

# Kietojo oksido kuro elemento energetinių sąnaudų analizė

**Giedrė Pakulytė,**

**Vytautas Martinaitis**

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas,  
Šildymo ir vėdinimo katedra,  
Saulėtekio al. 11–2411, LT-10223 Vilnius*

**Darius Milčius**

*Lietuvos energetikos institutas,  
Medžiagų tyrimų ir bandymų laboratorija,  
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas,  
el. paštas: milcius@mail.lei.lt*

Siekiant patenkinti vis didėjantį energijos poreikį, visame pasaulyje intensyviai ieškoma naujų, ekologiškų technologinių sprendimų, kaip padidinti esamų energijos konversijos sistemų efektyvumą ir naujų energijos nešėjų, kurie jau artimiausioje ateityje iš dalies pakeistų egzistuojančius energijos šaltinius. Vienas perspektyviausių mokslinių pasiūlymų šioms problemoms spręsti yra vandenilio energetikos technologijų panaudojimas.

Straipsnyje pateikti atlikti 125 kW kietojo oksido kuro elemento pagrindinių sąnaudų skaičiavimai. Reikalingų sąnaudų apskaičiavimas turi ekonominę reikšmę parenkant kuro elementų sistemas.

**Raktažodžiai:** kietojo oksido kuro elementai, vandenilis, sąnaudų analizė

## 1. ĮVADAS

Energetika – vienas pagrindinių veiksnių, sąlygojančių ekonominę, socialinę plėtrą bei aplinkos kokybę. Didėjant pasaulio gyventojų skaičiui, kasmet auga ir energijos poreikiai. Prognozuojama, kad lyginant su dabartine situacija, pasaulio gyventojų populiacija iki 2050 m. beveik padvigubės. Gyventojų skaičiaus augimas ypač pastebimas besivystančiose šalyse [1]. Šiuo metu energijos poreikiams užtikrinti daugiausia naudojamas iškastinis kuras. Jo deginimas siejamas su padidėjusia  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_x$  dujų emisija ir sukeliama pasauliniu atšilimo „šiltnamio“ efektu. Su energetikos sektoriumi taip pat susijusios tokios ekologinės problemos, kaip miškų naikinimas, ozono sluoksnio pakitimai, radioaktyviųjų dalelių emisija.

Vandenilio energetika galėtų padėti spręsti aplinkosaugos bei energetinės nepriklausomybės problemas. Per pastaruosius dešimtmečius daug dėmesio skiriama naujoms ir efektyvioms technologijoms, viena jų – vandenilio kuro elementai. Tai yra elektrocheminiai įrenginiai, kurie reakcijos cheminę energiją tiesiogiai paverčia elektros energija [2]. Toks įrenginys galėtų padėti užtikrinti saugų ir ekologiškai švaresnį, nei tradicinių technologijų, energijos tiekimą.

Straipsnyje pateikti atlikti 125 kW kietojo oksido kuro elemento (SOFC) pagrindinių sąnaudų skaičiavimai: kuro ir oro, apskaičiuojami pagaminti produktai. Reikalingų sąnaudų apskaičiavimas turi ekonominę reikšmę parenkant kuro elementų sistemas. Tiekiamas kuras – vandenilis gaunamas iš gamtinių dujų, panaudojant vandenilio atskirimo membranas, instaliuojamas prieš kuro elementą. Gamtinės dujos gali būti tiekiamos tiesiogiai į anodą. Deja, šiuo atveju nepavyks išvengti  $\text{CO}_2$  emisijos.

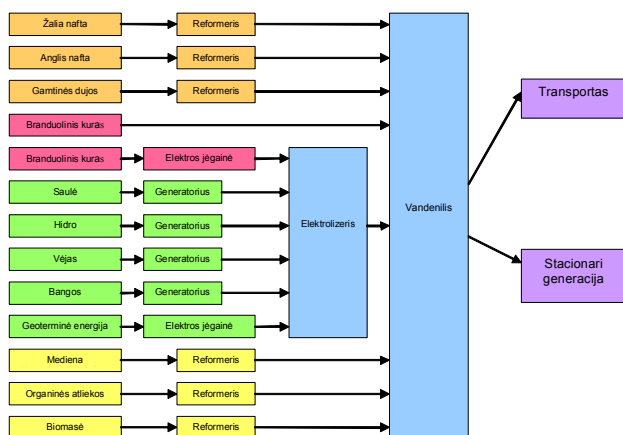
Kieto oksido kuro elementai dėl savo aukštos darbo temperatūros (1000°C) gali būti panaudoti kogeneracijos tikslams. 125 kW SOFC sistema galėtų padėti užtikrinti vidutinio dydžio ligoninės pastatų komplekso pagrindinius elektros energijos poreikius ir dalį šilumos poreikių. Taip pat SOFC praverstų kaip rezervinės galios šaltinis, užtikrinantis nuolatinį energijos tiekimą, o tai ypač svarbu gydymo įstaigose.

## 2. VANDENILIO ENERGETIKOS SISTEMŲ VEIKIMO PRINCIPAI

Vandenilis nėra energijos šaltinis, kaip nafta ir anglis. Tai energijos nešėjas ir kaip elektros energija turi būti generuojamas, panaudojant kitus energijos šaltinius. Vandenilis yra labiausiai Visatoje paplitęs cheminis elementas, bet Žemėje jis egzistuoja tik cheminiuose junginiuose, tokiuose kaip angliavandeniai ir vanduo [3]. Vandenilis, naudojant energiją, turi būti atskirtas iš šių junginių ir toliau panaudojamas vandenilio kuro elementuose [4, 5]. Šiuose įrenginiuose vandenilio ir deguonies sąveikos metu susidaro elektros energija ir vanduo.

Vandenilio energetikos technologijos šiuo metu yra dar labai brangios, tačiau mokslininkai nuolat ieško ir tiria naujus ir perspektyvius vandenilio gamybos ir panaudojimo būdus. Apibendrintas vandenilio energetikos sistemų veikimo principas pateiktas 1 pav.

Taigi dabar vandenilis gaunamas panaudojant labai įvairius energijos šaltinius (iškastinis kuras, atsinaujinančios energijos šaltiniai) ir technologijas. Kuro elementuose vandenilio konversija į energiją vyksta be degimo proceso, labai efektyviai, neteršia aplinkos, nesukelia triukšmo ir vibracijų [6].



1 pav. Apibendrintas vandenilio energetikos sistemų veikimo principas [2]

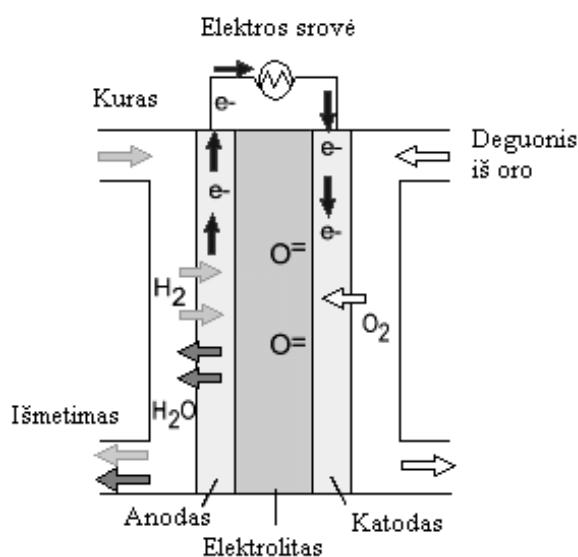
Panaudojant atsinaujinančią vėjo, saulės energiją, vandenilis išgaunamas iš vandens elektrolizės būdu. Vandenilio gavimas elektrolizės būdu yra brangus, todėl mokslininkai tiria vandenilio gavybą iš biomasės bei žaliųjų dumblių.

Šiuo metu daugiausia dėmesio yra skiriama kietojo oksido kuro elementams ir protonų mainų membranos kuro elementams (PEM). Tikimasi, kad SOFC bus naudojami stacionariems pritaikymams, o PEM ateities transporte.

### 3. ELEKTROS ENERGIJOS GAMYBA

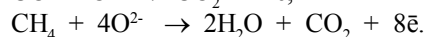
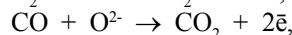
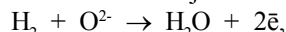
Kuro elementas yra sudarytas iš elektrolito sluoksnio ir jį ribojančių anodo ir katodo. SOFC turi kietakūnio oksido elektrolitą. Darbo metu dujinis kuras tiekiamas į anodo erdvę, o oksidatorius (paprastai deguonis iš oro) – į katodo erdvę (2 pav.). Vykstant elektrocheminėms reakcijoms, vandenilio kuro elementai generuoja elektros energiją [7].

SOFC deguonies molekulės katodo srityje redukuojamos ir gaunami deguonies jonai, migruojantys per kietą elektrolitą link anodo. Jiems reaguojant su  $H_2$  ar  $CO$ , susidaro  $H_2O$  ar  $CO_2$  ir elektronai.

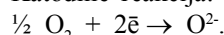


2 pav. SOFC veikimo schema [8]

Anodinės reakcijos:



Katodinė reakcija:



SOFC elektros energijos gamybos efektyvumas šiuo metu gali siekti net 70%, be to, kaip antrinis produktas gali būti panaudojama išsiskirianti šiluma [9].

Tokie įrenginiai galėtų patikimai tiekti elektros energiją gydymo įstaigų pagrindiniams bei rezerviniams galios poreikiams. Be to, jie pasižymi suderinamumu su aplinka, žemu triukšmo lygiu, reikalauja nedaug priežiūros.

125 kW SOFC sistema padėtų užtikrinti gydymo įstaigos nuolatinius energijos poreikius, o suderinamumas su kombinuoto ciklo įrenginiais leistų panaudoti didelius išsiskiriančios šilumos kiekius karšto vandens bei šildymo sistemoms [7].

### 3.1. DEGUONIES/ORO SĄNAUDOS

Iš kuro elemento veikimo principo žinoma, kad keturi elektronai yra perduodami kiekvienam deguonies molui ir krūvis yra lygus:

$$Q = 4F[O_2]; \quad (1)$$

čia  $[O_2]$  – suvartojamas deguonies kiekis moliais.

Pertvarkius (1) lygtį gaunama:

$$[O_2] = \frac{I}{4F} [\text{mol/s}]; \quad (2)$$

čia  $F$  – Faradėjaus konstanta,  $F = 96485$  C,  $I$  – srovė A. Visam kuro elementui, sudarytam iš  $n$  kuro elementų, reikės:

$$[O_2] = \frac{I \cdot n}{4F} [\text{mol/s}]. \quad (3)$$

(3) formulę išreiškiame kg/s, o srovę ir kuro elementų skaičių pakeičiame galia. Tuomet:

$$P_e = V_c \cdot I \cdot n; \quad (4)$$

čia  $V_c$  – kuro elemento įtampa [V].

$$I = \frac{P_e}{V_c \cdot n}. \quad (5)$$

Iš (3) lygties gauname:

$$\frac{d[O_2]}{dt} = \frac{P_e}{4 \cdot V_c \cdot F} [\text{mol/s}]. \quad (6)$$

Keičiame mol/s į kg/s ir gauname:

$$\frac{d[O_2]}{dt} = \frac{32 \cdot 10^{-3} \cdot P_e}{4 \cdot V_c \cdot F} = 8,29 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{P_e}{V_c} [\text{kg/s}]. \quad (7)$$

Ši formulė leidžia apskaičiuoti reikalingo deguonies kiekį bet kokiam kuro elementui. Dažniausiai deguonis yra imamas iš oro, jame deguonis sudaro 0,21 dalį. Oro molinė masė yra  $28,97 \cdot 10^{-3}$  kg/mol [7]. Tuomet (6) lygtis atrodytų taip:

$$\frac{d[O_2]}{dt} = \frac{28,97 \cdot 10^{-3} \cdot P_e}{0,21 \cdot 4 \cdot V_c \cdot F} = 3,57 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{P_e}{V_c} \text{ [kg/s]}. \quad (8)$$

Jei bus tiekiamas tik toks oro kiekis, tai išėjęs iš kuro elemento oras visiškai neturės deguonies. Tai nėra praktiška ir praktikoje oro srautas yra imamas dvigubai didesnis nei stochiometrija atveju [10]. Jei stochiometriją pažymėsime  $\lambda$ , tada:

$$\frac{d[oras]}{dt} = 3,57 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda \cdot \frac{P_e}{V_c} \text{ [kg/s]}. \quad (9)$$

Dažnai kg/s nėra plačiai taikomas masės srauto vienetas. Taikomi įvairūs perskaičiavimai, atitinkamai padauginus iš daugiklio:

3050, norint gauti m<sup>3</sup>/h;

$5,1 \cdot 10^4$ , norint gauti l/min;

847, norint gauti l/s.

Esant poreikiui, galima apskaičiuoti išeinančio oro srauto kiekį pagal formulę:

$$\frac{d[\text{Išein. oro kiekis}]}{dt} = 3,57 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda \cdot \frac{P_e}{V_c} - 8,29 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{P_e}{V_c} = (3,57 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda - 8,29 \cdot 10^{-8}) \frac{P_e}{V_c}. \quad (10)$$

Skaičiavimams reikalinga vidutinė kiekvieno kuro elemento įtampa kuro elemente yra  $V_c$ . Kadangi ji nėra nustatyta, tai dažniausiai pasirenkama iš intervalo 0,6–0,7 V, nes dauguma kuro elementų veikia esant tokiai įtampai. Geriausia priimti apytikslę reikšmę 0,65, tokia ji ir pasirenkama tolimesniems skaičiavimams. Taip pat  $V_c$  galima apskaičiuoti iš efektyvumo formulės:

$$\eta = \mu_f \cdot \frac{V_c}{1,48} \cdot 100\%; \quad (11)$$

čia  $\mu_f$  – yra sureagavusios kuro masės elemente ir įeinančios į elementą kuro masės santykis, apytiksliai jis gaunamas 0,95.

Skaičiuojamuoju atveju suvartojamas stochiometrinis deguonies kiekis yra 0,0159 kg/s, o reikalingas oro kiekis, priėmus stochiometriją 2, yra 0,137 kg/s, arba 419 m<sup>3</sup>/h oro. Gaunamas išeinančio oro kiekis yra 0,121 kg/s, arba 370 m<sup>3</sup>/h.

### 3.2. VANDENILIO SĄNAUDOS

Reikalingo vandenilio kiekis gaunamas panašiai kaip ir deguonies, išskyrus tai, kad gaunami du elektronai iš kiekvieno vandenilio molio:

$$\frac{d[H_2]}{dt} = \frac{I \cdot n}{2F} \text{ [mol/s]}. \quad (12)$$

$$\frac{d[H_2]}{dt} = \frac{P_e}{2V_c \cdot F} \text{ [mol/s]}. \quad (13)$$

Vandenilio molinė masė yra  $2,02 \cdot 10^{-3}$  kg/mol, stochiometriškai kuro elementui, kuris naudoja gryną vandenilį, reikalingas kuro kiekis lygus:

$$\frac{d[H_2]}{dt} = \frac{2,02 \cdot 10^{-3} \cdot P_e}{2V_c \cdot F} = 1,05 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{P_e}{V_c} \text{ [kg/s]}. \quad (14)$$

Skaičiuojamuoju atveju 125 kW SOFC reikės 0,00202 kg/s, arba 7,27 kg/h.

Vandenilio tankis 0,0899 kg/m<sup>3</sup> (0°C), tuomet stochiometrinis vandenilio suvartojimas yra 80,9 m<sup>3</sup>/h. Jei per metus SOFC dirbs 6000 valandų, tai reikės apie 485400 m<sup>3</sup> vandenilio.

### 3.3. GAMTINIŲ DUJŲ SĄNAUDOS

Jei SOFC tiekiamas kuras bus gamtinės dujos – o tai šiuo atveju būtų pigiau, – reikės tiekti kelis kartus didesnę gamtinių dujų kiekį nei gryno vandenilio. Vandenilis būtų gaminamas iš gamtinių dujų, panaudojant dujų reformingo procesus. Reformeriai įgalina dirbti kuro elementą, panaudojant angliavandenilinį kurą, ir aukštatemperatūros SOFC galėtų savo darbui naudoti metaną. Tokiais atvejais į sistemas reikėtų integruoti dujų nusierinimo katalizės įrenginius.

Gamtinių dujų suvartojimas gaunamas, apskaičiavus SOFC naudingumo koeficientą pagal pagamintą elektros energijos kiekį. Skaičiavimuose naudojama aukštutinė kuro degimo šiluma. Gamtinių dujų aukštutinė degimo šiluma yra 10,20 kWh/m<sup>3</sup>. Tokiu atveju 125 kW SOFC reikės 29,4 m<sup>3</sup>/h, kai naudingumo koeficientas pagal elektrą yra 41,7%. Jei per metus SOFC dirbs 6000 h, tai reikės apie 176 tūkst. m<sup>3</sup> gamtinių dujų.

### 4. ŠILUMOS IR VANDENS GAMYBA

SOFC veikimo metu gaunama praktiškams tikslams naudinga šiluma. Jei visa vandenilinio kuro elemento reakcijos entalpija būtų tiesiogiai verčiama į elektros energiją, tuomet įtampa būtų:

1,48 V, jei vanduo yra skystos būsenos,

1,25 V, jei vanduo yra garų būsenos.

Tačiau kuro elemento faktinė įtampa skiriasi nuo šios, nes dalis energijos virsta šiluma. Šiuo atveju mes apsiurbosime garų atveju. Nors reikia pažymėti, kad kuro elementą paliekanti energija yra trijų formų: elektros, šilumos ir vandens garų slaptosios šilumos. Pagamintos šilumos kiekis apskaičiuojamas taip:

$$\text{Šilumos kiekis} = 1 \cdot I(1,25 - V_c) \text{ [W]}, \quad (15)$$

$$\text{arba } \text{Šilumos kiekis} = P_e \left( \frac{1,25}{V_c} - 1 \right) \text{ [W]}. \quad (16)$$

Skaičiuojamuoju atveju pagamintos šilumos kiekis yra 115 kW.

Vandeniliniame kuro elemente pagaminamo vandens debitas yra:

$$Vandens\ gamyba = \frac{P_e}{2V_c \cdot F} \quad [\text{mol/s}]. \quad (17)$$

Vandens molinė masė yra  $18,02 \cdot 10^{-3}$  kg/mol, tada:

$$Vandens\ gamyba = 9,34 \cdot 10^{-8} \frac{P_e}{V_c} \quad [\text{kg/s}]. \quad (18)$$

Skaičiuojamuojai atveju pagaminto vandens kiekis yra 0,018 kg/s, arba 64,7 l/h.

## 5. IŠVADOS

Iškastinio kuro išteklių pasaulyje nuolat mažėja. Ateities energetikos technologijos turi būti susietos su aplinką tausojančių energijos nešėjų naudojimu. Vandenilio energetika gali tapti viena geriausių alternatyvų šiandien egzistuojančioms energetinėms technologijoms.

Srityse, kur reikia patikimai tiekti elektros energiją, gali būti panaudoti vandenilio kuro elementai.

Pasirenkamo kuro elemento tipas priklauso nuo naudojimo paskirties. Kogeneracijos tikslams dėl aukštos darbinės temperatūros tinkamiausia SOFC.

125 kW SOFC nuolatiniam darbui reikalinga 419 m<sup>3</sup>/h oro ir 80,9 m<sup>3</sup>/h (7,27 kg/h) vandenilio dujų, arba 29,4 m<sup>3</sup>/h gamtinių dujų. Toks kuro elementas pagaminatų 115 kW šilumos ir 64,7 l/h vandens.

## PADĖKA

Šis darbas buvo atliktas Giedrės Pakulytės 2005 metų studentų mokslinės praktikos Lietuvos energetikos institute metu ir paremtas Lietuvos mokslo tarybos lėšomis.

Gauta 2006 10 30  
Parengta 2006 11 30

## Literatūra

- EU and Energy Research. Energy Supply and Demand. [http://europa.eu.int/comm/research/energy/gp/gp\\_imp/article\\_1082\\_en.htm](http://europa.eu.int/comm/research/energy/gp/gp_imp/article_1082_en.htm)
- The International Clearinghouse for Hydrogen Commerce. Creating Hydrogen. <http://www.ch2bc.org/index2a.htm>
- Pranevičius L. New Materials for Hydrogen Storage. *Kaunas: VDU/LEI, 2005, 185 p.*
- Sandrock G. A panoramic overview of hydrogen storage alloys from a gas reaction point of view // *Journal of Alloys and Compounds*. 1999. Vol. 29–295. P. 877–888.
- Service R. F. The Hydrogen Backlash // *Science*. 2004. Vol. 305(5686). P. 958–961.
- Fuel Cell Handbook. By EG&G Services Parsons, Inc. Science Applications International Corporation. 2002.
- Stambouli A. B., Traversa E. SOFC's: a review of an environmentally clean and efficient source of energy // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2002. Vol. 6. P. 433–455.
- U. S. Department of Energy. Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program. [http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc\\_types.html](http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html)
- Milėivienė S., Milėius D. ir kt. Vandenilio energetikos plėtros perspektyvos // *Energetika*. 2004. Nr. 1. P. 62–68.
- Larminie J., Dicks A. *Fuel Cell Systems Explained*. Wiley Press, 2003.
- Zoulias M. Evaluation of Hydrogen Technologies based on H-SAPS specifics. Centre for Renewable Energy Sources, 2004.

**Giedrė Pakulytė, Vytautas Martinaitis, Darius Milėius**

## SOLID OXIDE FUEL CELLS COST ANALYSIS

### Summary

Future alternatives must be developed for long-term and environment-friendly energy supply needed by the constantly growing world's population. Electrical-generation efficiencies of 70% are possible nowadays, along with heat recovery possibility. Fuel cells appear to be an important technology for the future. They can run on a variety of fuels, from solar hydrogen to methanol, from biomass to gasified coal. As the technology develops, and if the cost of fossil fuels continues to rise, this clean, efficient alternative will find more and more practical uses.

The paper discusses stationary applications of the Solid Oxide Fuel Cells system. Fuel, oxygen and produced energy calculations are presented.

**Key words:** Solid oxide fuel cells, hydrogen, fuel and oxidant expenditures

**Гедре Пакулите, Витаутас Мартинайтис, Дарюс Мильчюс**

## АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ ДЛЯ ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА

### Резюме

С каждым годом в мире возрастает потребность в энергетических ресурсах. Интенсивно исследуются возможности повысить эффективность существующих энергетических систем и новые энергоносители, которые не нарушали бы природный баланс и заменили бы нефтепродукты. Одно из самых перспективных предложений в этой области – применение водородной энергетики.

В настоящей статье дана оценка затрат для высокотемпературного топливного элемента мощностью 125 кВт. Эти подсчеты имеют экономическое значение при подборе и применении топливных элементов.

**Ключевые слова:** высокотемпературные топливные элементы, водород, анализ затрат