



Sandro NIŽETIĆ, dipl. ing.

SOLARNE DIMNJAČNE ELEKTRANE - VIZIJA PRETVORENA U STVARNOST

Solarne dimnjačne elektrane (eng. solar chimneys) predstavljaju novi koncept u pretvorbi Sunčeve (toplinske) energije u električnu. Električna energija proizvodi se iz besplatne Sunčeve energije pomoću posebno izvedenog postrojenja koje radi prema vrlo jednostavnom fizikalnom načelu.

Načelo rada solarnih dimnjačnih elektrana

Kao što je prikazano na il. 1, tijekom dana Sunčevo zračenje prodire kroz stakleni kolektorski krov solarne dimnjačne elektrane pri čemu grije tlo ispod kolektorskog krova i s tla zrak. Okolni zrak radijalno struji kroz kolektor prema ulazu u središnji dimnjak. Taj se, razmjerno hladan okolni zrak prolaskom kroz kolektor grije i postaje lakši od okolnog zraka. Kao posljedica promjene temperature zračne struje javlja se razlika u gustoći vanjskog i unutarnjeg zraka koji ispunjava dimnjak u sredini kolektorskog krova. Zbog toga nastaje i održava se strujanje zraka prema središnjem dijelu postrojenja, tj. prema središnjem dimnjaku.

Zagrijani zrak pred ulazom u dimnjak ima određenu radnu sposobnost (eksergiju), koja se jednim (manjim) dijelom troši na koristan učinak, odnosno na pokretanje turbina (mehanička energija), a većim dijelom na podizanje još lakšeg zraka iza dimnjaka. Prolaskom zračne struje kroz turbinski dio (pri čemu se pokretanjem generatora proizvodi električna energija) zrak se dalje podiže unutar dimnjaka i izlazi manje-više istom brzinom u atmosferu. Postrojenje može raditi i noću, ali sa smanjenim kapacitetom, ovisno o količini akumulirane Sunčeve energije u tlu tijekom dana.

Budući da je načelo rada SDE analogno načelu rada klasične hidroelektrane, pojedini autori takva postrojenja nazivaju 'pustinjskim hidroelektranama'.

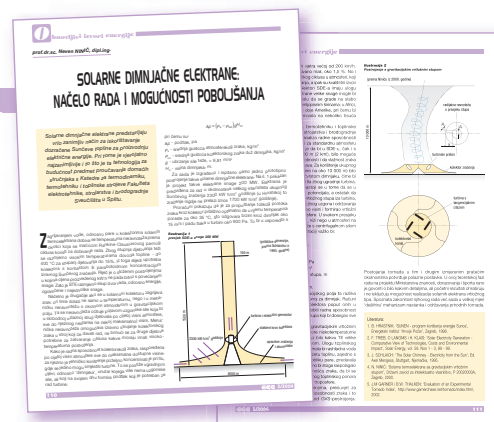
Ukupna učinkovitost takvih postrojenja je iznimno niska, ali je važna prednost u tome što je pogonski 'energent' besplatna Sunčeva energija pa cijela investicija u konačnici ima smisla. Naime, problem male ukupne učinkovitosti leži u učinkovitosti dimnjaka, koja iznosi od 1 - 3% prema sljedećem izrazu [1]:

$$\eta_d = \frac{P_{uk}}{Q_{kd}} = \frac{V \Delta p_d}{m c_p (T_d - T_{ok})} = \frac{gH}{c_p T_{ok}}$$

pri čemu su:

P_{uk} - nazivna snaga postrojenja, W

Q_{kd} - dovedena toplina u kolektoru, W



Prisjetimo se, o teoretskim osnovama rada SDE bilo je riječi u članku prof. Ninića u EGE 3/2004

V - volumni protok zraka, m³/s

Δp_d - podtlak na dnu dimnjaka, Pa

m - maseni protok zraka, m³/s

c_p - specifični toplinski kapacitet zraka, J/(kg K)

T_{ok} - temperatura okolnog zraka, K

T_d - temperatura zraka pred ulazom u dimnjak, K

g - gravitacijska konstanta, m/s²

H - visina dimnjaka, m.

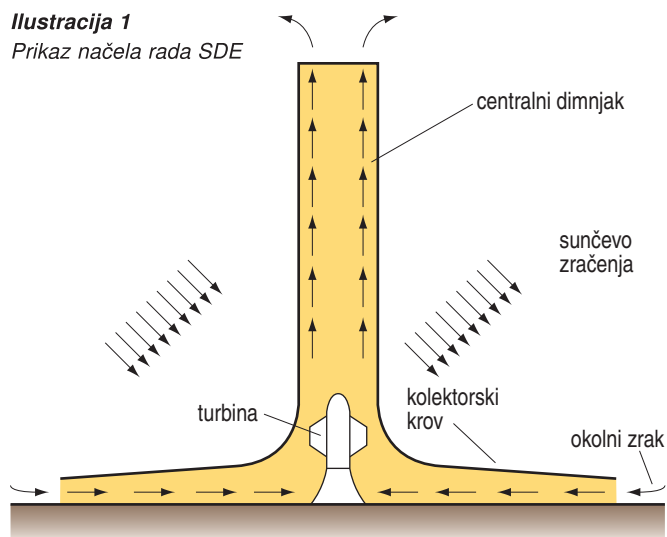
Kako se može vidjeti na temelju izraza, učinkovitost dimnjaka najviše ovisi o visini dimnjaka te raste sa visinom, a ograničena je na maksimalno 1500 m (zbog tehnokonske izvedivosti). Kao primjer se u tablici 1 nalaze rezultati proračuna učinkovitosti pojedinih komponenti i postrojenja u cjelini ovisno o predviđenoj nazivnoj snazi postrojenja [1].

Općenito o solarnim dimnjačnim elektranama

Glavna prednost takvog načina proizvodnje električne energije je u tome što ne postoji štetan utjecaj na okoliš u bilo kojem obliku (nema korištenja fosilnih goriva, nema otpadne topline, postrojenje se gradi iz reciklirajućih materijala i dr).

Temeljni preduvjet za gradnju postrojenja je dovoljan intezitet Sunčevog zračenja. Naime, da bi se za razmatranu lokaciju ekonomski opravdala gradnja postrojenja potrebna je minimalna insolacija od 2000 kW h/m² godišnje. Najjužniji dijelovi hrvatske obale imaju insolaciju najviše 1600 kW h/m² godišnje pa gradnja solarnih tornjeva u

Ilustracija 1
Prikaz načela rada SDE





Tablica 1

Ukupna učinkovitost postrojenja SDE ovisno o nazivnoj snazi

nazivna snaga, MW	5	30	200
visina dimnjaka, m	445	750	1500
promjer dimnjaka, m	54	84	175
promjer kolektora, m	1110	2220	4000
učinkovitost kolektora, %	56,2	54,7	52,6
učinkovitost dimnjaka, %	1,4	2,3	3,1
učinkovitost turbine, %	77,0	78,0	80,8
učinkovitost cijelog postrojenja, %	0,63	1	1,31

Hrvatskoj za sada nije ekonomski rentabilna. Pogodne lokacije za gradnju takvih postrojenja su pustinjska područja s dovoljnom insolacijom. Takva područja mogu se naći u Africi, Bliskom istoku, Australiji i dr. gdje je osigurano više od 2200 kW h/m² godišnje. Od ukupno raspoložive svjet-ske površine s pogodnom insolacijom, najviše zauzimaju nerazvijene, tj. siromašne zemlje. Upravo se komercijalizaci-jom postrojenja SDE može pomoći nerazvijenim zemljama. Jedan od dobrih primjera je Afrika koja bi mogla, osim zadovoljenja svojih potreba, električnu energiju izvoziti, a samim time ostvariti ekonomsku stabilnost i elektroener-getsku neovisnost. Prema provedenim analizama, tako proizvedena električna energija mogla bi se transportirati na velike udaljenosti pri čemu bi na tržištu po cijeni još bila konkurentna zbog malih gubitaka transporta. Na primjer, gubici tijekom transporta električne energije od Sahare do središnje Europe (udaljenost oko 3500 km) iznosili bi najvi-še 15% što je u odnosu na veliku udaljenost prihvatljivo.

Prva ideja za proizvodnju električne energije na takav način iznesena je 1931. godine, da bi se početkom osamde-setih godina pokrenuo ozbiljan i zahtjevan projekt. Konačan cilj projekta je bila gradnja prvog prototipnog postrojenja i prikupljanje eksploatacijskih karakteristika čime bi se potaknula komercijalizacija postrojenja. U to vrijeme projekt je prepoznala i podržala njemačka vlada te u njega uložila oko 15 milijuna (tadašnjih) DEM kroz razdoblje od 10 go-dina. Izgrađeno je i prototipno postrojenje u Španjolskoj (Manzanares) čime je projekt uspješno priveden kraju. Gradnjom prototipa napravljen je važan korak čime su se osigurali svi tehnički preduvjeti za gradnju prvog komer-cijalnog postrojenja.

Dugogodišnja ispitivanja i stečena iskustva na prototi-pu rezultirala su početkom gradnje prvog komercijalnog postrojenja SDE u Australiji. Dugo su vođene polemike o gradnji postrojenja zbog iznimno visokih troškova gradnje, ali i različitih energetske lobija kojima ne pogoduje rea-lizacija takvog projekta. Potkraj 2002. godine, australska je vlada odobrila financiranje polovice ukupne investicije čime je formalno započela realizacija projekta.

Početak gradnje prvog komercijalnog postrojenja nije ostao nezapažen u svijetu. Pojavile su se zainteresirane zemlje kao što su Maroko, Indija, Egipat, Kina i dr. u kojima je tvrtka EnviroMission već započela analize mogućnosti gradnje takvih postrojenja.

Prema trendu razvoja energetske situacije u svijetu, može se očekivati da će u bliskoj budućnosti SDE zauzi-mati svoj udio u ukupnoj proizvodnji električne energije na svjetskoj razini zbog ekološke prihvatljivosti, konkurentne

cijene proizvedene električne energije i dugog vijeka traja-nja postrojenja uz niske troškove održavanja.

Prototipno postrojenje

Gradnja prvog prototipnog postrojenja započela je 1980, a dovršena 1982. godine, nakon čega su provedena ispi-tivanja eksploatacijskih karakteristika do 1990. godine. Izgled postrojenja prikazan je na il. 2 [2]. Kolektorski krov je bio kombinirane izvedbe od stakla i posebne plastične folije. Površina prekrivena plastičnom folijom iznosila je 40 000, a staklom 6000 m². Ukupni troškovi gradnje pro-totipa iznosili su nešto manje od 1 milijun USD. Osnovne tehničke karakteristike postrojenja prikazane su u tablici 2 [2].

Tijekom pokusnog rada ispitani su različiti profili tur-binskih lopatica i načini smještaja turbinskih agregata. Pri brzini od 2,5 m/s turbine su započinjale rad, sve do maksimalno predviđene brzine 12,0 m/s. Za vrijeme ek-sploatacije uočeno je da su postrojenja vrlo stabilna u pogledu fluktuacija napona, zbog čega su daleko povoljnija od vjetroturbina. Kod takvih postrojenja stabilizacija mreže može se provesti bez većih zahvata.

Ispitani su kolektorski krovovi od različitih materijala, a kao najbolji se pokazao tzv. tetlar (polivinil-fluorid) s deblji-nom folije 1,8 mm i predviđenom trajnošću 10 - 12 godina. Folija je polagana na čeličnu konstrukciju rastera 6 × 6 m, a na sredini svakog rastera postavljan je uteg koji je služio kao uravnoteženje za vrijeme rada postrojenja, kada je strujanje zraka intezivno. Uz samu blizinu središnjeg di-mnjaka, umjesto plastične folije, postavljano je jednostruko ostakljenje debljine 4 mm jer su pred dimnjakom najveći gubici topline (zrak je najtopliji).

Dimnjak je bio izveden od sekcija, cilindričnog obli-ka trapezoidnog profila stijenke i debljine lima 1,25 mm. Duljina svake sekcije iznosila je 8,6 m, a nakon svaka 4 m postavljane su čelične ukrute. Pri samom dnu središnjeg



Ilustracija 2

Prototipno postrojenje SDE u Manzanaresu

Tablica 2

Osnovne tehničke karakteristike prototipnog postrojenja SDE u Manzanaresu

visina dimnjaka, m	194,6
promjer dimnjaka, m	10,2
promjer kolektorskog krova, m	244,0
srednja visina kolektorskog krova, m	1,85
broj turbinskih agregata	4
prosječni porast temperature zraka, K	20
nazivna snaga, kW	50



dimnjaka postavljani su čelični profili koji su služili kao potpora, tj. kao uležištenje najdonje sekcije.

Praćenje rada postrojenja bilo je osigurano sa 180 senzora koji su svake sekunde prikupljali podatke o radnim parametrima. Od 1986. do 1989. godine postrojenje je radilo oko 8611 h, približno 8,9 h/d. Osim dnevnog rada, postrojenje je radilo i noću, ali s manjim intenzitetom što je bilo osigurano posebno izvedenom akumulacijom topline. Ona je bila izvedena s crnim plastičnim cijevima koje su bile ispunjene vodom i polagale su se u zemlju ispod kolektorskog krova. Tijekom dana se Sunčevim zračenjem grijala voda u cijevima, a tijekom noći kada se zrak u kolektoru polako hladio ulogu izvora topline preuzimala je akumulacija. Time je bio osiguran neprekidan rad postrojenja, ali s manjom proizvedenom snagom zbog niže temperature kolektorskog zraka.

Prvo komercijalno postrojenje u Australiji

U Australiji je 2003. godine na pustinjском području Mildura nedaleko od Melbournea australska tvrtka EnviroMission uz pomoć stručnjaka njemačke tvrtke Schlaich Bergermann und Partner započela je gradnju prvog komercijalnog postrojenja nazivne snage 200 MW. Njegove tehničke karakteristike prikazane su u tablici 3 [4].

Dimnjak visine 1000 m predstavljat će najvišu građevinu na svijetu, ali i svojevrsni tehnički podvig i iskušenje. Prema ranije opisanom načelu rada, 32 turbine proizvodit će 700 - 800 GW h električne energije godišnje uz 24-satni rad postrojenja pri insolaciji 2300 kW h/m² godišnje. Temeljem provedenih proračuna i analiza, proizvedena energija bit će dostatna za pokrivanje ukupnih potreba za električnom energijom za oko 200 000 kućanstava. Ukupna vrijednost investicije iznosi oko 1 milijardu AUD od čega polovicu pokriva australska vlada. Kraj izgradnje postrojenja predviđen je za 2008. godinu. Cijena proizvedene električne energije predviđa se približno oko 0,07 EUR/(kW h), što ovisi o kamatama, predviđenom vijeku trajanja, godišnjem rastu i dr. Središnji dimnjak bit će izgrađen od betona (predviđa se utrošak konstrukcijskog betona oko 700 000 m³) jer na tako razmjerno velikim visinama nerijetko pušu jaki vjetrovi brzinom i do 50 m/s. Naime, problem predstavljaju velika vrtloženja zraka na tim visinama koja za trenutak mogu pretvoriti dimnjak u hrpu materijala. Na il. 3 [3] prikazana je računalna simulacija dimnjaka s vidikovcem.

U odnosu na postrojenje u Manzanaresu, predviđeni su i neki novi detalji. Naime, osim primarne namjene (proizvodnja električne energije), postrojenje će predstavljati i svojevrsnu turističku atrakciju. Predviđen je prijevoz turističkih skupina od dna središnjeg dimnjaka do vidikovca smještenog na samom njegovom vrhu. Posebno uređena strojarница s turbinama moći će se razgledavati za vrijeme rada. Goleme površine ispod kolektorskog krova služit će kao staklenici za uzgajanje voća i povrća, a oni će se iznajmljivati.

Izgradnja takvog objekta predstavlja izazov za stručnjake i znanstvenike koji će morati predvidjeti sve okolnosti i moguće probleme u radu. Velika pomoć zasigurno će biti stečena iskustva na prototipnom postrojenju. Osim tehničkih problema, veliki problem predstavljaju i golemi troškovi koji su već u fazi prvih kalkulacija iznimno visoki. Iz spo-



Ilustracija 3
Detalj simulacije dimnjaka sa vidikovcem

Tablica 3

Osnovne tehničke karakteristike postrojenja SDE u Australiji

visina dimnjaka, m	1000,0
promjer kolektorskog krova, m	7000,0
ukupna učinkovitost, %	1,50
ukupna kolektorska površina, km ²	38,0
broj turbinskih agregata	32
nazivna snaga, kW	200

menutih, a i drugih razloga u Australiji su se pojavile struje koje se protive gradnji postrojenja. Kao glavne činjenice spominju se visoki troškovi koji će prema njima nadmašiti potencijalne dobiti. Nadalje, zamjera se što nije izgrađeno postrojenje srednje snage pa tek nakon prikupljenih iskustava postrojenje velike nazivne snage. Pojedinci ukazuju na probleme održavanja i čišćenja goleme kolektorske površine nakon pješčanih oluja i dr.

Unatoč svemu, gradnja postrojenja u fazama je započeta i Australija će tako postati prva zemlja koja će na takav jedinstven i prije svega ekološki način proizvoditi električnu energiju.

Što se radi na FESB-u?

Na Katedri za termodinamiku, termotehniku i toplinske strojeve Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu u završnoj je fazi projekt Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa pod nazivom 'Bitno smanjenje visine solarnih dimnjačnih elektrana', pokrenut 2002. godine pod vodstvom prof. dr. sc. Nevena NINIĆA, dipl. ing. Naime, glavni cilj projekta je 'uklanjanje' dimnjaka budući da je on 'crna' točka postojećeg postrojenja, a ujedno i glavni razlog razmjerno niske ukupne učinkovitosti postrojenja. Nova ideja je u zamjeni dimnjaka gravitacijskim vrtložnim stupom koji je u prirodi vrlo sličan tornadu. Razvijen je matematički model koji simulira složen proces u vrtložnom stupu, a u tijeku je eksploatacija modela uz analizu dobivenih podataka.

Literatura:

- [1] Jorg SCHLAICH: 'The Solar Chimney - Electricity from the Sun', Edition Axel Menges, 1995.
- [2] J. SCHLAICH, R. BERGERMANN, W. SCHIEL i G. WEINREBE: 'Design of Commercial Updraft Tower System - Utilization of Solar Induced Convective Flows for Power Generation', 2004.
- [3] G. WEINREBE: "Das Aufwindkraftwerk-Wasserkraftwerk der Wüste", 2004.
- [4] 'Power Towers', NewScientist, 31. July 2004.
- [5] Neven NINIĆ: 'Available Energy of the Air in Solar Chimneys and the Possibility of its Ground-Level Concretion', Solar Energy, 2005.
- [6] internetske stranice: www.solarmissiontechnologies.com, www.cdnarchitect.com, www.enviromission.com.au, www.sbp.de/en/fla/index.html, www.eren.doe.gov/sunlab