kuna paksu katodi ja elektrolüüdi järjestikune takistus on liialt

suur. Seepärast pööratakse nüüd erilist tähelepanu kas anood-toetatud või metall-toetatud kütuseelementide uurimisele. Vastupanuvõimet termilisel tsükleerimisel kogunevatele pingetele püütakse neis tõsta metallvõrgu või perforeeritud metalli lisamisega elektrolüüdi- või anoodimaterjali. Mõistagi peavad erinevate materjalide termilise paisumise koefitsiendid ning nende temperatuurisõltuvused olema väga lähedased, et termilisel tsükleerimisel ei tekiks kütuseelementide mehaanilist purunemist. Oluliseks probleemiks on ka elektrokeemiliselt inertsete katoodi-, elektrolüüdi- ja anoodimaterjalide kõrge omahind ning teiste konstruktsioonelementide (voolukollektorid, korpused, gaaside sisestamise süsteemid) kõrgtemperatuurne korrosioon. Kasutades erinevalt disainitud moodulsüsteeme on TOKE võimsust võimalik varieerida suurtes vahemikes – kümnest kuni tuhande kilovatini.

Peale efektiivsuse on kõrgtemperatuursete kütuseelementide teiseks suureks eeliseks see, et nad ei tarvita kütusena ülipuhast vesinikku, vaid on võimelised töötama ka kütuse sisemise ehk vahetu reformimise (katalüütiline lagundamine) tingimustes (joonis 3a). Samuti on nendes võimalik kasutada eelnevalt välises reformeris osaliselt lagundatud kütusest moodustunud gaaside segu (joonis 3b)

Kas vesinikumaailm on juba ligidal?

Vesinik kui energiakandja on väga atraktiivne, kuid tema suureks puuduseks, võrreldes teda sisaldavate ühenditega (joonis 4), on suhteliselt väiksem energiatihedus normaalrõhul ja -temperatuuril. Pealegi pole ühiskond praegu valmis üleminekuks nn vesinikuühiskonda, sest puudub vajalik infrastruktuur (vesiniku transpordi süsteemid ning tanklate võrk). Seetõttu on vesiniku “salvestamine“ erinevates vormides (metallhüdriidid jt vesinikühendid) või tema energiatiheduse suurendamine (kokkusurumine, veeldamine) väga oluline. Samuti on tähtis leida lahendus küsimusele, kuidas teda ohutult transportida. Praegu on pikim torujuhe, mida mööda vesinikku transporditakse, 1400 km (USA) ning suurim tehas toodab 10 miljonit kuupmeetrit vesinikku päevas. Selleks, et täita USA energeetikaministeriumi 2015.–2018. aastaks püstitatud eesmärged (SO_x , NO_x ja CO_x õhkupaiskamise vähendamine, üleminek efektiivsemate kütuste kasutamisele), tuleb vesiniku tootmise mahtu tõsta mitmeid kordi.

Põhiliselt toodetakse vesinikku loodusliku gaasi reformimise teel (joonis 3). Et aga vesiniku omahinda vastuvõetavamaks muuta, tuleks protsessi efektiivsust oluliselt

suurendada (tabel 2). Ioonjuhtivate keraamiliste materjalidega membraanreaktorite rakendamine gaaside eraldamiseks võib alandada vesiniku tootmise protsessi omahinda ja tõsta vesiniku tootmise mahtu ning selle kasutatavust energiakandjana. Paralleelselt tuleks oluliselt tõsta ka vesiniku teiste meetoditega tootmise mahtu, seda eelkõige kivisöest gaasi valmistamise teel (USA-s Futuregen plan). Ka sel moel on võimalik saavutada toodetava vesiniku omahinna langust. Nimetatud plaan kätkeb endas söest gaasi tootmise, tahke-oksiid-kütuseelemendi ja ioonjuhtmembraanide kompleksset arendamist. Protsessi tulemusena toodetakse vesinikku ja elektrit nn süsinikoksiidide nullemissiooni tingimustes.

Tänapäeval mõistetakse, et vesiniku tootmine söest ja tema eraldamine gaasisegust nõuab ioonjuhtmembraanide (H^+ -iooni juht) ja kütuseelementide tõhusat edasiarendamist. Üheks kitsaskohaks ongi prootonjuhtmembraanide madal efektiivsus, kõrge hind ja lühike eluiga. Viimastel aastatel on väga palju tähelepanu osutatud perovskiidset struktuuri (perovskiidideks nimetatakse perovskiidi $CaTiO_3$ sarnase struktuuriga oksiide (ABO_3), mille kuubilise võre keskel paikneb metalli B (Ti) aatom, mida ümbritseb 8 A (Ca) aatomit võre kaheksas sõlmpunktis ning 6 hapnikuaatomit kuubi iga tahu keskmes) omavatele $BaCe_{1-x}M_xO_{3-\delta}$ tüüpi oksiididele, mis on võimelised töötama vesinikelektroodina kütuseelemendis, samuti vesinikupumbana elektrolüüserites ja seega ka gaaside separeerimise membraanidena. $BaCe_{1-x}M_xO_{3-\delta}$ on väga hea prootonjuht, kuid tema elektronjuhtivus on väike. Elektronjuhtivus aga on väga oluline selleks, et tasakaalustada prootonite membraanis liikumisest tekkinud polarisatsiooni. Kui $BaCe_{1-x}M_xO_{3-\delta}$ elektron- ja ioonjuhtivuse komponendid oleksid võrreldavad, siis oleks meil tegemist ideaalsete membraanidega, mis oleksid tehniliselt omadustelt võrreldavad pallaadiumist ja tema sulamitest valmistatud õhukesekihiliste membraanidega. Samas oleksid nad palju odavamad ning rakendatavad hoopis kõrgematel temperatuuridel, kus massiülekandeprotsessi kiirus on palju suurem.

2003. a toodeti USA-s 9–11 miljonit tonni vesinikku, millest jätkub 20–30 miljoni auto või 5–8 miljoni majapidamise energiavajaduse katmiseks ja mida saadi põhiliselt metaani katalüütilisel lagundamisel (95 protsenti, joonis 3). Sõe jt fossiilsete kütuste gaasistamisel, vee elektrolüüsil, fotoelektrilise ja soojusliku lagundamise meetodil ning biomassi termilise ja biokeemilise lagundamise tulemusena saadi kokku ainult 5 protsenti USA-s toodetud vesinikust. Euroopa kohta täpne statistika kahjuks

puudub. Vaatamata sellele, et USA kosmoseagentuuril NASA on rikkalikud kogemused vesiniku kasutamise otsese energiakandjana, läheb enamus vesinikust praegu siiski keemia- ja metallurgiatööstuse erinevate harude vajadusteks.

Kuna loodusliku gaasi varud on piiratud, siis on USA-s teostatud alternatiivsete energiaallikate kasutamise võimaluste detailne analüüs ja koostatud hinnaprognosisid (joonis 5). Maailmapraktikast lähtuvalt on põhilisteks taastuvenergia allikateks hüdro-, tuule-, fotoelektriline (päikesepatareid ja fotoelektrolüüs), biomassist saadav ja geotermiline energia. Need kõik on ühe energiaallika – Päikese ja temast lähtuva energia poolt genereeritud. Viimasel ajal on väga intensiivselt tegeldud nn vahetu päikesereaktori tehnoloogia arendamisega. Päikeselt lähtuv elektromagnetlainetuse energia kontsentreeritakse heliostaatiliste väljade ja peegelsüsteemide abil teatud ruumipunkti (päikesereaktorisse), kus temperatuur tõuseb 2500–2700 °C-ni. Päikesereaktori abil on võimalik läbi viia väga erinevaid termilise lagunemise reaktsioone (näiteks ZnS otsene termiline lagunemine tsingiks ja väävliks) või kasutada soojust muul moel – kas või veeauru tootmiseks gaasiturbiinide tarbeks.

Vastavalt Euroopa Liidu direktiividele peab Eesti saama 2011. aastal 5–6 protsenti energiast taastuvatest energiaallikatest, kusjuures autokütusest 5,74 protsenti peab moodustama biokütus (biodiiseli, (bio)etanool, (bio)metaan jne). Praegust seisust arvestades on tegemist küllaltki keerulise ülesandega, kuna Eestis on arvestatavateks taastuvateks energiaallikateks eeskätt tuuleenergia ja biomassi lagunemisest saadavad energiakandjad, hüdroenergia tootmise võimsused on meil aga väga piiratud. Erinevalt mõningatest teistest riikidest (Island, USA, Jaapan, Venemaa jt), pole Eestil ka üliodavaid geotermilise energia varusid.

USA-s ja Euroopa lõunapiirkondades pannakse väga suuri lootusi fotoelektrilisel meetodil toodetava elektrienergia omahinna alanemisele. Loodetakse, et 2010. aastaks on olemas piisavalt odavad fotoelemendid ning aastal 2050 saadakse juba 10–15 protsenti elektrist nende vahendusel. Fotoelektriline meetod ei oma Eestis oludes erilist perspektiivi.

Kokkuvõtteks tuleb tõdeda, et konkurentsivõime tõstmiseks tuleb PEKE, PHKE, SKKE ja TOKE omahinda oluliselt vähendada ning saavutada kõrgetemperatuursete kütuseelementide madalam töötemperatuur. See eeldab aga kogu maailma inseneride, materjaliteadlaste, füüsikute, keemikute ja rakendusmatemaatikute senisest oluliselt ladusamat koostööd. Loomulikult nõuab

eelseisev revolutsioon energiatehnoloogias aega ja raha, kuid 21. sajandi esimesel poolel on see lausa möödapääsmatu, arvestades energeetiliste ressursside ebahühtlast paiknemist maakeral ja nende kättesaadavust tarbijale.

Tabel 2. Ühe gigadžauli energia saamiseks vajaliku vesiniku ja bensiini omahind.

	Tootmisviis	Hind
1 GJ vesinikust (7 kg vesinikku)	Loodusliku gaasi lagundamine	5,6 \$
	Söe gasifitseerimine	10,3 \$
	Vee elektrolüüs	20,1 \$
1 GJ bensiinist (21 kg bensiini)		3,0 \$

Enn Lust (1956) on lõpetanud Tartu ülikooli keemikuna 1980. Keemiakandidaat 1989. Alates 1980. aastast Tartu ülikooli elektrokeemia laboratooriumi insener, teadur, sektorijuhataja. Aastast 1991 füüsikalise keemia instituudi dotsent, professor (1997) ja instituudi juhataja (2003). Rahvusvahelise elektrokeemia ühingu ja Ameerika elektrokeemia ühingu liige. enn.lust@ut.ee

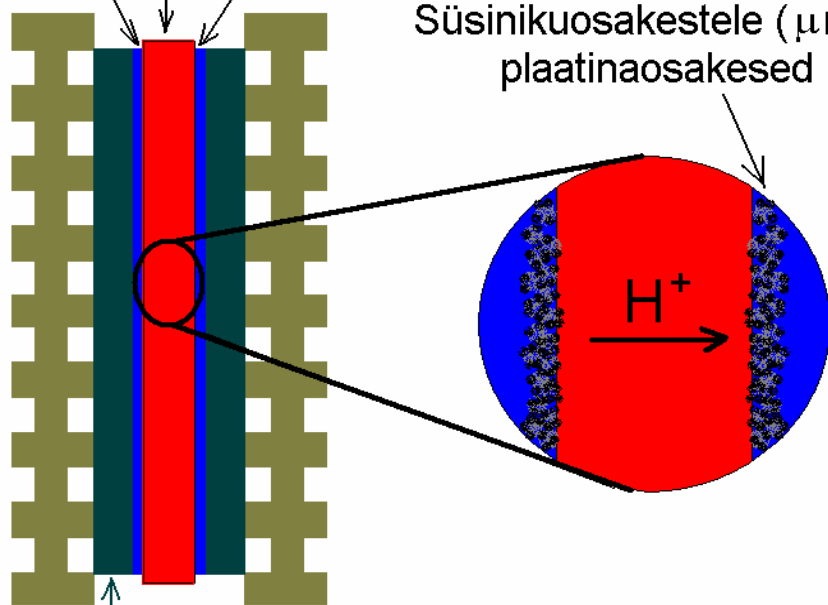
Prootonjuhtmembraan

Anood

Katood

Katalüsaator

Süsinikuosakestele (μm) kantud
plaatinaosakesed (nm)

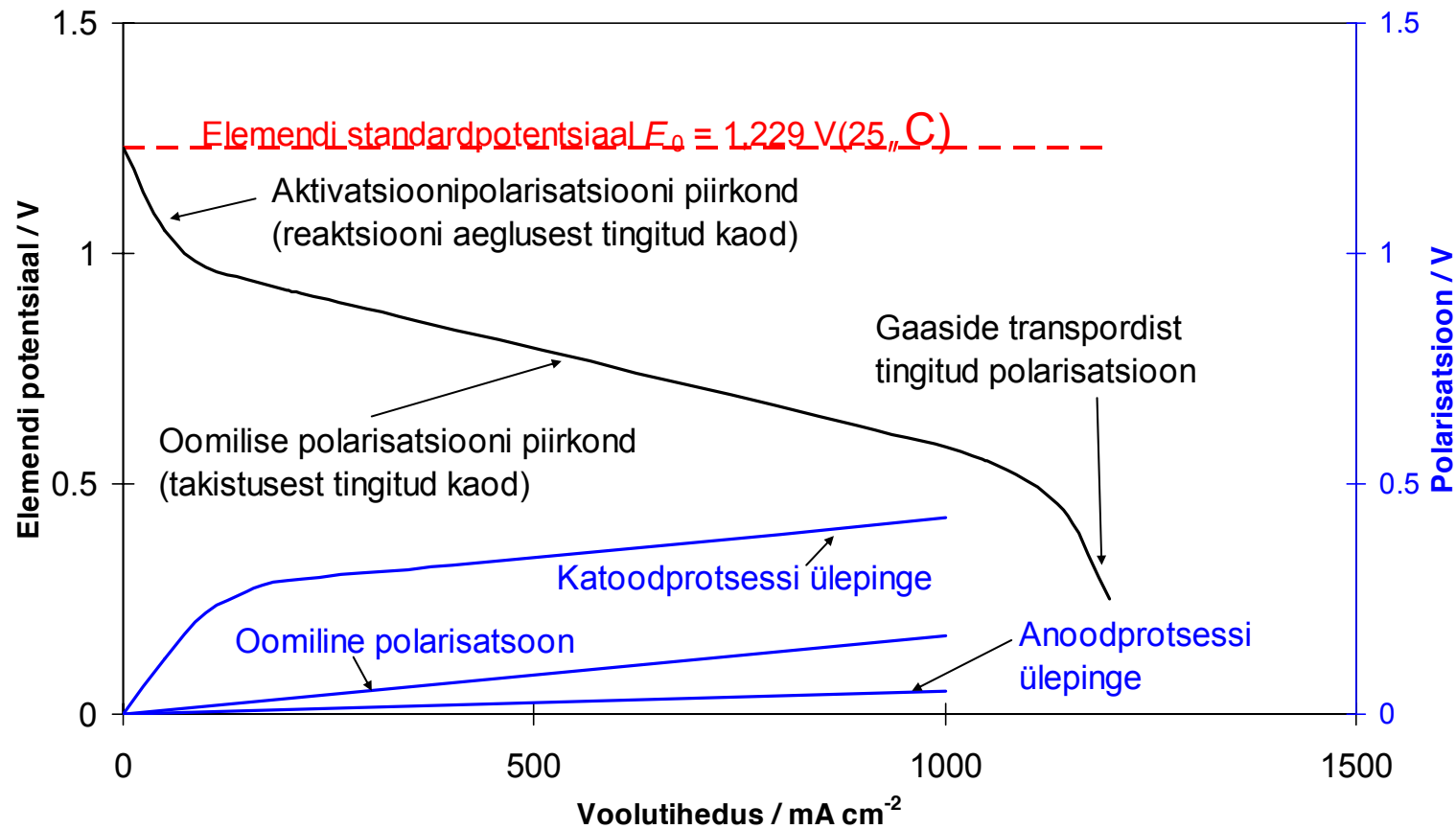


Mikroskoopiline
gaasjaotussüsteem

Makroskoopiline
gaasjaotussüsteem

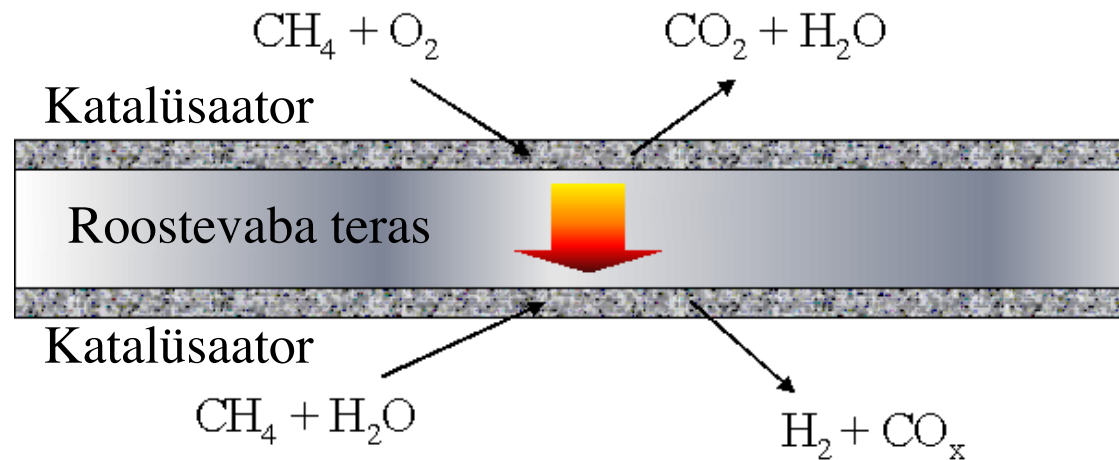
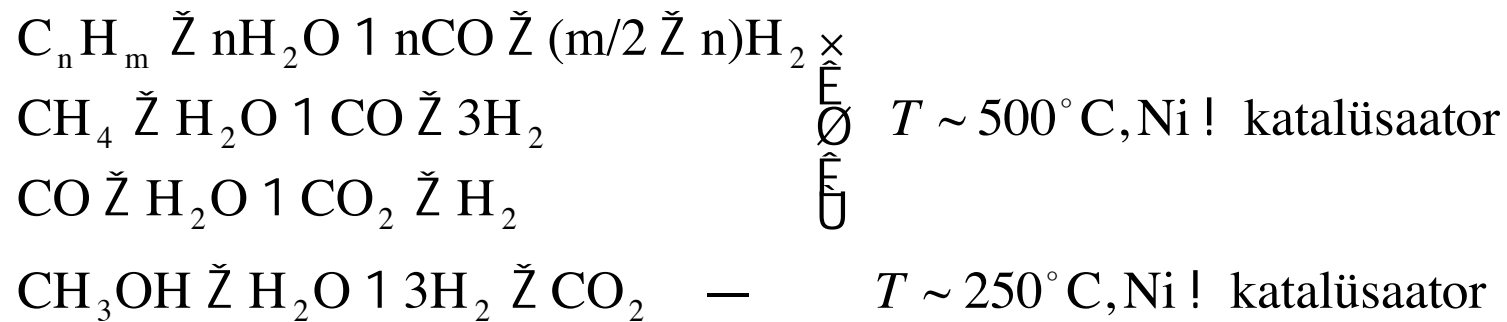
Joonis 1. Madaltemperatuurse kütuseelemendi
põhimõtteline skeem.

Anoodil vesinik oksüdeerub prootoniks, prooton liigub läbi prootoneid läbilaskva membraani katoodile ja reageerib seal hapnikuga. Tekib vesi. Elektronid liiguvad läbi välise vooluahela (koormuse) anoodilt katoodile



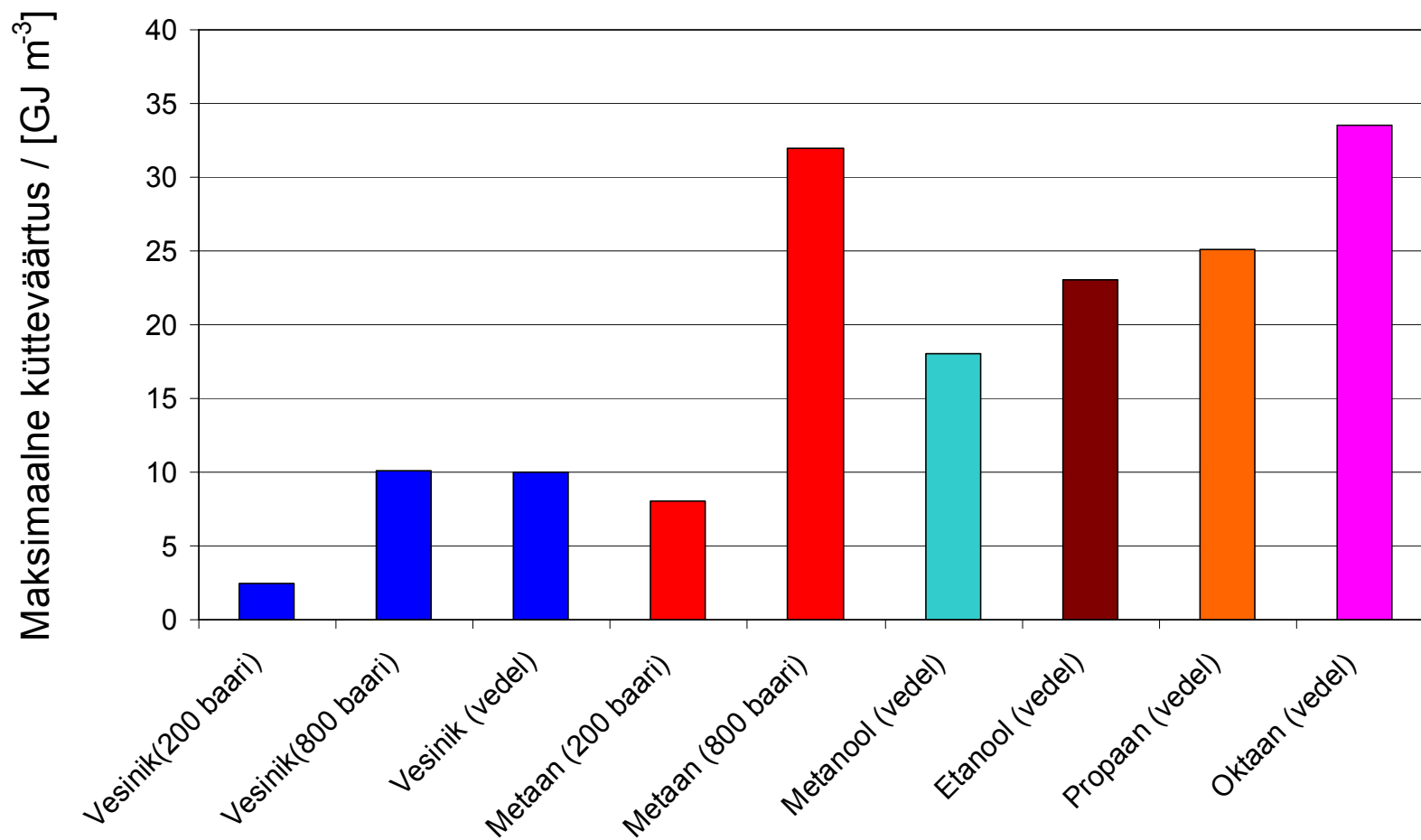
Joonis 2. Hapnik-vesinik-kütu

Elektrokeemilise elemendi töövõime on maksimaalne siis, kui ta töötab täiesti pöörduvalt, ehk siis, kui ta tegelikult tööd ei tee. Elemendi reaalse töölerakendamise korral aga on protsessid mittepöörduvad ning polarisatsioon ning ülepinged põhjustavad energiakadusid, mis vähendavad elemendi potentsiaali ja seega ka töövõimet.



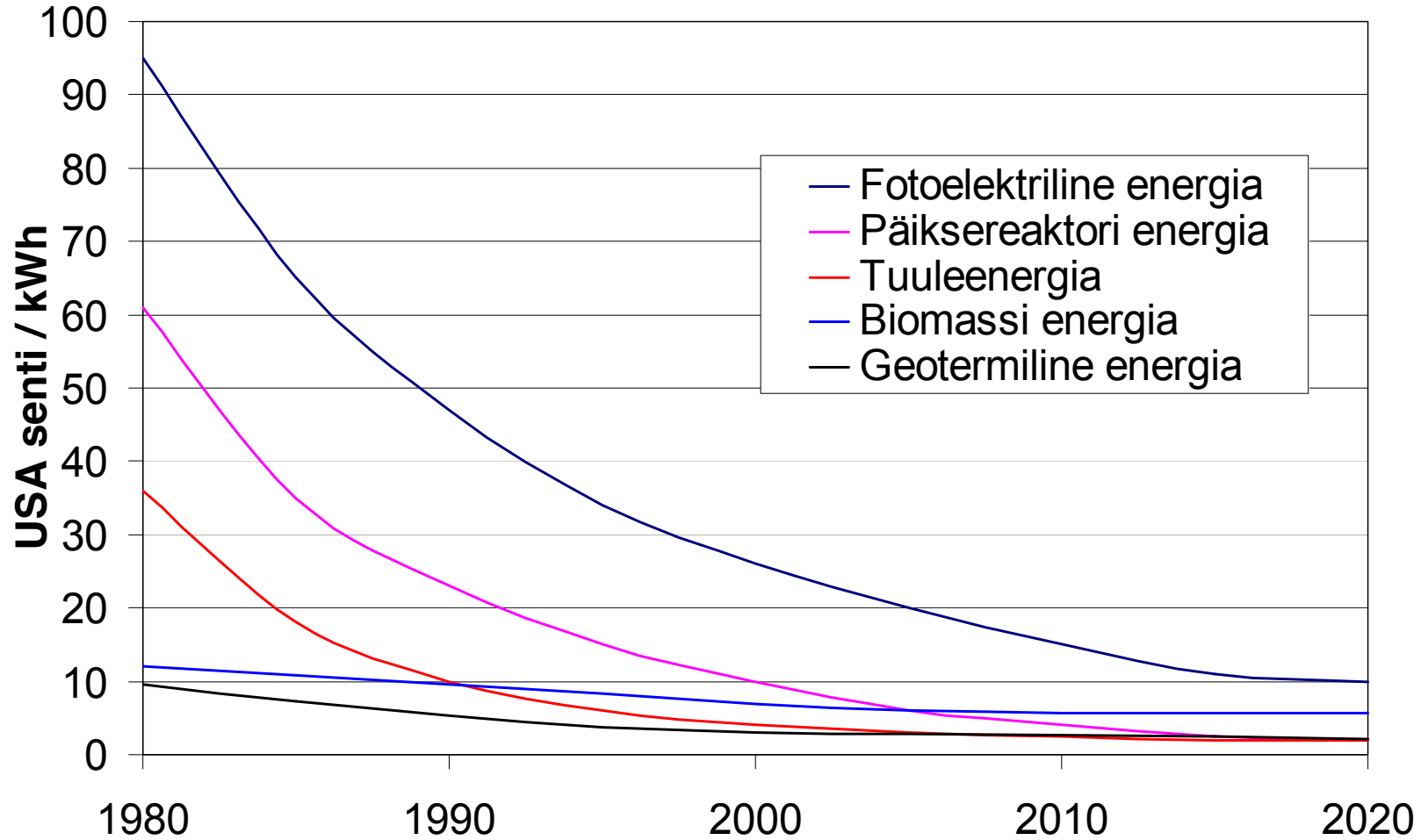
Joonis 3. **Kütuste reformimine ja reformeri põhimõtteline skeem.**

Reformeri ühel küljel toimub katalüütiline eksotermiline metaani oksüdeerumine süsihappegaasiks ja veeks. Eraldunud soojus juhitakse läbi roostevabast terasest kandja reformeri teisele küljele, kus toimub katalüütiline endotermiline protsess – metaani reformimine põhiliselt vesinikuks ja süsihappegaasiks.



Joonis 4. Kütuste kütteväärtused.

Maksimaalne kütteväärtus näitab, kui palju vabaneb energiat 1 kuupmeetri kütuse täielikul põletamisel tasakaalulistes tingimustes.



Joonis 5. Prognosis erinevate energialiikide hinna kohta USA-s.

Prognositakse seni väga kallite fotoelektriliste meetodite, päiksereaktorite ja tuulegeneraatorite abil tootetud energia maksumuse olulist vähenemist.