



Energija sunca

Korištenje energije sunca za proizvodnju el. energije Energijeske tehnologije FER 2007.



Fakultet elektrotehnike i računarstva - Zavod za visoki napon i energetiku

Energijeske tehnologije

Gdje smo:

- Organizacija i sadržaj predmeta
 - Uvodna razmatranja
 - O energiji
 - Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama
 - Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama
 - Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim el.
 - Geotermalna energija
 - Potrošnja električne energije
 - Prijenos i distribucija električne energije

10. Energija Sunca

 - Energija vjetra
 - Biomasa
 - Gorivne čelije i ostale neposredne pretvorbe
 - Skladištenje energije
 - Utjecaj na okoliš, održivi razvoj i energija

15. Utjecaj na okoliš, održivi razvoj i energija
2007. Energijske tehnologije: Energija sunca

2

Sadržaj

- Uvod
 - Sunčeve zračenje na horizontalnu i položenu plohu
 - Korištenje energije zračenja Sunca za grijanje
 - Korištenje energije zračenja Sunca za proizvodnju električne energije
 - Ukratko

2007

Energijske tehnologije: Energija sunca

3

Uvod;

Povijest korištenja energije sunca



- život na zemlji
 - vjerovanja
 - prvi pokušaji korištenja krajem 19. st.
 - 1954. prva fotonaponska ćelija
 - najrazvijenije korištenje za grijanje
 - komercijalno razvijene termoelektrane koje koriste toplinu proizvedenu sunčevim zračenjem
 - cijena u opadaju



Taperet praying to the sun



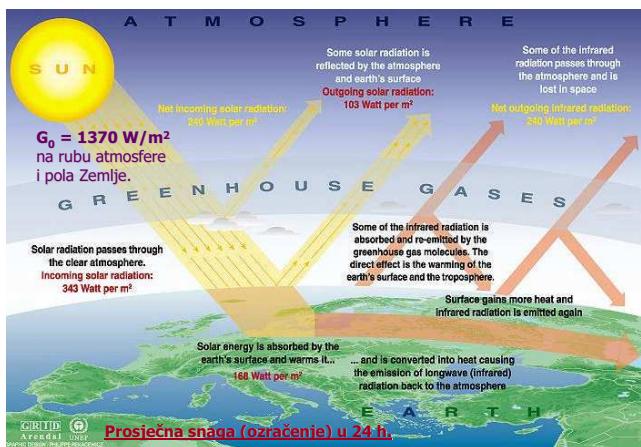
Le bagnanti,
Pablo Picasso, 1918



© 1999 by John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-36020-9

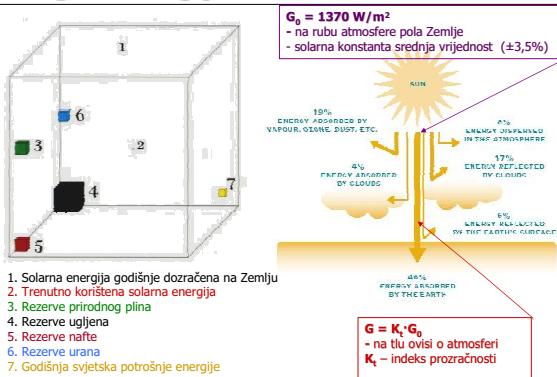


1



Sources: Okanagan university college in Canada, Department of geography, University of Oxford, school of geography; United States Environmental Protection Agency (EPA), Washington; Climate change 1995. The science of climate change, contribution of working group 1 to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change, UNEP and WMO, Cambridge University press, 1996.

Snaga i energija sa Sunca



2003

5. "Aldo's" 5."

1

Zadatak 1. Energija sa Sunca u jednom danu

Odrediti energiju koju sa Sunca prima Zemlja i Hrvatska u jednom danu (24 h) uz:

- snaga sunčeva zračenja na rubu atmosfere $G_0 = 1370 \text{ W/m}^2$
- poljumer Zemlje $R_Z = 6,378e6 \text{ m}$
- površina Hrvatske $A_H = 56594 \text{ km}^2$
- indeks prozračnosti $K = 0,5$
- pretpostaviti da Sunce sja 12 sati na dan

$$W_Z, W_H$$

$$W = P \cdot t \quad [\text{Ws}]$$

$$P = K \cdot G_0 \cdot A \quad [\text{W}]$$

Rješenje:

$$P_Z = 0,5 \cdot 1370 \cdot (6,378e6)^2 \cdot 3,14$$

$$= 685 \cdot 1,277e14 = 87,5e15 \text{ W}$$

- sunce sja 12 h na dan

$$W_Z = 8,75e16 \cdot 12 = 1,05e18 \text{ Wh}$$

$$= 1,05e18 \text{ kWh}$$

$$P_H = 685 \cdot 56594e6 = 38,8e12 \text{ W}$$

$$W_H = 3,88e13 \cdot 12 = 4,65e14 \text{ Wh}$$

$$= 0,465e12 \text{ kWh}$$

Za vježbu:

- odrediti potrebnu površinu, apsolutno i postotno, za pokrivanje godišnje potrošnje energije za HR i Svijet uz poznatu potrošnju - u HR 400e15 J
- u Svijetu 413e18 J

Rj.:

2007.

Energjske tehnologije: Energija sunca

7

Energija i snaga sunčeva zračenja na Zemlji

Ozračenje – gustoća snage $G \text{ [W/m}^2]$

(iradijacija, insolacija)

Ozračenost – gustoća energije $H \text{ [Ws/m}^2]$

Zemljopisna širina ϕ

Deklinacija Sunca δ - kut između ravnine ekvatora i spojnica središta Zemlje i Sunca

Satni kut Sunca ω - vrijeme izraženo pomoću kuta ($1h=15^\circ$, 0° za Sunce u najvišem položaju, negativno prije podne: npr. 10h Sunč. vremena odgovara sat. kutu $\omega=30^\circ$, satni kut izlaska/zalaska: $\omega=0^\circ/180^\circ$ u formuli

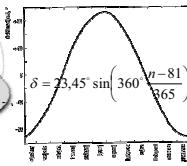
Visina Sunca α - kut između horizonta i Sunca

Azimut Sunca Ω - kut na ravnini horizonta Između pravca prema jugu i pravca projekcije sunčevih zraka na horizont (0° za Sunce u najvišem položaju, negativno prije podne)

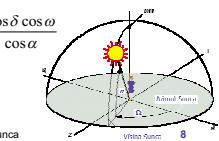
2007.

Kolektor: najbolji nagib kolektora za Sunce u najvišoj točki β_0 , $\omega=0^\circ$, okomito na sunčeve zrake: $\beta_0=90^\circ - \phi + \delta$

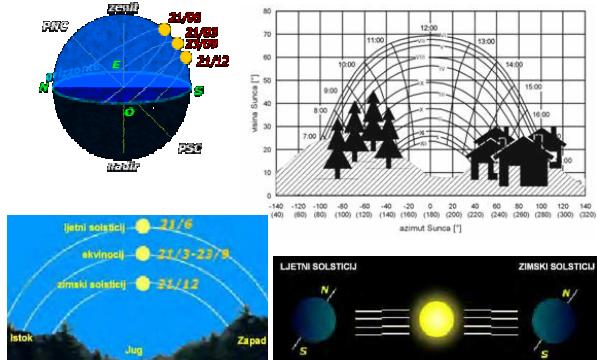
ϕ_{ek} satni kut za fiksni kolektor



$$\sin \alpha = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega$$



Prividno gibanje Sunca kroz godinu i dan



2007.

Energjske tehnologije: Energija sunca

9

Mjerenje ozračenosti (Sunčeva energija)

• Piranometri:

- termički ili
- poluvodički

• Zračenje na ravnoj plohi:

- globalno (ukupno),
- direktno i
- difuzno (raspršeno)



• Važan je iznos i trajanje dnevne ozračenosti (insolacije)

• Najčešće se mjeri samo globalna (ukupna) ozračenost

- tada je potrebno izračunavati udio direktne i difuzne komponente

• Rezultati mjerenja su dostupni kao ozračenost na ravnu plohu za prosječni dan u mjesecu: $[W/m^2 \text{ ili } J/m^2]$

• Za sve primjene nužno je razlučiti direktni i difuzni dio

2007.

Energjske tehnologije: Energija sunca

10

Od izmjerjenoga do potrebnoga

Mjesečne prosječne dnevne ozračenosti na horizontalnu plohu

	sije.	velj.	črnu.	trav.	svib.	lip.	srp.	kot.	ruj.	list.	stud.	pros.	GOD.
Split	6,5	9,8	14,3	12,0	23,3	23,3	25,4	22,4	17,4	12,7	7,4	5,7	1600
Zagreb	3,7	6,5	9,7	14,8	19,3	20,6	21,3	18,7	14,0	8,3	3,6	2,7	1200

• često su dostupne samo vrijednosti kate u tablici iznad

• za većinu primjene potrebno je odrediti ukupnu ozračenost na plohu pod nekim nagibom β koja se sastoji od tri dijela:

- direktni dio (d) se određuje preko produkta direktnog ozračenosti na ravnu površinu i faktora proporcionalnosti R_d

- difuzni dio (d) se određuje preko difuzne ozračenosti na ravnu plohu i prostornog kuta pod kojim se vidi nebo s ploha uz pretpostavku o dobroj atmosferi

- difuzna ozračenost na ravnu plohu se određuje primjenom korelacije (Kulić) s ukupnom ozračenostom H i indeksom prozračnosti K_t

- indeks prozračnosti određuje omjer ukupne ozračenosti i ozračenosti na ulazu u atmosferu H_d

- reflektirani dio se računa preko produkta faktora refleksije p , ukupne ozračenosti na ravnu plohu i proporcionalnosti s djelom okoline koja obja svjetlost na plohu

- za ravnu plohu nema reflektirane komponente

- opisani postupak određuje dnevne projekse ozračenosti za plohu pod nagibom β je potrebno koristiti dnevne prosjeke za H_d i R_d

$$\overline{H}_\beta = \overline{H}_{b\beta} + \overline{H}_{d\beta} + \overline{H}_{r\beta}$$

b - beam (direktni) dio

$$\overline{H}_{dp} = \overline{H}_d \frac{1+\cos \beta}{2}$$

$$\overline{H}_{r\beta} = \rho \overline{H} \frac{1-\cos \beta}{2}$$

$$\overline{H}_d = \overline{H} \cdot (1,60 - 4,17 \overline{K}_t + 5,29 \overline{K}_t^2 - 2,86 \overline{K}_t^3)$$

$$\overline{K}_t = \frac{\overline{H}}{\overline{H}_0}$$

$$\overline{H}_0 = \frac{24}{\pi} \left(1 + 0,033 \cdot \cos \frac{360 \cdot \pi}{365} \right) (\sin \phi \sin \delta \sin \omega + \phi \sin \phi \sin \delta)$$

$$\overline{R}_{dp} = \frac{\overline{H}_{dp}}{\overline{H}_0} = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \sin \omega + \phi \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega + \phi \sin \phi \sin \delta}$$

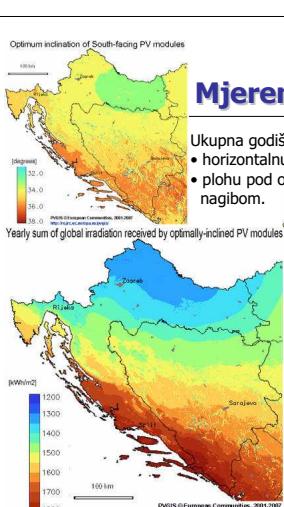
$$\omega_s = \arccos(-\tan \phi \cot \delta)$$

$$\omega_a = \min[\omega_s, \arccos(-\lg(\phi - \beta) \lg \delta)]$$

2007.

Energjske tehnologije: Energija sunca

12



Mjerenja i proračun

Ukupna godišnja ozračenost na:

- horizontalnu plohu i na
- plohu pod optimalnim fiksnim nagibom.

Od izmjerjenoga do potrebnoga

Mjesečne prosječne dnevne ozračenosti na horizontalnu plohu

	sije.	velj.	črnu.	trav.	svib.	lip.	srp.	kot.	ruj.	list.	stud.	pros.	GOD.
Split	6,5	9,8	14,3	12,0	23,3	23,3	25,4	22,4	17,4	12,7	7,4	5,7	1600
Zagreb	3,7	6,5	9,7	14,8	19,3	20,6	21,3	18,7	14,0	8,3	3,6	2,7	1200

• često su dostupne samo vrijednosti kate u tablici iznad

• za većinu primjene potrebno je odrediti ukupnu ozračenost na plohu pod nekim nagibom β koja se sastoji od tri dijela:

- direktni dio (d) se određuje preko produkta direktnog ozračenosti na ravnu površinu i faktora proporcionalnosti R_d

- difuzni dio (d) se određuje preko difuzne ozračenosti na ravnu plohu i prostornog kuta pod kojim se vidi nebo s ploha uz pretpostavku o dobroj atmosferi

- primjenom korelacije (Kulić) s ukupnom ozračenostom H i indeksom prozračnosti K_t

- indeks prozračnosti određuje omjer ukupne ozračenosti i ozračenosti na ulazu u atmosferu H_d

- reflektirani dio se računa preko produkta faktora refleksije p , ukupne ozračenosti na ravnu plohu i proporcionalnosti s djelom okoline koja obja svjetlost na plohu

- za ravnu plohu nema reflektirane komponente

- opisani postupak određuje dnevne projekse ozračenosti za plohu pod nagibom β je potrebno koristiti dnevne prosjeke za H_d i R_d

2007.

Energjske tehnologije: Energija sunca

12

Zadatak 2. Ozračenost plohe pod nagibom

Odrediti ozračenost plohe u Splitu pod nagibom za svibanj uz:

- površina ploha $A = 1 \text{ m}^2$
- nagib jednak zemljopisnoj širini $\beta = \varphi = 43,5^\circ$
- faktor refleksije $\rho = 0,2$
- mjeseca dnevna prosječna ozračenost na horizontalnu plohu $H = 23,3 \text{ MJ/m}^2$
- prosječni faktor (za svibanj, $\beta \neq \varphi = 43,5^\circ$) $R_{\beta\varphi} = 0,89$
- mjeseca dnevna prosječna ozračenost na ulazu u atmosferu $H_0 = 38,5 \text{ MJ/m}^2$

H_β

$$\overline{H}_\beta = \overline{H}_{b\beta} + \overline{H}_{d\beta} + \overline{H}_{r\beta}$$

$$\overline{H}_{b\beta} = \overline{H}_b \overline{R}_{b\beta}$$

$$\overline{H}_{d\beta} = \overline{H}_d \frac{1+\cos\beta}{2}$$

$$\overline{H}_{r\beta} = \rho \overline{H}_r \frac{1-\cos\beta}{2}$$

2007.

Energjske tehnologije: Energija sunca

13

Rješenje:

$$H_{b\beta} = 0,2 \cdot 23,3 \cdot (1-\cos(43,5)) / 2 = 0,637 \text{ MJ/m}^2$$

Za difuzni dio pod kutom treba izračunati prozračeni dio na ravnu plohu izrazom

$$\overline{H}_d = \overline{H} \cdot (1,60 - 4,17 \overline{K}_r + 5,29 \overline{K}_r^2 - 2,86 \overline{K}_r^3)$$

- prosječni dnevni indeks prozračnosti za svibanj:

$$K_{1,5} = H/H_0 = 23,3/38,5 = 0,6$$

$$\overline{H}_d = 23,3 \cdot (1,60 - 4,17 \cdot 0,6 + 5,29 \cdot 0,6^2 - 2,86 \cdot 0,6^3)$$

$$H_d = 8,96 \text{ MJ/m}^2$$

$$H_{d\beta} = 8,96 \cdot (1+\cos(43,5)) / 2 = 7,73 \text{ MJ/m}^2$$

$$H_{b\beta} = (H-H_d) R_{b\beta} = (23,3-8,96) \cdot 0,89$$

$$= 12,8 \text{ MJ/m}^2$$

$$H_\beta = H_{b\beta} + H_{d\beta} + H_{r\beta} = 12,8 + 7,73 + 0,637$$

$$= 21,2 \text{ MJ/m}^2$$

Za vježbu:

- odrediti ozračenost iste plohe za kolovoz uz $H=22,4 \text{ MJ/m}^2$, $H_0 = 35,3 \text{ MJ/m}^2$ i $R_{b\beta} = 1,0$

$$\text{Rj.: } H_\beta = 21,9 \text{ MJ/m}^2 \text{ (mjeru rezultat } H_\beta = 7,8 \text{ MJ/m}^2)$$

Korištenje sunčeve energije



Grijanje

- pasivno



Conventional



PSH



• aktivno



• u elektranama



parabolici protoci



linearni Fresnel leće

Spain, 80-te, 50 kW

14

Električna energija

- direktno



ON LONG ISLAND

FALO - Melville 500 kW (5574 m²)



helijost toranj



Spain, 80-te, 50 kW

14

Pasivno solarno grijanje



Potencijali:

- Zadovoljenje desetine postotaka potreba za grijanjem
- Od jednostavnih rješenja do sofisticiranih izvedbi
- Svjetlo po danu, upravljeni pokrovi, vakumirano staklo
- EU 2010: pasivno solarno grijanje štedi 10% potreba za grijanjem prostora

Zahtjevi:

- Velika južna površina za prihvatanje sunčeva zračenja.
- Konstrukcija s velikom termalnom masom (npr. gusti beton ili cigle). Ovo sprema toplinsku energiju za dana i zadržava preko noći.
- Dobra izolacija na vanjskim strukturama za održavanje topline
- Izbjegavanje zasjenjivanja objekata.

2007.

Energjske tehnologije: Energija sunca

15

Aktivno solarno grijanje

Solarni toplinski kolektori preuzimaju energiju svjetlosnog zračenja i griju vodu. Solarni toplinski kolektori se mogu kategorizirati prema temperaturi na koju griju vodu.

Nisko-temperaturni kolektori:

- Bez pokrova za grijanje npr. bazena.
- Perforirane ploče za predgrijavanje zraka.



Srednje-temperaturni kolektori:

- Izolirani kolektori s pokrovom.



Visoko-temperaturni kolektori:

- Vakumirane cijevi.
- Koncentrirajući

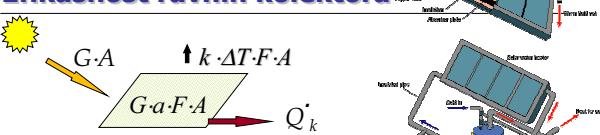


2007.

Energjske tehnologije: Energija sunca

16

Efikasnost ravnih kolektora



Efikasnost = Korisna toplina / Solarno zračenje

$$\eta = \frac{Q_k}{G \cdot A} = \frac{Q_k}{H \cdot A}$$

Korisna toplina = Primljeno - Gubitci

$$Q_k = F \cdot A / [a \cdot G - k \cdot \Delta T \cdot \Delta t]$$

$$Q_k = F \cdot A / [a \cdot H - k \cdot \Delta T \cdot \Delta t]$$

Efikasnost $\eta = F \cdot A / [a \cdot k \cdot \Delta T / G]$

$$\eta = F \cdot A / [a \cdot k \cdot \Delta T / G]$$



Propusnost stakla prema valnoj duljini svjetlosti

Energjske tehnologije: Energija sunca

17

Zadatak 3. Dobivena toplina iz kolektora i efikasnost

Srednje sunčeve ozračenje kolektora u Zagrebu za jedan dan u prosincu u podne (12-13 h) iznosi 255 W/m^2 .

Koefficijent toplinskog gubitaka kolektora je $k = 5 \text{ W/m}^2 \text{K}$, efektivni produkt $a = \tau \alpha = 0,87$, koefficijent prijenosa topline $F = 0,85$, ukupna dnevna ozračenost kolektora $28,4 \text{ MJ}$ i ukupna dobivena toplina $4,54 \text{ MJ}$. Temperatura vode na ulazu u kolektor je konstantna 30°C , a temperatura zraka u podne 25°C .

Odrediti podnevnu i dnevnu efikasnost kolektora površine 6 m^2 .

Toplina koja se apsorbira u fluidu koji protječe kroz kolektor može se izračunati iz izraza

$$Q_p = F \cdot A \cdot [a \cdot \overline{G} - k \cdot \Delta T] \cdot \Delta t$$

$$Q_p = 0,85 \cdot 6 \cdot [0,87 \cdot 255 - 5 \cdot (303 - 275,5)] \cdot 3600$$

$$Q_p = 1,55 \text{ MJ}$$

Podnevna efikasnost kolektora jednaka je

$$\eta_{12} = \frac{Q_p}{A \cdot G \cdot \Delta t} = \frac{1,55 \cdot 10^6}{6 \cdot 255 \cdot 3600} = 0,28$$

Dnevna efikasnost kolektora

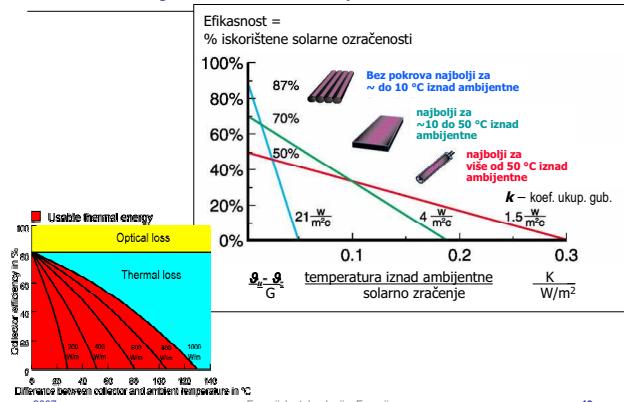
$$\eta_{dnevno} = \frac{\Sigma Q_p}{A \cdot \Sigma (G \cdot \Delta t)} = \frac{4,54}{28,4} = 0,16$$

2007.

Energjske tehnologije: Energija sunca

18

Efikasnost kolektora određuje konstrukcija i razlika temperature



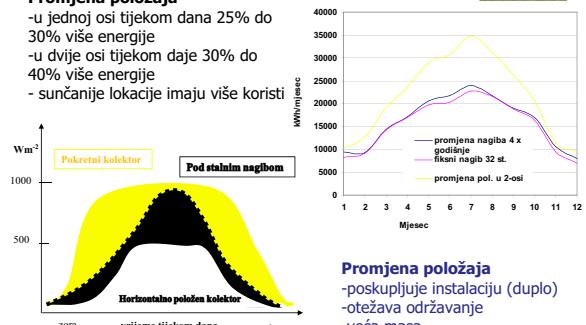
19

Energijeske tehnologije: Energija sunca

Sunčeve ozračenje na kolektor u horizontalnom položaju, pod nagibom i u pokretu

Promjena položaja

- u jednoj osi tijekom dana 25% do 30% više energije
- u dvije osi tijekom daje 30% do 40% više energije
- sunčanije lokacije imaju više koristi



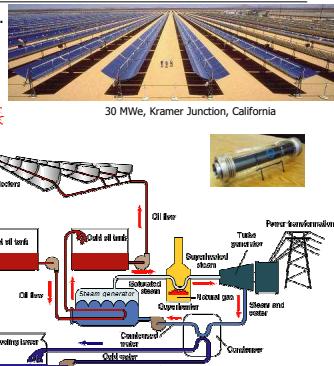
2007.

Energijeske tehnologije: Energija sunca

20

Solarna elektrana – parabolična protočna

- kao i sve druge koncentrirane teh. koristi samo direktno zračenje
- najrazvijenija tehnologija
- instalirano više stotina MW-e
- koncentracija sunca 75x
- temperature do 500 °C
- godišnja efikasnost (sunce u el. en.) do 14%
- obično prati sunce istok-zapad
- Rankine ciklus direktno ili posredno
- cijena blizu konkurentne drugim izvorima
- optimalna snaga 200 MWe
- unapređenja na cijevima i spremanju topline (otopljena sol)



2007.

Energijeske tehnologije: Energija sunca

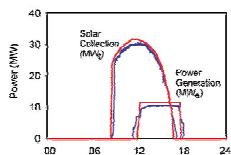
21

Solarna elektrana – solarni toranj

- manje razvijenija tehnologija u odnosu na parabolične protočne
- instalirano probno više desetaka MWe
- koncentracija sunca 800x
- temperature do 560 °C
- procjena godišnje efikasnosti do 18%
- radni mediji: voda, org. kapljivine soli natrij nitrata ili zrak
- Rankine ciklus posredno ili direktno
- optimalna snaga 100-e MWe
- unapređenja na cijevima i spremanju topline (otopljena sol)



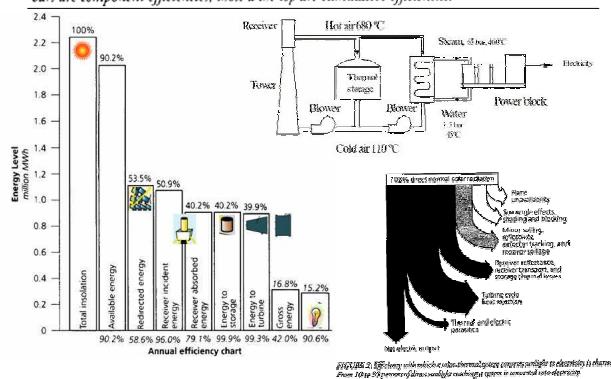
Solar II 10 MWe, California, skoro 2000 ogledala, 100m toranj, 40 MWe



Energijeske tehnologije: Energija sunca

22

FIGURE 23: Annual efficiency of a 100 MW_e central receiver. The efficiencies at the bottoms of the bars are component efficiencies; those at the top are cumulative efficiencies.



2007.

Energijeske tehnologije: Energija sunca

23

Solarna elektrana – parabolični tanjur

- najmanje razvijen sustav
- instalirano probno više MWe
- koncentracija sunca više od 3000x
- temperature preko 750 °C i godišnja efikasnost od 22%
- svaka jedinica ima 10 do 25 kW-e i može raditi samostalno - modularnost
- Stirlingov toplinski stroj
 - η_1 preko 40 %
 - visoka gustoća snage ~55kW/L
 - problem pouzdanoći i cijena koncentratora
- Braytonov topli stroj i mikroturbine se također testiraju
- planovi za stotine MWe



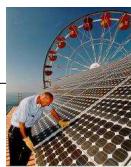
2007.

Energijeske tehnologije: Energija sunca

24

Fotonaponska sunčeva

- fotoefekt otkrio Becquerel 1839.
- Einstein objasnio fotoefekt 1905.
- direktna konverzija solarnog zračenja u el. energiju
- prva moderna FN celija napravljena 1954. u Bell Labs
- kristal silicija (ili drugi poluvodič) apsorbira svjetlost – odgovarajuće zračenje oslobođa elektron
- slobodni elektron znači elektricitet

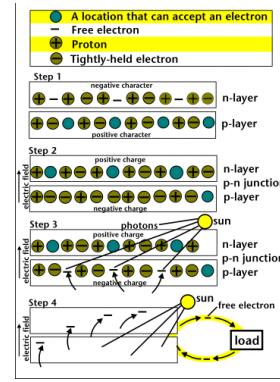


2007.

Energijeske tehnologije: Energija sunca

25

Kako radi FN celija



2007.

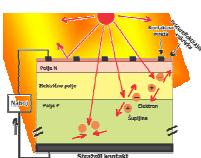
Energijeske tehnologije: Energija sunca

26

- Kristali silicija dopirani atomima različitog broja valentnih elektrona
Silicij 4,
– Fosfor 5 i Bor 3
 - Fosforom dopirani silicij postaje n-sloj, sa slobodnim elektronima
 - Borom dopirani silicij postane p-sloj, sa šupljinama
1. Elektroni idu od n-sloja prema p-sloju
 2. Inicijalno neutralni p-n spoj ima električno polje – napon između p-sloja i n-sloja
 3. Fotoni oslobadaju elektrone u p-n spoju koje električnom polju usmjerava u n-sloj
 4. Nagomilani elektroni struje kroz priključeni teret – električna energija

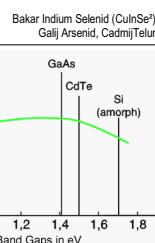
Učinkovitost FN celije

- 77% sunčeva spektra iskoristivo:
- Oko 43% apsorbiranog zračenja samo grijе kristal.
- Teorijski maksimum:
– na 0°C efikasnost = 24%
- Efikasnost opada brzo s porastom temperature
– na 100°C efikasnost = 14%



2007.

Energijeske tehnologije: Energija sunca



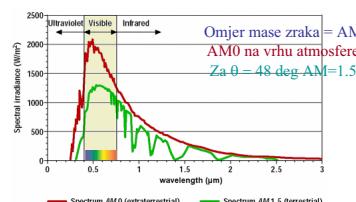
Theorijski maksimum efikasnosti za neke vrste FN celija pri standardnim uvjetima ovisno o vrsti celije i energiji zabranjenog pojaša E_g .

Za izbjeganje elektrona foton mora imati veću energiju od E_g . Energija fotonu veća od E_g se ne iskoristi. Celije s manjim E_g imaju i manji napon.

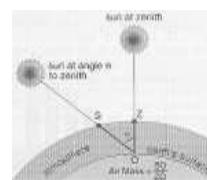
Energijeske tehnologije: Energija sunca

27

Sunčev zračenje i FN celija



Samo je dio zračenja u UV području, a ostalo približno podijeljeno u vidljivom (0,38-0,78 μm) i IC.

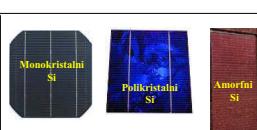


Energijeske tehnologije: Energija sunca

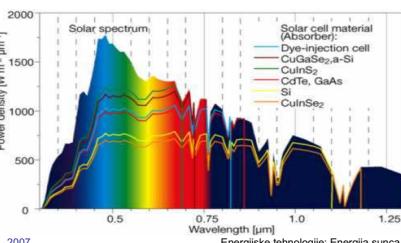
28

Temeljni parametri FN celija

Vrsta celije	U_{oc} / V	J_{sc} / (mA cm ⁻²)	η
Monokristalna-Si	0,65	30	0,15
Polikristalna-Si	0,60	26	0,15
Amorfna-Si	0,85	15	0,09
Cd S / Cu ₂ S	0,5	20	0,10
Cd S / Cd Te	0,7	15	0,12
Ga Al As / Ga As	1	30	0,24
Ga As	1	20	0,27



Stupanj djelovanja je definiran kao omjer upadnog ozračenja i električne snage.



2007.

Energijeske tehnologije: Energija sunca

29

Veći stupanj djelovanja od teorijskog se postiže kombinacijom poluvodičkih materijala, kvantnim točkama i fokusiranjem sunčeva zračenja.

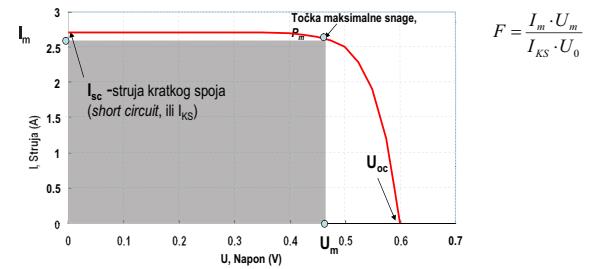
I-U karakteristika i maksimalna snaga

Unutrašnji otpori FN celije određuju I-U karakteristiku s točkom maksimalne snage.

Za maksimalnu snagu P_m karakteristične su struja I_m i napon U_m

U_{oc} – napon otvorenog kruga (*open circuit*, ili U_{OK} ili samo U_O)

Omjer maksimalne snage i produkta I_{KS} sa naponom U_e se naziva faktor punjenja F .

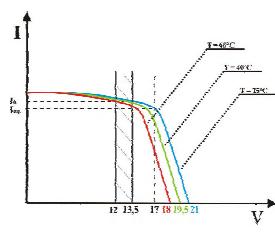
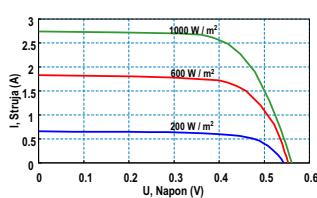


2007.

Energijeske tehnologije: Energija sunca

30

Snaga, solarno zračenje i temperatura



I-Struja (A)

I-Struja (A)

2007.

Energijeske tehnologije: Energija sunca

31

Zadatak 4. Efikasnost fotonaponske čelije i faktor punjenja

Fotonaponska čelija, površine 270 cm²,

ima neopterećena napon od 0,6 V i

struju kratkog spoja 8 A pri ozračenju od 1000 W/m².

Maksimum snage iz čelije dobije se pri teretu od 0,05 Ω i naponu 0,47 V.

Koliko iznosi efikasnost čelije i faktor punjenja?

Efikasnost čelije određuje se iz omjera snage električne energije i snage sunčeva ozračenja:

$$\eta = \frac{I_m \cdot U_m}{G \cdot A}$$

$$I_m = \frac{U_m}{R}$$

$$\eta = \frac{U_m^2}{R \cdot G \cdot A} = \frac{0,47^2}{0,05 \cdot 1000 \cdot 270 \cdot 10^{-4}} = 0,16$$

Faktor punjenja prikazuje koliko je stvarna čelija blizu idealnoj i to je omjer produkta struja i napona pri maksimalnoj snazi prema produktu struje kratkog spoja i napona bez opterećenja:

$$F = \frac{I_m \cdot U_m}{I_{sc} \cdot U_0}$$

$$I_m = \frac{U_m}{R}$$

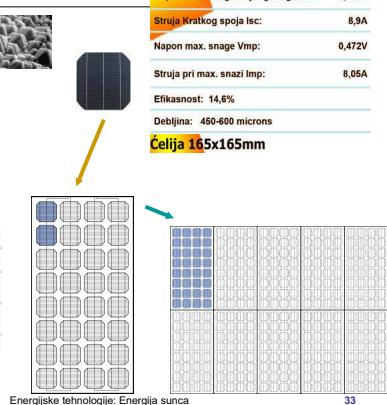
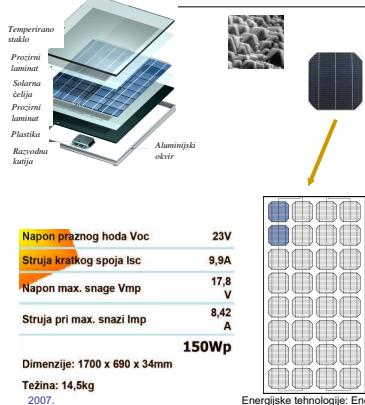
$$F = \frac{U_m^2}{R \cdot I_{sc} \cdot U_0} = \frac{0,47^2}{0,05 \cdot 8,0 \cdot 0,6} = 0,84$$

2007.

Energijeske tehnologije: Energija sunca

32

Solarni modul i panel



2007.

Energijeske tehnologije: Energija sunca

Optimiranje globalnog i lokalnog optimuma ozračenosti FN panela položajem

Lokacija	Kalkulacija sunčevog zračenja na kosu i orijentiranu površinu		Zemljopisna širina	Sjever
	MJ/m ² /dan	kWh/m ² /dan		
PULA			45,65	
BRIEČANJ	0,2	4,30	3,39	3,93
VELJACA	0,2	7,20	5,15	5,87
DUŽAK	0,2	11,10	3,08	3,79
TRAVANJ	0,2	15,60	4,33	5,15
SVIBANJ	0,2	20,00	5,56	6,45
LIJEPAN	0,2	21,80	5,97	6,62
SRPANJ	0,2	23,30	6,47	7,02
KOLOVOZ	0,2	20,00	5,66	6,59
RUŽIĆI	0,2	14,80	4,11	4,70
LJUBLJAD	0,2	9,60	2,67	3,40
STUDENI	0,2	5,10	1,42	2,05
PROSINAC	0,2	3,90	1,08	1,35
Prosj. Dnevna intenziteta	13,63	3,62	3,81	4,10
Prosj. godišnja intenziteta	4757,17	1321,44	1291,3	1400,1

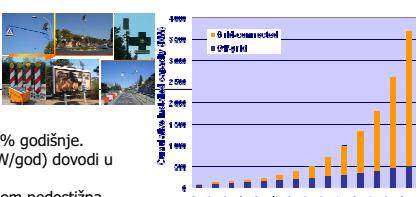
Sustemi stand-alone: teži se maksimizaciji proizvedene energije u najnepovoljnijem periodu.
Sustemi grid-connected: teži se maksimizaciji prosječne godišnje proizvedene energije

2007.

Energijeske tehnologije: Energija sunca

34

FN primjene



Off-Grid Industrial
Off-Grid Residential
Consumer
Ekono-mično
Ovisi o potpori
Instalirano 2002.

320 MW / 71%

70 MW / 15%

30 MW / 7%,
30 MW / 7%

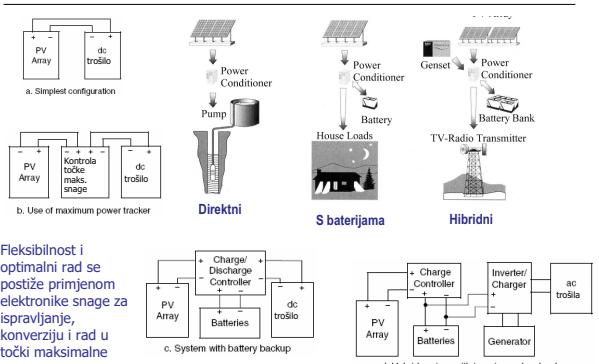
10 i 6,3 MWe Njemačka

2007.

Energijeske tehnologije: Energija sunca

35

Samostalni PV sistemi



2007.

Energijeske tehnologije: Energija sunca

Photovoltaics in cold climates 36

Elektrifikacija udaljenih i nerazvijenih krajeva



Pokazatelji: cijena na sat i cijena po litri vode

2007.

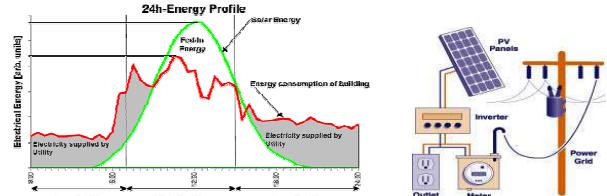
Energjske tehnologije: Energija sunca

37

FN na mreži

Pokazatelji: estetika, cijena po površini i cijena po energiji

Podudarnost FN proizvodnje i potreba u poslovnoj zgradi potencijal za ekonomičnost.



2007.



38

Mae Hong Son 500 kWp turn-key for EGAT
(Energy Generating Authority of Thailand)



A computer images of the 40 MW Walsleben site with items shown for scale.
2007.

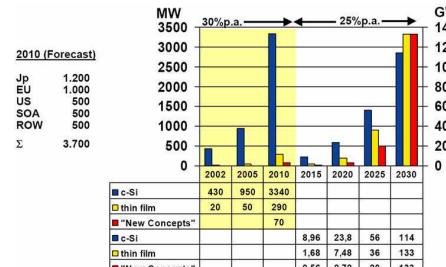
Energjske tehnologije: Energija sunca

39

Udio različitih FN technologija

Potrošnja silicija u konvencionalnom pristupu je prevelika. Nove tehnologije poput tankog filma rješavaju taj problem. Projekcije na slici za 2010. već su ostvarene u 2005.

c-Si – kristalni silicij
thin film – tanki film



Energjske tehnologije: Energija sunca



40

Ukratko

- Grijanje najveći i najisplativiji potencijal
 - pasivno
 - aktivno
- Posredna pretvorba u el. en. vrlo razvijena
 - komercijalno za parabolične protocne elektrane
 - veliki broj prototipnih postrojenja za solarne tornjeve
 - u razvoju za solare tanjure
 - uz spremanje topline ima veliki potencijal
- FN predstavlja čistu i pouzdanu tehnologiju
 - Proizvodnja uložene energije za 3 do 6 godina
 - Silicij dominira, tanki film dolazi
 - Značajnih FN resursa ima i u zemljama na sjeveru
- FN isplativ
 - samo u posebnim aplikacijama
 - poticaji nužni
- Masovna proizvodnja i inovacije će vjerojatno sputiti cijenu znacajno na duži rok:
 - 750 to 1500 kWh/kW
 - za 2010. 2-3 €/Wp
 - za 2020. 3 €/Wp i 9 €ct/kWh

2007.

Energjske tehnologije: Energija sunca

41



Energija vjetra

Korištenje energije vjetra za proizvodnju el. energije
Energjske tehnologije
FER 2007.



Gdje smo:

1. Organizacija i sadržaj predmeta
2. Uvodna razmatranja
3. O energiji
4. Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama
5. Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama
6. Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim el.
7. Geotermalna energija
8. Potrošnja električne energije
9. Prijenos i distribucija električne energije
10. Energija Sunca
- 11. Energija vjetra**
12. Biomasa
13. Gorivne ćelije i ostale neposredne pretvorbe
14. Skladištenje energije
15. Utjecaj na okoliš, održivi razvoj i energija

Energjske tehnologije: Energija vjetra

Sadržaj

- Uvod
- Snaga i energija vjetra
- Električna snaga vjetroagregata
- Proizvedena električna energija u vjetroelektrani
- Posebnosti proizvodnje električne energije u vjetroelektrani

2007.

Energjske tehnologije: Energija vjetra

3

Uvod:

Povijest korištenja energije vjetra

- jedrenje u Egiptu - prije 4500 g.
- pumpanje vode u Indiji i mljevenje žitarica u Kini - prije 2400 g.
- Perzija, Afganistan, Europa i drugi sve do industrijske revolucije za pumpanje vode i mljevenje žitarica
- krajem 19. st. prve el. VE u Danskoj i SAD
- 1941. u SAD vjetroelektrana za proizvodnju el. en. snage 1,25 MW
- 1980-te u SAD
- zadnjih 15 godina u Europi i šire

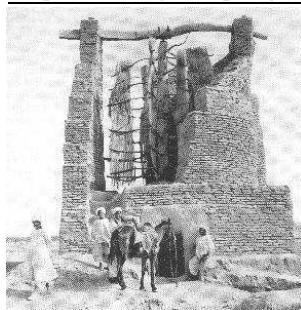


2007.

Energjske tehnologije: Energija vjetra

4

Mlin na vjetar – Afganistan (900. god.)



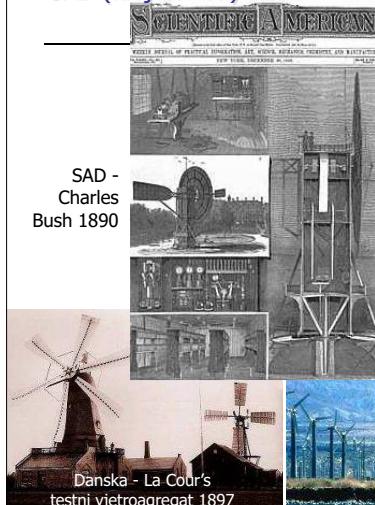
Vjetrenjače – Europa (srednji vijek)



Windmills kod Campo de Criptana, La Mancha (Španjolska)

Energjske tehnologije: Energija vjetra

Prvi vjetroagregati - Europa i SAD (kraj 19. st.)



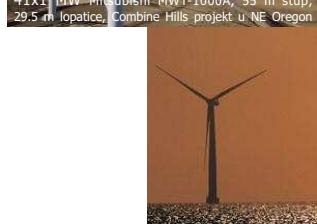
Novi početak – California 1985.



Danas – energija vjetra dio rješenja



10 x 2,3 MW Bonus (Siemens) VA
visina stupu 61 m, dubina vode 15 m



<http://www.samsohavvind.dk/windfarm/>

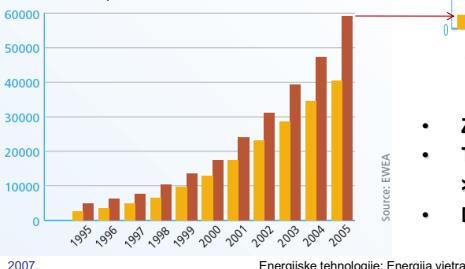
Stanje i perspektive

Podaci za 2005.

- ~60,000 MW -> ~100 TWh/yr
- 70% Europa; 17% SAD
- \$12 milijardi godišnjeg prometa:

 - 50% izvedba projekata; 45% prodaja el. en.; 5% održavanje i pogon
 - mali vjetroagregati:** \$20-50 milijuna/god.

European Union MW ■ World MW



1500 GW
1250 GW
1000 GW
750 GW
500 GW
250 GW
0 GW

Wind Force 12s, GWFC, EWIA, Greenpeace

- Za 10 godina porast 20x
- Trenutno > 6 GW/god., > 11 miljardi €/god.
- Daljnji porast > 30 %

8

2007.

Energija i snaga vjetra

- energija mase zraka je kinetička:

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

masu zraka određuje gustoća, površina kroz koju strui, brzina i vrijeme: $m=\rho Avt$

$$E_k = \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2} \cdot t$$

- snaga vjetra:

derivacija energije po vremenu, dE/dt : $P_{vjetra} = \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2}$

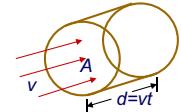
- gustoća zraka:

- ovisi o temperaturi, tlaku i vlažnosti
- za standardne uvjete na moru $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$ ($101,3 \text{ kPa}$ i 15°C)
- moguće je koristiti standardnu gustoću uz korekciju faktorom odstupanja (prosjeka) stvarnog tlaka i temperature:

$$c_H = \frac{P}{101,3} \quad c_T = \frac{288,1}{T}$$

- brzina zraka:

raste s visinom i vrlo promjenjiva



2007.

Energijeske tehnologije: Energija vjetra

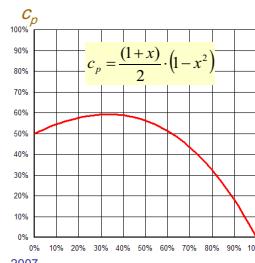
9

Teorijski iskoristiva snaga vjetra

Iskoristena snaga ovisi o brzini kojom vjetar dolazi (v) i brzini kojom odlazi (w):

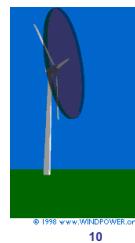
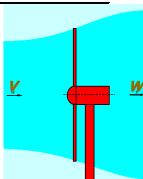
- posebno odvajamo masu jer ovisi o prosjeku brzina:
- neka omjer brzina w/v bude x

$$P = \frac{\rho \cdot A \cdot (v+w)}{2} \cdot \frac{(v^2-w^2)}{2} \cdot P = \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2} \cdot \frac{(1+x)}{2} \cdot (1-x^2)$$



2007.

Energijeske tehnologije: Energija vjetra



10

Analitički izvod teorijskog maksimuma za c_p

Maksimalna snaga se dobije za maksimalni $c_p(x)$:

$$c_p(x) = \frac{(1+x)}{2} \cdot (1-x^2)$$

Maksimum za $c_p(x)$ se može naći u nul-točki derivacije funkcije $c_p(x)$ ' izjednačene sa nulom:

$$[c_p(x)] = \left[\frac{(1+x)}{2} \cdot (1-x^2) \right]$$

$$0 = \frac{-2x+1-3x^2}{2}$$

$$x_1 = -1 \quad x_2 = \frac{1}{3}$$

Prema tome, maksimalna teorijska snaga se postiže kada je brzina vjetra iza vjetrenjače jednaka trećini brzine ispred i iznosi 59,3% snage vjetra

$$c_p \left(\frac{1}{3} \right) = \frac{\left(1 + \frac{1}{3} \right)}{2} \left(1 - \left(\frac{1}{3} \right)^2 \right) = \frac{16}{27} = 0,593$$

$$P_{vjetra.teorij.maks} = \frac{16}{27} P_{vjetra} = c_{p,Betz} \cdot P_v$$

Zadatak 1. Snaga vjetroagregata

Odrediti specifičnu i ukupnu električnu snagu vjetroagregata (VA) uz:

- gust. zraka $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$;
- brzinu vjetra $v = 12 \text{ m/s}$;
- promjer lopatica $D = 50 \text{ m}$;
- efikasnost $c_p = 0,4$
- el. meh. stup. djelovanja $\eta = 0,8$

P, p

$$P = \eta \cdot c_p \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad [\text{W}]$$

$$p = P/A = \eta \cdot c_p \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v^3 \quad [\text{W/m}^2]$$

Rješenje:

$$p = 0,8 \cdot 0,4 \cdot 0,5 \cdot 1,225 \cdot 12^3 \\ = 0,8 \cdot 0,4 \cdot 1058 = 339 \quad [\text{W/m}^2]$$

$$A = r^2 \cdot \pi = D^2 \cdot \pi / 4 \quad [\text{m}^2]$$

$$P = p \cdot A = 339 \cdot 50^2 \cdot 3,14/4 \\ = 339 \cdot 1963 = 665 \quad [\text{kW}]$$

Za vježbu:

- odrediti P i p uz $v = 9 \text{ m/s}$.
- odrediti maksimalnu snagu uz iste brzine ($\eta=1$ i $c_p=c_{p,Betz}$)

Rj.:

$$P_{9m/s} = 280 \text{ kW}; \quad P_{9m/s} = 143 \text{ W/m}^2$$

$$P_{9m/s,max} = 520 \text{ kW}; \quad P_{9m/s,max} = 265 \text{ W/m}^2$$

$$P_{12m/s,max} = 1232 \text{ kW}; \quad P_{12m/s,max} = 628 \text{ W/m}^2$$

2007.

Energijeske tehnologije: Energija vjetra

12

Snaga vjetroagregata za razne brzine

Utjecaj brzine vjetra na snagu održava c_p :

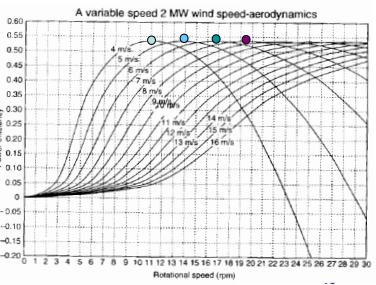
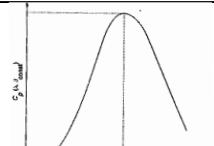
- $c_p = \eta_{vjetrenjače} \cdot c_{p,Betz}$ ovisi o aerodinamici lopatica: brzina i položaj

- često se uzima ukupna vrijednost koja u sebi sadrži i stupnjeve djelovanja mehaničke i električne pretvorbe: $c_{pe} = \eta_e \cdot c_p$

$$P = c_{pe} \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad [\text{W}]$$

- običajeno je prikazivati c_{pe} u ovisnosti o tzv. omjeru brzine vrha lopatice prema brzini vjetra (λ)

- promjena c_{pe} u ovisnosti o brzini okretanja rotora za različite brzine vjetra pokazuje pomicanje optima



2007.

Energijeske I

9

Zadatak 1.a Snaga vjetroagregata

Odrediti specifičnu i ukupnu električnu snagu vjetroagregata (VA) uz:

- gust. zraka $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$
- $p = 980 \text{ kPa}$, $\theta = 20^\circ \text{C}$
- brzinu vjetra $v = 12 \text{ m/s}$
- promjer rotora $D = 50 \text{ m}$
- el. efikasnost $c_{pe} = 0,34$

P_i

$$P = c_{pe} \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot c_k [\text{W}]$$

$$P = P/A = c_{pe} \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v^3 \cdot c_k [\text{W/m}^2]$$

$$c_k = C_H \cdot C_T = 98,0/101,3 \cdot 288,1/293,15 \\ = 0,967 \cdot 0,983 = 0,95$$

2007.

Energijeske tehnologije: Energija vjetra

14

Rješenje:

$$\begin{aligned} p &= 0,34 \cdot 0,5 \cdot 1,225 \cdot 12^3 \cdot 0,95 \\ &= 0,34 \cdot 1058 \cdot 0,95 = 342 \text{ [W/m}^2\text{]} \\ A &= r^2 \cdot \pi = D^2 \cdot \pi / 4 \text{ [m}^2\text{]} \\ P &= p \cdot A = 342 \cdot 50^2 \cdot 3,14/4 \\ &= 342 \cdot 1963 = 671 \text{ [kW]} \end{aligned}$$

Za vježbu:

- odrediti P_i p uz $v = 9 \text{ m/s}$.
- odrediti maksimalnu snagu uz iste brzine ($c_{pe}=c_{pb}$)

Rj.:

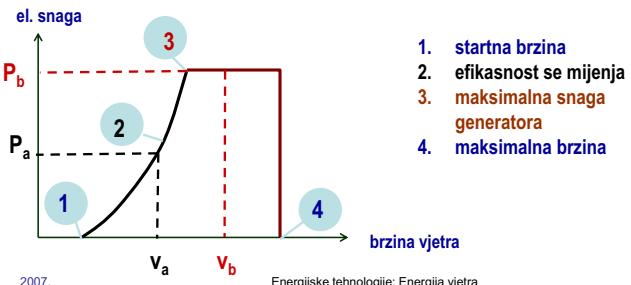
$$\begin{aligned} P_{9\text{m/s}} &= 378 \text{ kW}; \quad p_{9\text{m/s}} = 144 \text{ W/m}^2 \\ P_{9\text{m/s,max}} &= 490 \text{ kW}; \quad p_{9\text{m/s,max}} = 251 \text{ W/m}^2 \\ P_{12\text{m/s,max}} &= 1164 \text{ kW}; \quad p_{12\text{m/s,max}} = 593 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

Električna snaga vjetroagregata

Snaga vjetra proporcionalna je :

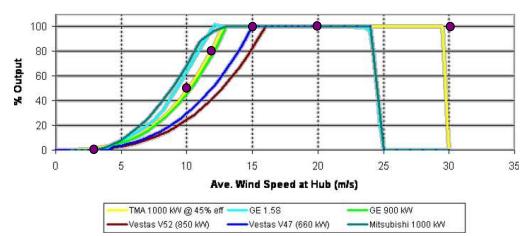
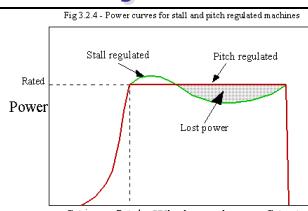
- gustoći zraka
- trećoj potenciji brzine vjetra

Dobivena snaga iz vjetra određena je brzinom vjetra i karakteristikom vjetroagregata:



Ovisnost snage VA o brzini vjetra

- Svaki VA ima karakteristiku snage u ovisnosti o brzini vjetra
- Karakteristika snage ovisi o tehničkoj izvedbi
 - pasivna samoregulacija (stall)
 - aktivna regulacija (pitch)



2007.

Energijeske tehnologije: Energija vjetra

16

Zadatak 2. Snaga vjetroagregata

Odrediti električnu snagu vjetroagregata (VA) za šest točaka iz krivulje snage:

nazivna snaga $P_n = 2 \text{ MW}$

brzina vjetra:

3, 10, 12, 15, 20 i 30 m/s
postotak nazivne snage:

0, 50, 80, 100, 100 i 0 %

Rješenje:

$$P_3 = 0 \cdot 2 = 0$$

$$P_{10} = 0,5 \cdot 2 = 1,0 \text{ MW}$$

$$P_{12} = 0,8 \cdot 2 = 1,6 \text{ MW}$$

$$P_{15} = 1 \cdot 2 = 2,0 \text{ MW}$$

$$P_{20} = 1 \cdot 2 = 2,0 \text{ MW}$$

$$P_{30} = 0 \cdot 2 = 0$$

Za vježbu:

- odrediti snagu vjetra i c_{pe} za sve brzine vjetra
Računati za promjer lopatica 64 m i standardnu gustoću zraka

P_i

$$P_i = c_{i,pns} \cdot P_n$$

Rj.:

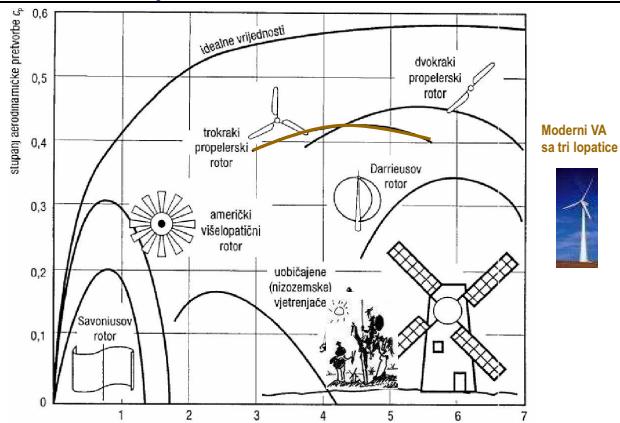
$$P_{10,vjetra} = 2,223 \text{ MW}; \quad c_{10,pe} = 0,45$$

2007.

Energijeske tehnologije: Energija vjetra

17

Koeficijent c_p ovisi o izvedbi vjetroagregata



5/22/2007 2007.

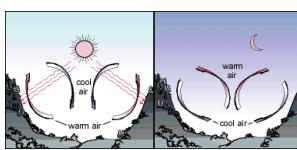
Energijeske tehnologije: Energija vjetra

18

Energija vjetra – brzina

Vjetar je masa zraka u pokretu:

- uzrokuje ga razlika tlakova (rezultat razlike temperaturu)
- posljedica sunčeve energije (1 do 2 %)
- značajan utjecaj rotacije Zemlje i konfiguracije tla

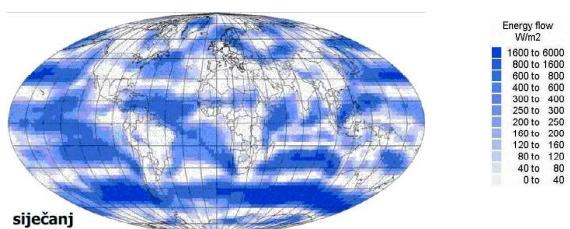


2007.

Energijeske tehnologije: Energija vjetra

19

Snaga vjetra: globalno na 70 m



B. Sørensen: Renewable Energy, Figure 3.27. Maps of wind power regimes for January, April, July and October 1997, based on NCEP/NCAR (1998). The power levels are estimated for a height of 70 m above ground, presently a typical hub height for wind turbines. The method of estimation is explained in section 6.2.5 (these and following area-based geographical information system (GIS) maps are from Sørensen and Meibom (1998), copyright B. Sørensen).

2007.

Energijske tehnologije: Energija vjetra

20

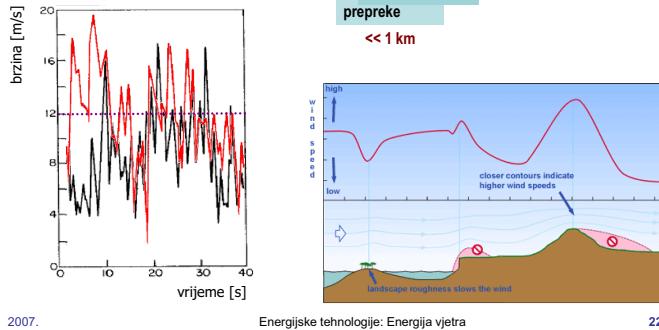
Spektar varijabilnosti vjetra u vremenu



Varijabilnost vjetra u prostoru

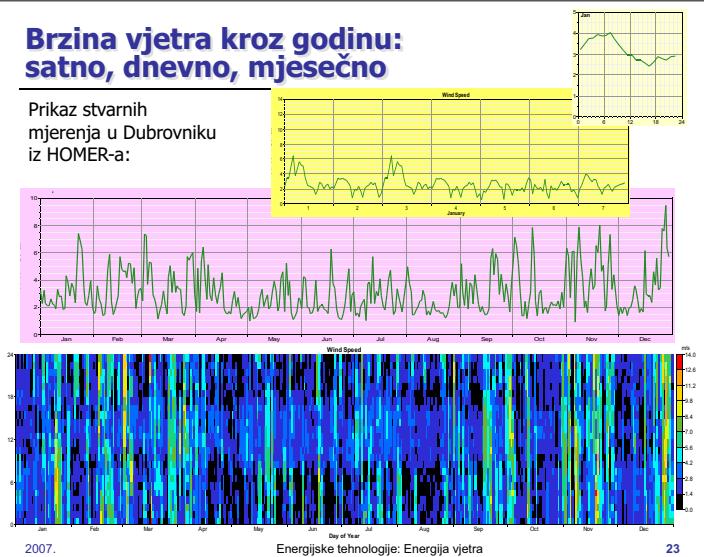
Kratkotrajne varijacije brzine vjetra na dvije lokacije mogu biti korisne za smanjivanje ukupne varijabilnosti proizvedene energije.

Primjer za dvije lokacije udaljene 90 m:

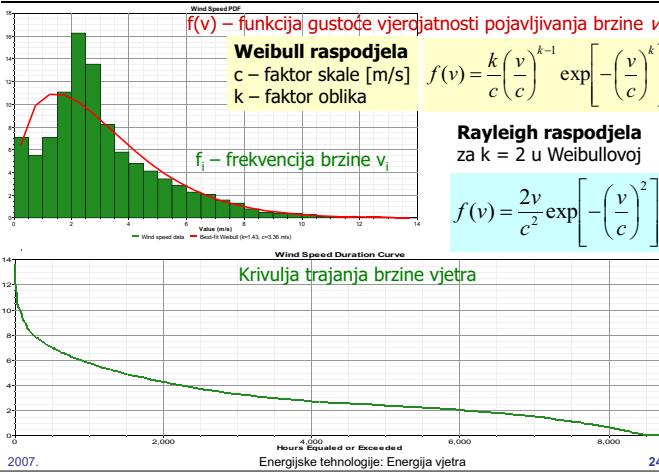


Brzina vjetra kroz godinu: satno, dnevno, mjesečno

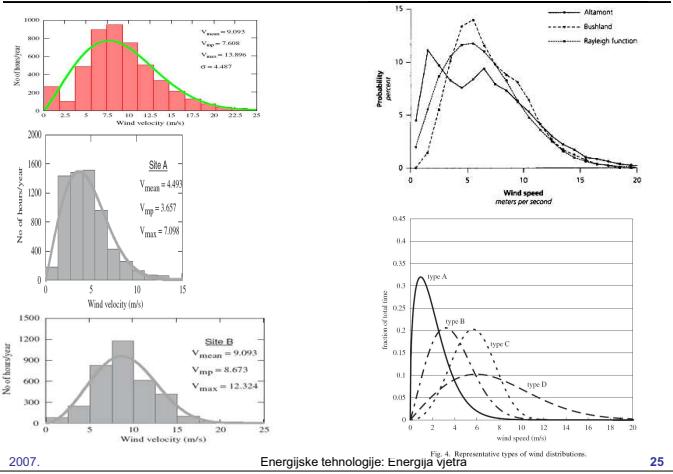
Prikaz stvarnih mjerjenja u Dubrovniku iz HOMER-a:



Brzina vjetra prikazana statistički

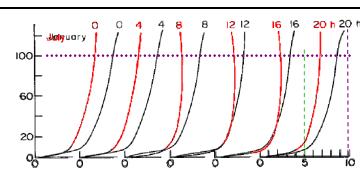


Raspodjele brzine vjetra i aproksimacija



Brzina vjetra u ovisnosti o visini

- Brzina se vjetra povećava s visinom
 - to ovisi o konfiguraciji tla, temperaturi i tlaku
 - važno za procjenu brzine na raznim visinama jer određuje snagu i naprezanje VA



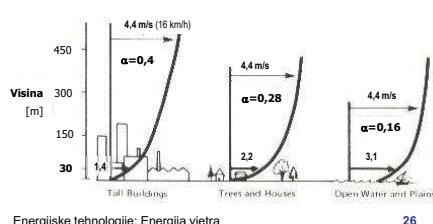
Varijacija brzine vjetra [m/s] s visinom [m] ovisno o dobu dana i godišnjem dobu (sjećanj – crno i srpanj – crveno). (B. Sørensen: Renewable Energy).

Jednostavan model preko koeficijenta terena α :

- mirna voda i glatko i tvrdo tlo: $\alpha=0,10$
- visoka trava $\alpha=0,15$
- šumovito $\alpha=0,25$
- grad sa velikim zgradama $\alpha=0,40$

$$v_H = v_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha$$

2007.



Energijske tehnologije: Energija vjetra

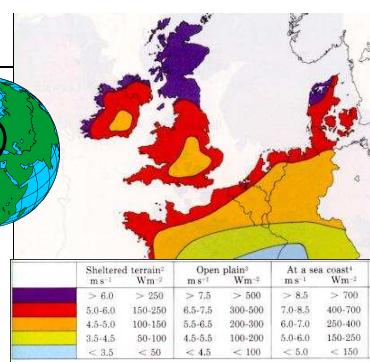
26

Atlas vjetra i potencijal energije

Europa	TWh/god.
kopno	500
pučina	2000
potrošnja ⁽¹⁾	3000

Svijet	TWh/god.
potencijal ⁽²⁾	25000
potrošnja ⁽¹⁾	15000

(1) Približno za 2003.
(2) Samo kopno.



Sheltered terrain⁽³⁾ Open plain⁽³⁾ At a sea coast⁽⁴⁾

> 6.0 > 250 > 7.5 > 500 > 8.5 > 700

5.0-6.0 150-250 6.5-7.5 300-500 7.0-8.5 400-700

4.5-5.0 100-150 5.5-6.5 200-300 6.0-7.0 250-400

3.5-4.5 50-100 4.5-5.5 100-200 5.0-6.0 150-250

< 3.5 < 50 < 4.5 < 100 < 5.0 < 150

Wind classes at 80 m

1 (V<5.9 m/s)

2 (5.9<V<6.9 m/s)

3 (6.9<V<7.5 m/s)

4 (7.5<V<8.1 m/s)

5 (8.1<V<8.6 m/s)

6 (8.6<V<9.4 m/s)

7 (V>9.4 m/s)

2007.

Energijske tehnologije: Energija vjetra

27

Kako dobiti statistiku vjetra za lokaciju?

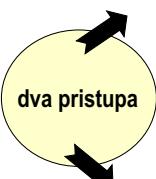
podaci s ostalih lokacija

Problem:

ostale lokacije ne odgovaraju

Rješenje:

koreliranje (tlo, prepreke)



lokalna mjerjenja



kratko vrijeme (brzina, smjer i temperatura) mjerjenja



"Predviđanje koreliranjem mjerjenja"

2007.

Energijske tehnologije: Energija vjetra

28

Dostupnost dugoročnih podataka

gdje?

- nacionalni sustav meteo mjerjenja brzine vjetra
- posebne namjene (nautika, avijacija, poljoprivreda)
- korištenje vjetra od ranih 80-ih

pouzdano?

- preciznost anemometara
- pohrana i obrada podataka
- konzistentnost i povijest lokacije

reprezentativno?

- prepreke, vrsta tla
- primjena korekcija

korisno?

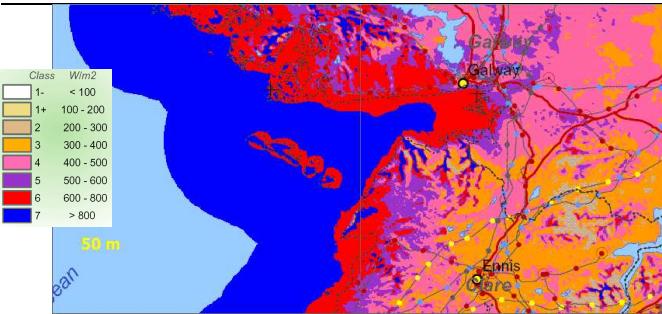
- format podataka: samo godišnji prosjeci ili duge vremenske serije
- dugotrajno mjerjenje

2007.

Energijske tehnologije: Energija vjetra

29

Procjena snaga vjetra lokalno na tri visine



Irska: na 50, 75 i 100 m; 75x150 km

Coordinate System: Irish National Grid

Spatial Resolution of Wind Resource Data: 200m
This map was created by TrueWind Solutions using the MesoMap system and historical weather data. Although it is believed to represent an accurate overall picture of the wind energy resource, estimates at any location should be confirmed by measurement.

Energijske tehnologije: Energija vjetra

Zadatak 3. Energija vjetra u prosjeku

Odrediti ukupnu specifičnu maksimalno iskoristivu energiju vjetra za dvije brzine:

gust. zraka $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$

brzinu vjetra $v_1 = 4 \text{ m/s}$

brzinu vjetra $v_2 = 9 \text{ m/s}$

trajanje vjetra $v_1 \cdot t_1 = 750 \text{ h}$

trajanje vjetra $v_2 \cdot t_2 = 750 \text{ h}$

Rješenje (KRIVO):

$$W_{1i2} = C_{p,\max} \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v_{\text{pros}}^3 \cdot t_{\text{ukupno}}$$

$$= 0,593 \cdot 0,5 \cdot 1,225 \cdot 6,5^3 \cdot 1500$$

$$= 149621 \text{ [Wh/m}^2] = 150 \text{ [kWh/m}^2]$$

ISPRAVNO:

$$W_{1i2} = W_1 + W_2$$

$$= C_{p,\max} \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot (v_1^3 \cdot t_1 + v_2^3 \cdot t_2)$$

$$= 0,593 \cdot 0,5 \cdot 1,225 \cdot (4^3 \cdot 750 + 9^3 \cdot 750)$$

$$= 216020 \text{ [Wh/m}^2] = 216 \text{ [kWh/m}^2]$$

Za vježbu:

Odrediti prosječnu brzinu koja daje ispravan rezultat i energiju koju bi proizvela VE sa promjerom lopatica 50 m te prosječnim $c_{p,e}=0,35$.

Rješenje: $V_{12,\text{sr,kub}} = 7,347 \text{ m/s}$

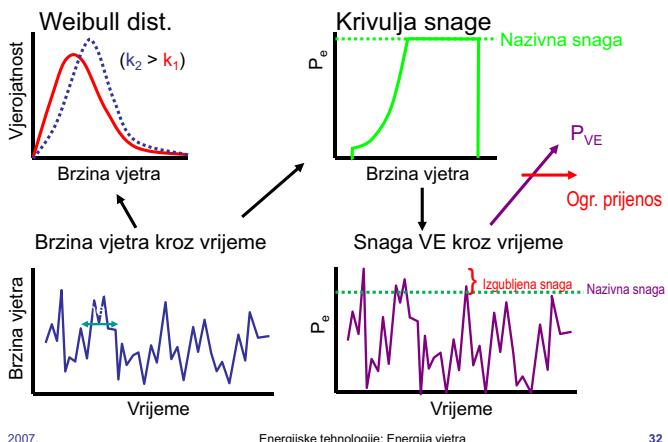
$W_{12} = 15040 \text{ KWh}$

2007.

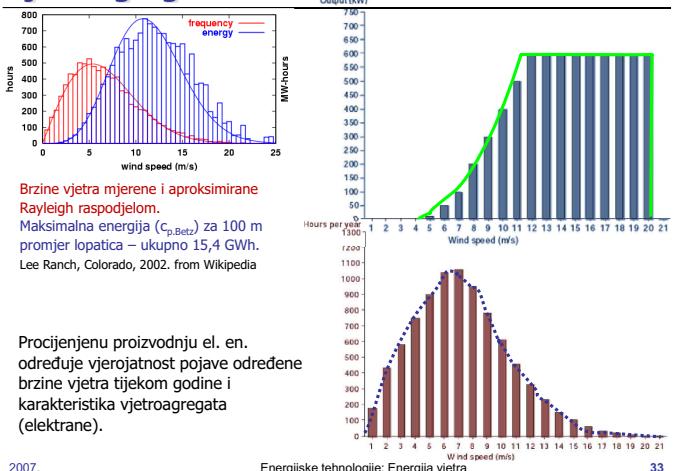
Energijske tehnologije: Energija vjetra

31

Procjena proizvedene električne energije u vjetroelektrani



Procjena proizvodnje električne energije u vjetroagregatu



Procjena proizvodnje ukupne godišnje električne energije

$W_{god.}$ – procijenjena godišnja proizvodnja el. en.

$$T_{god.} = 365 \cdot 24 = 8760 \text{ h}$$

r – raspoloživost (0,9 ili više)

v_p, V_m – početna i maksimalna brzina vjetra

$P(v)$ – snaga VA pri brzini v

$f(v)$ – funkcija gustoće vjerojatnosti pojavlivanja brzine v

Za utjecaj tlaka i temperature treba uključiti

korekciju c_H i c_T .

Za diskretnu raspodjelu frekvencije brzine

vjetra kroz godinu:

f_i – frekvencija brzine v_i

t_i – trajanje brzine v_i

– broj diskretnih koraka određuje preciznost

$$W_{god.} = \int_{v_p}^{v_m} T_{god.} \cdot r \cdot P(v) \cdot f(v) \cdot dv$$

$$W_{god.} = 8760 \cdot r \cdot \int_{v_p}^{v_m} P(v) \cdot f(v) \cdot dv$$

$$W_{god.} = 8760 \cdot r \cdot \sum_{v_i=v_p}^{v_m} P_i \cdot f_i$$

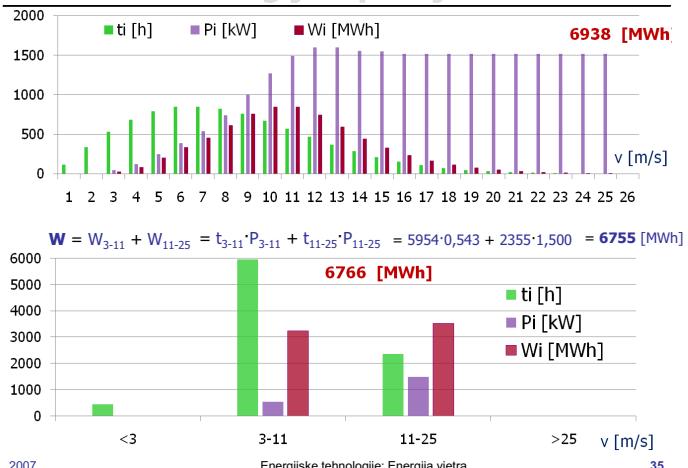
$$W_{god.} = r \cdot \sum_{v_i=v_p}^{v_m} P_i \cdot t_i$$

2007.

Energijske tehnologije: Energija vjetra

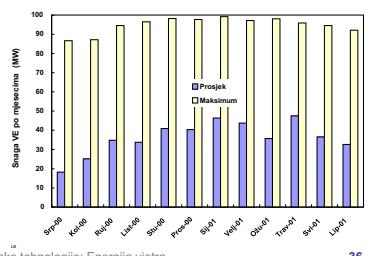
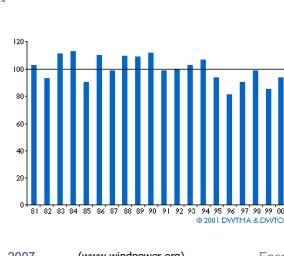
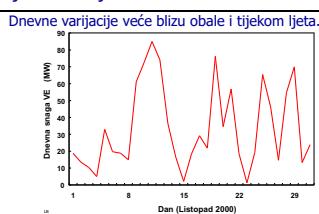
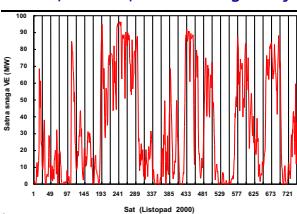
34

Procjena proizvodnje ukupne godišnje električne energije - primjer



Varijacije proizvodnje vjetroelektrana

Satne, dnevne, sezonске i godišnje varijacije brzine vjetra



2007. (www.windpower.org)

Energijske tehnologije: Energija vjetra

36

Utjecaj VE u EE sistemu

velika varijabilnost

može se dijelom smanjiti uključivanjem VE na širokom području

mala predvidljivost

korištenje poboljšanih metoda predviđanja vremena (= vjetra)

upravljivost

korištenje modernih VE s kontrolom nagiba lopatica i varijabilnom brzinom

2007.

Energijske tehnologije: Energija vjetra

37

Zadatak 4. Proizvedena el. energija iz vjetra

Odrediti proizvedenu el. energiju VA prema podatcima:

početna brzina vjetra $v_p = 4 \text{ m/s}$;
nazivna brzina vjetra $v_n = 10 \text{ m/s}$;
maks. radna brzina vj. $v_{\max} = 25 \text{ m/s}$;
trajanje vjetra između v_p i v_n $t_{p-n} = 3000 \text{ h}$;
trajanje vjetra između v_n i v_{\max} $t_n = 1500 \text{ h}$;
prosječna snaga do nazivne $P_{p-n} = 0,4 \text{ MW}$;
nazivna snaga $P_n = 1 \text{ MW}$;
raspoloživost $r = 90\%$

W

$$W_{god.} = r \cdot \sum_{v_i=v_p}^{v_m} P_i \cdot t_i$$

Rješenje:

$$\begin{aligned} W &= W_{p-n} + W_n \\ &= r(P_{p-n} \cdot t_{p-n} + P_n \cdot t_n) \\ &= 0,9(0,4 \cdot 3000 + 1 \cdot 1500) \\ &= 0,9(1200 + 1500) \\ &= 0,9 \cdot 2700 \\ &= 2430 \text{ [MWh]} \end{aligned}$$

Za vježbu:

Odrediti faktor opterećenja VA.

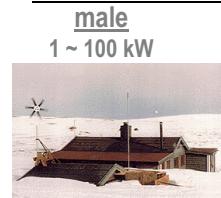
Rj.: 28 %

2007.

Energijske tehnologije: Energija vjetra

38

Tehnologija: veličine



Daleka izolirana mjesta
Raznolikost rješenja



male
1 ~ 100 kW

100 ~ 1500 kW

srednje i velike

(pučina)

> 1500 kW



Na mreži
Samostalne i u grupi
1000 kW posve
komercijalne (velike serije)

Na pučini (stotine MW)
Razvija se

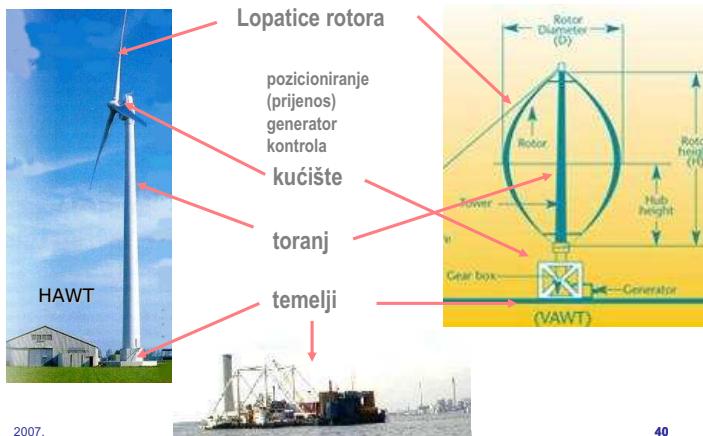
Mikro Vrlo male Male Srednje Velike

1 10 100 750 [kW]

Energijske tehnologije: Energija vjetra

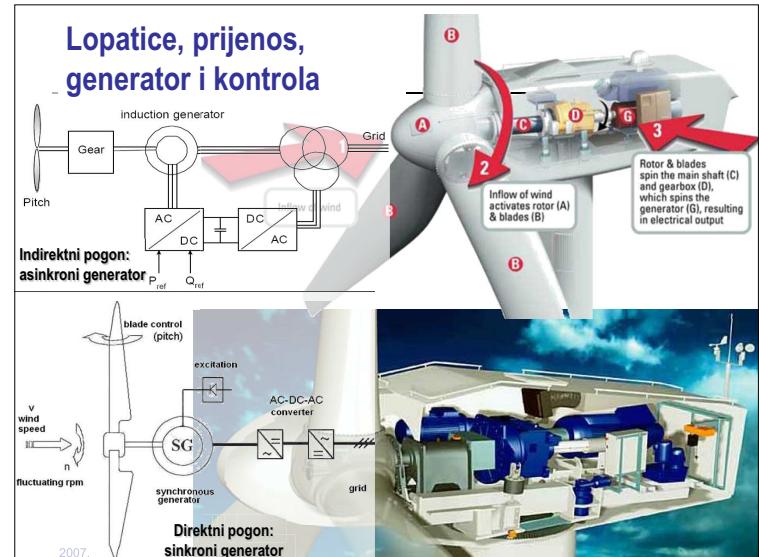
39

Tehnologija: osnovne komponente



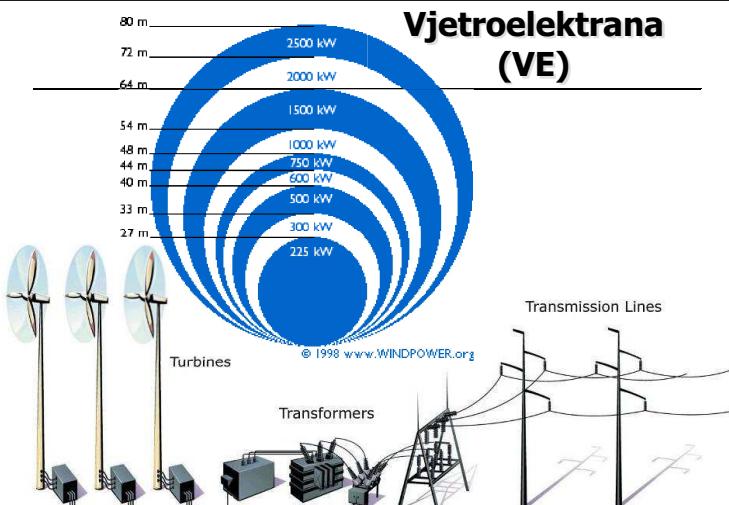
2007.

Lopatice, prijenos, generator i kontrola



2007.

Vjetroelektrana (VE)

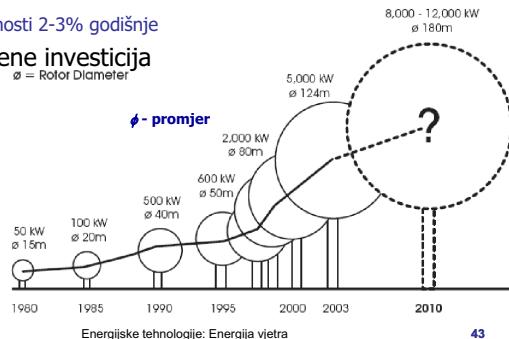


© 1998 www.WINDPOWER.org

Trendovi

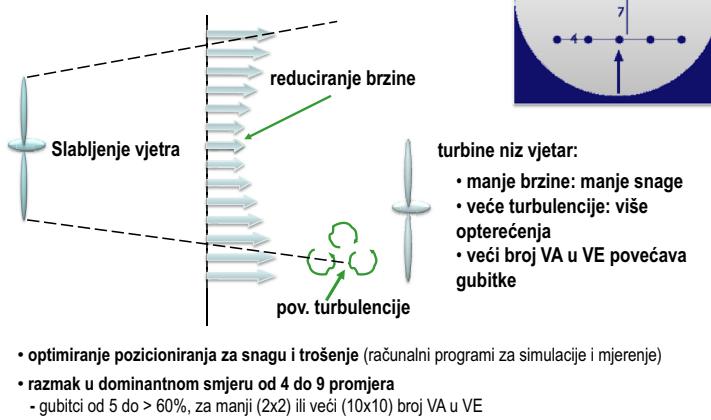
- Jedinice od 2 MW i više sve važnije od 2002.
- Poboljšana efikasnost
 - Odabir lokacija
 - Bolja oprema
 - Porast efikasnosti 2-3% godišnje
- Stalni pad cijene investicija

\varnothing = Rotor Diameter



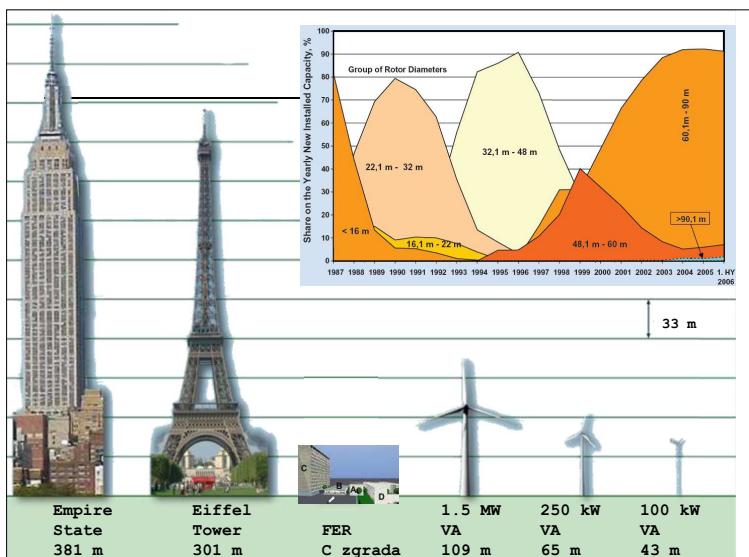
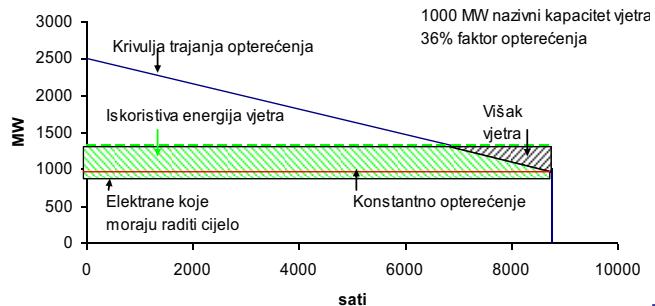
43

Lokacije VE: efekt više VA u blizini



Priklučak na mrežu i višak vjetra

- Odbacivanje energije iz vjetroelektrana za snagu koja prelazi opterećenje minus bazna proizvodnja
- Provodi se na nivou regionalne interkonekcije
- Promjenjivo za sve periode



Ukratko

- Iskoristiva snaga i energija vjetra ograničena je teorijski i praktično
- Pokraj velike brzine važna stalnost i pristup el. en. mreži
- Predviđanje brzine vjetra važno za planiranje
- Vjetar isplativ na najboljim lokacijama
- Za korištenje važna politika, planiranje i financiranje



Energija biomase

Korištenje energije biomase za proizvodnju el. energije
Energjske tehnologije
FER 2007.



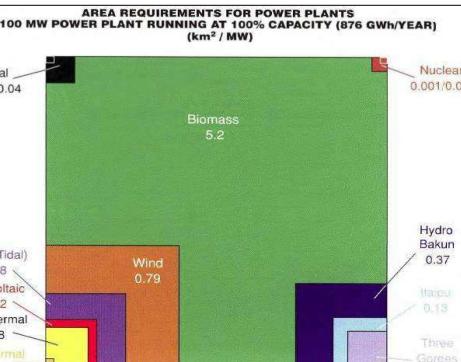
Gdje smo:

1. Organizacija i sadržaj predmeta
 2. Uvodna razmatranja
 3. O energiji
 4. Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama
 5. Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama
 6. Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim el.
 7. Geotermalna energija
 8. Potrošnja električne energije
 9. Prijenos i distribucija električne energije
 10. Energija Sunca
 11. Energija vjetra
 - 12. Biomasa**
 13. Gorivne ćelije i ostale pretvorbe
 14. Skladištenje energije
 15. Utjecaj na okoliš, održivi razvoj i energija
2007. Energjske tehnologije: Energija biomase

Sadržaj

- Uvod
- Izvor
- Upotreba
- Obrada
- Energetske vrijednosti i specifičnosti
- Primjeri korištenja
- Ukratko

2007.



Energijes tehnologije: Energija biomase

3

Uvod: Što je biomasa

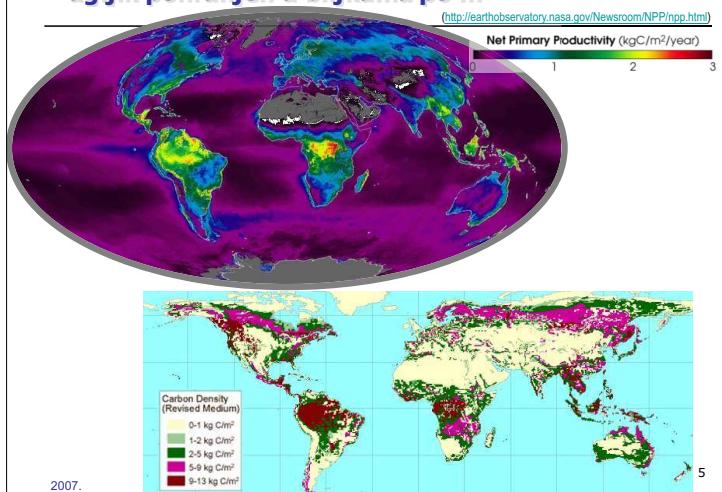
- Sve organsko.
- Organski materijal s energetskom vrijednosti podložan pretvorbi u gorivo ili direktno u toplinu.
- Prvobitni izvor energije.
- Danas se u svijetu još uvjek biomasa dominantno koristi na tradicionalan način (izravno izgaranje a ne prerada u tekuća ili plinovita goriva).
- Ostale primjene za industrijske materijale i kemikalije te druge raznovrsne primjene.

2007.

Energijes tehnologije: Energija biomase

4

Neto primarna proizvodnja biomase 2002 - ugljik pohranjen u biljkama po m²



2007.

Najvažnije vrste izvora biomase

Uzgoj

- Brzorastuće drveće
 - vrba
 - topola
 - eukaliptus
- Ligno-cellulozne vrste
 - trska
- Šećerne vrste
 - šećerna repica, trska i proso
 - slatki sirak
- Škrubne vrste
 - kukuruz
 - žitarice (pšenica, ječam)
- Uljne vrste
 - uljana repica
 - suncokret



2007.

Ostatci i otpad

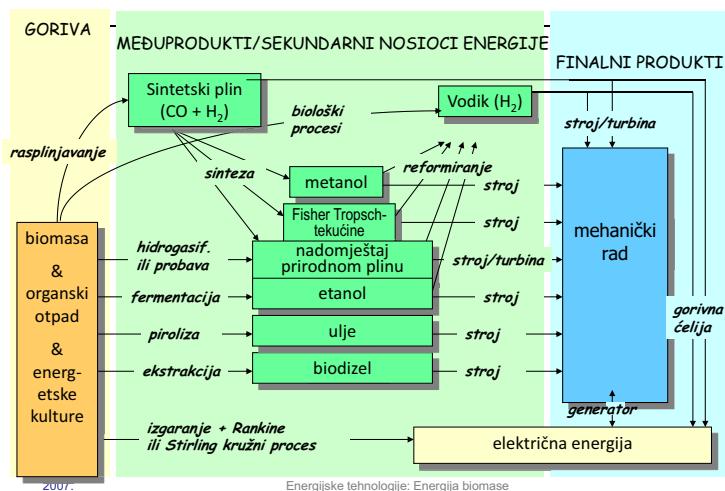
- Drvni otpad
 - održavanje šuma
 - obrada drvnih proizvoda
 - građevinski i drugi ostaci
- Poljoprivredni ostaci i otpad
 - slama
 - gnoj
- Organski dio javnog krutog otpada
- Kanalizacijski talog
- Industrijski ostaci
 - prerada hrane
 - prerada papira i sl.



Energijes tehnologije: Energija biomase

6

Energija iz biomase - putovi i mogućnosti

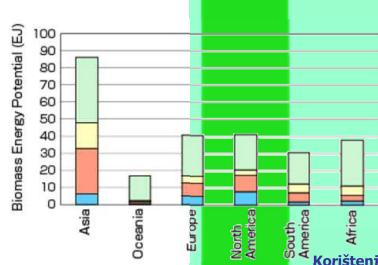


2007.

Energijes tehnologije: Energija biomase

Resursi

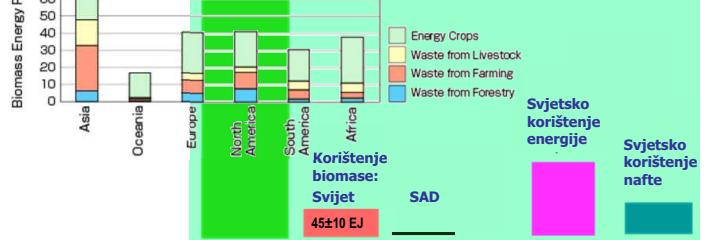
1 EJ (Exa J) = 1e18 J
1 EJ = 26,2e9 L ili
223 Mb sirove nafte



Svjetska proizvodnja biomase i korištenje energije

45±10 EJ

-za 2002. uključujući i tradicionalnu upotrebu
-to je 14% ukupne potrošnje
-samo ~3% u razvijenih
-i do 90% kod nerazvijenih

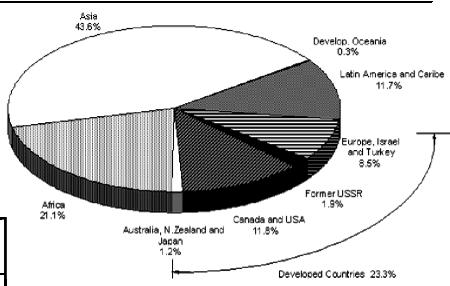


Svjetsko korištenje naftne

Udio biomase u potrošnji energije – primjeri za 2001.

Relativni udio korištenja energije biomase

Zemlja	U primarnoj en.	U el. en.
Austrija	10,0%	2,8%
Danska	8,5%	4,7%
Etiopija	93,0%	0,0%
Finska	19,0%	11,2%
Indija	35,0%	0,0%
Kongo	8,3%	3,5%
Švedska	16,0%	2,1%



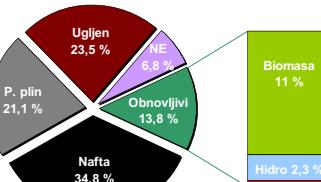
Sudjelovanje u ukupnoj proizvodnji energije biomase dijelova svijeta.

9

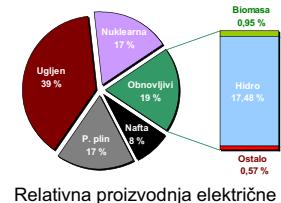
2007.

Energijske tehnologije: Energija biomase

Biomasa u energetskom sektoru svijeta



Ukupna svjetska potrošnja primarne energije za 2000. godinu



Relativna proizvodnja električne energije za 2000. godinu

1e12 kWh

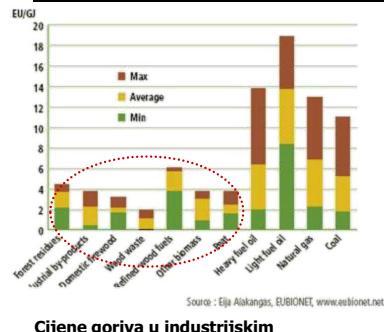
Proizvodnja električne energije za 2000. godinu

2007.

Energijske tehnologije: Energija biomase

Sources: 2004: Energy Information Administration (EIA), International Energy Annual 2004 (May-July 2006), web site [10](http://www.eia.doe.gov/iea/Projections:EIA, System for the Analysis of Global Energy Markets (2007).</p>
</div>
<div data-bbox=)

Biomasa u Evropi



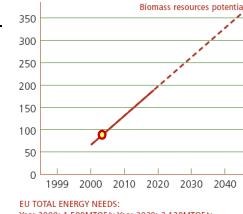
Cijene goriva u industrijskim elektranama zemalja Baltika (€/GJ)

Mtoe – energija 1e6 tona ekvivalentne naftne 42 GJ

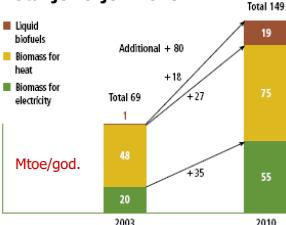
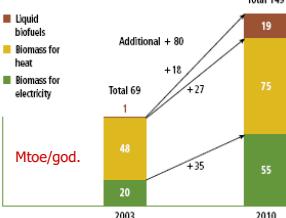
2007.

Energijske tehnologije: Energija biomase

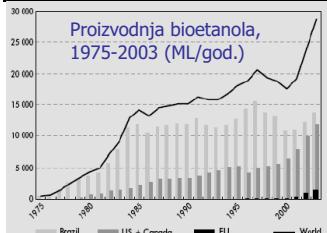
Mtoe/god.



Stanje i ciljevi EU25



Odnos nafte i biogoriva



Potrošnja nafte za 2003.

• ~30000 Mb (b=barrel)/god – proizvodnja nafte (3500000 ML/god)

• 80 Mb/dan – proizvodnja nafte (9400 ML/dan)

• ~1000x proizvodnje biogoriva!

• Brazil svojim uzgojem šećerne trske i proizvodnje bioetanola osigurava energetsku neovisnost i zaposlenost.

• Europa biodizel proizvodi iz uljane repice

2007.



Energijske tehnologije: Energija biomase

Stanje i perspektive korištenja biomase

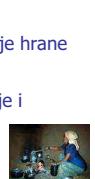
PREDNOSTI

- nerazvjeni
 - značajan izvor energije
 - potencijal za unapređivanje kvalitete života
 - razvoj, okoliš i održivost
- razvjeni
 - energetska sigurnost
 - globalno zagrijavanje
- decentraliziran izvor
- dodata društvena korist
- lokalni okoliš (otpad)
- mala cijena goriva
- stalniji obnovljivi izvor



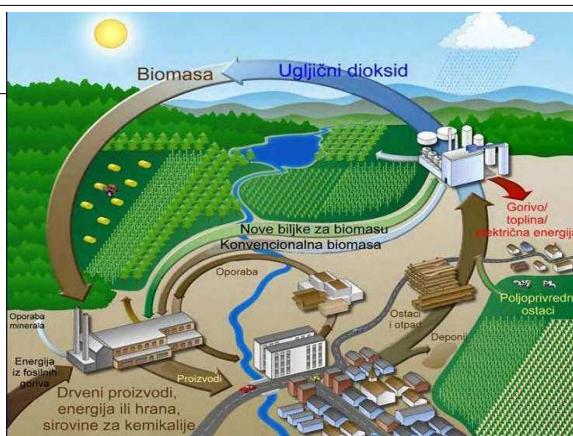
NEDOSTATCI

- mala energetska vrijednost i gustoća
 - prikupljanje i korištenje
- mali kapaciteti
- skupo korištenje
 - zahteva poticaje
 - poremećaji proizvodnje hrane
- održivost
 - upitna bez organizacije i tehnologije



2007.

Energijske tehnologije: Energija biomase



Pojednostavljeni ciklus biomase.

Za razliku od fosilnih goriva biomasa uklanja znatan dio CO₂ emitiranog u atmosferu kod upotrebe (obrada i izgaranje).

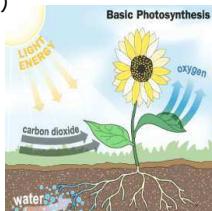
2007.

Energijske tehnologije: Energija biomase

14

Fotosinteza i prinos po ha

- Samo svjetlost se koristi
 - 43% od ukupne
 - biljka troši 30%
 - iskor. maks. ef. 10%
- Stvarno srednje iskorištenje ~0,15%
- Uzgajane vrste dostižu 1 do 3% (6%)



2007.

Energijske tehnologije: Energija biomase

15

Prinos biogoriva po hektaru:

- biodizela
 - 1,5 t iz uljane repice
- bioetanola
 - 3,0 t iz kukuruza (ili žitarica)
 - 5,0 t šećerne repice
- Europa za 6 % goriva u biogorivu (12 Mt etanola i 6 Mt biodizela) uzgaja:
 - 40 Mt kukuruza ili žitarica
 - 15 Mt uljane repice
 - na 10e6 ha obradiva tla
 - od ukupno 75e6 ha obradive zemlje u EU

ZADATAK 1. Energija i obradiva zemlja

Nakon 3 godine rasta s 10 ha zemlje posjeće se brzorastuće drveće prinosa 90 t/ha i 50% vlažnosti. Ogrjevna vrijednost suhog drva iznosi 20 GJ/t.

Koliko iznosi ukupna proizvedena toplina ukoliko se cijelokupna količina biomase iskoristi u peći na drva efikasnosti 60%?

Pretpostaviti linearnu ovisnost ogrjevne vrijednosti o vlažnosti.

Udio vlage je definiran kao omjer mase vlage prema ukupnoj masi:
 $W = m_v / (m_d + m_v)$

Masa drveta iznosi:

$$90 * 10 = 900 \text{ t}$$

Ogrjevna vrijednost vlažnog drveta iznosi:

$$20 * 0,5 = 10 \text{ GJ/t}$$

Energija sadržana u biomasi iznosi:

$$900 * 10 = 9.000 \text{ GJ}$$

Toplina proizvedena u peći iznosi:

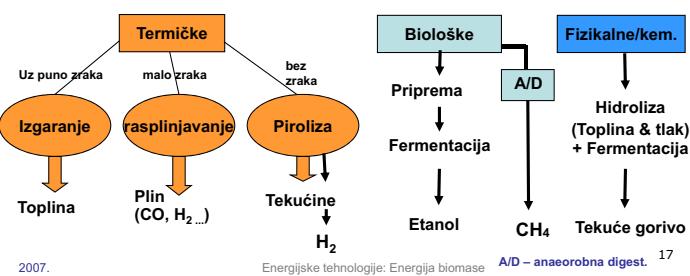
$$9.000 * 0,6 = 5.400 \text{ GJ}$$

2007.

Energijske tehnologije: Energija biomase

Pretvorbe biomase

- Pretvoda biomase se dijeli na primarnu i sekundarnu
- Primarna transformira početnu biomasu u biogorivo (dijagram dolje)
- Sekundarna služi pridobivanju korisne energije:
 - peć, turbine plinske i parne, motori s unutrašnjim izgaranjem, mikroturbine i gorivne ćelije



2007.

Energijske tehnologije: Energija biomase

A/D – anaerobna digest. 17

Drvna biomasa za ogrjev

- Drvna industrija
 - ostaci kod obrade (piljenje, bljanje i brušenje)
 - otpadci iz drvene industrije jeftiniji i kvalitetniji
- Gospodarenje šumama
 - održivo – međunarodni konsenzus
 - HR ima 44% površine pod šumama sa 9,6 Mm³ god. prirasta
- Poljoprivredni ostaci
 - heterogeno i različitih svojstava (slama, kukurozina, oklasak, stabljike, koštice, ljske, ...)
 - niska ogrjevna vrijednost (vlažno)
- Korištenje kao
 - gorivo za direktno spaljivanje ili obradu
- Kompaktiranje:
 - baliranjem, prešanjem i peletiranjem za automatsko loženje
- Potrošnja u srednjoj Europi
 - 2001. 0,12 Mt; 2002. 0,20 Mt
 - 2010. 1,00 Mt



2007.

Energijske tehnologije: Energija biomase

18

Zadatak 2. Vlažnost drvne biomase

Usporediti masu, količinu energije i energetsku gustoću sadržanu u 5 m³ hrastovih cjepanica odmah nakon sječe (vlažnost 55%) i nakon sušenja u šumi (vlažnost 30%) tijekom ljetnih mjeseci.

Gustoća i ogrjevna vrijednost potpuno suhog hrastovog drva iznose 580 kg/m³ odnosno 19 MJ/kg. Faktor popune za cjepanice je 0,7.

Pretpostavite da se volumen drva ne mijenja s promjenom vlažnosti.

Faktor popune definiran je kao omjer volumena punog drveta i volumena naslaganih cjepanica.

Ogrjevna vrijednost vlažnog drva računa se približno prema sljedećoj formuli:
 $H_{net} = H_d \cdot (100 - W) / 100 - 2,442 \cdot W / 100 \quad (\text{MJ/kg})$,
 gdje je H_d ogrjevna vrijednost suhog drva, a W vlažnost.

Volumen punog drveta iznosi:

$$5 \cdot 0,7 = 3,5 \text{ m}^3$$

Udio vlage je definiran kao omjer mase vlage prema ukupnoj masi:

$$W = m_v / (m_d + m_v)$$

2007.

Energijske tehnologije: Energija biomase

Zadatak 2. Vlažnost drvne biomase - rješenje

Uz vlažnost 55%:

Gustoća vlažnog drva iznosi:

$$580 * 100 / (100 - 55) = 1289 \text{ kg/m}^3$$

Masa vlažnog drva iznosi:

$$3,5 * 1289 = 4511 \text{ kg}$$

Ogrjevna vrijednost vlažnog drva:

$$\begin{aligned} &= 19 * (100 - 55) / 100 - 2,442 * 55 / 100 \\ &= 7,21 \text{ MJ/kg} \end{aligned}$$

Količina energije sadržana u drvu:

$$7,21 * 4511 = 32,51 \text{ GJ}$$

Energetska gustoća iznosi:

$$32,51 / 3,5 = 9,29 \text{ GJ/m}^3$$

Uz vlažnost 30%:

Gustoća vlažnog drva iznosi:

$$580 * 100 / (100 - 30) = 829 \text{ kg/m}^3$$

Masa vlažnog drva iznosi:

$$3,5 * 829 = 2902 \text{ kg}$$

Ogrjevna vrijednost vlažnog drva:

$$\begin{aligned} &= 19 * (100 - 30) / 100 - 2,442 * 30 / 100 \\ &= 12,57 \text{ MJ/kg} \end{aligned}$$

Količina energije sadržana u drvu:

$$12,57 * 2902 = 36,45 \text{ GJ}$$

Energetska gustoća iznosi:

$$36,45 / 3,5 = 10,414 \text{ GJ/m}^3$$

2007.

Energijske tehnologije: Energija biomase

Izgaranje drvne biomase

- Karakteristika goriva
 - promjenjiva i velika vlažnost (svježe drvo preko 50%)
 - veće emisije zbog lošijeg izgaranja
 - vrlo velik udio hlapljivih sastojaka (80%)
- Posebna konstrukcija peći
- Manji sustavi
 - nepomična i pomična rešetka
 - pouzdana i poznata tehnologija
- Veći sustavi
 - cirkulirajući i mjehuričasti fluidizirani sloj
- Manja efikasnost



2007.

Energijske tehnologije: Energija biomase

Biokemijske pretvorbe - biogoriva

Bioetanol (C_2H_5OH)

- Biomasa - sirovina
 - šećerna trska - šećer
 - kukuruz - škrob
 - drvo - celuloza
- Fermentacija (vrenje)
 - biokemijsko razlaganje složenih organskih molekula u jednostavnije molekule (npr. raspad šećera u alkohol i CO_2)
 - enzimi kataliziraju
- Zamjena za benzin
 - mješavina - udio do 20% etanola bez potrebe za preinakama motora

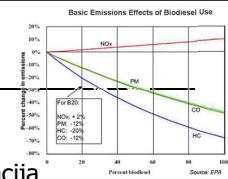


2007.

Energijske tehnologije: Energija biomase

Biodizel

- Esterifikacija
 - biljni ulja s metanolom (uljana repica, sunčokret, soja, otpadno jestivo ulje, loj)
- Svojstva slična dizelu
 - miješana ili čista potrošnja
 - gustoča i energetska vrijednost
 - bolja mazivost
 - manje ili nema sumpora
 - novi automobili prilagođeni (cijevi i brte za gorivo)



22

Životinjski ostaci i otpad

- Lešine i strelja
 - Spaljivanje
- Izmet i zelena masa
 - anaerobna fermentacija za biopljin
 - 60% metan, 35% CO_2 i 5% ostalo (vodik, dušik, amonijak, sumporovodik, CO, kisik i vodena para)
 - krava ili dvije svinje 1,5 m³ plina na dan (26 MJ/Nm³)

- Porijeklo otpada
 - biljni ostaci i drugo iz gradskog otpada
 - održavanje parkova i vrtova
 - mulj iz otpadnih voda
- Primarno je zbrinjavanje otpada
 - Veličine investicije (4000 US\$/kW)



2007.

Energijske tehnologije: Energija biomase

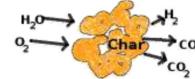
Rasplinjavanje – nepotpuno izgaranje

- Termokemijski proces
 - na visokim temperaturama (i do 1400°C)
 - uz ograničen dovod kisika
- Proizvodnja el. en. je efikasnija u plinskoj turbini
 - termički stupanj 45%
 - parni kotao na drva oko 20%
- Problem
 - osjetljivost plinskih turbina na čestice i paru
 - prociscavanje skupo
- Glavni sastojci plina:
 - CH_4 , CO_2 , H_2O

2007.

Energijske tehnologije: Energija biomase

- Svojstva plina određuju:
 - izvedba postrojenja
 - protustrujno, istostrujno, s fluidiziranim slojem
 - biomasa
 - temperatura, vlažnost i sastav
 - sredstvo rasplinjavanja
 - zrak – energetska vrijednost plina od 4 do 6 MJ/Nm³
 - kisik – energetska vrijednost plina od 15 do 20 MJ/Nm³



24

Energetska vrijednost goriva iz biomase

GORIVO	Sadržaj vode %	MJ/kg
Hrast	20	14,1
Bor	20	13,8
Slama	15	14,0
Sjemenje	15	14,2
Repičino ulje	-	37,1
Kameni ugljen	4	30-35
<i>Smedji ugljen</i>	20	10-20
<i>Lož ulje</i>	-	42,7
Bioetanol	-	25,5

Gorivo	En. vrijednost
Biljni ostaci	6 17 MJ/kg
Drvo	8 19 MJ/kg
Etanol	26,8 MJ/L
Biodizel	37,2 MJ/L
Nafta	42 MJ/L

25

2007.

Energijske tehnologije: Energija biomase

Proizvodnja el. en. iz biogoriva

- Plinska turbina
 - Pouzdana i poznata tehnologija
 - Efikasnost oko 45%
 - Kombinirani proces s parnom i do 55%
- Parna turbina
 - Pregrijana para na 5 do 10 MPa
 - Rasponi snage od 500 kW do 500 MW_{el}
 - Manje snage pogodnije za biomasu
 - Troškovi transporta
 - Niža efikasnost:
 - 5 MW_{el} do 20%, a 500 MW_{el} do 40%
- Stirling motor
 - Zatvoreni ciklus (zrak, H, He)
 - Efikasniji proces od parnog
 - Još se razvija
- Budućnost u gorivnim celijama

2007.

Energijske tehnologije: Energija biomase

26

Elektrane na biomasu



2007.

Energijske tehnologije: Energija biomase

Konverzija energije

Tablica navodi nekoliko primjera korištenja biomase u elektranama/toplanama različitih primarnih procesa.

Vrsta	Efikasnost	Ulaz	Izlaz			Drvo
			(MW)	Toplina (MW _t)	El. en. (MW _e)	
Samo toplina	75	1,3	1	0	1	4056
Parni kombinirani ciklus	80	53	30	12	42	170333
rasplinjavanje/piroliza	75	1,3	0,7	0,3	1	4056
rasplinjavanje/piroliza	80	49	29	10	39	158167

odt: Oven Dried Ton. Tona drva sa 0 % vlažnosti.
Za 10 t suhog drveta treba 1 ha zemljišta.

2007.

Energijske tehnologije: Energija biomase

Potrebe biomase za energiju

Potreban broj kamiona volumena 120 m³ svaki dan u elektranama za primjer:



Elektrana	Drvna sječka	Bale sijena	Bale trske
Izgaranje (30MWe)	21	28	17
Rasplinjavanje (30MWe)	17	23	13
Toplina (1 MWth)	¼	½	¼

Korištene gustoće:

- 0.15 m³/t za drvne sječke (Suurs, 2002),
- 0.11 m³/t za slamu i
- 0.19 m³/t za trsku (Bullard, 1999).



2007.

Energijske tehnologije: Energija biomase

Kogeneracija

- Kombinirana proizvodnja
 - Električne i toplinske energije
- Veća efikasnost i manji investicijski troškovi u odnosu na odvojeni rad
 - Uz kontinuiranu potrebu za toplinom
 - Vezano za izvor biomase i potrošača
- Trigeneracija (i hlađenje)
 - Prehrambena industrija i topliji krajevi



30

2007.

Energijske tehnologije: Energija biomase

Zadatak 3. Kombinirana elektrana

Potreba drvnopreradivačkog poduzeća za električnom energijom i toplinom mogu se zadovoljiti postrojenjem kapacitet 2,8 MW_e i 5,6 MW_t, uz godišnji pogon od 5000 sati.

Izračunati efikasnost pretvorbe ukoliko se koristi kogeneracija ili posebna postrojenja za toplinski i električni dio.

Za kogeneraciju se zna da godišnji gubici u kotlu iznose 18 TJ, a gubici u pretvorbi mehaničke energije u električnu iznose 9 TJ.

Kod posebnog rješenja toplana bi imala godišnje gubitke u kotlu od 10,8 TJ. Dok bi posebna proizvodnja električne energije imala godišnje gubitke u kotlu od 12,6 TJ, gubitke u pretvorbi mehaničke energije u električnu od 5,4 TJ i gubitke topline koja se predaje u okolinu pri kondenzaciji od 57,6 TJ.

Za slučaj kogeneracije, ukupna potrebna energija iznosi:

$$(2,8 + 5,6) * 5000 * 3600 = 151.200.000 MJ = 151,2 TJ$$

Efikasnost pretvorbe iznosi:

$$151,2 / (151,2 + 18 + 9) = 84,8 \%$$

Za slučaj odvojene proizvodnje električne energije i topline, ukupna potrebna energija ostaje jednaka, a efikasnost iznosi:

$$151,2 / (151,2 + 10,8 + 12,6 + 5,4 + 57,6) = 63,6\%$$

Napomena: na isplativost osim efikasnosti pretvorbe utječu još i cijena goriva, iznos investicijskih troškova i ukupno vrijeme rada postrojenja tijekom godine.

2007.

Energijske tehnologije: Energija biomase

Održivost korištenja biomase

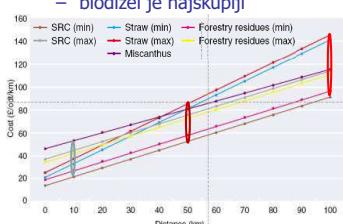
- Korištenje < prirosta
- Važnost povratka tvari u tlo
 - organske
 - mineralne
 - ostavljanje lišća i vraćanje pepela
- Planiranje rasta šuma
- Energetski nasadi i šume
 - staništa za ptice i manje sisavce
- Otklon od monokulturne poljoprivrede
- Smanjenje korištenja herbicida, pesticida i umjetnih gnojiva
- Očuvanje tla i sprečavanje erozije

2007.

Energijske tehnologije: Energija biomase

Isplativost korištenja biomase

- Investicijski troškovi
- Vanjski troškovi nejasni
- Jeftina sirovina
 - niska ili zanemariva otkupnina
 - veliki utjecaj pripreme (skupljanje i transport)
- Konkurentnost
 - drvna ekonomična
 - etanol blizu konkurentnosti
 - biodizel je najskupljiji



Utjecaj udaljenosti biomase na cijenu.

o logije: Energija biomase 33

Ukratko

- Opisani su izvori biomase za energetsko korištenje
 - direktno zapošljavanje
 - procjene za EU25 do 2010 oko 200000 radnih mjesto
- Makroekonomske dimenzije
 - Više proizvoda i usluga (BNP)
 - Velika zaposlenost
 - Stabilnost cijena (energije)
 - Smanjenje uvoza
- Izvori energije iz biomase imaju znatno veći potencijal uvažavanjem ukupnog utjecaja
- Prednosti
 - povećavanje energetske neovisnosti
 - smanjivanje ispuštanja stakleničkih plinova
 - brojni ekonomsko-socijalni pozitivni učinci
- Navedene su osnovne vrste biogoriva
- Izneseni su primjeri korištenja biomase u elektranama za proizvodnju električne energije i topline ili kombinirano
- Nedostatci
 - mala gustoća energije
 - zahtjev za održivim načinom korištenja
 - ekonomičnost

2007.

Energijske tehnologije: Energija biomase

34

Gorivne ćelije

Korištenje gorivnih ćelija za proizvodnju el. energije
Energijske tehnologije
FER 2007.

Fakultet elektrotehnike i računarstva - Zavod za visoki napon i energetiku



Energijske tehnologije

Sadržaj

- Uvod
- Kakvih vrsta ima
- Kako rade gorivne ćelije
- Važna pitanja za korištenje
- Ukratko
- Usporedba s drugim gorivima



2007.

Energijske tehnologije: Gorivne ćelije

3

Gdje smo:

1. Organizacija i sadržaj predmeta
2. Uvodna razmatranja
3. O energiji
4. Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama
5. Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama
6. Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim el.
7. Geotermalna energija
8. Potrošnja električne energije
9. Prijenos i distribucija električne energije
10. Energija Sunca
11. Energija vjetra
12. Biomasa

13. Gorivne ćelije i druge pretvorbe

13. Gorivne ćelije i druge pretvorbe
14. Skladištenje energije
15. Utjecaj na okoliš, održivi razvoj i energija

2007.

Energijske tehnologije: Gorivne ćelije i druge direktnе pretvorbe

2

Uvod: Što je to neposredna pretvorba

- Nas zanima prvenstveno električna energija te kako je najjednostavnije proizvesti
- Neposredna (direktna) pretvorba je svaki proces koji kao rezultat daje električnu energiju
- Gorivne ćelije predstavljaju uz fotonaponske ćelije najzanimljiviju direktnu (neposrednu) pretvorbu
- Neposredne pretvorbe:
 - **Fotonaponski efekt**
 - Termoelektrični efekt
 - Termoionski efekt
 - Direktna transformacija kemijske energije:
 - **Gorivna ćelija**
 - Akumulatori
 - Magnetohidrodinamički proces
 - Mnogi drugi (piezoelektricitet, statički elektricitet, ...)



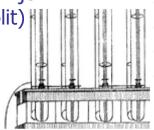
2007.

Energijske tehnologije: Gorivne ćelije

4

Gorivna ćelija

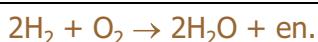
- Gorivna ćelija**
 - elektrokemijski element koji kontinuirano transformira kemijsku energiju goriva i oksidacijskog sredstva u el. en.
- Vodik + Kisik = Voda + El. en. + Toplina**
 - Baterija s kontinuiranim dotokom goriva (dvije elektrode i elektrolit)
 - obrnuti proces od elektrolize



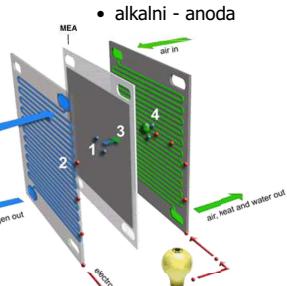
2007.

Energijeske tehnologije: Gorivne ćelije

5



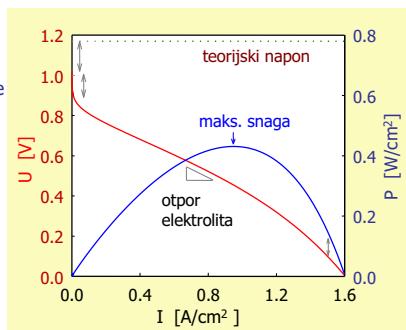
- Za vodik i kisik kao gorivo:**
 - kontakt vodika i kisika u plinskom stanju rezultira vodom i energijom
 - u gorivnom elementu to se odvija u dva koraka
 - vodik na anodi: $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2e^-$
 - elektroni i kisik na katodi: $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^- \rightarrow 4\text{OH}^-$
 - to je oksidni put redukcije kisika (kompleksno)
 - postoji još čitav niz mehanizama ovisno o korištenom gorivu



7

Performanse gorivne ćelije

- 1.17 V (prazni hod)
- gubitci napona
 - razni ovisno o vrsti gorivne ćelije i tehničkoj izvedbi te o struji
- istosmjerna snaga $P = I \cdot U$
 - maksimalna snaga kod srednjih struja ovisna o unutrašnjem otporu elektrolita
- maksimalna efikasnost kod manjih struja

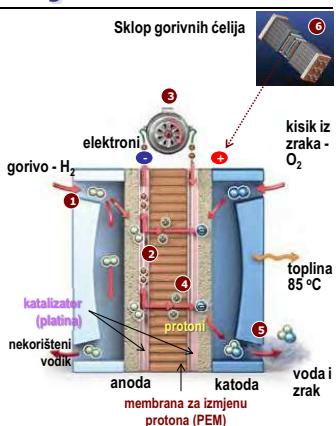


9

Način rada gorivne ćelije

Gorivna ćelija sa membranom za izmjenu protona (PEM):

- sastoji se od dvije porozne elektrode (anoda i katoda) prevučene platinom na strani prema čvrstoj membrani (elektrolit) koja ih razdvaja
- anodni katalizator omogućava razdvajanje elektrona od protona vodika
- elektroni idu kroz trošilo, a protoni idu kroz membranu
- katodni katalizator spaja elektrone s protonima i kisikom



2007.

Energijeske tehnologije: Gorivne ćelije

6

- Allis-Chalmers gorivna ćelija pogonila je traktor, 1959. Prva u vozilu.

- Allis-Chalmers gorivna ćelija za golf vozilo, 1962. 4kWe snage kontinuirano
- Alkalna gorivna ćelija za motor, 1967
- PEM gorivna ćelija za Gemini VII svemirsku letjelicu, 1965.



Vrste gorivnih ćelija

Vrstu određuje elektrolit, katalizator, gorivo i radna temperatura

Vrsta C	PEM 90-110	AFC 100-250	PAFC 150-220	MCFC 500-700	SOFC 700-1000
Efikasnost	35-45%	60 %	40-45%	45-60%	50-65%
Primjene	mala, prijevoz	svemir, prijevoz	velike stacionarne	velike stacionarne	stacionarne, prijevoz
Katalizator: anoda/katoda	Pt/Vulcan carbon	Ni, Ni-Pt, ..J NiO, AG ...	Pt/Vulcan carbon	Ni-Al, Ni-Cr legure/ NiO	Ni+YSZ/ (La,Sr)MnO _{3-d}
Gorivo	H ₂ + H ₂ O	H ₂	H ₂	HC + CO	HC + CO
Elektrolit Ioni	Nafion H ₃ O ⁺ ↓	KOH OH ⁻ ↑	H ₃ PO ₄ H ⁺ ↓	Na ₂ CO ₃ CO ₃ ²⁻ ↑	Y-ZrO ₃ O ²⁻ ↑
Oksidant	O ₂	O ₂ + H ₂ O	O ₂	O ₂ + CO ₂	O ₂

Nastaje: H₂O, CO₂

PEM = polymer electrolyte membrane, ili proton exchange membrane
 AFC = alkalne gorivne ćelije
 PAFC = phosphoric acid fuel cell
 MCFC = molten carbonate fuel cell
 SOFC = solid oxide fuel cell

2007.

Energijeske tehnologije: Gorivne ćelije

Odabir gorivne čelije

Temperatura određuje pogonske parametre i gorivo

- Temperatura okoline

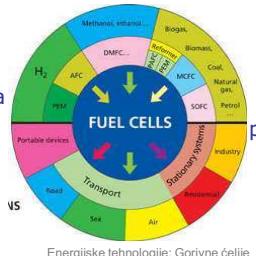
- ✓ Brzo pokretanje
- ✗ H₂ ili CH₃OH kao goriva
- ✗ Katalizator se lako otruje

- Visoke temperature

- ✓ Fleksibilnost za gorivo
- ✓ Vrlo visoka efikasnost
- ✗ Dugo vrijeme za pokretanje

- Primjene

- Prijenosni izvor
- Veliki broj ciklusa uključivanja
- Male dimenzije

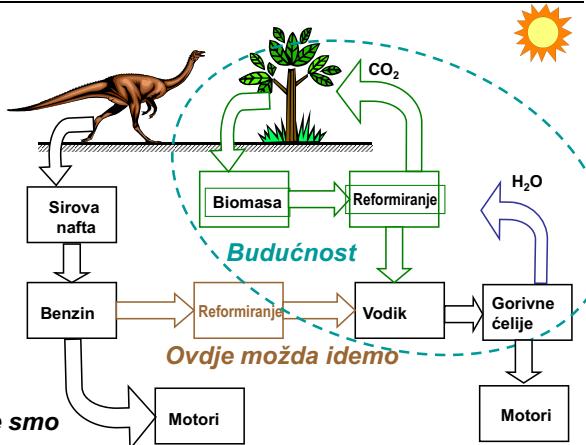


2007.

11

- Primjene
- Stacionarni izvor
- Pomoćni izvori u prijenosnim sustavima

Zašto gorivne čelije?



2007.

12

Potencijalne primjene



2007.

Energijeske tehnologije: Gorivne čelije

13

Vodik i platina

4 kg vodika
za 400 km



metalni hidridi
 Mg_2NiH_4 $LaNi_5H_6$

ukapljeno
 $<-241^{\circ}C$

stlačen
200 bar

- Energetska gustoća vodika

- Veliki sadržaj energije po jedinici mase vodika
- ali najbolje tehnike za spremanje vodika su na ~ 5 % mase H₂
- **5x** potrebnna ukupna masa za masu benzina iste energije

- Konvencionalne gorivne čelije trebaju platinu

- Cilj smanjivanja potreba od 1 g/kW $\Rightarrow \sim 1$ mg/kW
- Cijena:
 - 100 kW stroj $\Rightarrow 100$ g Pt $\Rightarrow \$4850$ (i raste!)
- Resursi:
 - za sve automobile na Zemlji treba desetak puta više Pt od dokazanih rezervi (5600 t; 80% rezervi u jednom rudniku u JAR, a 15% u Rusiji)

2007.

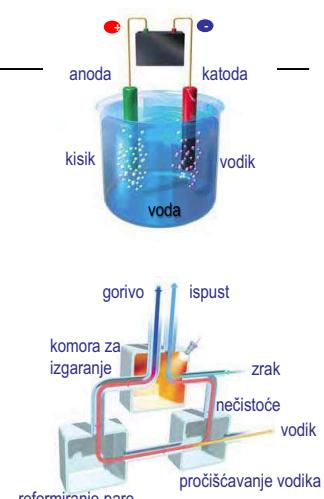
Energijeske tehnologije: Gorivne čelije

14

Proizvodnja vodika

Proizvodnja

- Iz vode
 - **elektrolizom**
- energijom iz nuklearnih i obnovljivi izvora
- Biomasa (ugljen)
 - rasplinjavanje/piroliza
- Fosilna goriva
 - prirodnji plin **reformiranjem**
 - benzin direktno
 - Toplinska energija
 - iz nuklearnih i drugih izvora
 - termička disocijacija
 - **parno reformiranje**



2007.

Energijeske tehnologije: Gorivne čelije

15

Pohranjivanje vodika

Pohranjivanje

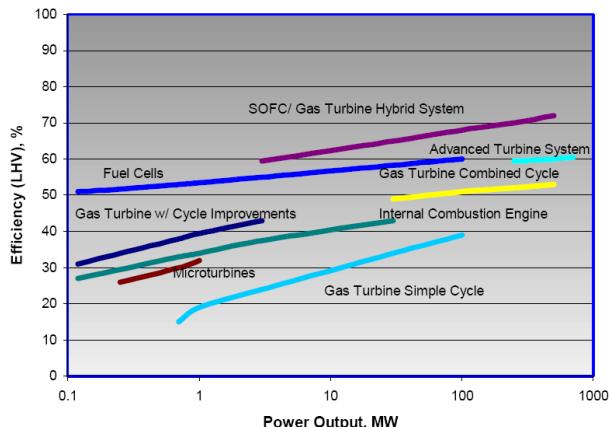
- skupo
 - kapitalni troškovi za velika spremišta 1 do 2 \$/W
- pod tlakom
 - gubitci energije ~22%
 - oko 250 bar
 - potreban veliki prostor
- ukapljivanje
 - na niskoj temperaturi
 - gubitci vodika ~0,2%/dan
- napredno
 - metalni i kemijski hidridi
 - jeftinije i efikasnije

2007.

Energijeske tehnologije: Gorivne čelije

16

Snaga i efikasnost gorivnih čelija

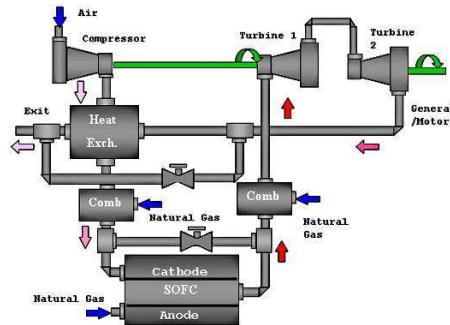


2007.

Energijske tehnologije: Gorivne čelije

17

Gorivne čelije u hibridnom sustavu



220 kW hibridni sustav tlačne cilindrične gorive
čelije s krutim oksidima i plinskom turbinom

http://www.nfrcr.uci.edu/ACTIVITIES/RESEARCH/STUDIES/Hybrid_Fuel_Cell_Systems/Analyses_of_Hybrid_FC_Gas_Turbine_Systems/Index.htm

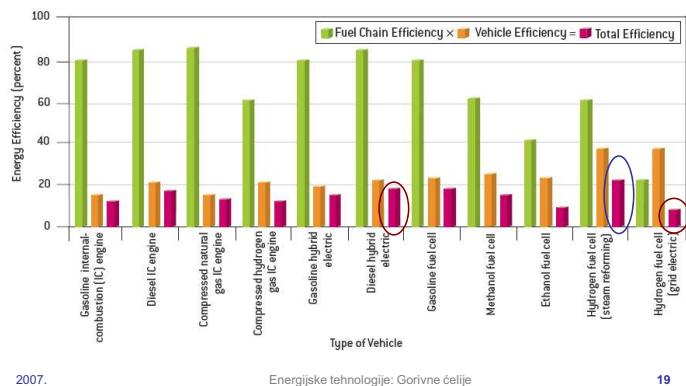
2007.

Energijske tehnologije: Gorivne čelije

18

Ukupna efikasnost

- Za pravu ocjenu važno je uzeti u obzir cijeli ciklus

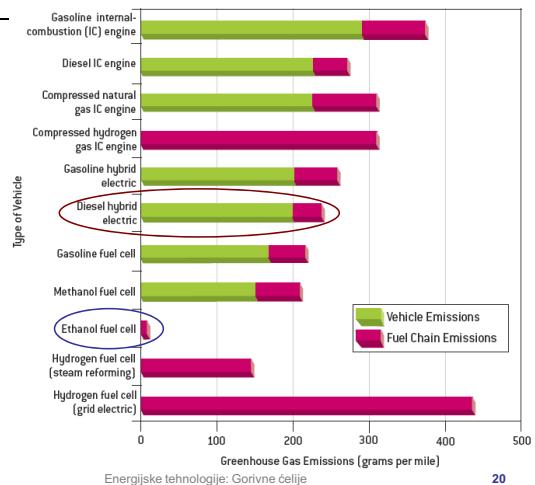


2007.

Energijske tehnologije: Gorivne čelije

19

Ukupni utjecaj na okoliš

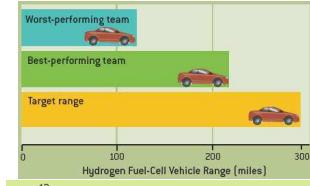


2007.

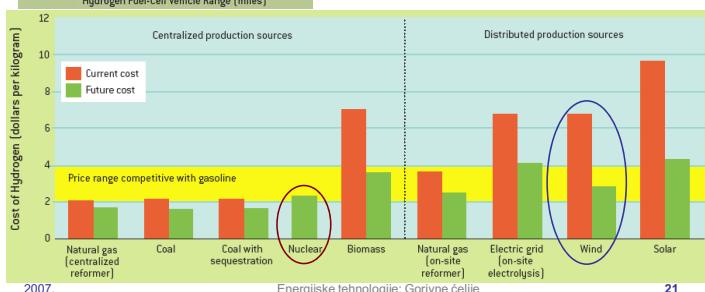
Energijske tehnologije: Gorivne čelije

20

Stanje i perspektive



Prototip dlanovnika i MP3-a na GC, do 60 h



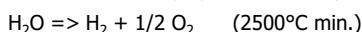
2007.

Energijske tehnologije: Gorivne čelije

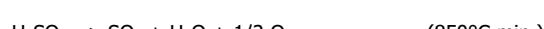
21

Termički procesi za proizvodnju vodika

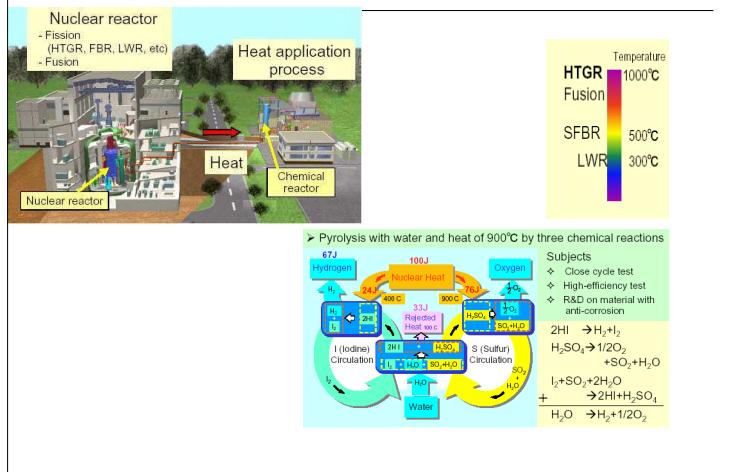
- Direktna termoliza vode traži temperature veće od 2500°C za značajniju proizvodnju vodika



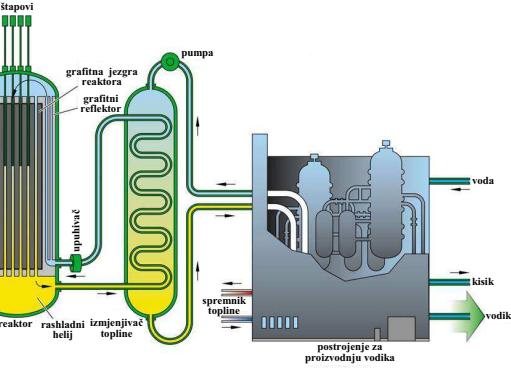
- Termokemijsko razlaganje vode u sumpor/jod ciklusu. Potrebna procesna toplina (para-plin temperature oko 900°C) u izmjenjivaču topline



Nuklearni reaktori i proizvodnja vodika



Vrlo-visoko-temperaturni reaktori (VHTR – Very-High-Temperature Reactor System)



- MTU CFC HotModuel instalacija u Essenu
- 250kW MCFC komercijalizacija do kraja 2007. (očekivanje)



- Siemens Westinghouse 250kW goriva čelija sa čvrstim oksidom.
- najveći SOFC 250kW sistem u svijetu

- Chugoku Electric Power 1kW PEM



Chugoku Electric Power
1kW PEM Fuel Cell
W/D/H: 1,000/1,300/1,500mm
Operating Temperature: 60°C
Efficiency: 58%



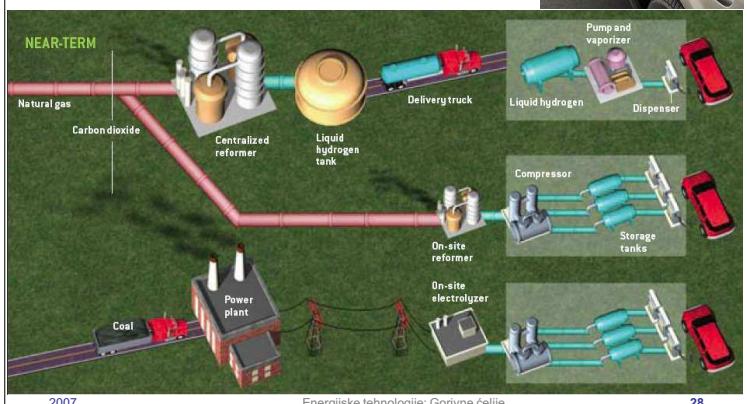
- Plug Power i Hondin prototip Home Energy Stationa
- proizvodi dovoljno vodika za jedno vozilo na dan

- Toyota FCHV-BUS2
- Scania's Fuel Cell Bus
- Mercedes-Benz Citaro Fuel Cell Bus

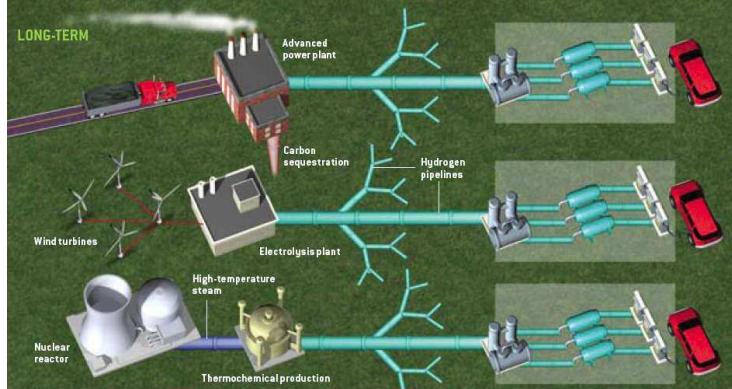


Infrastruktura – u početku

Što je bilo prije jaje ili kokoš?



Infrastruktura u budućnosti



2007.

Energijeske tehnologije: Gorivne ćelije

29

Ukratko o gorivnim ćelijama

- Opisana je gorivna ćelija
- Navedeni su razlozi zašto je gorivna ćelija važna
- Prednosti
 - direktna proizvodnja el. en. bez pokretnih dijelova (tiho i kompaktno)
 - smanjivanje ispuštanja stakleničkih plinova
 - rješavanje problema energenta za transport kod ograničene dostupnosti fosilnih goriva
- Nedostaci
 - proizvodnja
 - pohranjivanje
 - ekonomičnost

2007.

Energijeske tehnologije: Gorivne ćelije

30

Skladištenje energije

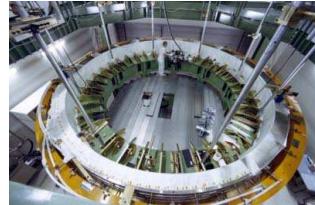
Energijeske tehnologije
FER 2007.

Fakultet elektrotehnike i računarstva - Zavod za visoki napon i energetiku



Sadržaj predavanja

- Što je skladištenje energije
- Zašto skladištimo energiju
- Osnovne značajke spremnika
- Vrste spremnika
- Usporedba načina skladištenja
- Zaključak



Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

2

Skladištenje energije

- transformacija prijelaznog u stalni oblik energije, pogodan za povratnu transformaciju
- prijelazni: električna energija, toplinska energija, mehanički rad
- stalni: neki oblik unutrašnje energije
- ovdje: transformacije električne energije!

2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

3

Zašto skladištiti energiju?

1. istovremenost potrošnje i proizvodnje električne energije
2. povremena nedostupnost pojedinih energenata

2007.

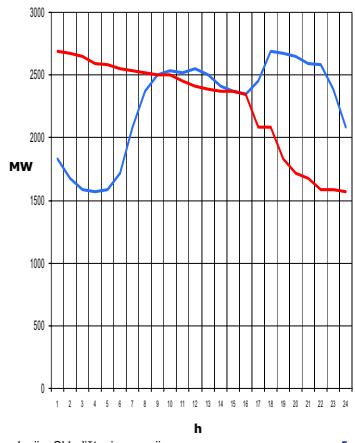
Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

4

Zašto skladištiti energiju? (2)

1. istovremenost potrošnje i proizvodnje električne energije

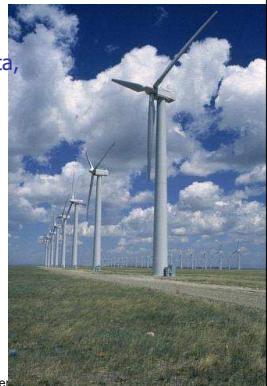
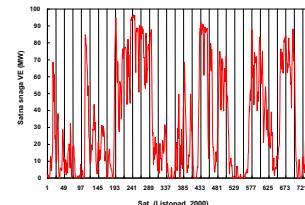
- smanjenje ulaganja u vršna postrojenja
- pouzdanost opskrbe
- kvaliteta električne energije



Zašto skladištiti energiju? (3)

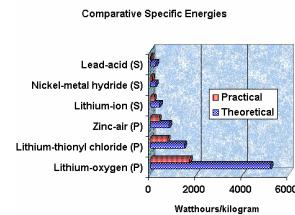
2. povremena nedostupnost nekih energetika

- Sunčev zračenje, vjetar, voda
- spremnik: proizvodi kad nema energenta, skladišti kad je dostupan



Osnovne značajke spremnika energije

- gustoća energije (volumna ili masena)
 - $e = E_s/m$ [J/kg] ili $e = E_s/V$ [J/m³]
 - E_s – energija sadržana u spremniku



- trajanje skladištenja
 - pogonski ciklus spremnika energije sastoji se od tri dijela:
 - punjenje (τ_c)
 - skladištenje (τ_s)
 - pražnjenje (τ_d)

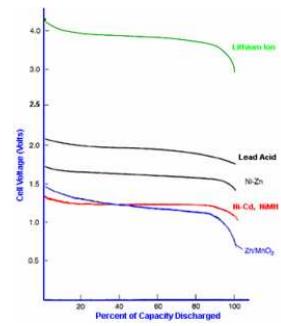
Osnovne značajke spremnika energije (2)

• učinkovitost skladištenja

- omjer energije koja napusti spremnik za vrijeme pražnjenja i energije koja uđe u spremnik za vrijeme punjenja

$$\eta_s = E_d/E_c = 1 - E_g/E_c,$$

E_g - energija gubitaka



• brzina punjenja/praznjenja

- količina energije u jedinici vremena koja ulazi/izlazi iz spremnika
- punjenje (charge): $\dot{e}_c = dE_c/dt$
- pražnjenje (discharge): $\dot{e}_d = dE_d/dt$

2007. Energijeske tehnologije: Skladištenje energije 7

Korišteni oblici energije

- elektromagnetska potencijalna energija
 - elektrokemijska
 - magnetska
- mehanička energija
 - kinetička
 - gravitacijska potencijalna
- unutrašnja kalorička energija
 - plin pod tlakom

2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

9

Elektrokemijska energija

- elektročna potencijalna energija na razini molekula
- spremnici
 - akumulatori
 - punjive baterije
 - reverzibilne gorivne ćelije
 - superkondenzatori



10

Akumulatori i punjive baterije

- akumulatori i baterije (eng. battery)
- baterija – skup galvanskih elemenata

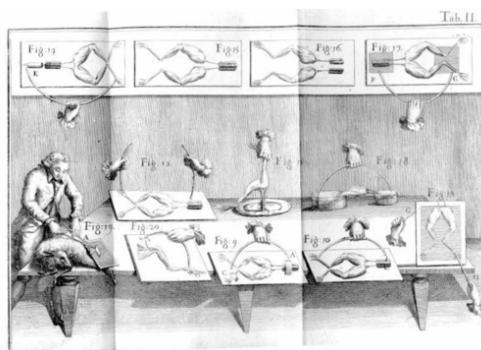


2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

11

Galvanski elektricitet



2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

12

Galvanski spremnici

- galvanski članci kojima je elektrokemijsko djelovanje reverzibilno
 - kad se baterija/akumulator prazni, teče tzv. galvanska struja
 - prilikom punjenja, električna struja iz vanjskog izvora teče u obratnom smjeru od galvanske
- izvedbe
 - olovni akumulator
 - NiCd baterija
 - NiMH baterija
 - Li-ion baterija
 - ...

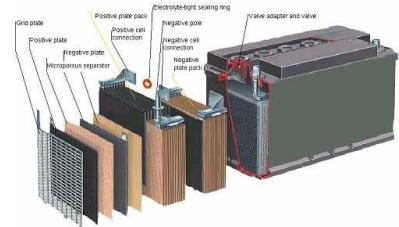
2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

13

Olovni akumulator

- konstruiran 1859. godine, u najširoj upotrebi
- napunjeni akumulator sastoji se od
 - pozitivne elektrode kojoj je aktivna masa olovni dioksid PbO_2
 - negativne elektrode kojoj je aktivna masa spužvasto olovo Pb
 - elektrolita – sumporne kiseline H_2SO_4 , razrijedjene destiliranim vodom

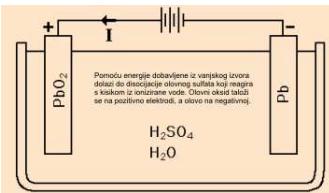
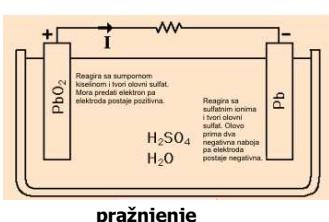


2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

14

Olovni akumulator (2)



2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

15

Olovni akumulator (3)

- prilikom pražnjenja, za dvije molekule utrošene sumporne kiseline (jedna na anodi, jedna na katodi), dva električna naboja prijeđu kroz članak od negativne na pozitivnu elektrodu
- na objema elektrodama nastaje olovni sulfat
- $U = E - IR_U$
- $I = E/(R_U + R_T)$
- $I = N_e F$

 N_e – broj molova elektrona u sekundi [mol/s] F – Faradayeva konstanta (električni naboje sadržan u jednom molu elektrona, 96487 C/mol)

2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

16

Zadatak 1: Olovni akumulator

12 V olovni akumulator pri određenom opterećenju daje struju jakosti 60 A. Potrebno je izračunati trenutnu snagu koju akumulator daje i potrošnju sumporne kiseline u g/s.

$$U = 12 \text{ V}$$

$$I = 60 \text{ A}$$

$$P = ?$$

$$dm_{\text{H}_2\text{SO}_4}/dt = ?$$

$$\text{Trenutna snaga } P = UI = 720 \text{ W}$$

Za svaki mol H_2SO_4 utrošen na katodi, iz katode se oslobode dva elektrona te se jedan mol H_2SO_4 potroši na anodi.

Potrošnja H_2SO_4 određena je sljedećom jednadžbom

$$N_{\text{H}_2\text{SO}_4} = N_e = I/F [\text{mol/s}] \\ = 60[A] / 96487 [\text{C/mol}]$$

$$= 6,22 \cdot 10^{-4} \text{ mol/s}$$

$$m_{\text{H}_2\text{SO}_4} = N_{\text{H}_2\text{SO}_4} M_{\text{H}_2\text{SO}_4} [\text{g/s}] = 6,22 \cdot 10^{-4} [\text{mol/s}] (2+32+4 \cdot 16) [\text{g/mol}] \\ = 0,061 \text{ g/s}$$

2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

17

Podjela akumulatora

• prema namjeni

- napajanje potrošača
- pokretanje motora
- pogon vozila

• prema ciklusu

- starteri
- deep - cycle

• prema izvedbi

- mokri
- gel
- silikatno staklo

2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

18



Punjive baterije

• nikal-kadmijska baterija

- najveći broj punjenja i pražnjenja (više od 1500 ciklusa),
- niska gustoća energije
- memorijski efekt, ali smanjen zahvaljujući razvoju
- kadmij je otrovan, pa predstavlja opasnost po okoliš
- katoda: nikal
- anoda: kadmij

• nikal-metal hidridna baterija

- slične NiCd, ali je anoda hidridna legura, pa je manje štetna po okoliš
- može imati nekoliko puta veći kapacitet od NiCd baterije iste veličine
- manje izražen memorijski efekt
- koristi se u hibridnim vozilima, npr. Toyota Prius i potrošačkoj elektronici

2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

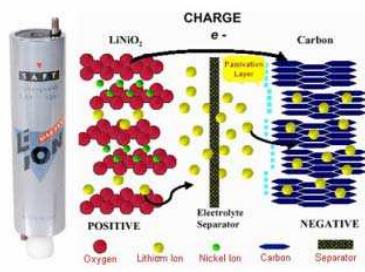
20



Punjive baterije (2)

• litij-ionska baterija

- velika gustoća energije
- posve uklonjen memorijski efekt
- katoda: LiCoO_2 , LiMn_2O_4 , LiNiO_2 ili Li-Ph
- anoda: ugljik
- primjena: laptop, mobitel, MP3 playeri...



2007.

Energijeske

Photo Courtesy of SAFT America



- 100 000 km vožnje s Li-ion baterijom
- 400 km po punjenju
- nekoliko tisuća Li-ionskih baterija

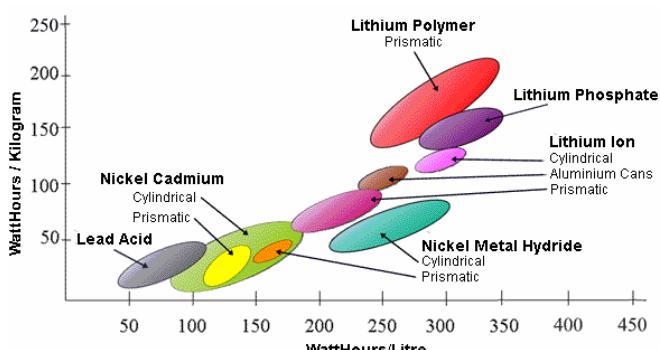
<http://www.teslamotors.com/index.php>

2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

22

Baterije i olovni akumulator - usporedba



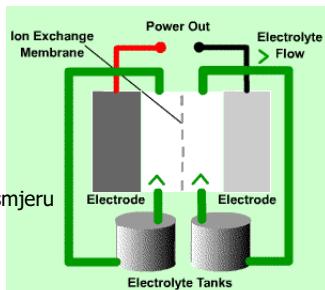
2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

23

Reverzibilne gorivne čelije

- Proces u svakoj gorivoj čeliji može biti reverzibilan
- 'pražnjenje': u reakciji tvari A i B proizvodi se električna energija i tvar C
- 'punjenje': uz potrošnju električne energije i tvari C proizvode se tvari A i B
- reverzibilnost
=>način skladištenja energije



problem: niska učinkovitost u jednom smjeru

2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

24

Superkondenzatori

- energija pohranjena u kondenzatoru

$$E = \frac{CU^2}{2}$$

- razlike prema konvencionalnom kondenzatoru

- velika površina ploča
- mali razmak među pločama
- kapacitet nekoliko tisuća F!

- prednosti u odnosu na baterije

- brže unjenje i pražnjenje,
- nema kemijskih reakcija – veća trajnost materijala i veći broj ciklusa
- veći raspon napona
- mogućnost čestih pulseva energije



2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

25

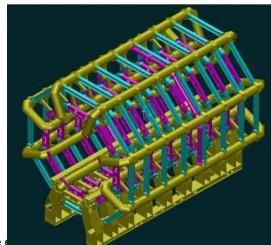
Magnetski spremnici energije

- energija magnetskog polja dana je formulom

$$E = \frac{LI^2}{2}$$

- L induktivitet [H],
– I jakost struje [A]

- skladištenje magnetske energije zasniva se na supravodičima



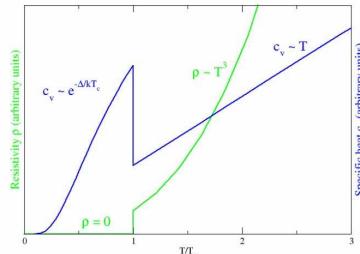
2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

Supravodiči

- materijali koji na dovoljno niskim temperaturama gube električni otpor i pritom iz svoje unutrašnjosti istiskuju magnetska polja
- priroda supravodljivosti je kvantna

- električni otpor vodiča posljedica je raspršenja elektrona u gibanju na primjesama i drugim defektima kristalne rešetke
- povezivanjem elektrona u parove raspršenje postaje nedjelotvorno i javlja se supravodljivost
- zbog pada električnog otpora na nulu, električna struja može bez gubitaka teći supravodljivim krugom

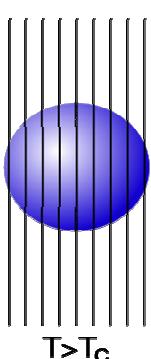
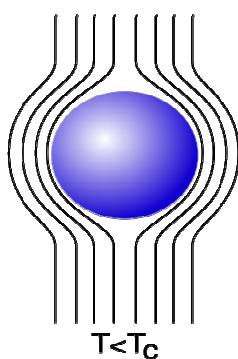


2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

27

Meissnerov efekt

B $T > T_c$ **B** $T < T_c$

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

28



Ograničenja supravodiča

- temperatura, magnetska indukcija, struja i frekvencija
 - Hg 4,16 K
 - organski spojevi – Nb₃Sn, 23 K, 30 T
 - visokotemperaturna supravodljivost – anizotropni keramički materijali, 125 K (-148°C!)
 - hlađenje ukapljenim dušikom umjesto helijem!

2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

30

Supravodiči i skladištenje energije

- magnetsko polje istosmjerne struje u supravodljivoj zavojnici
- magnetska indukcija do 15 T
- pohranjena energija 1- 200 MWh
- velika trajnost, uz osiguranje hlađenja

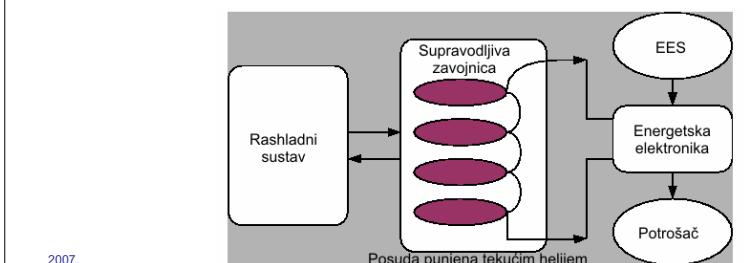
2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

31

Supravodiči i skladištenje energije (2)

- sustav se sastoji od tri dijela:
 - supravodljiva zavojnica
 - energetska elektronika
 - hladioc
- ispravljač/izmjerenjivač ispravlja izmjeničnu struju i izmjenjuje istosmjernu struju (gubici 2-3%)



Prednosti

- električna energija je gotovo trenutno raspoloživa
- visoka učinkovitost, oko 85%
- nepokretni dijelovi => pouzdanost

2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

33

Načini skladištenja energije

skladištenje

- elektromagnetske potencijalne energije
- mehaničke energije
- unutrašnje kaloričke energije

2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

34

Spremnici mehaničke energije

- spremnici kinetičke energije
- spremnici gravitacijske potencijalne energije

2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

35

Spremnik kinetičke energije

- pohranjuje energiju kretanja
- baziraju se na rotacijskom gibanju



2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

Zamašnjak

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2$$

- I – moment inercije
- ω – kutna brzina

- naprezanje najveće na rubovima, drugdje je podopterećen
- trajan
- velika gustoća energije

2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

37

Način rada sustava sa zamašnjakom

- punjenje skladišta
 - električni motor pokreće zamašnjak
 - akumulira se energija rotacije
- praženjenje
 - generatorski režim rada
 - zamašnjak pokreće rotor generatora
 - generator napaja potrošače električnom energijom

2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

38

Razvoj sustava sa zamašnjakom

- sve privlačniji razvojem novih materijala i tehnologija

čelik 24 Wh/kg
azbest 320 Wh/kg
 Al_2O_3 513 Wh/kg

- razvoj: materijali, eksperimenti s oblicima

2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

39



Flywheel Technology Development Approach

Glenn Research Center

System Application Challenges

- Power/Momentum Mgmt.
- High Specific Energy
- Efficiency
- Safety
- High Specific Power
- Deployment
- System Integration

Component Technology Development Challenges

- Rotors
- Magnetic Bearings
- Motor/Power Electronics
- Systems/Controls

Flight Systems



Integrated System Demonstrations

- Power Momentum Mgmt.
- Energy Density
- Efficiency

Spremniči gravitacijske potencijalne energije

- u gravitacijskom polju

$$W_{\text{pot}} = mgh$$

- 1 t na 10 m => $E_p = 0,0273 \text{ kWh}$



2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje

Spremniči gravitacijske potencijalne energije (2)

- radi se o skladištenju vodnih snaga
- reverzibilna hidroelektrana



2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

Reverzibilna hidroelektrana

- koriste se dva bazena – gornji i donji
 - ili konfiguracija terena omogućava prirodne spremnike, ili se donji spremnik ukopava
- postrojenje može raditi kao elektrana
 - voda pokreće turbinu
 - turbina okreće generator
 - ... i kao pumpa
 - generator se prebaci u motorski režim rada
 - turbina služi kao pumpa

2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

43

Reverzibilna hidroelektrana (2)

- gubici
 - dio vode zaobilazi lopatice turbine
 - pretvorba u toplinu zbog trenja
 - isparavanje vode iz bazena
- ukupna učinkovitost do 85%

2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

44

Reverzibilna hidroelektrana (3)

- prednosti
 - poznata tehnologija
 - visoka pouzdanost
 - niski troškovi održavanja
 - brzi start (1/2-3 min)
- nedostaci
 - veliko zauzeće zemljišta (skupo, sve skuplje)
 - dugotrajna izgradnja

2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

45

Zadatak 2: Reverzibilna hidroelektrana

Srednji godišnji protok reverzibilne hidroelektrane jednak je instaliranom protoku i iznosi $55 \text{ m}^3/\text{s}$, a neto pad 510 m . Učinkovitost pretvorbe mehaničke u električnu energiju iznosi 85%, a učinkovitost pumpanja 60%. Faktor opterećenja hidroelektrane iznosi 0,285. U razdobljima niske cijene električne energije sva utrošena voda prebacuje se iz donjeg u gornji bazen.

1. Kolika je vršna snaga elektrane?
2. Koliko se električne energije za pumpanje potroši iz mreže?
3. Kolika je učinkovitost čitavog ciklusa skladištenja energije?
4. Koliki je najmanji volumen spremnika potreban?

$$Q_{\text{sr}} = 55 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$h_{\text{neto}} = 510 \text{ m}$$

$$\eta_{\text{m_el}} = 0,85$$

$$\eta_{\text{pumpe}} = 0,6$$

$$f = 0,285$$

2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

46

Zadatak 2: Reverzibilna hidroelektrana

$$\begin{aligned} P_{el} &= \eta_{m_el} P_{meh} = \eta_{m_el} \rho g h_{neto} Q = \\ &= 0,85 \cdot 1000[\text{kg/m}^3] \cdot 9,81[\text{m/s}^2] \cdot 510[\text{m}] \cdot 55[\text{m}^3/\text{s}] \\ &= 234 \text{ MW} \end{aligned}$$

$$E_{el_god} = P_{el} t_{el} = 234 \text{ [MW]} \cdot 0,285 \cdot 365 \cdot 24 \text{ [h]} = 584 \text{ GWh}$$

da bi se ta energija proizvela, u gornjem spremniku treba biti akumulirano

$$E_{gornji} = E_{el_god} / \eta_{m_el} = 584 / 0,85 = 687 \text{ GWh}$$

akumulacija energije u gornjem spremniku postignuta je pomoću pumpi, čija je efikasnost 60% električna energija potrebna za pogon pumpi iznosi

$$E_{el_p} = E_g / \eta_p = 687 \text{ [GWh]} / 0,6 = 1145 \text{ GWh}$$

2007.

Energjske tehnologije: Skladištenje energije

47

Zadatak 2: Reverzibilna hidroelektrana

učinkovitost ciklusa skladištenja energije

$$\begin{aligned} \eta_{uk} &= E_{dobiveno}/E_{ulozeno} \\ &= E_{el}/E_{el_p} \\ &= 584 / 1145 \\ &= 0,51 \end{aligned}$$

potrebnii volumen spremnika

$$\begin{aligned} V &= Q \cdot t \\ &= 55 [\text{m}^3/\text{s}] \cdot 0,285 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 [\text{s}] \\ &= 494 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

2007.

Energjske tehnologije: Skladištenje energije

48

Načini skladištenja energije

skladištenje

- elektromagnetske potencijalne energije
- mehaničke energije
- unutrašnje kaloričke energije

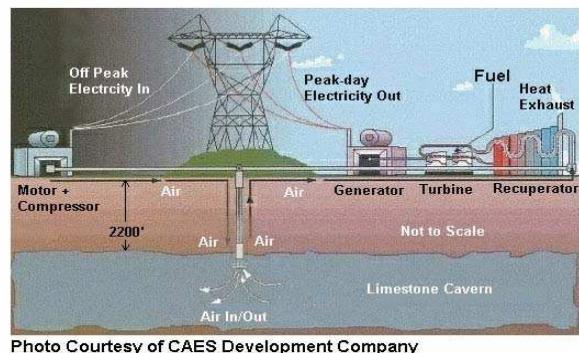
2007.

Energjske tehnologije: Skladištenje energije

49

Spremniči unutrašnje kaloričke energije

- spremnici plina pod tlakom



2007.

Skladištenje komprimiranog zraka

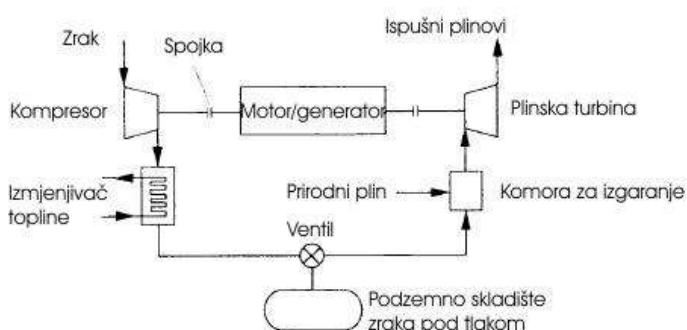
- u tlu postoje ili se mogu napraviti spremnici zraka – rudnici, podzemni džepovi
 - u razdobljima niske potrošnje (i cijene) električne energije, kompresorom se tlači zrak u podzemno spremište
 - najčešće:
 - zrak koji izlazi iz turbine pohranjuje se komprimiran u spremnik
 - kad je potrebno, vraća se u turbinu
 - energija predana sustavu pohranjuje se u obliku unutrašnje kaloričke energije plina
- => bolje iskorištenje goriva

2007.

Energjske tehnologije: Skladištenje energije

51

Skladištenje komprimiranog zraka (2)



2007.

Energjske tehnologije: Skladištenje energije

52

Komercijalna postrojenja

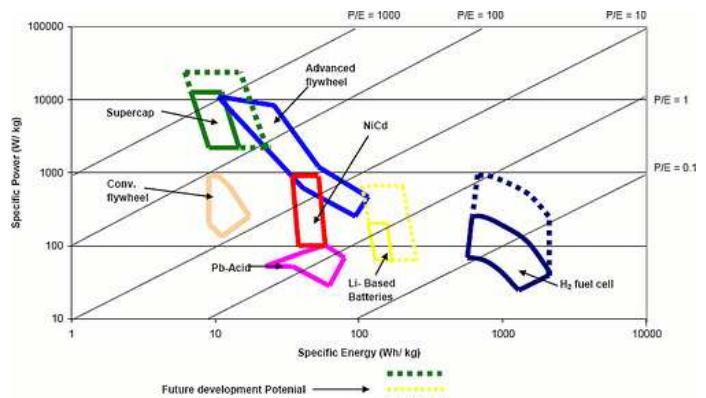
- danas u svijetu postoje dva ovakva spremnika
 - u Njemačkoj, 290 MW
 - u SAD, 100 MW

2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

53

Usporedba - snaga i energija po kg

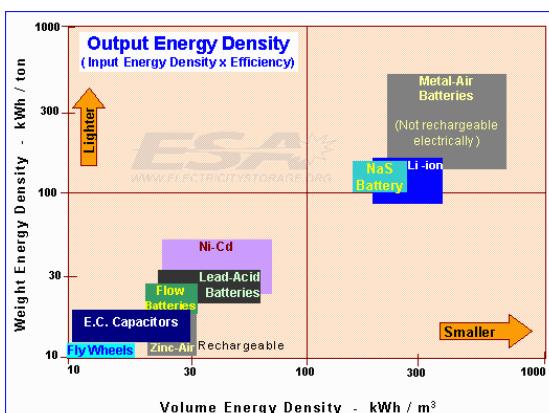


2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

54

Usporedba - volumna i masena gustoća energije

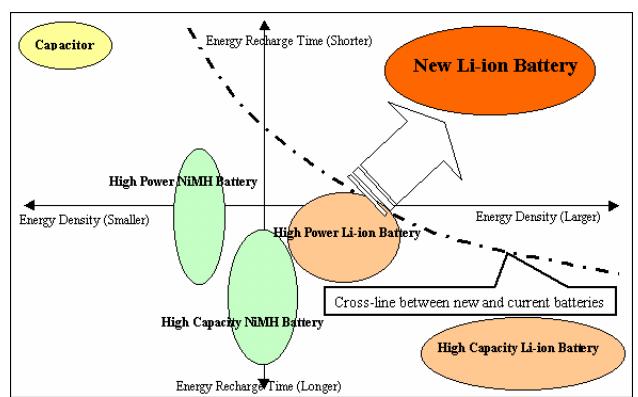


2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

55

Usporedba - brzina punjenja i gustoća energije

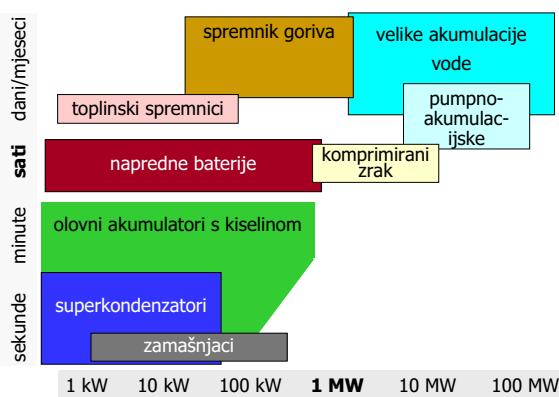


2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

56

Vrijeme i snaga



2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

57

Zaključak

- postoje različiti načini skladištenja energije
- svaki način ima svoje prednosti i nedostatke
- najvažniji elementi pri izboru su
 - količina energije
 - gustoća energije
 - brzina punjenja i pražnjenja
 - trajnost pohrane energije
 - učinkovitost punjenja/praznjenja
 - cijena, trajnost, održavanje

2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

58

Zadatak

Crpno-akumulacijska hidroelektrana proizvodi 100 MW_e tijekom 4h. Gornja akumulacija hidroelektrane smještena je 200 m iznad rijeke. Stupanj je djelovanja crpenja vode 0,65, a proizvodnje električne energije 0,85. Odredite:

- električnu energiju (MWh) potrebnu za dnevno crpenje vode u gornju akumulaciju kako bi hidroelektrana proizvodila 400 MWh dnevno;
- volumen vode koja se dnevno prebacuje u gornju akumulaciju kako bi se ostvarila predviđena proizvodnja hidroelektrane (400 MW).

Računajte sa zadanom visinom, 200 m, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ i gustoćom vode 10^3 kg/m^3 .

2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

59

Zadatak - nastavak

a) $W_p = \frac{100 \text{ MW} \cdot 4 \text{ h}}{0,65 \cdot 0,85} = 723,98 \text{ MWh/dan}$

b) eksergija (potencijalna energija) vode u akumulaciji mora biti tolika da se u hidroelektrani dnevno proizvede 400 MWh. Kad bi stupanj djelovanja hidroelektrane bio jednak jedan, to bi bila tražena eksergija vode. No, on je jednak 0,85. Eksergija vode u akumulaciji mora stoga biti jednak:

$$\frac{400 \text{ MWh}}{0,85} = 470,59 \text{ MWh} = 1,694 \cdot 10^{12} \text{ J.}$$

Masa je vode dakle

$$m = \frac{\text{eksrgija}}{gH} = 8,63 \cdot 10^8 \text{ kg, a volumen } V = 8,63 \cdot 10^5 \text{ m}^3.$$

2007.

Energijeske tehnologije: Skladištenje energije

60