



---

**Energetski potencijal mikro- kogeneracijskih sustava  
s PEM gorivnim člancima na prirodni plin ili u sprezi s obnovljivim  
izvorima energije**

Predmet: Kvalifikacijski doktorski rad  
Znanstveno područje: Tehničke znanosti  
Znanstveno polje: Strojarstvo  
Znanstvena grana: Procesno energetska strojarstvo  
Mentor: prof.dr.sc. Frano Barbir  
Doktorand: Domina Cikatić Šanić, prof. mentor

Split, lipanj 2015.

*D. Cikatić Šanić: Energetski potencijal mikrokogeneracijskih sustava sa PEM gorivnim člancima na prirodni plin ili u sprezi s obnovljivim izvorima energije*

## SADRŽAJ

	Str.
Sažetak .....	3
1. Uvod .....	4
2. PEM gorivni članak .....	6
2.1. Struktura i princip rada PEM gorivnog članka .....	6
2.2. Termodinamika PEM gorivnog članka .....	7
2.3. Masena i energetska bilanca .....	8
2.4. PEM gorivni svežanj .....	12
2.5. Sustav PEM gorivnih članaka .....	13
2.5.1. Podsustav za obradu goriva .....	14
2.5.2. Elektronički podsustav .....	17
2.5.3. Podsustav za upravljanje toplinom.....	17
3. Standardni mCHP sustavi s gorivnim člancima .....	18
3.1. Dijelovi mCHP sustava .....	19
3.2. Pregled dostupnih komercijalnih modela mCHP uređaja .....	20
4. Demonstracijski projekti .....	21
4.1. Uvod .....	21
4.2. Calux project .....	22
4.3. Ene farm program .....	24
5. Modeliranje mCHP sustava .....	25
5.1. Osnove .....	25
5.2. Učinkovitost sustava gorivnih članaka .....	26
5.3. Utjecaj pogonskih uvjeta na vijek trajanja sustava .....	27
5.4. Ekonomska analiza rada mCHP sustava s PEMFC na prirodni plin u HR .....	28
6. Simulacija rada mCHP sustava s PEMFC u sprezi s obnovljivim izvorima energije .....	30
6.1. Električni i toplinski profil domaćinstva .....	30
6.2. Sunčevo zračenje .....	31
6.3. Vjetar kao obnovljivi izvor energije .....	33
6.4. MCHP sustav u sprezi s obnovljivim izvorima energije .....	33
6.4.1. Opis rada sustava .....	34
6.4.2. Fotonaponski modul PV .....	34
6.4.3. Vjetroagregat WT .....	35
6.4.4. Pretvarač AC/DC .....	37
6.4.5. Baterijski komplet .....	38
6.4.6. Dizalica topline HP .....	39
6.4.7. Podsustav gorivnih članaka PC .....	40
1. PEMFC .....	40
2. Elektrolizator .....	41
3. Spremnik vodika .....	42
6.5. Analiza režima rada mCHP sustava .....	42



---

6.5.1.	Spremnik za pohranu topline TS.....	42
6.5.2.	Optimalni režim rada PEMFC .....	44
6.5.3.	Optimalni režim rada fotonaponskog modula PV .....	45
6.5.4.	Optimalni režim rada vjetroagregata WT.....	45
6.6.	Rezultati optimizacije i njihova analiza.....	44
6.7.	Zaključak optimizacije.....	48
7.	Pravci istraživanja i razvoja.....	48
7.1.	Pregled dosadašnjih istraživanja.....	48
7.2.	Plan 2020.....	50
7.3.	Smjernice za buduća istraživanja.....	51
8.	Zaključak.....	51
9.	Popis slika .....	53
10.	Popis tablica.....	54
11.	Reference.....	55

## Sažetak:

Čist i lako dostupan energent visoke učinkovitosti postaje jedan od najvažnijih uvjeta održivog razvoja energetike. U posljednjih nekoliko godina došlo je do značajnog porasta novih tehnologija manje snage za decentraliziranu proizvodnju električne energije (*eng. Distributed Generation, DG*). Mala postrojenja za pretvorbu energije sa gorivnim člancima mogu nadomještati različite energetske potrebe za električnom i toplinskom energijom domaćinstva, s velikim potencijalom za uštedu primarne energije, visokom pouzdanosti, tihim radom i gotovo bez emisije štetnih plinova. Među različitim vrstama gorivnih članaka, membranski gorivni članci (*engl. Proton Exchange Membrane Fuel Cells PEMFC*) trenutno prolaze kroz najbržu fazu razvoja, u odnosu na ostale vrste gorivnih članaka za male stacionirane energetske kogeneracijske sustave, zbog svoje niže radne temperature ( $< 85^{\circ}\text{C}$ ), visoke ukupne učinkovitosti ( $\approx 90\%$ ) i brzog pokretanja.

Mali kombinirani sustav za proizvodnju električne i toplinske energije (*engl. Micro Combined Heat and Power mCHP*), također poznat kao mikro-kogeneracija, na temelju tehnologije gorivnog članka, kontinuirano i neposredno pretvara energiju kemijske reakcije u električnu energiju, toplinu i vodu. Otpadna toplina iz članaka se regenerira i koristi za grijanje potrošne tople vode (PTV) u domaćinstvu, dok se proizvedena el. energija koristi za napajanje električnih uređaja. Zbog bolje pohrane toplinske energije, sustavu može biti dodan i toplinski spremnik (TS).

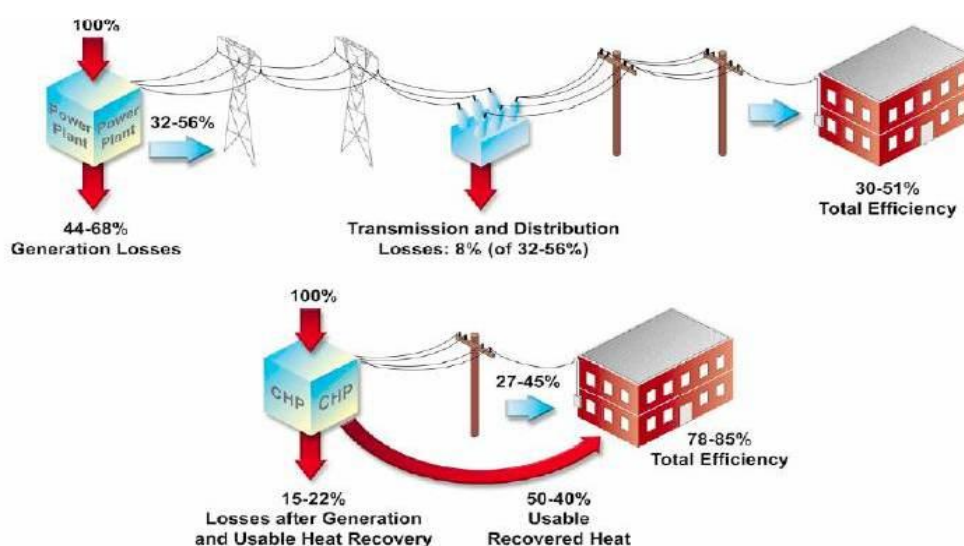
PEMFC sustavi su pogodni za kombiniranje sa električnim dizalicama topline (HP) s monovalentnim učinkom, tako da je moguće osim pripreme PTV, grijanje i hlađenje prostora. Tri su koeficijenta učinkovitosti povezana s mCHP sustavima: električna, toplinska i ukupna učinkovitost. U odnosu na uobičajene klasične sustave, mCHP sustavi imaju potencijal povećavanja ukupne toplinske efikasnosti, snižavanja potreba za ukupnom snagom, te osiguranja veće kvalitete i pouzdanosti opskrbe.

U ovom su radu predstavljene tehnološke sheme, komponente i izvedbe mCHP sustava, te naznačene potencijalne mogućnosti budućih hibridnih sustava pogonjenih PEM gorivnim člancima. Međutim, ostaje problem učinkovite proizvodnje, distribucije i pohrane vodika. Jedno od dostupnih komercijalnih rješenja je postupak reformacije prirodnog plina u  $\text{H}_2$ , pri čemu se proizvodnja  $\text{H}_2$  oslanja na postojeću infrastrukturu prirodnog plina. U slučaju kad je gorivo vodik proizveden iz obnovljivih izvora energije, mCHP na temelju PEMFC na jednostavan način potpomaže obnovljive izvore energije u plasmanu na tržište, dajući energiju kada sunce, vjetar ili neki drugi alternativni izvori nisu dostupni.

**Ključne riječi:** mCHP, gorivni članak, PEM gorivni svežanj, obnovljivi izvori energije, dizalica topline

## 1. UVOD

Mikro-kogeneracijski ili mCHP (*micro Cogeneration Heat and Power*) sustav može se smatrati malom elektranom primjerenom za pokrivanje potreba kućanstva za toplinskom i električnom energijom. Zbog veličine i lokacije centraliziranih termoelektrana nije moguće koristiti otpadnu toplinu (el. gubitak) koja iznosi od 50 do 70% unosa energije. Zbog nemogućnosti prijenosa topline na duge relacije, za potrebe grijanja objekata i pripremu PTV obično se koriste uređaji koji stvaraju toplinu na samom mjestu gdje se i troši po potrebi. Na Sl. 1. vidljivo je kako prosječna učinkovitost kogeneracijskih sustava iznosi 78-85% , za razliku od učinkovitosti termoelektrane od 30-51% .



Slika 1.: Uštede CHP sustava u pretvorbi energije; Source: [www.ecorenovator.org](http://www.ecorenovator.org)

U odnosu na tradicionalne centralizirane elektrane mikro-kogeneracijski sustavi imaju nekoliko prednosti. Proizvedena el. struja ima 3-3,5 puta veću ekonomsku vrijednost od prirodnog plina, pa pretvaranje niske cijene plina u visoku vrijednost električne energije omogućava smanjenje računa za potrošnju energije u kućanstvu. Od svih kogeneracijskih tehnologija namijenjenih domaćinstvima, mCHP sustav pogonjen gorivnim člancima ima najveći potencijal, zbog najnižih troškova pretvorbe energije, najniže potrošnje goriva uz najveće smanjenje CO<sub>2</sub>. U gorivnim člancima se direktno i kontinuirano kemijska energija goriva (H<sub>2</sub>) pretvara u el. energiju, pri čemu dolazi do generiranja otpadne topline koja se u kogeneraciji koristi za zagrijavanje prostora ili pripremu PTV. Iako je u posljednjih 10 godina došlo do ubrzanog razvoja tehnologije stacioniranih niskotemperaturnih gorivnih članaka, ostaje problem učinkovite proizvodnje, distribucije i pohrane vodika. Jedno od dostupnih komercijalnih rješenja je postupak reformacije prirodnog plina u H<sub>2</sub>, pri čemu se proizvodnja H<sub>2</sub> oslanja na postojeću infrastrukturu prirodnog plina. Prirodni plin je fosilno gorivo koje se najvećim dijelom (85%-95%) sastoji od metana CH<sub>4</sub> koji je najjednostavniji ugljikovodik bez mirisa i okusa. Preostali udio (5%-15%) su složeniji ugljikovodici, dušik i CO<sub>2</sub>. Vodik se

može dobiti standardnim načinom, vanjskom tehnikom parne reformacije metana. U novije vrijeme su razvijeni postupci koji uključuju internu reformaciju H<sub>2</sub> koja se odvija u FC procesoru/ reformeru. Za potrebe samostalnog energetskog sustava domaćinstva, vodik je moguće proizvoditi u elektrolizatoru postupkom elektrolize vode. El. energija potrebna za napajanje elektrolizatora dobiva se iz energije sunca ili vjetra. [1]

Jedan od najperspektivnijih gorivnih članaka za potrebe kućanstava je PEM gorivni članak sa protonski provodljivom membranom (*engl. Proton Exchange Membrane*). To je uređaj koji proizvodi el. energiju izravnom elektrokemijskom pretvorbom vodika i kisika uz nusproizvod samo čiste vode i topline. Osim što su voda i otpadna toplina pogodni za kogeneracijsku primjenu, kogeneracijski potencijal PEM gorivnog članka očituje se u radu na niskim temperaturama (od 20 °C do 80°C), brzom startu pri sobnim temperaturama, jednostavnosti, bešumnosti i relativno velikim gustoćama snage. Zbog katalizatora na bazi platine, ima malu toleranciju na CO (<10 ppm) pa zahtijeva visoku čistoću vodika. *Tablica 1.*

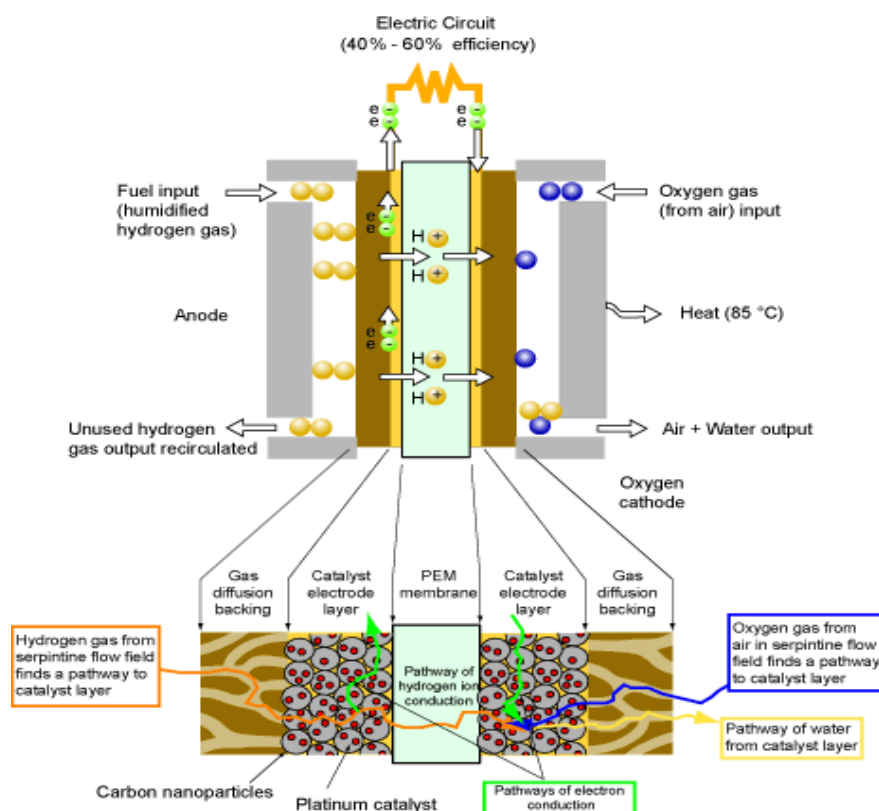
*Tablica 1.: Tehničke i ekonomske karakteristike tehnologije stacioniranih gorivnih članaka*

GORIVNI ČLANCI	NISKO/SREDNJE TEMPERATURNI GORIVNI ČLANCI			VISOKOTEMPERATURNI GORIVNI ČLANCI	
Vrsta	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
El. efikasnost (%)	30 - 60	30-60	37-42	50-60	45-60
Radno temperaturno područje	≈ 80°C	65 – 250 °C	150 – 220 °C	650 °C	1000 °C
Kvaliteta otpadne topline	Niska	Niska-srednja	Srednja	Visoka	Visoka
Primjena otpadne topline	Vruća voda/ Aps. hlađenje	Vruća voda/ Aps. hlađenje	Vruća voda/ proizvodnja pare /Aps.hlađenje	para/ procesna toplina/ Aps. hlađenje	para/ procesna toplina/ Aps. hlađenje
Trenutna cijena \$/kW	3000-4000	2500-3000	3000-4000	3000-4000	pred- komercijalni status
Očekivana cijena \$/kW	400-600	250-500	1000-1500	<1000	250-500
Dobivanje vodika	Reformacija/ Elektroliza /Plinovod	Reformacija/ Elektroliza /Plinovod	Reformacija/ Elektroliza /Plinovod	Povrat anodnog plina	Povrat anodnog plina

## 2. PEM GORIVNI ČLANAK

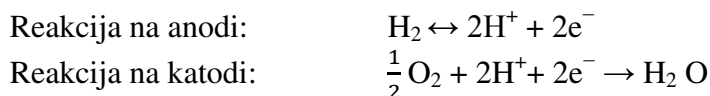
### 2.1. Struktura i princip rada

Najvažniji dio PEM članka je sklop elektroda – membrana, naziva MEA (*engl. Membrane Electrode Assembly*), Sl. 2. MEA se sastoji od dvije porozne plinske difuzijske elektrode izrađene od prešanih karbonskih vlakana ili slojeva papira (tzv. plinski difuzijski sloj ili *engl. GDL*). Između elektroda je čvrsti elektrolit u obliku hidratizirane polimerne membrane od Nafion<sup>®</sup> propusne samo za protone vodika. S obje strane membrane nanešene su fine čestice aktivnog ugljena sa površinskim nanočesticama platine koje čine katalizatorski sloj (*engl. Catalyst Layer ili CL*). Membrana funkcionira dvostruko, djeluje kao elektrolit koji služi za provođenje protona od anode do katode, te istovremeno kao barijera između dva plinovita reaktanta. Optimalna vlažnost membrane je od presudne važnosti za efikasan rad gorivnog članka. Elektroda na kojoj se odvija redukcija kisika zove se katoda, a ona na kojoj dolazi do oksidacije vodika zove se anoda.



Slika 2.: Struktura PEMFC(MEA) [2]

Vodikom se napaja anodna strana membrane, tako da je  $H_2$  po dolasku u CL podijeljen na protone i elektrone. Protoni prolaze kroz membranu, a elektroni kroz električno vodljivi GDL i kolektorske ploče s kanalima, te kroz vanjski strujni krug gdje proizvode električni rad. Elektroni se naposljetku spajaju s kisikom iz katodnog CL, stvarajući vodu koja se mora odvoditi tako da ne blokira rad gorivnog članka. Iz navedenog vrijede sljedeće relacije:



## 2.2. Termodinamika PEM gorivnog članka

Maksimalni el. rad ( $W_{\text{el}}$ ) proizveden u PEM gorivnom članku na konstantnoj temperaturi i tlaku odgovara promjeni Gibbsove slobodne energije ( $\Delta G$ ) elektrokemijske reakcije, kako slijedi:

$$W_{\text{el}} = -\Delta G \text{ [J/mol]} \quad (1)$$

Promjena Gibbsove slobodne energije jednaka je promjeni entalpije sustava ( $\Delta H$ ) umanjene za umnožak temperature  $T$  [K] i promjene entropije sustava ( $\Delta S$ ), prema izrazu (2):

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (2)$$

Termodinamička svojstva reaktanata  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$  i  $\text{H}_2\text{O}$  prikazana su u Tab. 2., pod standardnim uvjetima ( $p = 1 \text{ atm} = 1,01325 \text{ [bar]}$  i  $T = 25 \text{ [}^\circ\text{C]} = 298 \text{ [K]}$ ).

Tablica 2.: Termodinamička svojstva pri 25 °C i 1 bar

SVOJSTVA	$\text{H}_2$	$\text{O}_2$	$\text{H}_2\text{O}$ (tekuće)	$\text{H}_2\text{O}$ (parno)
Entalpija H (kJ/mol)	0	0	-286,02	-241,98
Entropija S (kJ/mol K)	0,13066	0,20517	0,06996	0,18884

Koristeći podatke iz gornje tablice i Hessov zakon, promjena entalpije i entropije sustava uslijed kemijske reakcije iznosi, kako slijedi:

$$\Delta H = \Delta H_{\text{reakcije}} = \sum H_{\text{produkata}} - \sum H_{\text{reaktanata}} = H_{\text{H}_2\text{O}} - H_{\text{H}_2} - \frac{1}{2} H_{\text{O}_2} \quad (3)$$

$$\Delta H = -286,02 \text{ [kJ/mol]}$$

$$\Delta S = \Delta S_{\text{reakcije}} = \sum S_{\text{produkata}} - \sum S_{\text{reaktanata}} = S_{\text{H}_2\text{O}} - S_{\text{H}_2} - \frac{1}{2} S_{\text{O}_2} \quad (4)$$

$$\Delta S = -0,1633285 \text{ [kJ/Kmol]}$$

Količina apsorbirane topline u sustavu,  $\Delta Q$ :

$$\Delta Q = T \cdot \Delta S \quad (5)$$

$$\Delta Q = 298 \text{ [K]} \cdot (-0,1633285) \text{ [kJ/Kmol]} = -48,6589 \text{ [kJ/mol]}$$

Promjena Gibbsove energije prema izrazu (2), (3) i (4) iznosi:

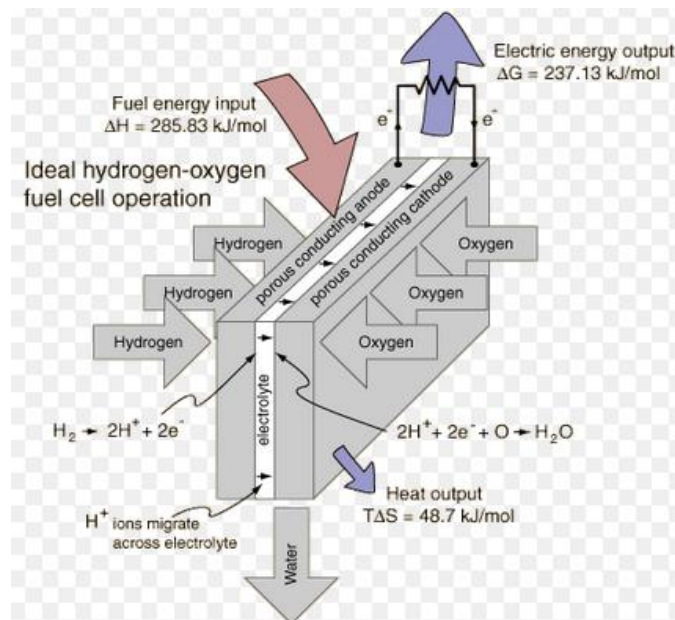
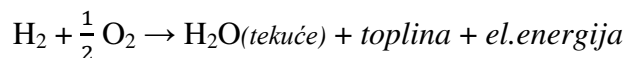
$$\Delta G = -237,34 \text{ [kJ/mol]}$$

Slijedi maksimalni rad proizveden u PEM gorivnom članku prema izrazu (1):

$$W_{\text{el}} = -\Delta G = 237,34 \text{ [kJ/mol]}$$



S obzirom na prethodne izračune, elektrokemijskom reakcijom u gorivnom članku proizvede se  $237.34 [kJ/mol]$  el. energije i  $48.66 [kJ/mol]$  topline, *Sl.3.*, odnosno vrijedi:



Slika 3.: Teoretski rad PEM gorivnog članka[3]

### 2.3. Masena i energetska bilanca

Za pravilan rad stacioniranog PEM gorivnog članka važno je poštivati masenu bilancu, tj. maseni protoci  $\dot{m} [gs^{-1}]$  moraju biti u ravnoteži. Suma masenih protoka plinovitih reaktanata na ulazu u gorivni svežanj mora biti jednaka sumi protoka na izlazu iz svežnja:

$$\sum(\dot{m}_i)_{in} = \sum(\dot{m}_i)_{out} \quad (6)$$

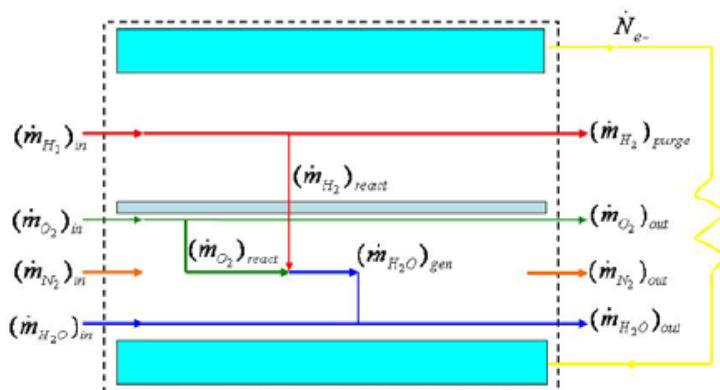
pri čemu se indeksi „i“ i „out“ odnose na  $\text{H}_2$ , zrak ( $\text{O}_2$  i  $\text{N}_2$ ) i vodenu paru prisutnu u reaktantima, kako slijedi:

$$\dot{m}_{\text{H}_2} \Big|_{in}^{FC} + \dot{m}_{\text{Air}} \Big|_{in}^{FC} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \Big|_{in}^{Air} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \Big|_{in}^{FC} = \dot{m}_{\text{H}_2} \Big|_{out}^{FC} + \dot{m}_{\text{Air}} \Big|_{out}^{FC} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \Big|_{out}^{Air} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \Big|_{out}^{H_2}$$

Maseni protok vode u sustavu također mora biti u ravnoteži, što znači da voda koja putem reaktanata uđe u sustav, te voda generirana radom gorivnog svežnja mora biti jednaka količini vode koja napusti gorivni svežanj putem strujanja zraka i vodika u „flow through“ režimu rada:

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \Big|_{in}^{Air} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \Big|_{in}^{FC} = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \Big|_{out}^{Air} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \Big|_{out}^{H_2}$$

Na Sl. 4 shematski je prikazan presjek PEMFC sa membranom i dvije bipolarne ploče, te maseni protoci reaktanata na ulazu i izlazu iz PEMFC. [4]



Slika 4.: Maseni protoci reaktanata kroz PEMFC

U slučaju rada gorivnog članka u „dead-end“ režimu, koji podrazumijeva 100% potrošnju vodika iz struje na ulazu, stehiometrijski je omjer  $S_{H_2} = 1$ . Stehiometrijski omjer je definiran kao omjer između stvarnog i teoretski mogućeg protoka reaktanata na ulazu u gorivni članak. Vrijednosti veće od jedan odnose se na režim rada „flow-through“, kada je potrebno neiskorišteno gorivo ( $H_2$ ) na izlazu recirkulirati, tj. pomoću pumpe ili kompresora pripojiti ulaznoj struji vodika u gorivni članak. Očito je da količina vode ovisi o nekoliko važnih parametara, kao što je stehiometrijski omjer struje kisika  $S_{O_2}$ , kao i vodika  $S_{H_2}$ , zatim o radnoj temperaturi svežnja  $T_{ST}$ , koja je zapravo temperatura na izlaznoj strani, zatim o izlaznom tlaku svežnja  $p_{ca}$ , tj. tlaku pri kojem se vlaga izdvaja iz plinova na izlazu, te o uvjetima okoline (tlak zasićenja  $p_{vs}$ , temperatura i relativna vlažnost,  $r$ ), kao i gustoći el. struje svežnja  $I [Acm^{-2}]$ , Faradayevom konstanti  $F$ , te broju članaka  $n_{cell}$ . Tablica 3.

Energetska ravnoteža zahtijeva jednakost između količine energije na ulazu i količine energije na izlazu iz gorivnog svežnja, odnosno:

$$\sum(H_{i})_{in} = \sum(H_{i})_{out} + Q + W_{el} \quad (7)$$

Ulazne entalpije se odnose na masene protoke  $\dot{m} [gs^{-1}]$  reaktanata (gorivo i oksidans), te vodene pare prisutne u tim plinovima, kao i na njihove specifične toplinske kapacitete  $c_p [Jg^{-1}K^{-1}]$  i temperature  $[^{\circ}C]$ . Tablica 4. U izračunima koji se vrše pomoću numeričkih alata (npr. Microsoft Office Excel) uzima se gornja ogrjevna vrijednost vodika HHV, koja uključuje kondenzaciju vodene pare pri  $0^{\circ}C$ .

Tablica 3.: Maseni protok reaktanata kroz gorivni svežanj

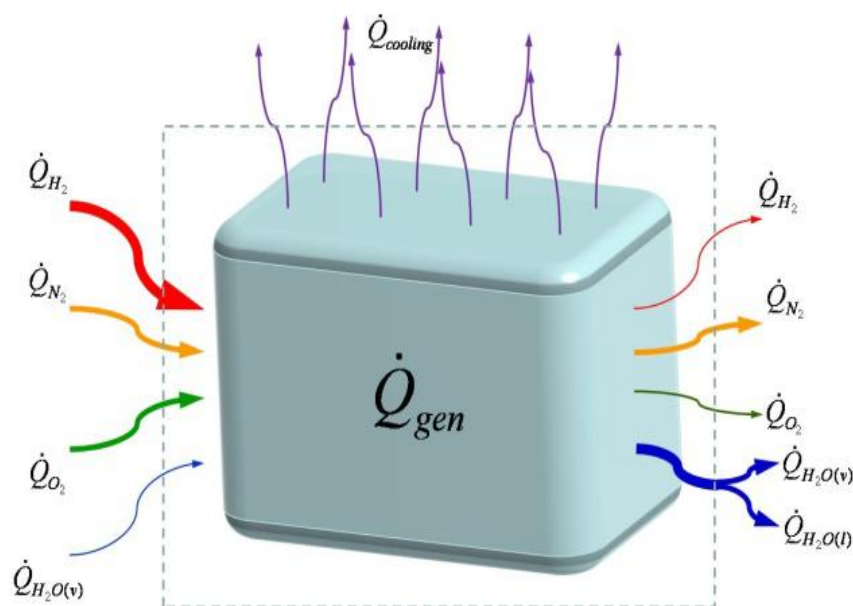
Reaktant	Maseni protok [ $gs^{-1}$ ]
$H_2 \Big _{in}^{FC}$	$\dot{m}_{H_2in} = S_{H_2} \frac{M_{H_2}}{2F} I n_{cell}$
$O_2 \Big _{in}^{FC}$	$\dot{m}_{O_2in} = S_{O_2} \frac{M_{O_2}}{4F} I n_{cell}$
$N_2 \Big _{in}^{FC}$	$\dot{m}_{N_2in} = \frac{S_{O_2}}{r_{O_2in}} (1 - r_{O_2in}) \frac{M_{N_2}}{4F} I n_{cell}$
$Air \Big _{in}^{FC}$	$\dot{m}_{Airin} = \frac{S_{O_2}}{r_{O_2in}} \frac{M_{Air}}{4F} I n_{cell}$
$H_2O \Big _{in}^{H_2}$	$\dot{m}_{H_2O,H_2in} = S_{H_2} \frac{M_{H_2O}}{2F} \frac{\varphi_{an} p_{vs}(T_{an,in})}{p_{an} - \varphi_{an} p_{vs}(T_{an,in})} I n_{cell}$
$H_2O \Big _{in}^{Air}$	$\dot{m}_{H_2O,Airin} = \frac{S_{O_2}}{r_{O_2in}} \frac{M_{H_2O}}{4F} \frac{\varphi_{ca} p_{vs}(T_{ca,in})}{p_{ca} - \varphi_{ca} p_{vs}(T_{ca,in})} I n_{cell}$
$H_2O \Big _{gen}^{FC}$	$\dot{m}_{H_2O,gen} = \frac{M_{H_2O}}{2F} I n_{cell}$
$H_2O \Big _{ED}^{FC}$	$\dot{m}_{H_2O,ED} = \xi \frac{M_{H_2O}}{F} I n_{cell}$
$H_2O \Big _{BD}^{FC}$	$\dot{m}_{H_2O,BD} = \beta \xi \frac{M_{H_2O}}{F} I n_{cell}$
$O_2 \Big _{out}^{FC}$	$\dot{m}_{O_2,out} = (S_{O_2} - 1) \frac{M_{O_2}}{4F} I n_{cell}$
$N_2 \Big _{out}^{FC}$	$\dot{m}_{N_2,out} = \frac{S_{O_2}}{r_{O_2in}} (1 - r_{O_2in}) \frac{M_{N_2}}{4F} I n_{cell}$
$Air \Big _{out}^{FC}$	$\dot{m}_{Air,out} = [ (S_{O_2} - 1) M_{O_2} + S_{O_2} \frac{1 - r_{O_2in}}{r_{O_2in}} M_{N_2} ] \frac{I n_{cell}}{4F}$
$H_2O \Big _{out}^{Air}$	$\dot{m}_{H_2OinAir,out} = \dot{m}_{H_2O,Airin} + \dot{m}_{H_2O,gen} + \dot{m}_{H_2O,ED} - \dot{m}_{H_2O,BD}$
$H_2O_{(v)} \Big _{out}^{Air}$	$\dot{m}_{H_2OinAir,out(v)} = \min \left[ \frac{S_{O_2} - r_{O_2in}}{r_{O_2in}} \frac{M_{H_2O}}{4F} \frac{p_{vs}(T_{ca,out})}{p_{ca} - \Delta p_{ca} - p_{vs}(T_{ca,out})} I n_{cell} ; \dot{m}_{H_2OinAir,out} \right]$
$H_2O_{(L)} \Big _{out}^{Air}$	$\dot{m}_{H_2OinAir,out,L} = \dot{m}_{H_2OinAir,out} - \dot{m}_{H_2OinAir,out,V}$
$H_2 \Big _{out}^{FC}$	$\dot{m}_{H_2,out} = (S_{H_2} - 1) \frac{M_{H_2}}{2F} I n_{cell}$
$H_2O \Big _{out}^{H_2}$	$\dot{m}_{H_2OinH_2,out} = \dot{m}_{H_2OinH_2,in} - \dot{m}_{H_2O,ED} + \dot{m}_{H_2O,BD}$
$H_2O_{(v)} \Big _{out}^{H_2}$	$\dot{m}_{H_2,out,V} = \min \left[ (S_{H_2} - 1) \frac{p_{vs}(T_{an,out})}{p_{an} - \Delta p_{an} - p_{vs}(T_{an,out})} \frac{M_{H_2O}}{2F} I n_{cell} ; \dot{m}_{H_2OinH_2,out} \right]$
$H_2O_{(L)} \Big _{out}^{H_2}$	$\dot{m}_{H_2,out,L} = \dot{m}_{H_2OinH_2,out} - \dot{m}_{H_2,out,V}$

Tablica 4.: Entalpija reaktanata u gorivnom svežnju

Reaktant	Entalpija [ $Jmol^{-1}$ ]
$H_2 \Big _{in}^{FC}$	$H_{H_2,in} = \dot{m}_{H_2,in} (c_{p,H_2} t_{an,in} + h_{HHV}^0)$ $h_{HHV}^0 = h_{HHV}^{25} - (c_{p,H_2} + \frac{1}{2} \frac{M_{O_2}}{M_{H_2}} c_{p,O_2} - \frac{M_{O_2}}{M_{H_2}} c_{p,H_2O(L)}) \cdot 25$
$O_2 \Big _{in}^{FC}$	$H_{O_2,in} = \dot{m}_{O_2,in} \cdot c_{p,O_2} \cdot t_{ca,in}$
$N_2 \Big _{in}^{FC}$	$H_{N_2,in} = \dot{m}_{N_2,in} \cdot c_{p,N_2} \cdot t_{ca,in}$
$Air \Big _{in}^{FC}$	$H_{Air,in} = \dot{m}_{Air,in} \cdot c_{p,Air} \cdot t_{ca,in}$
$H_2O \Big _{in}^{H_2}$	$H_{H_2O,H_2,in} = \dot{m}_{H_2O,H_2,in} \cdot (c_{p,H_2O(v)} \cdot t_{an,in} + h_{fg}^0)$
$H_2O \Big _{in}^{Air}$	$H_{H_2O,Air,in} = \dot{m}_{H_2O,Air,in} \cdot (c_{p,H_2O(v)} \cdot t_{ca,in} + h_{fg}^0)$
$H_2O \Big _{gen}^{FC}$	$H_{H_2O,gen} = m_{H_2O,gen} c_{p,H_2O} t_{gen}$
$Air \Big _{out}^{FC}$	$H_{Air,out} = \dot{m}_{Air,out} \cdot c_{p,Air,out} \cdot t_{ca,out}$
$H_2O \Big _{out}^{Air}$	$H_{H_2O,inAir,out} = H_{H_2O,inAir,out(V)} + H_{H_2O,inAir,out(L)}$
$H_2O_{(v)} \Big _{out}^{Air}$	$H_{H_2O,inAir,out(V)} = \dot{m}_{H_2O,Air,out,V} (c_{p,H_2O(v)} t_{ca,out} + h_{fg}^0)$
$H_2O_{(L)} \Big _{out}^{Air}$	$H_{H_2O,inAir,out(L)} = \dot{m}_{H_2O,Air,out,L} c_{p,H_2O(L)} t_{ca,out}$
$H_2 \Big _{out}^{FC}$	$H_{H_2,out} = \dot{m}_{H_2,out} (c_{p,H_2} t_{an,out} + h_{HHV}^0)$
$H_2O_{(v)} \Big _{out}^{H_2}$	$H_{H_2O,inH_2,out(V)} = \dot{m}_{H_2O,inH_2,out(V)} \cdot (c_{p,H_2O(v)} \cdot t_{an,out} + h_{fg}^0)$
$H_2O_{(L)} \Big _{out}^{H_2}$	$H_{H_2O,inH_2,out(L)} = \dot{m}_{H_2O,inH_2,out(L)} \cdot c_{p,H_2O(L)} \cdot t_{an,out}$
$H_2O \Big _{out}^{H_2}$	$H_{H_2O,inH_2,out} = H_{H_2O,inH_2,out(V)} + H_{H_2O,inH_2,out(L)}$

Izraz za vrijednost tlaka zasićenja u ovisnosti o temperaturi nalazi se u termodinamičkim tablicama (ASHRAE):  
 $p_{vs} = e^{aT^{-1} + b + cT + dT^2 + eT^3 + f \ln(T)}$ , pri čemu su koeficijenti: a = -5800,2206; b = 1,3914993; c = -0,048640239; d = 0,4176768 · 10<sup>-4</sup>; e = -0,14452093 · 10<sup>-7</sup>; f = 6,5459673

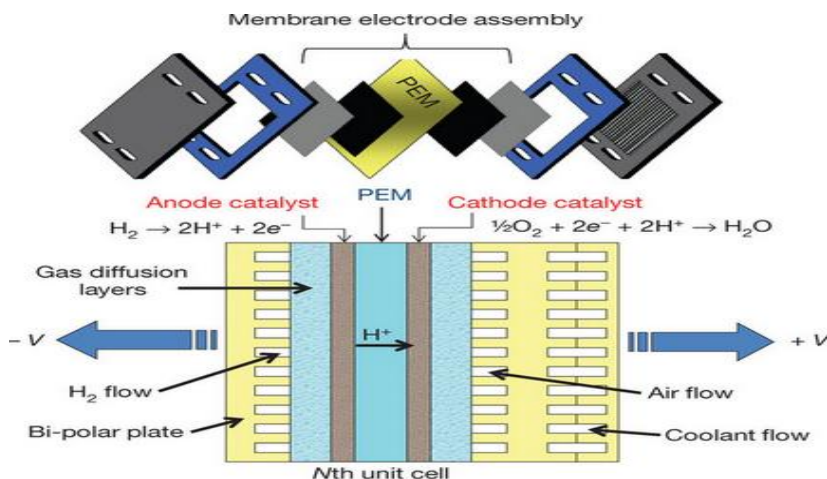
Energija na izlazu je proizvedena električna energija  $W_{el}$  uvećana za iznos entalpija  $H_{out}$  svih masenih protoka neiskorištenog goriva i oksidansa, kao i entalpije vodene pare sadržane u izlaznim plinovima.  $Q$  se odnosi na generiranu otpadnu toplinu u svežnju. Naime, za održavanje željene radne temperature, gorivnom članku se mora odvoditi toplina. Dio topline se konvekcijom i zračenjem odvodi u atmosferu s njegove vanjske površine, dok je preostali dio topline potrebno odvesti putem sustava za hlađenje (zrakom, vodom ili posebnom rashladnom tekućinom). *Slika 5.*



*Slika 5.: Prijenos topline kroz PEMFC [4]*

#### 2.4. PEM gorivni svežanj

Međusobno povezani gorivni članci tvore gorivni svežanj (*engl. stack*). Budući da je napon otvorenog kruga pojedinog gorivnog članka oko 0.7 V, potrebno je povezati više članaka u seriju (20-100 kom) kako bi povećali napon na 10-50 V, što daje oko 1kW izlazne snage. Jakost proizvedene istosmjerne (DC) struje kreće se u rasponu od 20-100 A. Uobičajena površina stacioniranih gorivnih članaka je 100 cm<sup>2</sup>, a debljina nekoliko milimetara. *Sl. 6.*

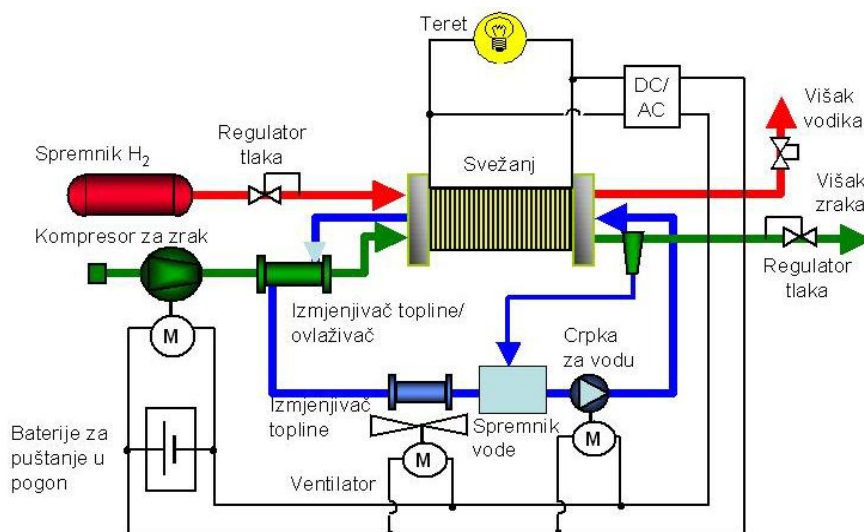


Slika 6.: Svežanj gorivnih članaka [5]

Električno povezivanje gorivnih članaka u svežanj, ujednačena koncentracija vodika i kisika, kao i kontrolirano odvođenje vode postignuto je ugradnjom tzv. bipolarnih ploča i difuzijskih membrana. Bipolarne ploče izrađene su od električki vodljivog i mehanički krutog materijala, npr. grafita, a imaju debljinu do nekoliko milimetara. S jedne i druge strane u njima su urezani kanali za ravnomjerno dovodenje vodika (anodna strana bipolarne ploče) i kisika (katodna strana bipolarne ploče). Kanali su izvedeni tako da istovremeno pružaju što manji hidraulički otpor strujanju reaktanata.

## 2.5. Sustav PEM gorivnog članka

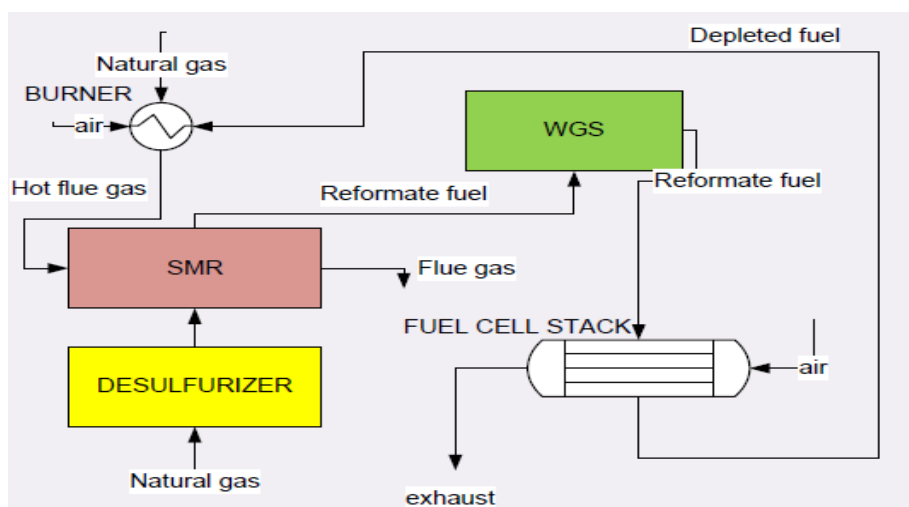
Sustav gorivnih članaka sastoji se od četiri glavna podsustava: osim podsustava gorivnog svežnja koji uključuje načine njegovog hlađenja i dobavu zraka (ventilator ili kompresor zraka), potreban je podsustav za obradu goriva koji se sastoji od kemijskih reaktora, plamenika i cjevovoda. Podsustav za upravljanja toplinom uključuje izmjenjivače topline, cjevovode i crpke. Elektronički podsustav upravlja cijelim uređajem. Na Sl.7. prikazana je shema sustava gorivnih članaka na vodik/zrak. [6]



Slika 7.: Shema sustava vodik / zrak;

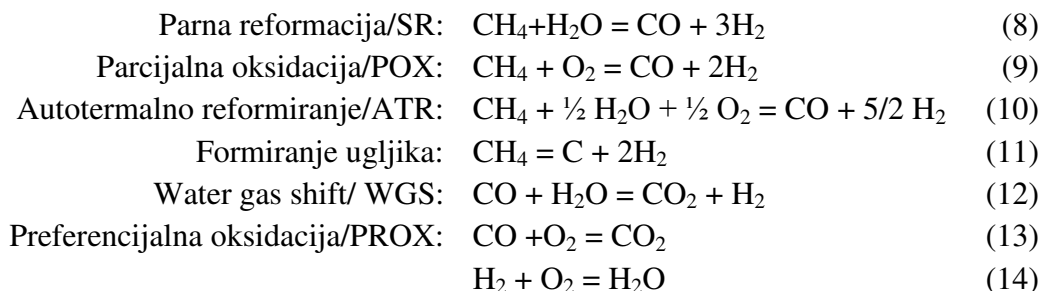
### 2.5.1. Podsustav za obradu goriva

U podsustavu za obradu goriva se iz prirodnog plina proizvodi reformat bogat vodikom. Potreban je niz postupaka obrade goriva prije ulaska reformata na anodnu stranu gorivnog svežnja kako bi se različite nečistoće svele na podnošljive granice ili potpuno uklonile ovisno o toleranciji pojedine vrste gorivnog članka, Tipična pojednostavljena shema podsustava za obradu goriva prikazana je na Sl. 8.

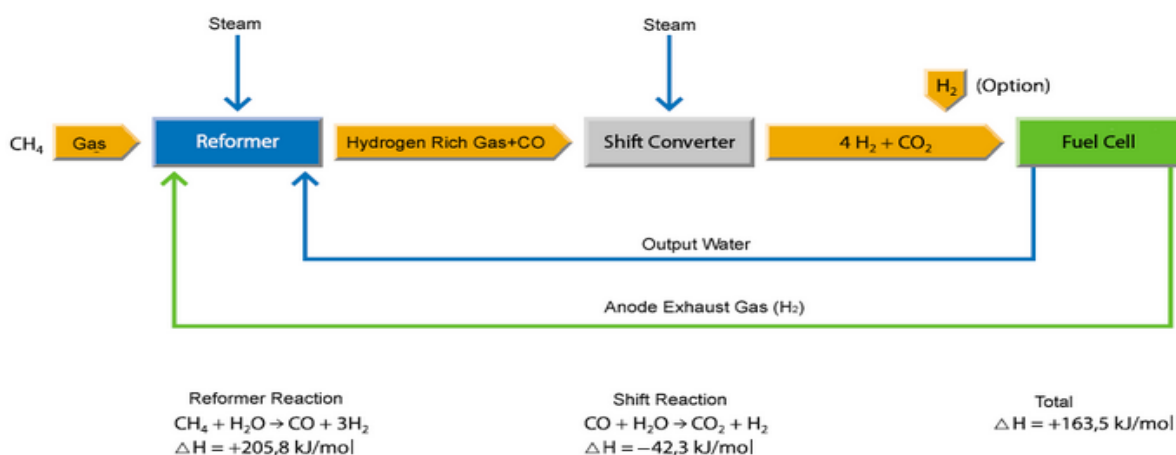


Slika 8.: Shema podsustava za obradu goriva [7]

Na tržištu postoje tri osnovne vrste reformera: parni reformeri, reformeri parcijalne oksidacije i autotermalni reformeri, koji se međusobno razlikuju po izvoru kisika potrebnog za kombiniranje s ugljikom iz goriva i oslobađanje reformata, te toplinskoj ravnoteži kemijskog procesa [8]. Sljedeće kemijske jednačbe predstavljaju moguće reakcije u različitim postupcima obrade prirodnog plina/metana kao goriva:



Parna reformacija koristi za kemijsku reakciju  $\text{O}_2$  iz pare, pri čemu je potrebno dovesti veliku količinu topline, pa je proces krajnje endotermni, za razliku od egzotermne reakcije u reformeru parcijalne oksidacije, koji proizvodi toplinu [9]. Prethodna dva procesa se mogu kombinirati u autotermalnom reformeru zbog obostrane termalne koristi .Sl.9.



Slika 9.: Integrirani postupak reformacije goriva za gorivni članak [10]

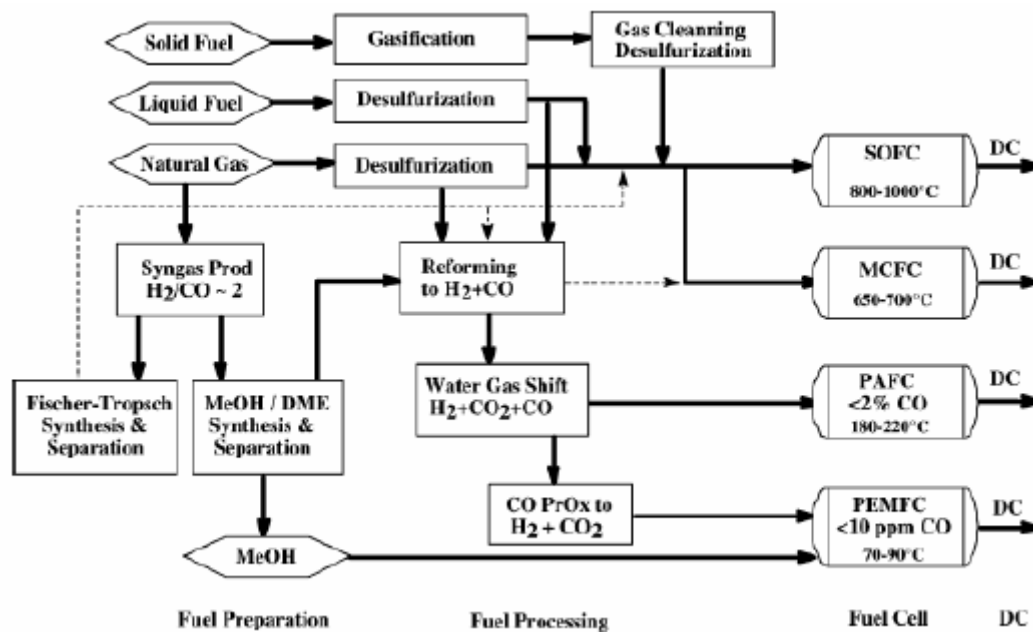
Iskoristi li se toplina iz povratnog anodnog plina ( $\text{H}_2$ ) tipični reformer može postići stupanj učinkovitosti  $\eta_{\text{ref}}$  od 0.80 za LHV, te 0.90 za HHV. Učinkovitost reformera je definirana kao omjer ogrjevne vrijednosti generiranog vodika i ogrjevne vrijednosti prirodnog plina na ulazu u reformer . Tablica 5.



Tablica 5.: Raspon efikasnosti i operativnih parametara sustava gorivnih članaka [6]

FC System	$\eta_{ref}$	$\eta_{PROX}$	$S_{H_2}$	$V_{cell}$	$\eta_{sys(HHV)}$	$\eta_{sys(LHV)}$
H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	Low		1,01	0,80	0,48	0,56
	High		1,01	0,85	0,53	0,62
H <sub>2</sub> /Air	Low		1,05	0,70	0,37	0,44
	High		1,01	0,80	0,49	0,57
with fuel processor	Low	0,80	0,95	1,2	0,7	0,25
	High	0,90	0,97	1,1	0,80	0,40

Nakon procesa reformiranja potrebno je pročititi proizvedeni H<sub>2</sub> tj. ukloniti CO<sub>2</sub> i CO. To je moguće postići podvrgavanjem reformiranog plina WGS reakciji nakon čega slijedi : a ) uklanjanje svih nečistoća tijekom PSA procesa (*Pressure Swing Absorption*) ili b ) parcijalna oksidacija u katalitičkom PROX reaktoru za smanjenje CO nečistoća ispod ~ 10 ppm za PEM gorivni članak. Slika 10.



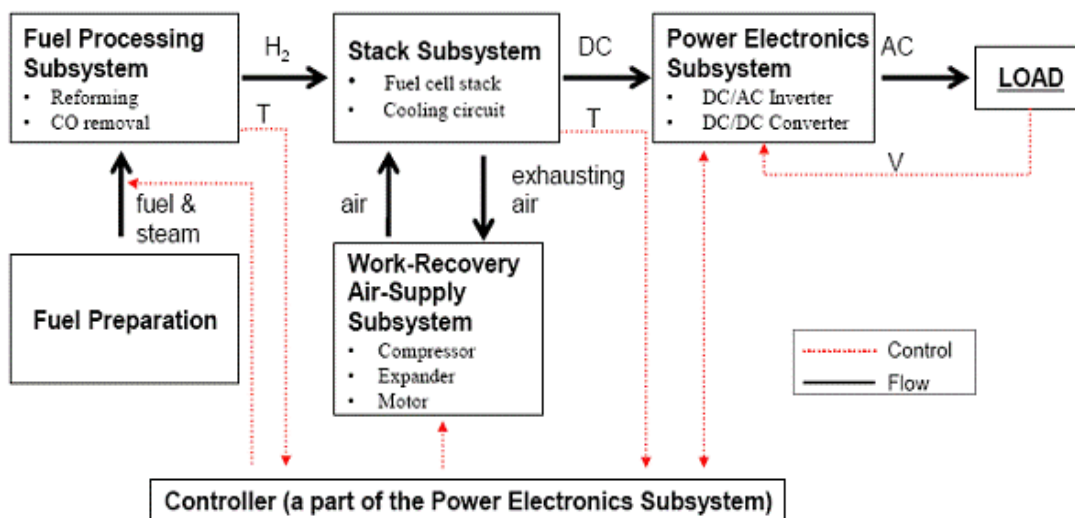
Slika 10.: Shema procesa reformacije i pročišćavanja goriva[8]

Nedavno razvijen postupak *Thermal Swing Sorption Enhanced Reaction (TSSER)* može se koristiti za kombiniranu reformaciju s pročišćavanjem u jednoj kompaktnoj operativnoj jedinici. Proces omogućava pomicanje termodinamičkih limita reakcije u SMR reaktoru i dopušta izravnu proizvodnju H<sub>2</sub> s visokim stupnjem čistoće, uz nižu temperaturu SMR reakcije. Do sada je simulirana učinkovitost procesa za opskrbu H<sub>2</sub> stacioniranih gorivnih članaka snage do 250 kW [11].

Proizvođač „Osaka Gas“ ugradio je istovjetne komponente procesora goriva (manjih dimenzija) iz 50-100 kW PAFC sustava u procesor goriva za 1kW PEMFC uz dodatak faze pročišćavanja CO. Razlog ugradnje je ostvarenih 40.000 radnih sati u 2001. [12] Tokyo Gas sustav za obradu goriva u 1kW PEMFC sustavu ostvario je najmanje 20.000 radnih sati i 4.000 stop-start ciklusa bez gubitka učinkovitosti. Uvjereni su da na osnovu 10- godišnjeg pogonskog iskustva od 40.000 sati lako mogu postići demonstracijsku trajnost od 80 000 sati. [13]

### 2.5.2. Elektronički podsustav

Proizvedena el. struja iz gorivnog članka mora imati stabilan i pouzdan električni tok što je moguće ostvariti regulacijom i pretvaračima. DC / AC pretvarači pretvaraju istosmjernu (DC) struju u izmjeničnu (AC) struju, dok DC / DC pretvarači reguliraju odstupanja dolaznog napona iz gorivnog svežnja pretvarajući ga u odlazni napon konstantne vrijednosti. Gotovo sva proizvedena struja može biti isporučena, jer su oba pretvarača vrlo učinkovita, s tipičnim vrijednostima oko 85-90% i 90-98%, [14]. Za održavanje snage gorivnog svežnja unutar željenog raspona zadužena je kontrolna jedinica koja koristi povratnu vezu između senzora i akuatora (npr. ventili, sklopke) *Sl.11*.

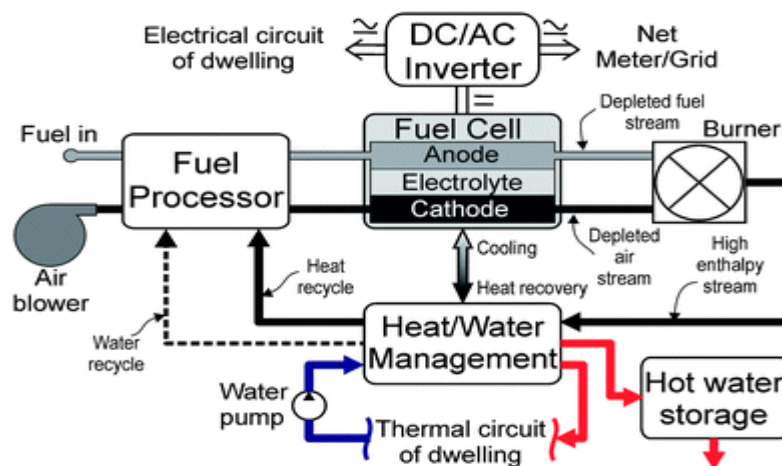


Slika 11. : Shematski prikaz upravljanja sustavom gorivnih članaka[15]

### 2.5.3. Podsustav za upravljanje toplotinom

Podsustav za upravljanje toplotinom iskorištava otpadnu toplinu iz sustava pomoću izmjenjivača topline. U slučaju integriranog podsustava reformera goriva, potreban je niz izmjenjivača topline pomoću kojih se osigurava toplinu za dobivanje pare i predgrijavanje goriva ili omogućava hlađenje reformata goriva između reaktora i prije dotoka goriva na anodu gorivnog članka. Obično se iskorištava otpadna toplina iz katalitičkog plamenika, egzoternog kemijskog reaktora, iz procesa hlađenja reformata i povratnog anodnog plina. S

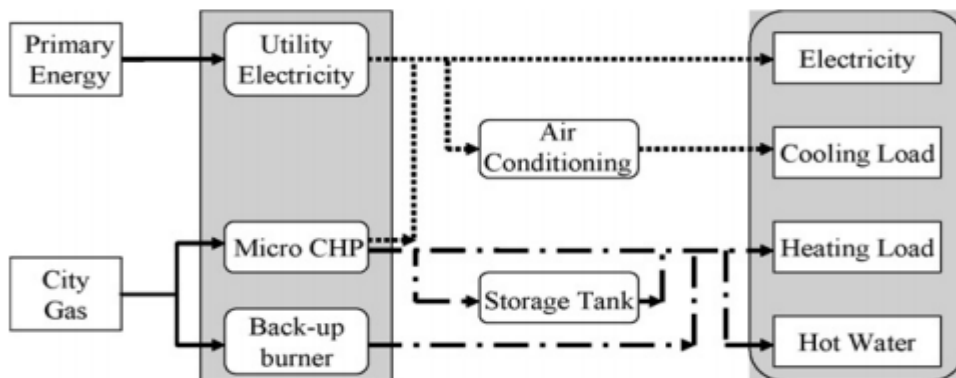
druge strane , toplina je potrebna parnom generatoru , predgrijaču goriva , toplinskom spremniku , *Sl.12.* Stoga treba vrlo pažljivo dimenzionirati izmjenjivače topline , kako bi se postigla optimalna operativno-ekonomska isplativosti sustava, bez velike potrebe za vanjskim grijanjem i / ili hlađenjem .



*Slika 12.: Shematski prikaz sustava gorivnih članaka [16]*

### 3. STANDARDNI mCHP SUSTAVI S GORIVNIM ČLANCIMA

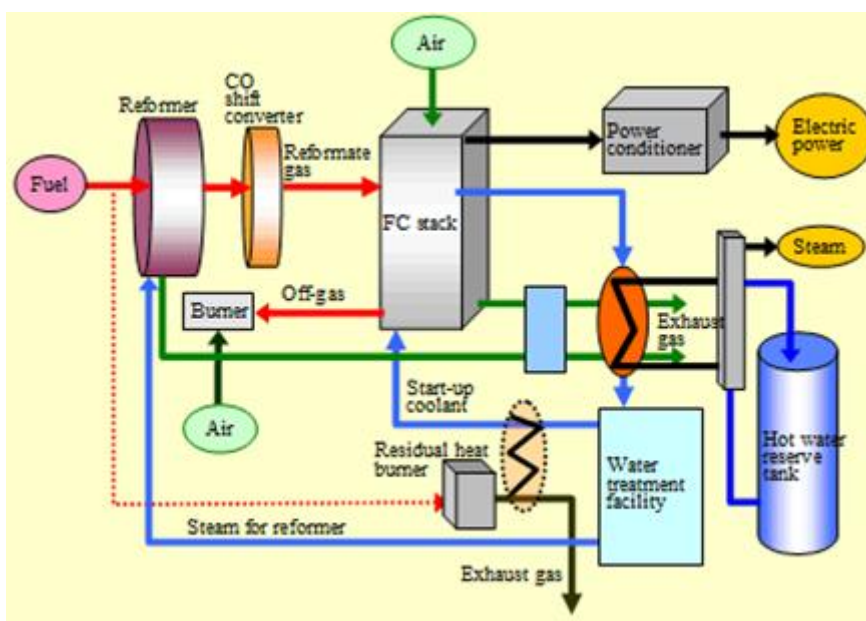
Cjelokupni sustav temeljen na tehnologiji gorivnih članaka, zahtijeva dodatne komponente za obavljanje različitih funkcija poput grijanja, hlađenja , napajanja uređaja, regulacije i upravljanja. Svežanj gorivnih članaka mora biti zagrijan na start-up temperaturu, dok je tijekom promjenjivog režima rada potrebno hlađenje radi održavanja normalne radne temperature. Funkcija optimalnog hlađenja se podjednako odnosi na sprječavanje pregrijavanja svežnja kao i na sprječavanje gubitka topline u svežnju [17]. Hladiti i grijati nije potrebno samo gorivni svežanj, već i ostale dijelove sustava, poput podsustava za obradu goriva . Iz navedenih razloga toplinski sustav treba detaljno dimenzionirati , a upravljanje cjelokupnim sustavom pažljivo prilagoditi svakom pojedinačnom zahtjevu . Ovisno o potrebama potrošača, moguće je proizvesti minimum otpadne topline iz gorivnog svežnja i podsustava za obradu goriva. Za potrebe kućanstva poželjna je dodatna otpadna toplina koju je moguće oporaviti i koristiti u kogeneraciji za npr. pokrivanje profila opterećenja za grijanje prostora, pripremu PTV ili korištenje u sustavu apsorpcije toplinske crpke [18]. Ukupna efikasnost sustava definirana je kao zbroj neto električne i toplinske učinkovitosti (za kogeneraciju) podijeljene s učinkovitosti kemijske energije goriva na ulazu u sustav. Na *Sl.13.* nalazi se shematski prikaz standardnog mCHP sustava.



Slika 13.: Shematski prikaz standardnog mCHP sustava [19]

### 3.1. Dijelovi standardnog mCHP sustava s gorivnim člancima

Na *Sl.14.* prikazana je standardna oprema mCHP sustava. Četvrtina veličine i cijene mCHP sustava odnosi se na gorivni svežanj sa integriranim procesorom goriva za obradu prirodnog plina i izdvajanje reformata vodika prihvatljive čistoće. Pretvarač izlaznog istosmjernog (DC) napona u napon mreže (AC); izmjenjivači topline za hlađenje svežnja i opskrbu kuće PTV i toplinom; spremnik tople vode za pohranu topline kada nema toplinskog opterećenja; senzori, pumpe, ventili i plinovodi za isporuku goriva; uređaji za dobavu zraka i rashladne tekućine za svežanj, uređaji za uklanjanje neiskorištenih plinova, topline i električne energije; upravljački sklop (nije na slici) za reguliranje količine goriva na ulazu, izlazne snage, i svih podsustava.



Slika 14.: Shema mCHP sustava sa HT-PEM gorivnim člancima [20]

### 3.2. Pregled dostupnih komercijalnih modela mCHP uređaja

U *Tablicama 6a.i 6b.* nalaze se sažeti podaci o postojećim mCHP uređajima. Tvrtka BAXI je razvila mCHP uređaj nazivne snage 1 kWe/1.7 kWth na LT – PEMFC ( Innotech GAMMA 1,0 ), električne i ukupne učinkovitosti od 32 % i 83 % [21]. Korejska tvrtka ClearEdge Power razvila je 5 kWe kogeneracijski uređaj na LT - PEMFC koji ima ukupnu učinkovitost do 90% [22]. Tokyo Gas u suradnji s Panasonicom razvio je mCHP jedinicu sa LT – PEMFC snage 0,75 kWe , električne učinkovitosti 40% , dok je ukupna učinkovitost 90% [23] . Hexis je razvio SOFC kogeneracijski sustav snage 1 kWe / 2 kWth Galileo ( 1000 N ) , električne i ukupne učinkovitosti od 30 % i 90 % [24]. Neke druge tvrtke , poput Osaka gas - Kyocera , Ceres Power and Ceramic Fuel Cells su također u procesu razvoja mikro kogeneracijskih uređaja sa SOFC [25].

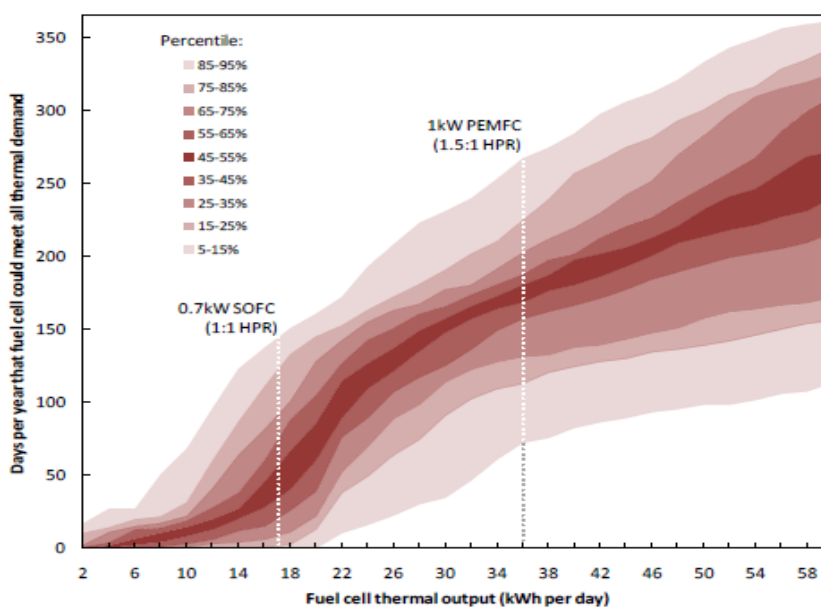
*Tablica 6a.: Pregled postojeće mCHP tehnologije: Status i sažetak izvedbe*

Tvrtka	Vrsta	$\eta_{el.net}$ %	$\eta_{tot}$ %	Stanje na tržištu
ClearEdge Power	LT- PEMFC	N/A	90	Demo
Tokyo Gas/Panasonic Ene-Farm	LT- PEMFC	40	90	Demo
BAXI Innotech GAMMA 1.0	LT- PEMFC	32	83	Demo
Plug Power	HT-PEMFC	32	90	Demo
Dantherm	HT-PEMFC	40	85-90	Demo
Ceramic Fuel Cells	SOFC	60	N/A	Planirano
Hexis Galileo 1000 N	SOFC	30	90	Demo
Ceres Power	SOFC	N/A	N/A	Demo
Osaka Gas-Kyocera	SOFC	N/A	N/A	Demo

*Tablica 6b.: Gorivni članci u postojećim mCHP sustavima*

Model	Kyocera- Toyota SOFC	Panasonic ENE- FARM	Ballard and Ebara PEMFC	Sulzer Hexis Galileo 1000N SOFC	Ceramic Fuel Cells SOFC	Nuvera Avanti PEMFC	Vaillant FCU 4600 PEMFC	Acumentrics RP-SOFC 5000	Arcotronics PENTA H2
Električna snaga (kW)	0,70	0,75	1,0	1,0	1,0	4,6	4,6	5,0	5,0
Toplinska snaga (kW)	0,6	1,0	1,7	2,0	1,0	7,6	7,0	3,0	3,0
Električna učinkovitost	45%	40%	34%	30%	40%	30%	35%	50%	45%
Ukupna učinkovitost	85%	90%	92%	92%	80%	80%	80%	80%	
Gorivo	Prirodni plin	Prirodni plin	Prirodni plin	Prirodni plin, bioplina	Prirodni plin, propan, butan, etanol, biodizel	Prirodni plin	Prirodni plin	Prirodni plin, metan, propan, etanol, metanol, vodik	vodik
Masa (kg)	80	225		170		400			200
Dimenzije (mm)	L 560 H 900 D 300	1065 1883 480		550 1600 550		1200 1400 560			

Konkretno, Ceramic Fuel Cells razvija kogeneracijsku jedinicu sa SOFC ( 1,5 kW<sub>e</sub>/0.5 kW<sub>th</sub> ), s visokom električnom učinkovitosti do 60 % [26]. Plug Power je razvio HTPEMFC kogeneracijsku jedinicu snage 5 kW<sub>e</sub>, električne i ukupne učinkovitosti blizu 32 % i 90 %. Na *Sl.15.* je vidljiva razlika između 1 kW PEMFC i 0.7 kW SOFC (tj. ENEFARM i Kyocera) koja je veća nego što se može zaključiti iz vrijednosti el. snage.



*Slika 15.: Usporedba godišnje toplinske učinkovitosti mCHP sustava sa PEMFC i SOFC [27]*

Naime, veća HPR vrijednost (omjer toplina/snaga) PEMFC sustava znači dvostruko više proizvedene topline u odnosu na samo nešto električno slabiji SOFC sustav. 1kW PEMFC sustav u potpunosti pokriva potražnju za toplinskom energijom veći dio godine (35-55% godine), u usporedbi s pokrivenošću od 0-30% godine za 0.7 kW SOFC.

## 4. DEMONSTRACIJSKI PROJEKTI

### 4.1. Uvod




Posljednjih godina desetak spomenutih velikih tvrtki diljem Japana, Južne Koreje i Njemačke vrše intenzivna istraživanja mikro CHP sustava sa PEM ili SO gorivnim člancima za domaćinstva s ciljem komercijalnog razvoja i plasmana na tržište. Od demonstracijskih mCHP sustava sa PEMFC u Južnoj Koreji, SOFC sustava u Japanu i njemačkog Callux programa očekuje se detaljna tehnička i ekonomska analiza, usporedba dobivenih podataka s ENE-FARM projektima u svrhu produljenja trajnosti, smanjenja troškova i optimiziranja performansi kogeneracijskog sustava u svakodnevnom okruženju. Prošle godine japanski proizvođači su uveli prve automatizirane proizvodne linije kogeneracijskih uređaja, što se smatra dugo očekivanim prijelazom na masovnu proizvodnju. S više od 3000 mCHP uređaja

instaliranih u japanskim domaćinstvima i očekivanim udvostručenjem godišnje prodaje, komercijalizacija gorivnih članaka je započela.

#### 4.2. CALLUX projekt

U Njemačkoj je u ljeto/ jesen 2008. pokrenut program stacioniranih gorivnih članaka , nazvan " Callux " , čija je prva faza dovršena krajem 2012. Konzorcijem je obuhvaćeno nekoliko elektrodistribucijskih tvrtki (EnBW, E.ON, EWE ENERGIE, MVV Energie, VNG) i tvrtki proizvođača gorivnih članaka (Baxi , Hexis i Vaillant) sa PEM i SOFC tehnologijom (1 kWe) [24]. Koordinator projekta je Centar za sunčevu energiju i istraživanja vodika (ZSW). Do sada je instalirano više od 560 kogeneracijskih uređaja na gorivne članke čiji se rad prati do kraja 2015. Cijena uređaja 3. generacije obuhvaćene projektom je za 60% manja od cijene 1. generacije. Troškovi servisiranja i zamjene dijelova su smanjeni za 90% u odnosu na iste s početka projekta. Znatno je poboljšana pouzdanost gorivnog svežnja i trajnost komponenti reformera, dok je pouzdanost sustava povećana na  $> 97\%$ . (od 8. 2008. do 6.2011.). Električna učinkovitost je porasla sa 28.8% prve generacije na  $> 33\%$  uređaja 3. generacije, dok je ukupna učinkovitost porasla sa 84.9% na  $> 96\%$ . Došlo je do značajnog smanjenja dimenzija i težine uređaja (do 50%), stoga se današnji uređaji lako uklapaju u arhitektonske zahtjeve zgrade. Dokazano su manje emisije štetnih plinova, a i buka je neznatna. Značajna prilagodba zahtjevima potrošača dovela je do produljenja operativnog vremena na godišnjoj razini. U dvogodišnjim terenskim ispitivanjima, osim dokazanog povećanja vrijednosti HPR (omjer grijanje /snaga), potvrđen je rad gorivnog svežnja od cca. 10.000 sati uz smanjenje kvarova u radu svežnja na  $< 0,2\%$  na 1000 sati. U *Tablici 7.* su navedeni tehnički podaci sva tri proizvođača kogeneracijskih uređaja zastupljenih Callux projektom.

Tablica 7.: Tehničke karakteristike proizvođača mCHP uređaja Callux projekta

	<b>BAXI INNOTECH</b> GAMMA PREMIO	<b>HEXIS</b> GALILEO 1000N	<b>Vaillant</b>
<b>CALLUX FIELD TEST</b>			
<b>CHP section</b> Type: Output (e/th) max. : Modulation range approx. : Fuel : Electrical efficiency (NCV) : Thermal efficiency (CHP) : Total CHP efficiency	LT-PEMFC(70 °C) 1.0 kWe/1.87 kWth  100 – 40% PeN natural gas, biomethane  34,1 % 62,0 % 96,1 %	SOFC 1.0 kWe/1,8 kWth  100-50% natural gas, biomethane  > 30 – 35%  > 95% (at 40/30 °C)	SOFC max. 1.0 kWe/2.0 kWth  single-family home natural gas, biomethane  31%  87%
<b>Integrated auxiliary heater</b> Type: Output: Efficiency :	condensing appliance 3,5-20 kW 109 % ( $\eta_N$ at 40/30 °C)	condensing appliance 4 – 20 kW 109% ( $\eta_N$ at 40/30 °C)	External peak heater: condensing appliance configuration as required by user 109% ( $\eta_N$ at 40/30 °C)
<b>Complete system</b> Dimensions: LxWxH (mm) Weight: Housing: Natural gas pressure: Electrical connection: Operating mode: Total efficiency:	600 x 600 x 1515  235 kg coated, fully enclosed  20/25 mbar (EN 437)  230 V/50 Hz power-controlled, heat- controlled, energy manager-controlled; central control (virtual power plant)	620 x 580 x 1640  approx. 170 kg coated, fully enclosed  20-25 mbar (EN 437)  230 V/50 Hz heat-controlled, energy manager-controlled; remote control option  > 95% (according to EN 50465 at 60/40 °C flow/return)	600 x 625 x 986  approx. 150 kg coated, fully enclosed  20-25 mbar (EN 437)  230 V/50 Hz heat-controlled, energy manager-controlled; remote control option



### 4.3. ENEFARM program

ENE-FARM je zajedničko ime mCHP sustava proizvedenih u Japanu. Od pet početnih proizvođača navedenih na Sl. 16., Ebara je raskinula partnerstvo s Ballardom zbog posljedica recesije u 2008/09., a Toyota se vratila automobilskoj industriji.



Slika 16.: mCHP sustavi na gorivne članke sa spremnicima PTV, početnih pet ENE-FARM proizvođača. [28]

Japanski kogeneracijski uređaji se temelje na PEM gorivnim člancima el. snage od 0,7 do 1.0 kW i toplinskog kapaciteta od 0.9-1.4 kW sa integriranim procesorom goriva prirodnog plina, ukapljenog naftnog plina ili kerozina, te spremnika tople vode (s integriranim bojlerom). Tipične dimenzije sustava su 0.9 x 0.9 x 0.3 m za jedinicu gorivnih članaka (105kg), a 1.9 x 0.75 x 0.45 m za sustave sa spremnikom i reformerom goriva (305 kg kada je pun). Sl. 17.

	ENE-FARM	Kyocera
Fuel cell capacity (kW electrical)	0.7-1.0	0.7
Tank capacity (L)	200	70
Spare boiler capacity (kW)	42	42
Rated electrical efficiency (HHV, full load)	31.5-33.5%	40.5%
Rate thermal efficiency (HHV, full load)	41-47%	36%
Voltage degradation rate (per 1000 hours)	0.25-0.5%	0.25-1%
Turndown ratio	30%	15%
Start-up time	1 hour	-
Start-up energy (kWh)	1.5	-

Slika 17.: Performanse japanskih mCHP sustava sa PEM gorivnim člancima

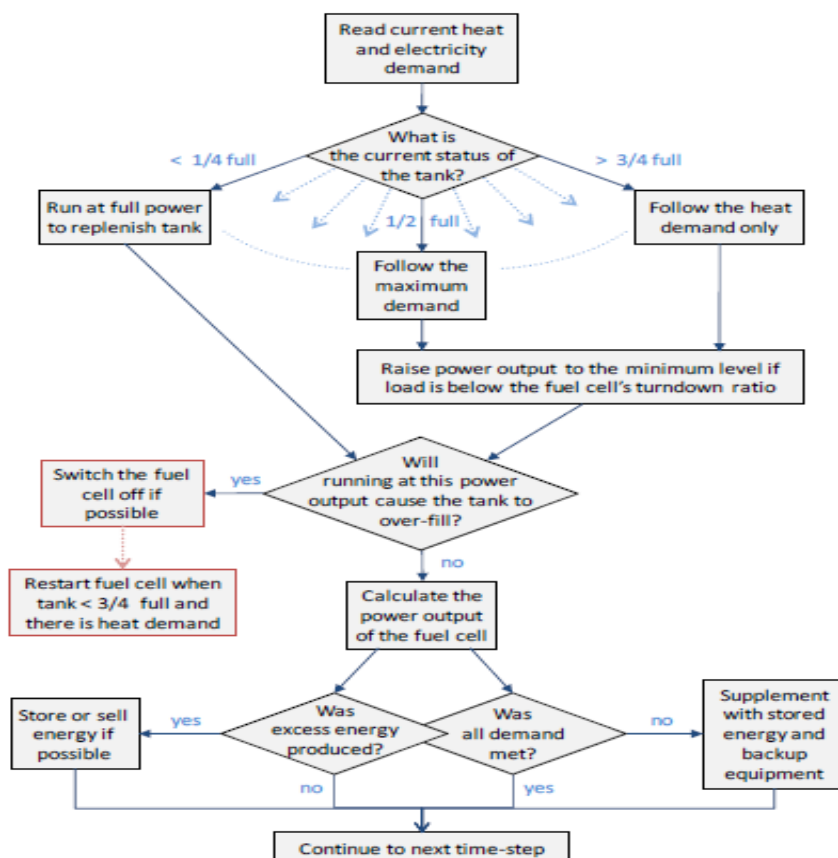
## 5. MODELIRANJE mCHP SUSTAVA

### 5.1. Osnove

S obzirom na modeliranje, svaki gorivni članak je jednostavna crna kutija koja pretvara energiju prirodnog plina/vodika u el. energiju i toplinu, tako da se tehnologija svežnjeva razlikuje samo u svojoj izvedbi (poput učinkovitosti) i ograničenju u režimima rada. Razlike između pojedinih tehnologija mogle bi se sažeti u konfiguracijskim parametrima definiranim od strane korisnika, na sljedeći način:

- izlazni električni i toplinski kapacitet i učinkovitost;
- učinkovitost pri djelomičnom opterećenju;
- stopa električnog i toplinskog pada učinkovitosti i trajnosti sustava;
- operativna strategija primjene,
- smanjenje omjera HPR tj. minimalna izlazna snaga;
- utrošak vremena i energije za pokretanje sustava;
- utjecaj uključivanja i isključivanja iz pogona, te prazni hoda na radne performanse

Proračun kogeneracijskih modela varira u složenosti od jednostavnih tabličnih izračuna do opširnih softverskih aplikacija raznih ponuđača. *Sl.18.*



Slika 18.: Primjer algoritma upravljanja mCHP sustava [27]

Kod većine osnovnih modela pretpostavlja se da gorivni članak radi punom snagom određeni broj sati dnevno ili pokriva određeni profil opterećenja prema *Tablici 8*.

*Tablica 8. : Ciljane vrijednosti energijskih brojeva izračunatih na neto korisnu površinu [29]*

	$E_{gr}$ [kWh/m <sup>2</sup> god.]	$E_{PTV}$ [kWh/m <sup>2</sup> god.]	$E_{ostalo}$ [kWh/m <sup>2</sup> god.]	$E$ [kWh/m <sup>2</sup> god.]
Obiteljska kuća Višestambena zgrada	55	25	25	105
Poslovni objekt	45	15	20	80

$$E = E_{gr} + E_{PTV} + E_{ostalo}$$

U literaturi se mogu naći četiri različita pristupa modeliranju mCHP sustava:

- Primjenom stvarnog ili simuliranog profila potrošnje energije moguće je utvrditi uzorak i broj sati rada gorivnog članka, uz puni ili djelomični režim rada. Primjeri: CODEGen [30];
- Modeliranjem prijelaza topline između gorivnog članka, kruga grijanja, kućanstva i okoline moguće je simulirati promjenu profila potražnje topline ugradnjom gorivnog članka. Primjeri: ESP - r [31], TRANSYS
- Detaljnom razradom ulaznih performansi utvrđuje se efikasnost gorivnog članka pod djelomičnim opterećenjem, graničnim i promjenljivim režimima rada. Primjeri: CODEGen, Annex 42 [32];
- Umjesto simulacije moguće je optimirati radni ciklus gorivnog članka, učinkovitost promjene dizajna i radnih parametara radi poboljšanja performansi. Primjeri: CODEGen;

## 5.2. Učinkovitost sustava gorivnih članaka

Postoji nekoliko načina za mjerenje učinkovitosti: primjenom različitih definicija sustava, potrošnje goriva i izlazne snage. Učinkovitost gorivnog svežnja i sustava mijenja se s vremenom jer se članak troši, a mijenja se i izlazna snaga s promjenom radne točke. Klasične tvrdnje o tim promjenama nisu usklađene s rezultatima promatranja stvarnih sustava. Potrebno je voditi računa o energetske bilanci gorivnog članka, kako tijekom rada, tako i tijekom pokretanja kao i isključivanja. U *Tablici 9*. prikazan je utjecaj pogonske izloženosti gorivnog članka na učinkovitost sustava. Pogonski uvjeti su 4.000 radnih sati godišnje, pad napona 5 mV na tisuću sati (0,75%) i udio toplinskog iskorištenja 0.643.

*Tablica 9.: Utjecaj pogonskih uvjeta na učinkovitost kogeneracijskog sustava [27]*

Pogonska izloženost	Napon članka [mV]	Max. el. snaga [W]	Max. toplina [W]	HPR	$\eta_{el}$	$\eta_{th}$	$\eta_{tot}$
novo	666	1000	1500	1,5	30%	45%	75%
1. godina	646	970	1595	1,565	29,1%	45,5%	74,6%
2. godina	626	940	1696	1,633	28,2%	46,1%	74,3%
3. godina	606	910	1805	1,706	27,3%	46,6%	73,9%

Načelno, do sada se došlo do sljedećih zaključaka o primjeni i svojstvima kogeneracijskih gorivnih članaka, te energetske zahtjevima domaćinstava :

- Gorivni članci sa većom učinkovitošću ( posebno električnom) daju veće uštede u odnosu na tradicionalne sustave grijanja;
- Povećanjem učinkovitosti ( ili smanjenjem troškova i ugljičnih spojeva ) tradicionalnog sustava smanjit će se prednosti zamjenske tehnologije gorivnih članaka;
- Smanjenjem omjera HPR (toplina/el.struja) mCHP uređaja povećavaju se uštede, iako postoji velika potražnja za el. energijom, istovremena visoka proizvodnja topline ograničava rad u ljetnim mjesecima [33] ;
- mCHP sustav bolje odgovara kućanstvima sa velikom potražnjom za energijom , jer sustav može satima proizvoditi potrebnu energiju [34] ;
- Integriranjem spremnika za pohranu topline TS i izvozom električne energije natrag u mrežu produljuje se vrijeme rada sustava i povećavaju uštede [35] , [36] .

### 5.3. Utjecaj pogonskih uvjeta na vijek trajanja sustava

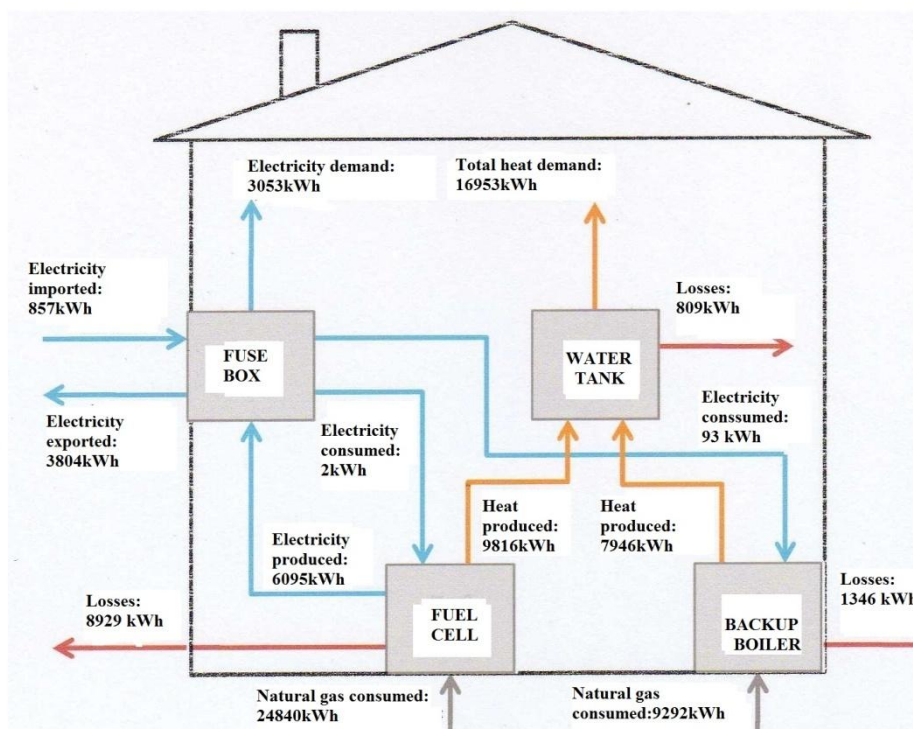
Iz primjene demonstracijskih mCHP uređaja s režimom rada prilagođenim stvarnim potrebama prosječnog kućanstva dobiveni su podaci koje je trebalo korigirati u odnosu na kataloške performanse sustava proizvođača opreme. U *Tablici 9.* za svaki podatak razvrstan u sedam kategorija, izračunate su pouzdanije vrijednosti HPR, stupanj toplinske iskoristivosti  $v_{th}$  i vijek prosječne učinkovitosti sa standardnom devijacijom izračunate vrijednosti. Učinkovitost se odnosi na gornju ogrjevnu vrijednost prirodnog plina (HHV).

*Tablica 10.: Performanse demonstracijskih mCHP sustava sa PEM i SO gorivnim člancima [27]*

mCHP/FC system	PEMFC	SOFC
Initial performance at full power:		
Net electrical efficiency:	26.7 ± 3.5%	34.7 ± 4.5%
Total system efficiency:	66.9 ± 6.6%	72.4 ± 4.4%
Heat to power ratio(HPR):	1.51 ± 0.23	1.09 ± 0.14
Thermal utilisation ( $v_{th}$ ):	0.55 ± 0.07	0.58 ± 0.04
Part load efficiency:		
Variation in electrical and thermal efficiency with load factor ( $L$ ):	$\eta_{el} = -0.220 + 5.277L - 9.127L^2 + 7.172L^3 + -2.103L^4$ $\eta_{th} = 0.900 - 0.070L + 0.170L^2$ (valid for $0.2 \leq L \leq 1.0$ )	
Durability and degradation:		
Voltage degradation [ $\mu V/h$ ]:	8.0 ± 7.8	12 ± 16
(per 1000 hours of operation)	1.2 ± 1.1%	1.7 ± 2.3%
Same rate as voltage loss, with maximum power output also decreasing		
Rate of electrical efficiency loss:	Assumed to be 0.5-1.0% per year	
Rate of thermal degradation :	Assumed to be 0.5-1.0% per year	
Operating lifetime [kh] :	19.7 ± 10.0	11.3 ± 7.1

#### 5.4. Ekonomska analiza rada mCHP sustava s PEMFC na prirodni plin u Hrvatskoj

Većina dosadašnjih eksperimentalnih studija oslanjala se na dnevne, tjedne ili sezonske serije podataka o električnim i toplinskim zahtjevima kućanstava za energijom, simulirano ili mjereno na fiksnim intervalima. Ovakav tip podataka može se dobiti od svakog kućanstva tijekom jedne godine uz relativno jeftinu opremu. Na *Sl.19.* prikazana je simulacija jednog kogeneracijskog uređaja s gorivnim člancima i pomoćnim plinskim kotlom tijekom jedne godine.



Slika 19.: Simulacija rada mCHP uređaja s gorivnim člancima i pomoćnim plinskim kotlom

Takav uređaj zadovoljava potrebe za električnom energijom 3053 kWh i toplinskom energijom 16 953 kWh nekog domaćinstva, a za to potroši 34132 kWh prirodnog plina, ali pri tome proizvede i isporuči u mrežu višak od 2947 kWh električne energije. Ekvivalentni standardni uređaj s klasičnim plinskim kotlom i spremnikom PTV bi utrošio 20771 kWh prirodnog plina za zadovoljenje iste potrebe za toplinskom energijom, dok bi se 3053 kWh trebalo kupiti iz mreže. Iz navedenog se može zaključiti da bi kogeneracijski uređaj trošio 10% manje primarne energije, u ovom slučaju prirodnog plina, uz efikasnost pretvorbe prirodnog plina u električnu energiju od 38% (prema podacima godišnjeg energetskeg pregleda za Hrvatsku u 2012.). Zanimljivo je primijetiti da uz prosječnu prodajnu cijenu prirodnog plina od 0,3952 kn/kWh (3,66 kn/m<sup>3</sup>) i prosječnu prodajnu cijenu el. energije od 0,83 kn/kWh (prema podacima Eurostat-a za Hrvatsku u 2012. [37]), takav uređaj u



Hrvatskoj ne bi bio ekonomičan; kogeneracijski uređaj bi trošio 13 488 kn za prirodni plin, dok vraćanjem el. energije u mrežu ostvaruje uštedu od 2 446 kn, što čini ukupni godišnji trošak kogeneracije od 11 042 kn. Za rad standardnog sustava potrebno je potrošiti 2 706 kn za kupnju el. energije, te 8 209 kn za prirodni plin, dakle ukupno 10 915 kn. Razlog ove neekonomičnosti leži u netržišno reguliranim cijenama električne energije i prirodnog plina u Hrvatskoj ( s omjerom cijena el. energije/ cijena plina od svega 2,1 ), ali i u relativno niskoj električnoj i ukupnoj efikasnosti analiziranog kogeneracijskog uređaja s gorivnim člancima od svega 24,5% odnosno 64%. Prema podacima proizvođača ovakvi uređaji mogu postići efikasnost višu od 30%, odnosno ukupnu i do 90% kako je to ranije prikazano. U tom slučaju bi kogeneracijski uređaji i u Hrvatskoj mogli ostvarivati godišnje uštede od 1 985 kn (18%), odnosno 8 343 kWh primarne energije (28%).

## 6. SIMULACIJA RADA mCHP SUSTAVA S PEMFC U SPREZI S OBNOVLJIVIM IZVORIMA ENERGIJE

Referentni stambeni objekt (70m<sup>2</sup>) nalazi se u području mediteranske klime (Split, Hrvatska) sa potrošnjom električne energije od 10kWh/ dan, pri čemu je satna vršna potrošnja iznosa 3,8 kW. Dosadašnji klasični način dobivanja energije za potrebe domaćinstva odnosi se na dva neovisna izvora – plinski kotao i električnu mrežu. Električni profil kućanstva pokriva se kupnjom električne energije iz mreže, u iznosu od 3425 kWh godišnje. Grijanje prostora i priprema PTV vrši se pomoću kotla za centralno grijanje kapaciteta 8 kW, čija je proizvedena količina topline 7785 kWh/god. Kompresor toplinske crpke zahtijeva dodatnih 1.493 kWh/god za hlađenje prostora u ljetnim mjesecima. Mikro CHP u usporedbi sa klasičnim sustavom, istovremeno pokriva zahtjeve za toplinskom i električnom energijom kućanstva uz stupanj učinkovitosti veći od 90%. Simulacija modela hibridnog sustava s mCHP odrađena je pomoću računalnog optimizacijskog modela HOMER, razvijenog u američkom nacionalnom laboratoriju za obnovljive izvore energije (NREL) [38].

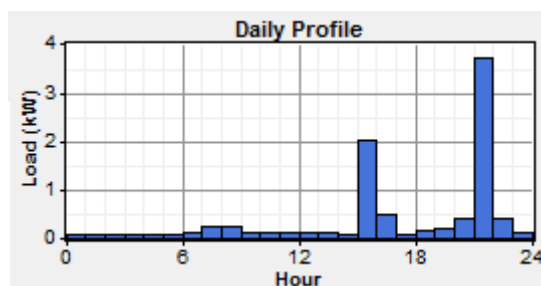
### 6.1. Električni i toplinski profil domaćinstva

Primarno opterećenje se odnosi na zahtjev koji mora ispuniti elektroenergetski sustav u određenom trenutku, povezan sa potrebama domaćinstva za rasvjetom, napajanjem el. uređaja, kućanskih aparata, računala i sl. *Tablica 11.*

*Tablica 11. Potrošnja el. energije četveročlanog domaćinstva*

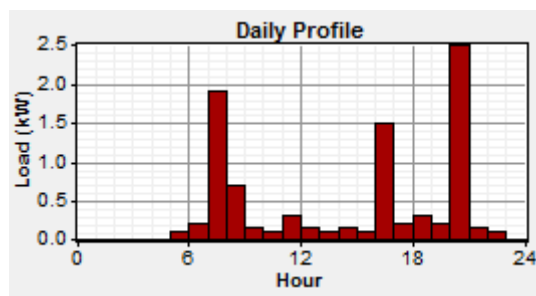
Electrical appliance	Operating hours	Consumption per hour kW/h	Daily consumption kWh/d	Annual consumption kWh/yr
Classic light bulb 10 pieces	4h/day	0.600	2.40	876.0
Electrical stove	2h/day	2.000	4.00	1460.0
Electrical oven	2h/week	1.500	3.00	156.0
Cooker hood	2h/day	0.100	0.20	73.0
Refrigerator 250L				
Deep freezer 50L	constantly	0.080	1.44	525.6
Washing machine	3times a week	1.850	1.85	288.6
Dishwasher	once a day	2.000	2.00	730.0
LED TV	4h/day	0.050	0.20	73.0
PC	8h/day	0.125	1.00	365.0
Iron	2h/week	2.400	4.80	250.0
Vacuum cleaner	2h/week	0.600	1.20	62.4
Hairdryer	2h/week	1.800	3.60	187.2

Električni profil domaćinstva u Splitu tijekom prosječnog zimskog dana (studeni - ožujak) prikazan je na *Sl. 20*. Zahtjevi za el. energijom variraju tijekom dana. Navike ukućana su takve da većinom nisu kući u poslijepodnevnom satima (17:00 - 19:00). Iako su u jutarnjim satima (7:00-9:00), te nakon posla/škole (15:00-17:00) članovi obitelji doma zbog doručka, ručka i odmora, što uzrokuje povećanu potrošnju električne energije domaćinstva, maksimalna potrošnja javlja se noću (21:00-23:00).



*Slika 20.: Dnevni profil električnog opterećenja*

Toplinsko opterećenje se odnosi na potražnju za toplinom, odnosno na zagrijavanje PTV. Sustav pokriva toplinsko opterećenje sa otpadnom toplinom dobivenom iz PEMFC i toplinom proizvedenom iz nastalog viška električne energije. Toplinski spremnik (TS) pohranjuje višak topline na satnoj i dnevnoj bazi, ovisno o potrebama sustava za toplinom. *Sl.21*.



*Slika 21.: Dnevni profil PTV*

## 6.2. Sunčevo zračenje

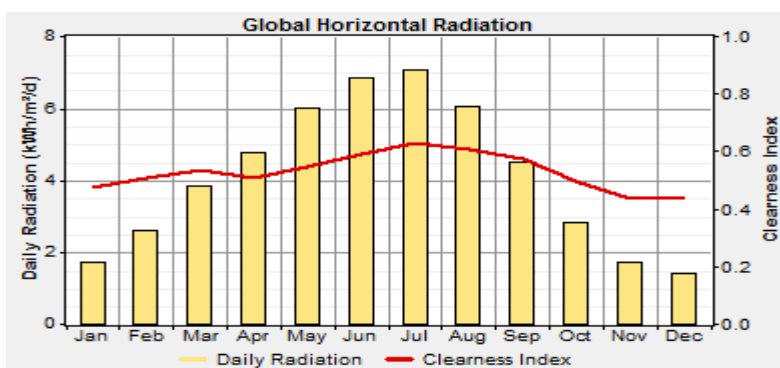
Količina sunčevog zračenja ovisi o klimatskim uvjetima i zemljopisnoj lokaciji stambenog objekta. Mjerilo prozirnosti atmosfere je broj između nula i jedan, tzv. indeks prozirnosti. Odnosi se na omjer sunčevog zračenja koje dopiye na površinu Zemlje i zračenja koje pogađa gornji dio atmosfere [39]. *Tablica 12*.



Tablica 12.: Mjesečni podaci o sunčevom zračenju za Split ( $43^{\circ}16'N$ ;  $16^{\circ}52'E$ )

Month	Clearness index	Daily radiation kWh/m <sup>2</sup> /d
Jan	0.473	1.740
Feb	0.511	2.610
Mar	0.536	3.860
Apr	0.509	4.770
May	0.549	6.010
Jun	0.591	6.850
Jul	0.629	7.080
Aug	0.609	6.050
Sep	0.572	4.530
Oct	0.497	2.840
Nov	0.436	1.740
Dec	0.436	1.420
Average	0.551	4.134

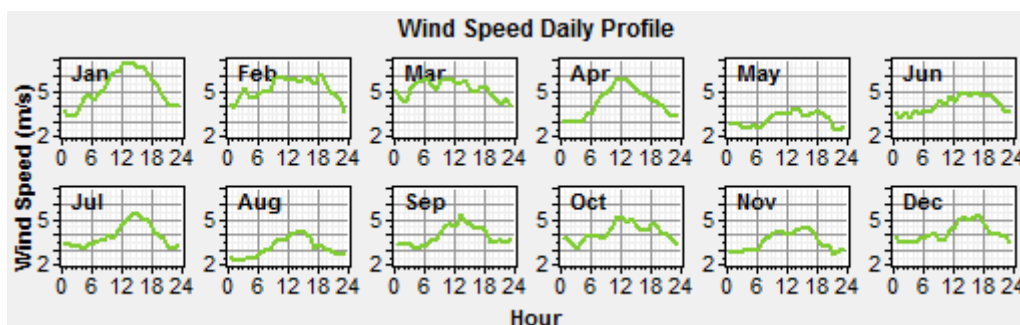
Podaci o dnevnoj dozračenju sunčevoj energiji skupa sa podacima o sunčevom zračenju za svaki mjesec u godini generiraju se pomoću algoritma [40]. Ulazni parametri ovog algoritma su prosječne mjesečne vrijednosti sunčevog zračenja na odabranoj zemljopisnoj lokaciji za stambeni objekt, a izlazne vrijednosti obuhvaćaju 8760-satni skup podataka sa statističkim karakteristikama (autokorelacija) odabranim tako da su dobiveni podaci vrlo slični eksperimentalnim vrijednostima. Vidljivo je kako je raspon sunčevog zračenja između 1,42 kWh/m<sup>2</sup> / dan i 7,08 kWh/m<sup>2</sup>/dan. Godišnji prosjek sunčevog zračenja procjenjuje se na 4,134 kWh/m<sup>2</sup>/dan. Više sunčevog zračenja dopire od ožujka do rujna, u odnosu na period od listopada do veljače. Sl.22.



Slika 22.: Prosječno mjesečno sunčevo zračenje za Split ( $43^{\circ}16'N$ ;  $16^{\circ}52'E$ )

### 6.3. Vjetar kao obnovljivi izvor energije

Podaci o brzinama vjetra za Split odnose se na 10-godišnju bazu podataka o prosječnim mjesečnim brzinama vjetra, mjereno 10 m iznad površine Zemlje u trosatnim intervalima kao što je prikazano na *Slici 23*. Primjetno je da je brzina vjetra u rasponu od 3,10 m/s do 5,10 m/s, dok je iznos prosječne godišnje brzina vjetra 4,102 m/s. [41]



*Slika 23.: Dnevni profil brzine vjetra u Splitu*

Iz *Tablice 13*. vidljivo je kako su na osnovu višegodišnjih sezonskih praćenja brzina vjetra najveće vrijednosti zabilježene od siječnja do ožujka.

*Tablica 13.: Prosječna mjesečna brzina vjetra, Split (43°16'N; 16°52'E)*

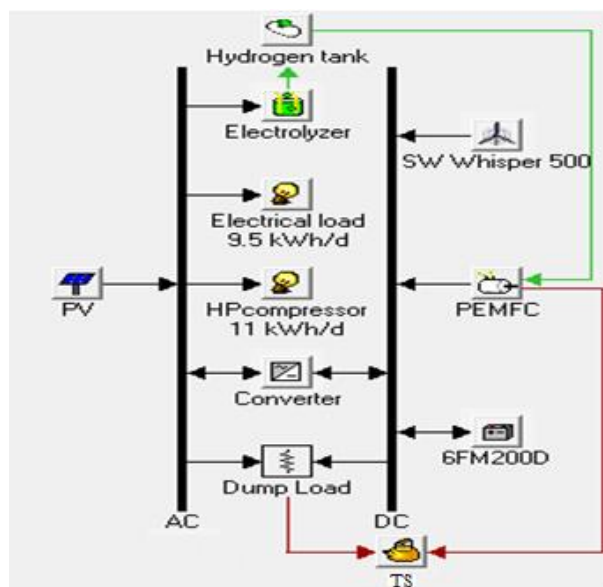
Month	Wind speed m/s
Jan	5.100
Feb	5.100
Mar	5.100
Apr	4.200
May	3.100
Jun	4.100
Jul	3.900
Aug	3.100
Sep	3.900
Oct	4.100
Nov	3.500
Dec	4.100
Average	4.102

### 6.4. mCHP sustav u sprezi s obnovljivim izvorima energije

Hibridni energetska sustav sastoji se od fotonaponskog panela PV i vjetroagregata WT, kao obnovljivih izvora, dok se mCHP sastoji od podsustava niskotemperaturnih gorivnih članaka (PEMFC, elektrolizator i spremnik H<sub>2</sub>), električne dizalice topline (HP) i toplinskog spremnika (TS).

#### 6.4.1. Opis rada sustava

PV i WT pretvaraju energiju sunca i vjetra u električnu energiju kojom, osim što slijede električni profil domaćinstva, napajaju elektrolizator za proizvodnju vodika za gorivni članak. U satima bez sunca /vjetra, gorivni članak nadomješta potrebe domaćinstva za električnom energijom, ujedno proizvodeći otpadnu toplinu kojom slijedi toplinski profil domaćinstva. Višak ovako dobivene električne energije pohranjuje se u TS. Sustav uzima toplinu pohranjenu u TS za pripremu PTV u satima kada navedeni uređaji proizvode manje energije nego što zahtijeva domaćinstvo. Baterijski spremnik omogućava pokrivanje el. profila u takvim uvjetima. *Slika 24.*



*Slika 24.: Funkcionalna shema mCCHP sustava u sprezi sa obnovljivim izvorima energije*

Hibridni PV/WT/baterija/PEMFC sustav sastoji se od 10kW fotonaponskih panela (63% udjela sunčeve energije), jednog vjetroagregata od 3 kW (24% udjela vjetra), dva niza baterija ukupnog nominalnog kapaciteta 14,4 kWh i 10kW pretvarača AC/DC. Optimalnom hibridnom sustavu dodan je PEMFC podsustav sa 3 kW PEMFC i elektrolizatorom od 5 kW sa spremnikom za pohranu H<sub>2</sub> od 30kg.

#### 6.4.2. Fotonaponski modul PV

PV modul je modeliran kao uređaj koji proizvodi izmjeničnu struju u ovisnosti o količini dozračene sunčeve energije koja doprije na njegovu površinu, neovisno o temperaturi i naponu. Izlazna snaga PV panela ( $P_{PV}$  u kW) izračunava se koristeći jednadžbu:

$$P_{PV} = f_{PV} \cdot Y_{PV} \frac{I_T}{I_S} \quad (\text{kW}) \quad (8)$$

Gdje je  $I_T$  globalno sunčevo zračenje u  $\text{kW/m}^2$  (Tablica 12.), dok je  $I_S$  standardna količina zračenja (u standardnim uvjetima ispitivanja,  $1\text{kW/m}^2$ ).

Nazivna snaga fotonaponskog modula (ponekad se naziva vršna snaga) je proizvedena količina el. energije pod standardnim uvjetima ispitivanja pri zračenju od  $1\text{kW/m}^2$  i temperaturi panela od  $25^\circ\text{C}$ . Podaci o količini dozračene sunčeve energije dospjele na PV panele za svaki sat u godini obrađuju se primjenom HDKR modela [42]. Ovaj model uzima u obzir količinu sunčevog zračenja na horizontalnu površinu, orijentaciju PV panela, lokaciju na zemljopisnoj karti, doba godine i dana. Napon pri kojem se javlja povećana izlazna snaga ovisi o jakosti sunčevog zračenja i temperaturi. Faktorom prigušenja su obuhvaćeni svi uzročnici zbog kojih izlazna snaga PV odstupa od očekivane pod idealnim uvjetima (prašina na ploči, gubici vodiča/žice, povišena temperatura). Tehnički podaci za odabrane PV module su prikazani u Tablici 14.

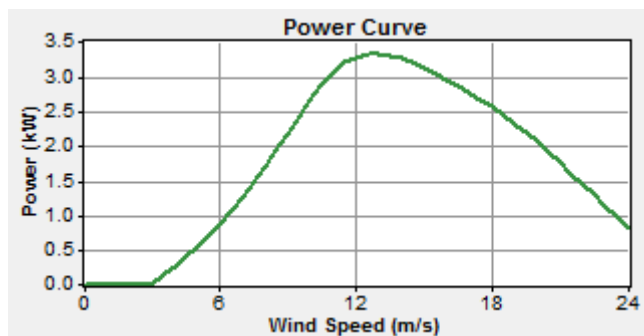
Tablica 14.: Tehnički podaci PV modula

Parameters	Value
Rated (peak) capacity, $Y_{PV}$	1 kW
Derating factor, $f_{PV}$	90 %
Slope (degrees)	65
Azimuth (degrees W or S)	2
Temperature coefficient of power	-0.5% / $^\circ\text{C}$
Nominal operating cell temperature	$47^\circ\text{C}$
Efficiency at standard test conditions	11.9%
Ground reflectance	20%
Output current	AC
Capital cost	1500\$/kW
Replacement cost	1500\$/kW
O&M cost	3\$/kW/year
Lifetime	20 years

Za energetske neovisne sustave, optimalni nagib fotopanela je onaj s najvišom srednjom dnevnom vrijednosti insolacije u mjesecu sa najmanje sunčanih sati godišnje (obično u prosincu). Odabir kuta nagiba panela od  $65^\circ$  rezultira sa 13% manje proizvedenog viška električne energije u odnosu na kut nagiba od  $35^\circ$  [43].

#### 6.4.3. Vjetroagregat WT

Vjetroagregat je modeliran kao uređaj koji pretvara kinetičku energiju vjetra u istosmjernu električnu energiju prema određenoj krivulji snage. Na Sl. 25. je dijagram izlazne snage u odnosu na brzinu vjetra u visini ukrute lopatica.



Slika 25.: Krivulja snage vjetroagregata SW Whisper 500

Krivulja snage vjetroagregata odnosi se na standardnu gustoću zraka od  $1,225 \text{ kg/m}^3$ , što odgovara standardnim uvjetima temperature i tlaka. Izračun satne izlazne snage vjetroagregata sastoji se od četiri koraka:

- Prosječna brzina vjetra za svaki sat određuje se u visini anemometra ovisno o podacima za brzinu vjetra na odabranoj lokaciji.
- Odgovarajuća brzina vjetra u visini ukrute lopatica vjetroagregata izračunava se pomoću logaritamske ovisnosti brzine i snage.
- Izračun krivulje izlazne snage vjetroagregata pri određenoj brzini vjetra uzima u obzir normalnu gustoću zraka.
- Vrijednost izlazne snage množi se s omjerom gustoće zraka, koja je konstantna tijekom cijele godine, kao omjer stvarne i standardne gustoće zraka.

Osim geometrijskih podataka o vjetroagregatu, potrebno je navesti vijek trajanja turbine u godinama, početnu cijenu, trošak zamjene, godišnje operativne troškove u dolarima. *Tablica 15.*

Tablica 15.: Tehnički podaci vjetroagregata SW Whisper 500 [44]

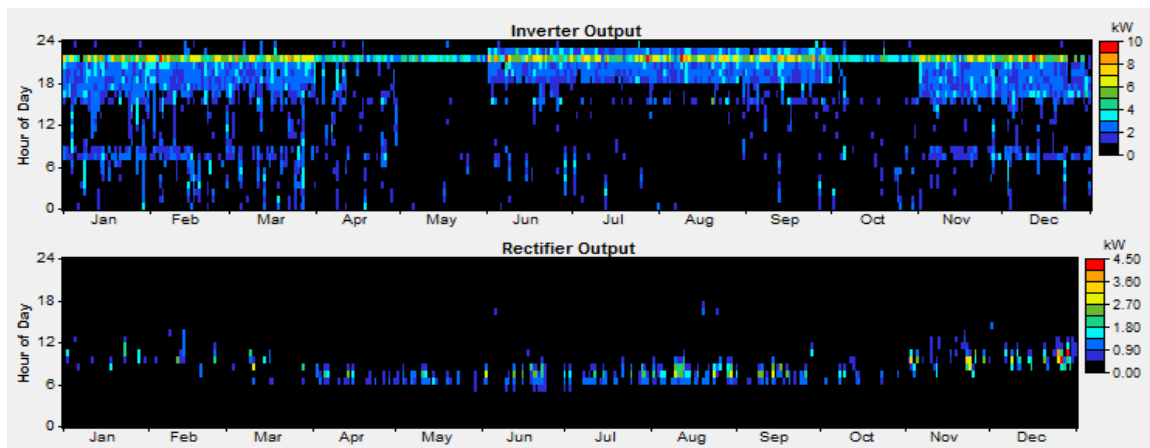
Parameters	Value
Altitude (m above sea level)	0
Anemometer height	10 m
Weibull k	1.5
Autocorrelation factor	0.8
Diurnal pattern strength	0.2
Hour of peak wind speed	15
Rotor diameter	4.5 m
Rated power	3 kW DC
Hub heights	21.3 m
Capital cost	1100\$/kW
Replacement cost	1100\$/kW
O&M cost	11\$/ year
Lifetime	15 years

#### 6.4.4. AC/DC pretvarač

Pretvarač je uređaj koji pretvara istosmjernu DC električnu energiju u izmjeničnu AC i obrnuto. Optimalna snaga pretvarača se odabire pomoću računalne simulacije. Tehnički podaci su prikazani u *Tablici 16.*, a optimizirani mjesečni režim rada na *Sl.26.*

*Tablica 16.: Tehnički podaci za AC/DC pretvarač*

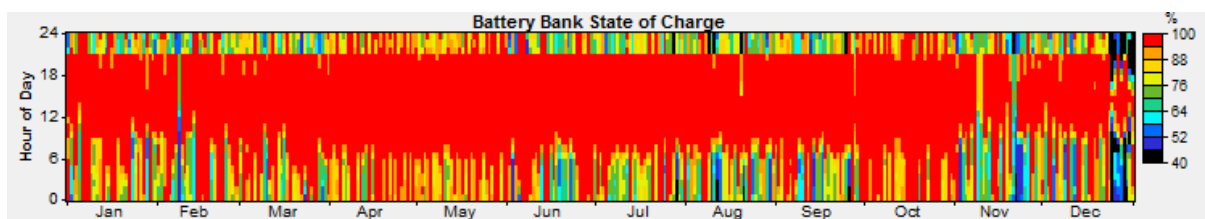
Parameters	Inverter	Rectifier	Units
Capacity	10.0	10.0	kW
Mean output	0.8	0.1	kW
Minimum output	0.0	0.0	kW
Maximum output	9.5	4.3	kW
Capacity factor	8.2	0.6	%
Hours of operation	6016	1413	hrs/yr
Energy in	7580	641	kWh/yr
Energy out	7201	545	kWh/yr
Efficiency	95	85	%
Loses	379	96	kWh/yr
Capacity relative to inverter		100	%
Capital cost		700	1100\$/kW
Replacement cost		700	1100\$/kW
O&M cost		10	11\$/ year
Lifetime		15	15 years



*Slika 26.: Mjesečni režim rada pretvarača*

#### 6.4.5. Baterijski komplet

Baterijski komplet se sastoji od više pojedinačnih baterija. Pojedinačna baterija je modelirana kao uređaj za pohranu određene količine istosmjerne struje DC konstantne učinkovitosti, uz ograničenu brzinu punjenja/praznjenja, te količinu energije koju može pohraniti prije nego što je potrebna zamjena (900kWh). *Slika 27.*



*Slika 27.: Stanje napunjenosti baterije*

Ovaj mali baterijski komplet, koji se sastoji od šest paralelnih nizova sa po dvije baterije u seriji, djeluje kao energetska spremnik za potrebe hibridnog sustava, da sustav ni u jednom trenutku ne ostane bez električnog napajanja. Tablični prikaz tehničkih svojstava nalazi se u *Tablici 17.*

*Tablica 17.: Tehnički podaci za odabranu vrstu baterije Vision 6FM200D [45]*

Parameters	Value
Nominal capacity	200 Ah (2.4 kWh)
Nominal voltage	12 V
Batteries per string	2 (24V)
Round trip efficiency	80%
Min. state of charge	40%
Float life	10 yrs
Max. charge rate	1 A/Ah
Max. charge current	60 A
Lifetime throughput	917 kWh
Suggested value	900 kWh
Maximum capacity	193 Ah
Capacity ratio, c	0.184
Rate constant, k	7.48 hr <sup>-1</sup>
Capital cost	1100\$/kW
Replacement cost	1000\$/kW
O&M cost	10\$/ year
Lifetime	15 years

#### 6.4.6. Dizalica topline HP

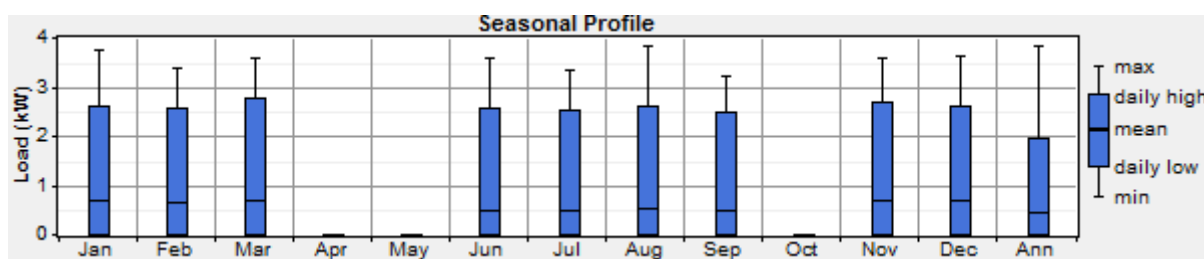
Za pogon kompresora dizalice topline koristi se električna energija proizvedena iz obnovljivih izvora ili PEMFC, ovisno o dostupnosti električne energije iz spomenutih uređaja. Načelno, prostor se grije kada je vanjska temperatura niža od 15 ° C i hladi kada je vanjska temperatura viša od 22 ° C [46]. Prosječno opterećenje kompresora dizalice topline tijekom zimskih dana je 8h / dan, a tijekom ljetne sezone 6h / dan. Način rada HP prikazan je u *Tablici 18*.

*Tablica 18.: Režimi rada HP*

Month	Days	$\Theta_{avg}^*$ °C	Heating kWh/day	Cooling kWh/day	Monthly kWh
Jan	31	8.2	16.8	no	520.8
Feb	28	8.3	16.8	no	470.4
Mar	31	11	16.8	no	520.8
Apr	30	14.5	no	no	0
May	31	19.8	no	no	0
Jun	30	23.9	no	12.24	367.20
Jul	31	26.6	no	12.24	379.44
Aug	31	26.4	no	12.24	379.44
Sep	30	21.2	no	12.24	367.20
Oct	31	17.3	no	no	0
Nov	30	12.7	16.8	no	504
Dec	31	9.1	16.8	no	520.8

\* $\Theta_{avg}$  – the monthly average ambient temperature in Split

Instalirana snaga kompresora u režimu hlađenja iznosi 2.1kW s EER od 5,1, dok je u režimu grijanja 2,04 kW s COP 3,8. Sezonski profil grijanje/hlađenje kompresora HP prikazan je na *Sl. 28*.



*Slika 28.: Sezonski profil kompresora HP*



## 6.4.7. Podsustav gorivnih članaka PCS

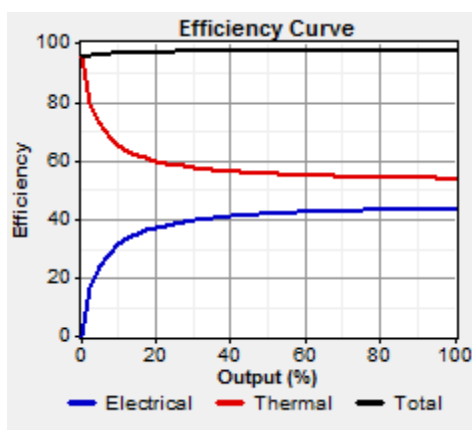
### 1. PEMFC

Pogonsko gorivo niskotemperaturnog gorivnog članka PEMFC za proizvodnju električne energije i korištenje otpadne topline je vodik pohranjen u spremniku vodika, dobiven elektrolizom u elektrolizatoru. Tehnički podaci uređaja prikazani su u *Tablici 19.*

*Tablica 19.: Tehnički podaci PEMFC*

Parameters	Value
H <sub>2</sub> curve intercept coefficient, F <sub>0</sub>	0.003 kg/h kW
H <sub>2</sub> curve slope, F <sub>1</sub>	0.066 kg/h kW
Max. electrical output	3 kW
Heat recovery ratio	95%
Minimum load ratio	10%
Output current	DC
Capital cost	1000\$/kW
Replacement cost	1000\$/kW
O&M cost	0.2\$ / year
Lifetime (operating hours)	15000

Glavne karakteristike PEMFC su najmanja i najveća proizvedena količina izlazne električne energije, očekivani životni vijek uređaja izražen u radnim satima, te krivulja goriva koja se odnosi na količinu potrošenog H<sub>2</sub> u odnosu na proizvedenu električnu energiju. *Sl.29.*



*Slika 29.: Krivulja efikasnosti PEMFC*

Satna potrošnja goriva u PEMFC prikazana je u sljedećoj matematičkoj relaciji:

$$F = F_0 \cdot Y_{\text{gen}} + F_1 \cdot P_{\text{gen}} \quad (\text{kg/h}) \quad (9)$$

gdje je:

$F$  – satna potrošnja goriva (kg/h)

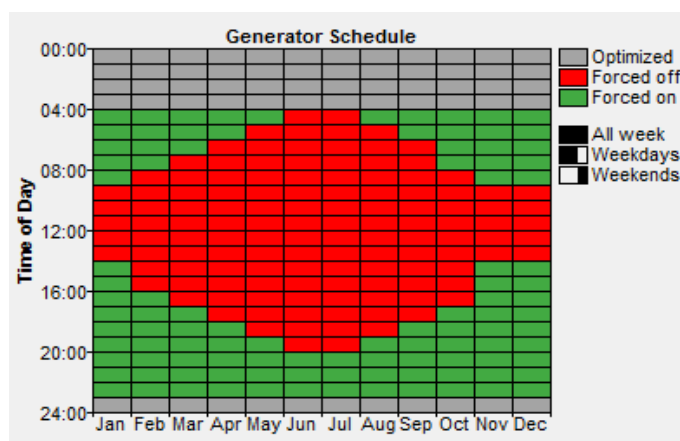
$F_0$  – koef. odsječka krivulje goriva (kg/h kW)

$F_1$  – koef. nagiba krivulje potrošnje goriva (kg/h kW)

$Y_{gen}$  – generirana snaga (kW)

$P_{gen}$  – izlazna el. snaga (kW)

95% otpadne topline iz PEMFC iskorištava se za nadomještanje toplinskog opterećenja domaćinstva. Modeliranje režima rada PEMFC odnosi se na mogućnost uključivanja/isključivanja uređaja u određene sate tijekom dana/noći ili na optimiranje sati rada pomoću numeričkog alata, ovisno o proizvedenoj električnoj energiji iz obnovljivih izvora, te potrebama sustava za električnom i toplinskom energijom tijekom godine. Na osnovu potreba sustava i relativnih troškova ostalih izvora energije, računalni programski alat odabere, iz nekoliko tisuća mogućnosti, optimalnu izlaznu snagu PEMFC na satnoj razini, koja može biti bilo gdje između njegove minimalne i maksimalne snage. *Sl.30.*

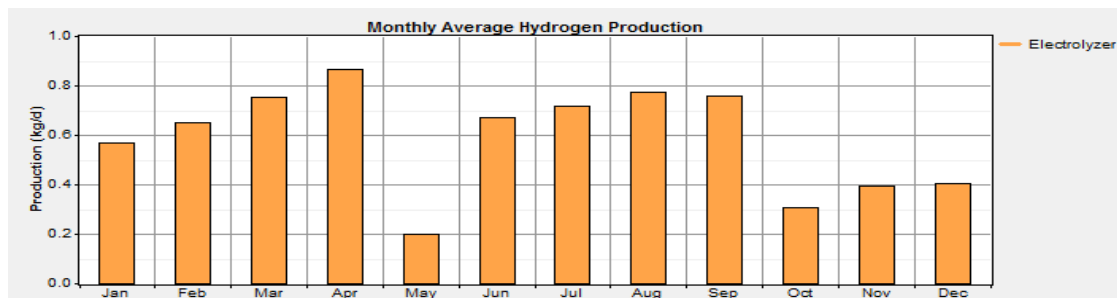


*Slika 30.: Mjesečni režim rada PEMFC*

## 2. Elektrolizator

Elektrolizator proizvodi vodik elektrolizom vode pri čemu troši struju (AC ili DC) dobivenu iz obnovljivih izvora. Teoretski se od 1litre vode može proizvesti  $1.24 \text{ Nm}^3$  vodika [47]. Učinkovitost uređaja je 85%, a definira se kao omjer količine proizvedenog vodika (na temelju gornje ogrjevne vrijednosti) i potrošene el. energije. Optimalni elektrolizator za potrebe ovog hibridnog sustava ima nazivnu snagu od 5kW s minimalnim udjelom opterećenja od 20%. To je minimalna ulazna snaga potrebna za rad uređaja, izražena kao postotak maksimalne snage na ulazu. Elektrolizator proizvodi optimalnu količinu vodika potrebnog za napajanje PEM gorivnih članaka. Godišnja proizvodnja je 229 kg, a prosječna

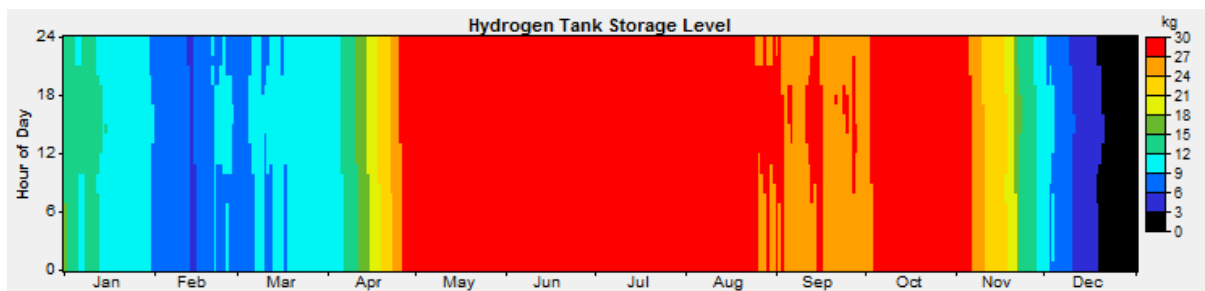
mjesečna proizvodnja  $H_2$  prikazana je na *Sl.31*. Očekivani životni vijek je 15 godina, optimalna cijena uređaja 1000 \$/kW, dok su godišnji operativni troškovi i troškovi održavanja 5\$/god.



Slika 31.: Prosječna mjesečna proizvodnja  $H_2$

### 3. Spremnik vodika

Spremnik vodika pohranjuje  $H_2$  proizveden u elektrolizatoru za napajanje PEMFC. Veličina spremnika ovisi o količini uskladištenog vodika. Početna količina vodika u spremniku definira se u apsolutnom iznosu u kg ili kao postotak veličine spremnika. Na *Sl. 32*. je vidljivo kako se u ljetnim mjesecima javlja najveća potreba za proizvodnjom  $H_2$  kada količina pohranjenog vodika dosegne 30 kg. Ekonomski parametri  $H_2$  spremnika su cijena od 500\$/kg, godišnji troškovi održavanja 5\$/godišnje i očekivani životni vijek od 25 godina.

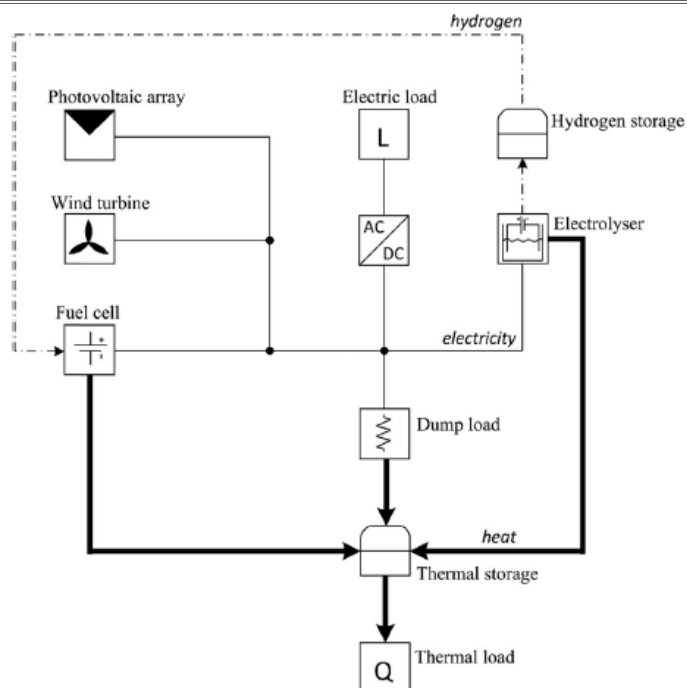


Slika 32.: Količina pohranjenog  $H_2$  u spremniku po mjesecima

## 6.5. Analiza režima rada mCHP sustava

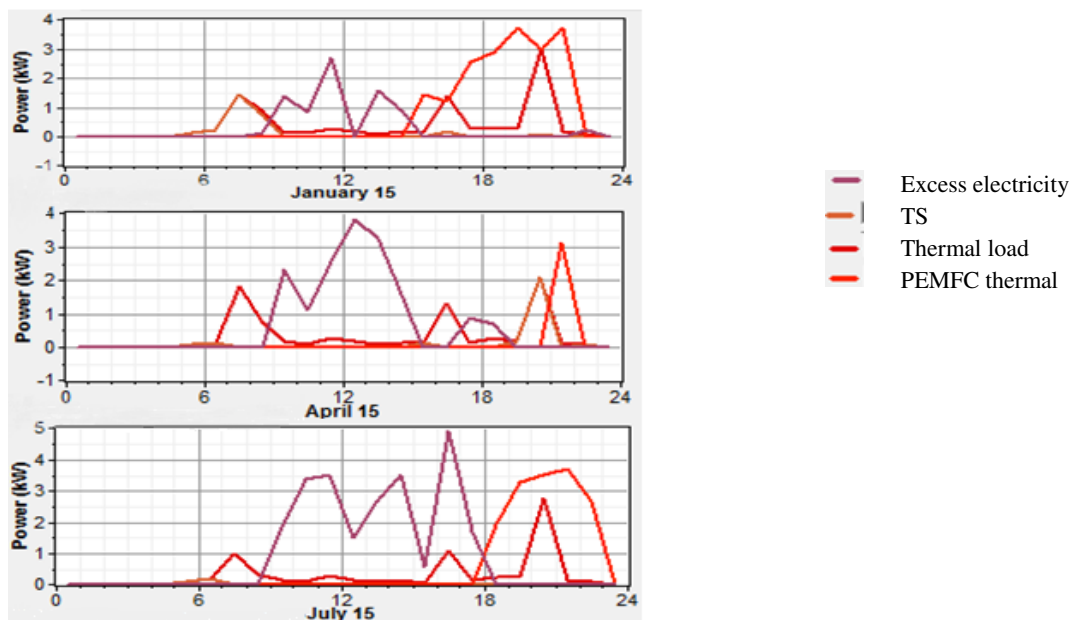
### 6.5.1. Spremnik za pohranu topline (TS)

Spremnik za pohranu topline (TS) puni se viškom el. energije proizvedene iz PV i WT, te otpadnom toplinom iz PEMFC, kao što je vidljivo na *Sl. 33*.:



Slika 33.: Shematski prikaz proizvodnje/ spremanja toplinske energije u hibridnom sustavu

Višak proizvedene el. energije javlja se tijekom zimskih mjeseci u razdoblju od 10:00-15:00, prosječno 7.4 kWh/d, dok se tijekom proljeća/jeseni u istom satnom intervalu proizvede 14,5 kWh/d viška el. energije. U ljetnom razdoblju od 10:00-18:00 sati može se pohraniti u TS prosječno 27.1 kWh/d. Sl. 34.

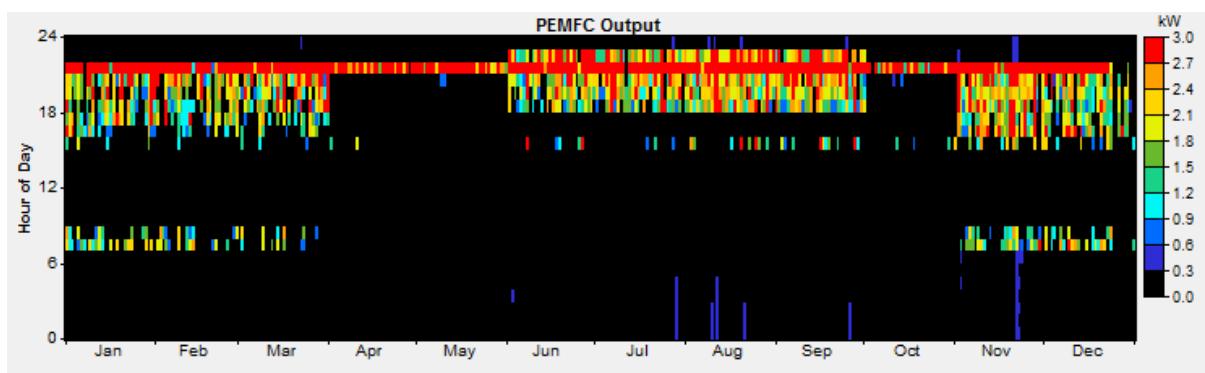


Slika 34.: Satni režim proizvodnje/potražnje toplinske energije u prosječnom zimskom, proljetnom i ljetnom danu

U jutarnjim satima 06:00-09:00 tijekom cijele godine javlja se manjak proizvedene topline, tako da se potražnja kućanstva za PTV pokriva iz TS. U zimskim mjesecima (Nov-March) potrebno je nadomjestiti prosječno 6.12 kWh/d za zagrijavanje PTV, u prijelaznom periodu (Apr, May, Oct) iz TS se uzima 3,46 kWh/d, dok tijekom perioda hlađenja (Jun-Sept.) nedostaje prosječno 1.62kWh/d. Na godišnjoj razini u TS se pohrani 7630 kWh/god.

### 6.5.2. Optimalni režim rada PEMFC

PEMFC slijedi toplinski profil kućanstava. Optimizacijski rezultati pokazuju kako je potreba za radom PEMFC najizraženija u večernjem intervalu od 19:00 do 22:00, kada nema sunčevog zračenja, a time ni viška proizvedene el. energije od fotonaponskih panela. Na godišnjoj razini, PEMFC radi 1545 sati, uz 520 uključenja. *Sl.35.*



*Slika 35.: Izlazna snaga PEMFC u ovisnosti o satu u danu*

Na taj način PEMFC proizvodi 3266kWh/god električne energije i 4164 kWh/god toplinske energije. Za to je potrebno 229 kg/god vodika, energije 7649 kWh/god. Električna iskoristivost PEMFC iznosi 42,7%, dok je ukupna iskoristivost 97,1%. Radne performanse su prikazane u *Tablici 20.*

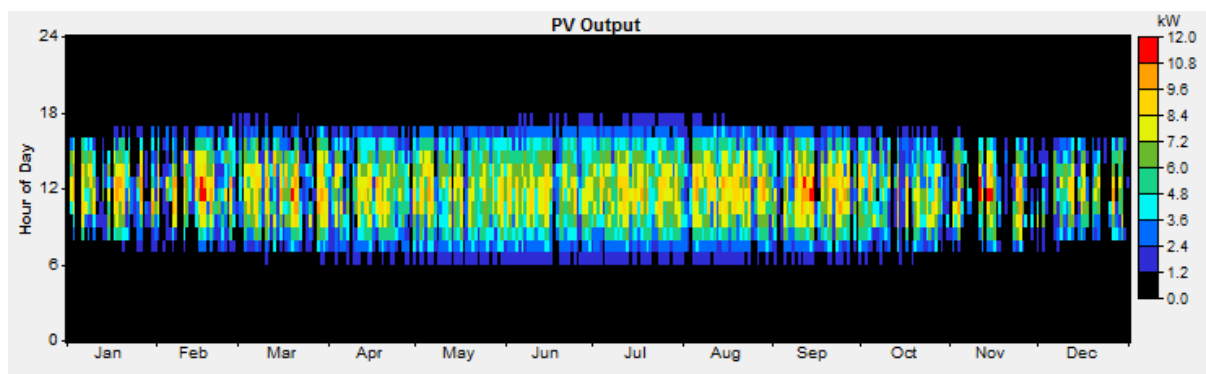
*Tablica 20.: Radne performanse PEMFC*

Quantity	Value	Units
Hours of operation	1545	hr/yr
Number of starts	520	starts/yr
Operational life	9.71	yr
Capacity factor	12.4	%
Electrical production	3266	kWh/yr
Mean electrical output	2.11	kW
Min. electrical output	0.300	kW
Max. electrical output	3.000	kW
Thermal production	4164	kWh/yr
Mean thermal output	2.7	kW
Min. thermal output	0.627	kW
Max. thermal output	3.71	kW
Hydrogen consumption	229	kg/yr

Specific fuel consumption	0.070	kg/kWh
Fuel energy input	7649	kWh/yr
Mean electrical efficiency	42.7	%
Mean total efficiency	97.1	%

### 6.5.3. Optimalni režim rada fotonaponskih modula PV

PV koristi sunčevu energiju u dnevnom satnom režimu 7:00-18:00, s godišnjih 4392 sati rada i maksimalnom snagom od 11,4 kW. *Sl.36.*



*Slika 36.: Mjesečna izlazna snaga PV*

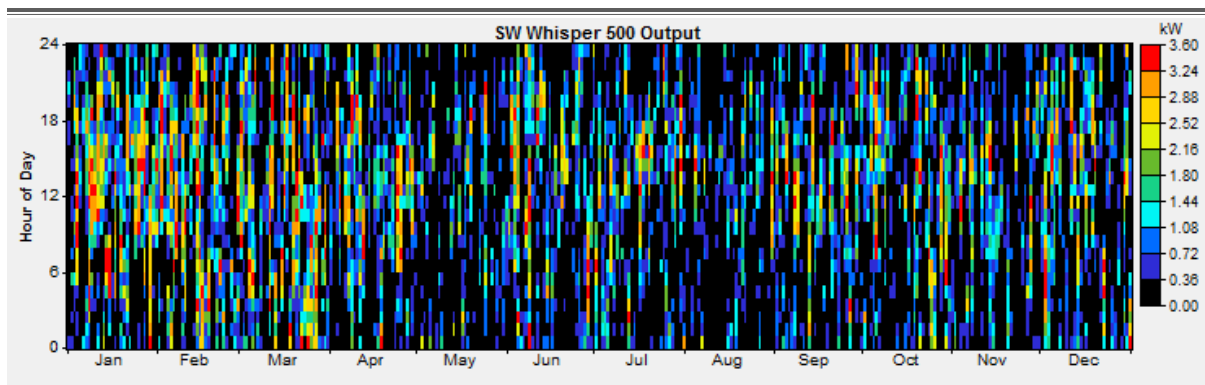
Ukupna godišnja proizvodnja el. energije je 15 703 kWh, sa udjelom od 17.9%, kao što je vidljivo iz *Tablice 21.*

*Tablica 21.: Radne performanse PV*

Quantity	Value	Units
Hours of operation	4392	hr/yr
Capacity factor	17.9	%
Total production	15703	kWh/yr
Mean output	1.8	kW
Mean output	43.0	kWh/d
Minimum output	0.000	kW
Maximum output	11.4	kW
Levelized cost	0.0085	\$/kWh

### 6.5.4. Optimalni režim rada vjetroagregata WT

WT proizvodi el. energiju na godišnjoj razini od 5675 sati. Izlazna snaga vjetroagregata u ovisnosti o satu u danu prikazana je na *Sl. 37.*



Slika37.: *Proizvodnja električne energije vjetroagregata po mjesecima*

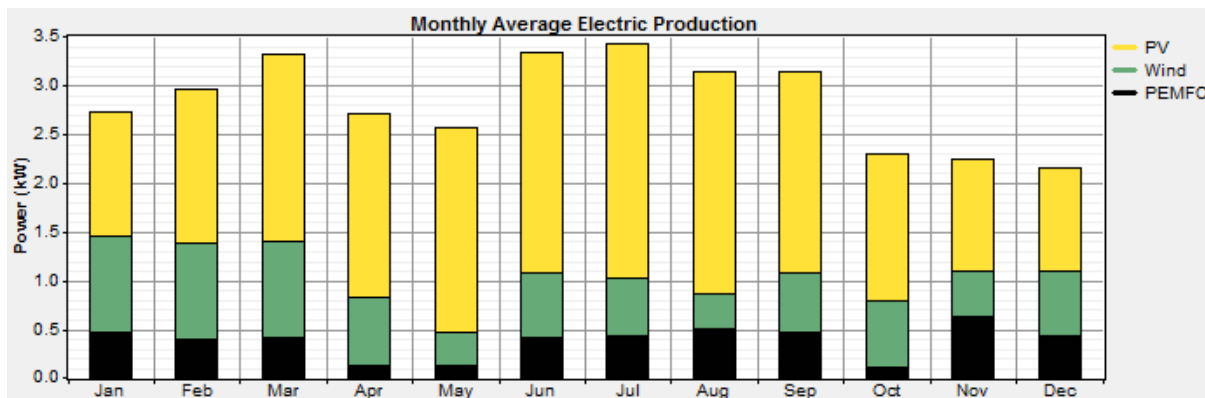
Vjetroturbina proizvede ukupno godišnje 5859 kWh/yr uz maksimalnu izlaznu snagu od 3.33 kW. Radne performanse uređaja nalaze se u *Tablici 22.*

Tablica 22.: *Radne performanse WT*

Quantity	Value	Units
Hours of operation	5675	hr/yr
Capacity factor	22.3	%
Total production	5859	kWh/yr
Minimum output	0.000	kW
Maximum output	3.33	kW
Mean output	0.67	kW
Levelized cost	0.0216	\$/kWh

## 6.6. Rezultati optimizacije i njihova analiza

Predloženi optimalni hibridni sustav ima početnu cijenu od 30.200 \$, te uz godišnje operativne troškove od 3103\$, njegova ukupna netto cijena (NPC) iznosi 69.871 \$. Prosječna cijena po kWh energije (COE) je 0.696\$/kWh. Prosječna mjesečna proizvodnja optimiziranog hibridnog PV / WT / baterija/ PEMFC / sustava prikazana je na *Sl. 38.*



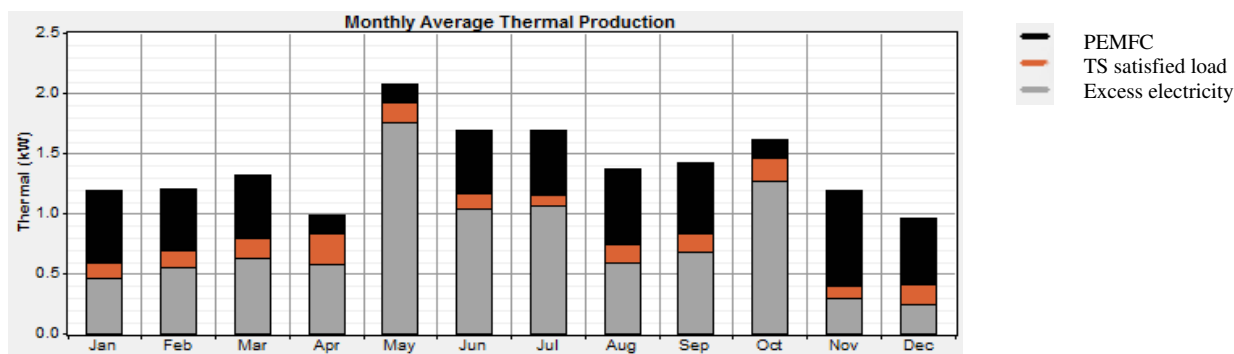
Slika 38.: *Prosječna mjesečna proizvodnja el. energije*

Vidljivo je kako PV paneli rade češće i proizvode više energije u usporedbi s vjetroagregatom, što znači da PV moduli pokrivaju glavninu potražnje domaćinstva za el. energijom. Ukupna godišnja proizvodnja električne energije iz optimiziranog hibridnog sustava iznosi 24 829 kWh, pri čemu 15 703 kWh/god električne energije dolazi od sunčevog zračenja (63%) i 5 859 kWh/god el. energije dolazi iz energije vjetra (24%) s godišnjim nedostatkom kapaciteta od 2%. Budući da se u bateriju pohrani vrlo malo el. energije, taj dio je jedva primjetan. Optimiziran sustav ima neostvarena električni teret koji ne može služiti u iznosu od 63,4 kWh / godišnje (oko 0,8%), te višak proizvedene električne energije 6715kWh / god ili 27%. *Tablica 23.*

*Tablica 23.: Električne performanse hibridnog sustava*

Production	kWh/yr	%
PV array	15703	63
Wind turbine	5859	24
PEMFC	3266	13
Total	24829	100
Consumption		
AC primary load	7419	43
Electrolyzer	9953	57
Total	17372	100
Quantity		
Excess electricity	6715	27
Unmet electric load	63.4	0.8
Capacity shortage	148	2

Načelno, višak proizvedene električne energije u hibridnom sustavu uvijek postoji, a najčešće se pohranjuje u vidu topline u toplinski spremnik (TS) za pokrivanje potreba kućanstva za grijanjem i hlađenjem [48-49]. Prosječna mjesečna proizvodnja toplinske energije hibridnog sustava prikazana je na *Sl. 39.*



*Slika39.: Prosječna mjesečna proizvedena toplinska energija*

Iako gorivni članci uspješno slijede toplinski profil kućanstva, postoje sati tijekom dana kada je potrebno posegnuti za viškom topline iz TS. Radi se od oko 1353 kWh uglavnom jutarnjih



sati tijekom godine, *Sl.14*. PEMFC proizvodi 4164 kWh/god toplinske energije, a u TS je dodatno spremljeno 6715 kWh/god topline dobivene iz viška električne energije. *Tablica 24*.

*Tablica 24.: Toplinski parametri hibridnog sustava*

Production	kWh/yr	%
PEMFC	4164	38
Excess electricity	6715	62
Total	10879	100

Quantity		
Thermal storage tank TS	10879	100
Thermal load	3249	100
Excess thermal	7630	235
TS satisfied load	1353	18

## 6.7. Zaključak optimizacije

Ovaj relativno mali, energetski neovisan hibridni sustav, koristi energiju sunca i vjetra za generiranje vodika, komprimirani sustav za pohranu 30 kg vodika, 5 kW elektrolizator i 3 kW PEMFC za generiranje otpadne topline. Za skladištenje energije sustav koristi kombinaciju baterije i vodika, pri čemu mali baterijski spremnik djeluje kao pufer spremnik, dok je glavna energija pohranjena u obliku vodika. Rezultati analize rada sustava pokazuju kako PEMFC omogućava pouzdani rad mCHP sustava tijekom cijele godine uz vrlo visoku učinkovitost, proizvodeći optimalnu količinu energiju za nadomještanje kućnih energetskih potreba, posebno u trenucima kada sunce i vjetar nisu dostupni.

## 7. PRAVCI ISTRAŽIVANJA I RAZVOJA

### 7.1. Pregled dosadašnjih istraživanja

Razni su autori tijekom posljednjih 5-6 godina intenzivno istraživali i razvijali teoretske modele decentraliziranih stacioniranih energetskih sustava s višim koeficijentima iskoristivosti uz niže temperature izvora topline.

*Pilatowsky i sur. (2007.)* su objavili eksperimentalno istraživanje koje se oslanja na računalnu simulaciju za određivanje optimalnih radnih performansi kogeneracijskog sustava sa PEMFC i klima uređajem. Rezultati su pokazali da je moguće povećati ukupnu učinkovitost sustava gorivih članaka korištenjem otpadne topline PEMFC u sezoni hlađenja [50]. *Suslu (2009.)* je usporedio potencijal kogeneracije sa PEMFC i apsorpcijskom DT sa PEMFC i kompresijskom DT. Autor je analizirao utjecaj različitih koeficijenata grijanja obiju dizalica topline na ukupni koeficijent iskoristivosti mCCHP sustava [51]. *Kuroki i sur. (2010.)* je istražio kako razni uređaji za grijanje domaćinstva utječu na uštedu električne energije. Rezultati su pokazali da najbolji stupanj iskoristivosti ima kogeneracija sa gorivnim člancima (SOFC ili PEMFC) [52]. *Staffell i sur. (2010.)* su usporedili trenutno vodeće kogeneracijske

uređaje dostupne na tržištu bazirane na tehnologiji gorivnih članaka. Njihove glavne prednosti u odnosu na postrojenja pogonjena fosilnim gorivima su niska emisija ugljičnog dioksida i visoka učinkovitost [53]. *Arsalis i sur. (2011)* su usporedili rad mCHP sustava koji se temelji na HT-PEMFC koji rade na povišenim temperaturama sa kogeneracijom baziranom na niskotemperaturnim PEMFC. Modelirali su podsustav gorivnog svežnja sa pripadajućim podsustavom obrade goriva. Pomoću numeričkog programa LabVIEW simuliran je rad mCHP sustava u stvarnim uvjetima [54]. *Bendaikha i sur. (2011.)* su objavili studiju opravdanosti primjene hibridnog energetskog sustava sa PEMFC. Otpadna toplina iz PEMFC se pohranjuje u toplinski spremnik i miješa s vodom iz geotermalnog izvora. Podsustav za hlađenje se sastoji od ventilokonvektora i dizalice topline koja za rad koristi spremnik hladne vode [55]. *Hawkes i sur. (2011.)* su predstavili tehnološki napredan mCHP sustav, dizajniran da zamijeni konvencionalne kućne uređaje za grijanje prostora i pripremu tople vode. Autori su usporedili sustave gorivnih članaka (PEMFC i SOFC) sa sustavima pogonjenima motorom. Rezultati su pokazali da gorivni članci imaju približno jednak odnos proizvedene topline i el. energije, dosljedniji rad tijekom godine i samim tim veću iskoristivost. Autori su zaključili da su potrebna daljnja istraživanja u svrhu produljenja radnog vijeka uređaja i smanjenja ulaznih troškova [56]. *Pilatowsky i sur. (2011)* su analizirali eksperimentalni koeficijent iskoristivosti za apsorpcijsku dizalicu topline u kombinaciji s PEMFC, kao i ukupnu kogeneracijsku učinkovitost kogeneracijskog sustava. Rezultati su pokazali da eksperimentalna vrijednost koeficijenta iskoristivosti apsorpcijske DT kao i ukupna učinkovitost kogeneracije, može doseći vrijednosti od 0,256 i 0,571 [57]. *Angrisani i sur. (2012.)* su proučavali energetski, ekološki i ekonomski utjecaj (3-E analiza) primjene malih trigeneracijskih energetskih sustava pretvorbe energije u kombinaciji s električnom (EHP) ili toplinskom (THP) dizalicom topline. U usporedbi navedenih sustava sa klasičnim sustavima odvojene proizvodnje el. i toplinske energije, rezultati su pokazali primarnu uštedu i do 28% energije [58]. *Arsalis i sur. (2012.)* su razvili i prikazali detaljan termodinamički, kinetički i geometrijski model mCHP sustava sa HT-PEMFC, koristeći postupak optimizacije sa genetskim algoritmom (GA). Istražili su utjecaj nekoliko promjenljivih varijabli (omjer S/C (para/ugljik), radna temperatura gorivnog članka, temperatura izgaranja goriva i stohiometrija vodika) na ukupnu učinkovitost kogeneracijskog sustava, te time dali svoj doprinos u projektiranju učinkovitijeg mCHP sustava [59]. *Fazlollahi i sur. (2012.)* su razvili i usporedili dvije optimizacijske metode za složene energetske sustave, kao što su dizalice topline, kotlovi, fotonaponski sustavi, gorivni članci, plinske turbine i plinski motori. Metoda optimizacije koja se oslanja na *Mixed Integer Linear Programming* -MILP je namijenjena uskom intervalu rješenja, dok se dodatni set rješenja odnosi na model optimizacije tzv. *Evolutionary Algoritam* (EMOO) [60]. *Hirohisa i sur. (2012)* su pustili u pogon tri mCHP sustava sa PEMFC, na način da su omogućili napajanje proizvedenom el. energijom i toplom vodom iz gorivnih članaka za šest prostorija [61]. Izvješće sadrži rezultate rada gorivnih članaka, potrošnju energije, analizu primarne uštede energije i smanjenje emisije CO<sub>2</sub>. *Zhang i sur. (2012.)* su analizirali opće značajke rada hibridnog sustava sa PEMFC i toplinom pogonjene toplinske crpke. Autori su pomoću

numeričkog proračuna dali optimalne vrijednosti glavnih varijabli (temperatura gorivnog članka, radna temperatura DT, COP), kao i analizu utjecaja nepovratnih gubitaka na performanse hibridnog sustava [62].

## 7.2. Plan 2020

Pravci razvoja kogeneracijskih postrojenja sa gorivnim člancima uključuju povećanje stupnja električne iskoristivosti na 42,5% do 2015., odnosno 45% do 2020., kao i porast cjelokupne učinkovitosti kogeneracijskog sustava na 90% do 2020. Nadalje, očekuje se veća iskoristivost otpadne topline, poboljšanje performansi internog reformera goriva, produljenje trajnosti sustava (na 60000 sati u 2020.god.) ispitivanjem i primjenom novih tehnoloških materijala, čime se smanjuju troškovi opreme, kao i troškovi cjelokupnog postrojenja .  
*Tablica 25.*

*Tablica 25.: 1–10 kWe kogeneracijska postrojenja sa gorivnim člancima na prirodni plin<sup>a</sup>*

Characteristic	2011 Status	2015 Targets	2020 Targets
Electrical efficiency at rated power <sup>b</sup>	34-40%	42,5%	45% <sup>c</sup>
CHP energy efficiency <sup>d</sup>	80-90%	87,5%	90%
Equipment cost <sup>e</sup> , 2-kW <sub>avg</sub> <sup>f</sup> system	NA	\$1200/kW <sub>avg</sub>	\$1000/kW <sub>avg</sub>
Equipment cost <sup>e</sup> , 5-kW <sub>avg</sub> system	\$2300 - \$4000/kW <sup>g</sup>	\$1700/kW <sub>avg</sub>	\$1500/kW <sub>avg</sub>
Equipment cost <sup>e</sup> , 10-kW <sub>avg</sub> system	NA	\$1900/kW <sub>avg</sub>	\$1700/kW <sub>avg</sub>
Transient response (10 - 90% rated power)	5 min	3 min	2 min
Start-up time from 20°C ambient temperature	<30 min	30 min	20 min
Degradation with cycling <sup>h</sup>	<2%/1,000 h		
Operating lifetime <sup>i</sup>	12000 h	40 000 h	60 000 h
System availability <sup>j</sup>	97%	98%	99%

*Source: US.DOE, Technical targets for residential CHP and DG FC systems*

*a Pipeline natural gas delivered at typical residential distribution line pressures.*

*b Regulated AC net/LHV of fuel.*

*c Higher electrical efficiencies (e.g. 60% using SOFC) are preferred for non-CHP applications.*

*d Ratio of regulated AC net output energy plus recovered thermal energy to the LHV of the input fuel. For inclusion in CHP energy efficiency calculation, heat must be available at a temperature sufficiently high to be useful in space and water heating applications. Provision of heat at 80°C or higher is recommended.*

*e Complete system, including all necessary components to convert natural gas to electricity suitable for grid connection, and heat exchangers and other equipment for heat rejection to conventional water heater, and/or hydronic or forced air heating system. Includes all applicable tax and markup. Based on projection to high-volume production (50,000 units per year).*

*f kW<sub>avg</sub> is the average output (AC) electric power delivered over the life of system while unit is running.*

*g Strategic Analysis, Inc. preliminary 2011 cost assessment of stationary PEM system, range represents manufacturing volumes of 100 to 50,000 units per year.*

*h Durability testing should include effects of transient operation, startup, and shutdown.*

*i Time until >20% net power degradation.*

*j Percentage of time the system is available for operation under realistic operating conditions and load profile. Unavailable time includes time for scheduled maintenance.*

### 7.3. Smjernice za buduća istraživanja

Smjernice za buduća istraživanja mCHP sustava za proizvodnju toplinske i električne energije u cilju smanjenja troškova proizvodnje, produljenja radnog vijeka, veće dostupnosti i više energetske učinkovitosti odnose se na [63] :

- ✚ optimirati pouzdanost gorivnog svežnja, kao i podsustava za obradu goriva, posebno u promjenljivim radnim uvjetima, sa većim količinama CO u reformiranom gorivu, varijacijom radne temperature i steam-carbon (S/C) omjera
- ✚ razvijati dinamički simulacijski model, baziran na eksperimentalnim podacima mCHP sustava, radi smanjenja utjecaja režima rada (promjenljiva opterećenja, puštanje u pogon i prestanak rada) na stupanj iskorištenja sustava
- ✚ kontinuirano nadzirati i optimirati količinu i kvalitetu svih energetskih pretvorbi prisutnih u procesu, te na taj način utjecati na smanjenje troškova goriva kao i ukupnih troškova.
- ✚ optimalno uskladiti režim rada dizalice topline mCHP sustava sa potrebama FC sustava za hlađenjem,

## 8. ZAKLJUČAK

PEMFC mikro-kogeneracijski sustavi pokazuju izrazitu prednost u odnosu na konkurentne tehnologije. Naime, gorivni članak kao niskotemperaturni izvor topline za mikro-kogeneraciju omogućava dosljedniji rad mCHP postrojenja tijekom cijele godine, čime se postiže vrlo visoka učinkovitost, s potencijalom korištenja energije goriva većim od 90%, u usporedbi s ukupnom učinkovitošću od 45% do 50% sustava koji električnu energiju dobiva iz termoelektrane izgaranjem prirodnog plina, a toplinsku energiju na licu mjesta izgaranjem prirodnog plina ili nekog drugog fosilnog goriva u kotlu za centralno grijanje.

Nadalje, primjena mikro-kogeneracije bazirane na PEMFC omogućuje brži probitak obnovljivih izvora energije na tržište i pouzdanu opskrbu energijom kada sunce ili vjetar nisu dostupni [64-65].

U svrhu optimiranja performansi mikro-kogeneracijskog sustava, potrebno je uložiti daljnje istraživačke napore u razvijanje 3D modela gorivnog svežnja, numeričke modele termodinamičke procjene otpadne topline i produljenje vijeka trajanja PEMFC sustava . Rješavanje tehnoloških problema, razvijanjem i primjenom manje skupih materijala, mCHP sustavi s PEMFC ( $< 10\text{kW}_{el}$ ) s korištenjem otpadne topline postaju optimalan izbor za nadomještanje energetske potrebe kućanstva u vrlo bliskoj budućnosti.

Po uzoru na japanska postignuća, osnovana je jedinstvena europska neprofitna organizacija NEW-IG javno-privatnog partnerstva kao poveznica između Europske komisije (European Commission) i istraživačkog/ proizvodnog centra za tehnologije vodika i gorivnih



članaka (FC&H<sub>2</sub> Industry and Research Community) s ciljem neposredne primjene istraživačko-demonstracijskih programa (R&D) kako bi dosegli plasman na tržište ostvaren u Japanu [66]. Do kraja 2015. planira se demonstracija više od 1000 stambenih mCHP jedinica pogonjenih H<sub>2</sub> ili prirodnim plinom / bioplinom u 20 europskih gradova i više od 50.000 uređaja do 2020. [67].

Na osnovu dosadašnjih rezultata pre-normativnog istraživanja i razvojnih spoznaja treba poraditi na standardizaciji H<sub>2</sub> tehnologije uvođenjem jedinstvene zakonske regulative unutar Europske Unije kojom bi se osigurali propisi za proizvodnju, transport i primjenu vodika i vodikovih energetske tehnologije.

**9. POPIS SLIKA****Str.**

<i>Slika 1. Uštede CHP sustava u pretvorbi energije.....</i>	<i>4</i>
<i>Slika 2. Struktura PEMFC(MEA).....</i>	<i>6</i>
<i>Slika 3. Teoretski rad PEM gorivnog članka.....</i>	<i>8</i>
<i>Slika 4. Maseni protoci reaktanata kroz PEMFC.....</i>	<i>9</i>
<i>Slika 5. Prijenos topline kroz PEMFC.....</i>	<i>12</i>
<i>Slika 6. Svežanj gorivnih članaka.....</i>	<i>13</i>
<i>Slika 7. Shema sustava vodik / zrak.....</i>	<i>14</i>
<i>Slika 8. Shema podsustava za obradu goriva.....</i>	<i>14</i>
<i>Slika 9. Integrirani postupak reformacije goriva za gorivni članak.....</i>	<i>15</i>
<i>Slika 10. Shema procesa reformacije i pročišćavanja goriva.....</i>	<i>16</i>
<i>Slika 11. Shematski prikaz upravljanja sustavom gorivnih članaka.....</i>	<i>17</i>
<i>Slika 12. Shematski prikaz sustava gorivnih članaka.....</i>	<i>18</i>
<i>Slika 13. Shematski prikaz standardnog mCHP sustava.....</i>	<i>19</i>
<i>Slika 14. Shema mCHP sustava sa HT-PEM gorivnim člancima.....</i>	<i>19</i>
<i>Slika 15. Usporedba godišnje toplinske učinkovitosti mCHP sustava sa PEMFC i SOFC.....</i>	<i>21</i>
<i>Slika 16. mCHP sustavi na gorivne članke sa spremnicima PTV, početnih pet ENE-FARM proizvođača.....</i>	<i>24</i>
<i>Slika 17. Performanse japanskih mCHP sustava s PEM gorivnim člancima...</i>	<i>24</i>
<i>Slika 18. Algoritam upravljanja mCHP sustava.....</i>	<i>25</i>
<i>Slika 19. Simulacija rada mCHP uređaja s gorivnim člancima i pomoćnim plinskim kotlom.....</i>	<i>28</i>
<i>Slika 20. Dnevni profil električnog opterećenja.....</i>	<i>31</i>
<i>Slika 21. Dnevni profil PTV.....</i>	<i>31</i>
<i>Slika 22. Prosječno mjesečno sunčevo zračenje za Split (43°16'N; 16°52'E)...</i>	<i>32</i>
<i>Slika 23. Dnevni profil brzine vjetra u Splitu.....</i>	<i>33</i>
<i>Slika 24. Funkcionalna shema mCCHP sustava u sprezi s obnovljivim izvorima energije.....</i>	<i>34</i>
<i>Slika 25. Krivulja snage vjetroagregata SW Whisper 500.....</i>	<i>36</i>
<i>Slika 26. Mjesečni režim rada ispravljača i pretvarača.....</i>	<i>37</i>
<i>Slika 27. Stanje napunjenosti baterije.....</i>	<i>38</i>
<i>Slika 28. Sezonski profil kompresora HP.....</i>	<i>39</i>
<i>Slika 29. Krivulja efikasnosti PEMFC.....</i>	<i>40</i>
<i>Slika 30. Mjesečni režim rada PEMFC.....</i>	<i>41</i>
<i>Slika 31. Prosječna mjesečna proizvodnja H<sub>2</sub>.....</i>	<i>42</i>
<i>Slika 32. Količina pohranjenog H<sub>2</sub> u spremniku po mjesecima.....</i>	<i>42</i>
<i>Slika 33. Shematski prikaz proizvodnje i spremanja toplinske energije u hibridnom sustavu.....</i>	<i>43</i>
<i>Slika 34. Satni režim proizvodnje/potražnje toplinske energije u prosječnom zimskom, proljetnom i ljetnom danu.....</i>	<i>43</i>
<i>Slika 35. Izlazna snaga PEMFC u ovisnosti o satu u danu.....</i>	<i>44</i>
<i>Slika 36. Mjesečna izlazna snaga PV.....</i>	<i>45</i>
<i>Slika 37. Proizvodnja električne energije vjetroagregata po mjesecima.....</i>	<i>46</i>
<i>Slika 38. Prosječna mjesečna proizvodnja el. energije.....</i>	<i>46</i>
<i>Slika 39. Prosječna mjesečna proizvedena toplinska energija.....</i>	<i>47</i>

## 10. POPIS TABLICA

	Str.
<i>Tablica 1. Tehničke i ekonomske karakteristike tehnologije stacionarnih gorivnih članaka .....</i>	5
<i>Tablica 2. Termodinamička svojstva pri 25 °C i 1bar .....</i>	7
<i>Tablica 3. Maseni protok reaktanata kroz gorivni svežanj .....</i>	10
<i>Tablica 4. Entalpija reaktanata u gorivnom svežnju .....</i>	11
<i>Tablica 5. Raspon efikasnosti i operativnih parametara sustava gorivnih članaka.....</i>	16
<i>Tablica 6a. Pregled postojeće mCHP tehnologije: Status i sažetak izvedbe.....</i>	20
<i>Tablica 6b. Gorivni članci u postojećim mCHP sustavima.....</i>	20
<i>Tablica 7. Tehničke karakteristike proizvođača mCHP uređaja Callux projekta.....</i>	23
<i>Tablica 8. Ciljane vrijednosti energijskih brojeva izračunatih na neto korisnu površinu.....</i>	26
<i>Tablica 9. Utjecaj pogonskih uvjeta na učinkovitost kogeneracijskog sustava.....</i>	26
<i>Tablica 10. Performanse demonstracijskih mCHP sustava sa PEM i SO gorivnim člancima .....</i>	27
<i>Tablica 11. Potrošnja el. energije četveročlanog domaćinstva.....</i>	30
<i>Tablica 12. Mjesečni podaci o sunčevom zračenju za Split (43°16'N; 16°52'E).....</i>	32
<i>Tablica 13. Prosječna mjesečna brzina vjetra, Split (43°16'N; 16°52'E).....</i>	33
<i>Tablica 14. Tehnički podaci PV modula.....</i>	35
<i>Tablica 15. Tehnički podaci vjetroagregata SW Whisper 500.....</i>	36
<i>Tablica 16. Tehnički podaci za AC/DC pretvarač.....</i>	37
<i>Tablica 17. Tehnički podaci za odabranu vrstu baterije Vision 6FM200D.....</i>	38
<i>Tablica 18. Režimi rada HP.....</i>	39
<i>Tablica 19. Tehnički podaci PEMFC.....</i>	40
<i>Tablica 20. Radne performanse PEMFC .....</i>	44
<i>Tablica 21. Radne performanse PV .....</i>	45
<i>Tablica 22. Radne performanse WT .....</i>	46
<i>Tablica 23. Električne performanse hibridnog sustava.....</i>	47
<i>Tablica 24. Toplinski parametri hibridnog sustava .....</i>	48
<i>Tablica 25. 1–10 kWe kogeneracijska postrojenja s gorivnim člancima na prirodni plin.....</i>	50

## 11. REFERENCE:

- [1] Barbir, F.: PEM Fuel Cells: Theory and Practice, Elsevier, 2005.
- [2] <http://physics.nist.gov/MajResFac/NIF/pemFuelCells.html>, posjećeno 2.9.13.
- [3] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>, posjećeno 2.9.13.
- [4] Shevock B.W.: "System level Modeling of Thermal Transients in PEMFC Systems", Virginia Polytechnic and State University, Blacksburg, Virginia, 2008.
- [5] <http://natura.com>, posjećeno 2.9.13.
- [6] Barbir F.: "PEM Fuel Cells Theory and practice"; 2nd ed., Elsevier Inc., 2013.
- [7] Arsalis A.: „Development of next generation micro-CHP system based on HT-PEMFC technology“ Department of Energy Technology Aalborg University 2011.
- [8] Aidu Q., Brant P., Kunal K.: "Integrated fuel processors for fuel cell applications: A review", Fuel processing technology 88, pp.3-22, 2007.
- [9] Ogden J.M.: "Review of small stationary reformers for hydrogen production", National Renewable Energy Laboratory, US, 2001
- [10] [www.innovationspark-brennstoffzelle.de](http://www.innovationspark-brennstoffzelle.de), posjećeno 3.9.13.
- [11] Beaver M.G., Sircar S.: "Decentralized production of hydrogen for residential PEM fuel cells from piped natural gas by low temperature steam-methane reforming using sorption enhanced reaction concept", Chemical Engineering Department, Lehigh University, Bethlehem, Pa.18015 USA, 2010.
- [12] First UK domestic fuel cell cogen installation. Fuel Cells Bulletin (10): p. 6-6. 2005
- [13] Hubert C.E., Achard P., Metkemeijer R.: "Study of a small heat and power PEM fuel cell system generator", Journal of Power Sources, 156(1): p. 64-70., 2006.
- [14] Larminie, J., & Dicks, A. L. : Fuel Cell Systems Explained (2nd ed.). Chichester, UK: Wiley., 2003.
- [15] [www.cfpub.epa.gov](http://www.cfpub.epa.gov), posjećeno 6.11.13.
- [16] [www.pubs.rcs.org](http://www.pubs.rcs.org), posjećeno 8.11.13.
- [17] O'Hayre, R., Colella, W., Cha, S.-W., & Prinz, F. B. *Fuel Cell Fundamentals* (2nd ed.). Hoboken, New Jersey: Wiley, 2009.
- [18] Korsgaard, A. R., Nielsen, M. P., & Kær, S. K. ;Part one: A novel model of HTPEM-based micro-combined heat and power fuel cell system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(7), 1921-1931., 2008.
- [19] Hongbo R., Weijun G.: "Economic and environmental evaluation of micro CHP systems with different operating modes for residential buildings in Japan, Energy and Buildings 42 (2010) 853–861, 30. December 2009.
- [20] [www.daido-it.ac.jp](http://www.daido-it.ac.jp), posjećeno 15.11.13.
- [21] <http://www.baxi-innotech.de>, posjećeno 15.11.13.
- [22] <http://clearedgepower.com>, posjećeno 19.11.13.
- [23] <http://www.tokyo-gas.co.jp>, posjećeno 21.11.13.
- [24] <http://www.callux.net>, posjećeno 25.11.13.



- [25] Delta Energy & Environment Ltd. Micro-CHP Markets – Status and Outlook. In D. Morgado (Ed.), *Danish micro-CHP Workshop*. Sønderborg, Denmark, 2010.
- [26] <http://www.cfcl.com.au> Ceramic Fuel Cells Ltd, 2010., *posjećeno 5.01.14.*
- [27] Staffell I. “Fuel cells for domestic heat and power: are they worth it?“, University of Birmingham, September 2009.
- [28] OsakaGas. *ENE-FARM Product Information*. 2009.;  
<http://www.ene-farm.info/en/products/>, *posjećeno 10.1.14.*
- [29] Agencija za učinkovito rabo energije (AURE) “Zbirka informativnih listov: ZA učinkovito rabo energije”, Slovenija, 1999.
- [30] Kimura T.: “Results of the Residential Fuel Cell Extensive Demonstration Project in Japan”. Presented at *Fuel Cell Seminar & Exposition*. Phoenix, Arizona. 2008.
- [31] Pawlik J. et al.: “Simulation of Operation, Energy Savings, and CO<sub>2</sub> Balance of a Domestic Fuel Cell Energy Center”. *Fuel Cells* 7(3): pp. 190-196., 2007.
- [32] Toshiba Fuel Cell power Systems Corporation. *仕様カタログ (ENE-FARM Specifications)*. <http://www.toshiba.co.jp/product/fc/products/pdf/catalog5>, 2009.
- [33] Danish Micro Combined Heat and Power, 2009. <http://www.dk-mchp.eu/>
- [34] Kogaki T.: “Japan's Approach to the Commercialization of Fuel Cell and Hydrogen Technology”. *Fuel Cell Seminar & Exposition*. San Antonio, USA. 2007.
- [35] Tanaka R.: “Update on Residential Fuel Cells Demonstration and Related Activities in Japan”, Presented at *Fuel Cells KTN: Fuel cells for distributed generation*. 2008
- [36] Thomas B.: “Benchmark testing of Micro-CHP units”. *Applied Thermal Engineering*, 28(16): pp. 2049-2054., 2008.
- [37] Annual Energy report 2012. /Godišnji energetske pregled u Hrvatskoj 2012.
- [38] T. Lambert, P. Gilman, P. Lilienthal: “Micropower system modeling with Homer”, *Integr. Altern. Sources Energy*, John Wiley & Sons, pp.379–418., 2006.
- [39] Surface meteorology and solar energy. [www.eosweb.larc.nasa.gov/sse](http://www.eosweb.larc.nasa.gov/sse)
- [40] Graham V. A.; Hollands K.G.T., A method to generate synthetic hourly solar radiation globally, *Solar Energy*; 44(6), pp. 333–341., 1990.
- [41] [http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2014\\_08\\_97\\_1938.html](http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2014_08_97_1938.html), *posjećeno 3.3.15.*
- [42] Nafeh AE.: „Optimal economical sizing of a PV/wind hybrid energy system using genetic algorithm“, *International Journal of Green Energy*;8(1), pp. 25-43., 2011.
- [43] Bezmalinovic D., Barbir F., Tolj I.: „Techno-economic analysis of PEM fuel cells role in photovoltaic-based systems for the remote base stations“. *Journal of Hydrogen Energy*,38, pp.417-425, 2013
- [44] [www.windenergy.com](http://www.windenergy.com), *posjećeno 7.3.15.*
- [45] [www.vision-batt.com](http://www.vision-batt.com), *posjećeno 25.3.15.*
- [46] Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 4-2: Space heating generation systems, heat pump systems; prEN 15316-4-2:2006 (E)
- [47] Barbir F.: “PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources”, *Sol. Energy* 78, pp. 661–669. 2009.

- [48] Lacko R., Drobnić B., Sekavčnik M., Mori M.: "Hydrogen energy system with renewables for isolated households: The optimal system design, numerical analysis and experimental evaluation". *Energy and buildings* 80, pp.106-113., 2014.
- [49] Yang G., Chen M.: „The methodology for size optimization of the photovoltaic/ wind hybrid system“. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 32(17), pp. 1644-1650., 2010.
- [50] Pilatowsky I., Romero R.J, Isaza C.A., Gamboa S.A., Rivera W., Sebastian P.J., Moreira J.: „Simulation of an air conditioning absorption refrigeration system in a cogeneration process combining a proton exchange membrane fuel cell“, *International Journal of Hydrogen Energy* 32 , pp. 3174 – 3182., 2007.
- [51] Suslu O.S.:“ Combined cooling heating and power (CCHP) generation in a fuel cell-heat pump hybrid system“, *ECS Transactions*, 25 (1 PART 2), pp. 2019- 2027., 2009.
- [52] Kuroki H. , Shimizu S. , Nakao M., Aoki H., Takaguchi H., Watanabe T.:“ Study on energy conservation effects of housing electricity and heat source equipments: Installation effect of distributed power and heat source system for housing“ (Part 2), *Journal of Environmental Engineering*, 75 (647), pp. 43-50. , 2010.
- [53] Staffell I. , Baker P., Barton J.P. , Bergman N., Blanchard R., Brandon N.P. , Brett D.J.L. , Hawkes A. , Infield D. , Jardine C.N. , Kelly N. , Leach M. , Matian M., Peacock A.D. , Sudtharalingam S. , Woodman B. :“ UK microgeneration. Part II: Technology overviews“, *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Energy*, 163 (4), pp. 143-165., 2010.
- [54] Arsalis A.,Nielsen M. P.,Kar S. K.: „Modeling and off-design performance of a 1 kWe HT-PEMFC (high temperature-proton exchange membrane fuel cell)-based residential micro-CHP (combined-heat-and-power) system for Danish single-family households“ *Energy* 36, pp. 993-1002, 2011.
- [55] Bendaikha W. , Larbi S. , Bouziane M.:“ Feasibility study of hybrid fuel cell and geothermal heat pump used for air conditioning in Algeria“, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36 (6), pp. 4253-4261., 2011.
- [56] Hawkes A.D. , Brett D.J.L. , Brandon N.P.:“ Role of fuel cell based microcogeneration in low carbon heating“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 225 (2), pp. 198-207., 2011.
- [57] Pilatowsky I., Huicochea A., Romero R.J., Gutierrez-Urueta G., C.A., Rivera W., Siqueiros J.:“ A novel cogeneration system: A proton exchange membrane fuel cell coupled to a heat transformer“, *Applied Thermal Engineering* xxx pp.1-6., 2011.
- [58] Angrisani, G., Roselli, C., Sasso, M. :“Distributed microtrigeneration systems“, *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(4),pp.502-521., 2012.
- [59] Arsalis A.,Nielsen M. P.,Kar S. K.: „Modeling and parametric study of a 1 kWe HTPEMFC- based residential micro-CHP system“, *International journal of hydrogen energy* 36, pp. 5010-5020, 2011.

- [60] Fazlollahi S., Mandel P., Becker G., Marechal F.: „Methods for multi objective investment and operating optimization of complex energy systems“, *Energy*, 45 (1), pp. 12-22., 2012.
- [61] Hirohisa A., Yukinobu T., Itaru T., Akeshi K., Hideki H., Yoshiro I., Shigeo Y., Ichiro S.:“ Fuel cells and energy networks of electricity, heat, and hydrogen: A demonstration in hydrogen-fueled apartments“, *International journal of hydrogen energy* 37, pp.1204-1213., 2012.
- [62] Zhang, X., Chen, J.:“ Performance evaluation and parametric optimization of a proton exchange membrane fuel cell/heat-driven heat pump hybrid system“, *Fuel Cells*, 12 (3), pp. 313-319., 2012.
- [63] Hawkes A., Staffell I., Brett D., Brandon N.:” Fuel Cells for Micro-Combined Heat and Power Generation”, *Energy & Environmental Science*, 2: p. 729-744., 2009.
- [64] U.S. Department of Energy, „Energy efficiency and Renewable Energy, Hydrogen, Fuels&Infrastructure Technologies Program, [www.energy.gov](http://www.energy.gov)
- [65] „Fuel cell and hydrogen technologies in Europe; Financial and technology outlook on the European sector ambition 2014.- 2020.“
- [66] <http://www.new-ig.eu>, *posjećeno 5.2.14.*
- [67] „Fuel cell and hydrogen technologies in Europe Financial and technology outlook on the European sector ambition 2014.- 2020.“ [www.new-ig.eu/hydrogen-fuel-cells](http://www.new-ig.eu/hydrogen-fuel-cells)