

ENERGIJA, NOVE MOGUĆNOSTI – 1. DIO

Među pojmovima koji neprestano odjekuju svjetskim medijima današnjice uz održivi razvoj svakako su i obnovljivi izvori energije. Kakve sve mogućnosti obnovljivih izvora energije danas imamo, te koliko su oni iskoristivi i isplativi piše nam profesor Ivica Aviani s Instituta za fiziku u Zagrebu. Članak ćemo objaviti u dva dijela – a u prvome će dijelu biti riječi o energiji samo: što je energija, kako je otkrivena, koliko nam je treba i kako je trošimo.

Ivica AVIANI, Zagreb

Povijest energije je povijest nastojanja čovjeka da prirodne sile usmjeri u svoju korist, da njihovo djelovanje pretvori u koristan rad. Prvo je čovjek krotio životinje i koristio snagu njihovih mišića, a zatim je zauzdao vodu i ukrao snagu vjetru. Upravo su upravljanje vodom i navodnjavanje doline Nila omogućili razvoj napredne civilizacije staroga Egipta. Vodeni tok pokretao je kotač, a kotač je vodu podizao na potrebnu visinu. Za navodnjavanje i za opskrbu vodom bilo je to od presudne važnosti. Sa stajališta fizike to su prvi primjeri pretvaranja kinetičke energije vode u potencijalnu. Takve naprave zalijevale su i višeće vrtove babilonske. Tehnologija upravljanja vodom svoj je vrhunac dosegla u staroj Grčkoj, o čemu svjedoči i Arhimedov vijak, a kasnije i u Rimu, gdje su sustavi vodoopskrbe razvijeni do savršenstva. Neki se od tih sustava koriste i danas – npr. splitski vodovod. Vodenice koje pokreću mlinove, preše ili brusno kamenje nalazimo u 11. stoljeću u cijeloj Europi. Energija vjetra koristi se na sličan način u vjetrenjačama, a vjetar je pokretao i brodove te omogućio otkrića novih kontinenata. Vodenice i vjetrenjače, preteče današnjih hidroelektrana i vjetroelektrana, postat će uskoro pogonski strojevi manufakturna, i mjesta na kojima će nicati nova naselja.

Sve do 18. stoljeća naša se civilizacija razvijala na bazi energije životinjskih i ljudskih mišića, te na kinetičkoj energiji vode i vjetra, dok se toplinska energija rabila samo za zagrijavanje. Možemo reći da se, sve do otkrića parnog stroja, razvoj civiliza-

cije u potpunosti temeljio na obnovljivim izvorima energije, te da čovjek korištenjem energije okoline nije narušavao prirodnu ravnotežu. Intenzivni razvoj civilizacije započeo je tek kada se to promijenilo, a čovjek je toplinsku energiju počeo pretvarati u koristan rad.

Prvi iskoristivi parni stroj izumio je Thomas Newcomen 1712. godine. Znalo se da vruća para ekspandira gurajući klip cilindra u jednom smjeru, no problem je bio povrat klipa u početni položaj. Newcomen je otkrio da to može ostvariti ako, nakon ekspanzije pare, u prostor cilindra uštrca hladnu vodu. Tada dolazi do nagle kondenzacije vodene pare i pada tlaka na vrijednost znatno ispod atmosferskog. Nastali podtlak vraća klip natrag u početni položaj. U Newcomenovom stroju klip se pokretao naprijed–nazad neprekidnim dodavanjem vruće pare i hladne vode. Ovaj se stroj koristio za pokretanje pumpe kojom se ispumpavala voda iz rudnika, posao koji je prije bio namijenjen konjskoj snazi. Stroj je zamjenjivao istovremeni rad 4 konja. Iako je korisnost stroja bila manja od 0,5 %, stroj je bio dobro prihvaćen jer je bio pouzdaniji i lakši za održavanje od konja. Shvativši da se hlađenjem ekspanzijskog cilindra vodom nepotrebno gubi puno toplinske energije, James Watt je 1769. dodao posebnu posudu za hlađenje i kondenzaciju pare, tzv. kondenzor. Time je višestruko poboljšao korisnost, pa je korisnost parnog stroja ubrzo porasla na 5 %.

Parni strojevi postajali su sve efikasniji i snažniji. Pokretali su brodove, željeznice, tvorničke strojeve. Ipak bili su preveliki i prebučni za obavljanje kućanskih poslova. Otkriće električne energije, njenog prijenosa na velike udaljenosti i načina korištenja, sasvim će promijeniti naš način života. Tome će se pridružiti otkriće motora s unutrašnjim sagorijevanjem, kod kojeg se toplina izgaranja nafte ili benzina pretvara u rad direktno, bez posredovanja vodene pare. Naš život sada je nezamisliv bez električne rasvjete, kućanskih aparata, automobila i aviona.

Unatoč izvanrednom tehnološkom razvoju, princip parnog stroja, kojim se iz topline dobiva koristan rad, odnosno energija, ostao je nepromijenjen do danas. Većinu energije danas dobivamo iz termoelektrana i nuklearnih elektrana koje rade na principu parnog stroja. Čak su i fuzijski reaktori budućnosti zamišljeni kao veliki parni strojevi. Značajnija tehnološka poboljš-

šanja u odnosu na Wattov parni stroj su uvođenje parne turbine, koja je zamijenila ekspanzijsku posudu, i povećanje radne temperature parnog kotla na oko 800 K, zahvaljujući novim izdržljivijim materijalima. Zbog toga je korisnost toplinskog stroja porasla na vrijednost od 40 %.

Današnji čovjek troši dvadeset puta više energije nego što mu treba za biološke potrebe, odnosno dvadeset puta više energije nego što je trošio prije 100 godina. Budući da se u zadnjih sto godina broj stanovnika udeseterostručio, ukupna potrošnja energije u zadnjih sto godina porasla je 200 puta! Zbog povećanih potreba za energijom zadnjih 100 godina intenzivno trošimo kemijsku energiju fosilnih goriva, onu koju su biljke u davnjoj prošlosti milijunima godina sakupljale od Sunca. To je zbog toga jer se najveći dio naše tehnologije još uvijek temelji na toplinskom stroju.

Toplinski stroj izgaranjem pretvara kemijsku energiju fosilnih goriva u toplinu, a toplina se koristi za zagrijavanje vodene pare i pokretanje parnih turbina, odnosno generatora. Izgaranjem se, međutim, stvara velika količina ugljikovog dioksida, veća od one koju biljke fotosintezom mogu potrošiti, čime se povećava koncentracija ugljikova dioksida u atmosferi. Danas znamo da je ugljikov dioksid odgovoran za efekt staklenika, odnosno za globalno zagrijavanje. Jedini izlaz su izvori energije koji ne stvaraju stakleničke plinove. Jedan od takvih izvora je nuklearno gorivo. Nuklearne elektrane najviše su se gradile nakon bliskoistočne krize sedamdesetih godina kada je došlo do velikog poremećaja opskrbe naftom i skoka njezine cijene. Primjerice, Francuska je izgradila toliko mnoštvo nuklearnih elektrana da one danas zadovoljavaju čak oko 80 % njenih energetske potreba. *Naftni šok* je pokrenuo i potragu za alternativnim izvorima energije, prije svega kako bi se smanjila ovisnost o nafti. Nakon krize sedamdesetih, slijedile su godine stabilnog razvoja, ali svi su izgledi da smo danas na pragu nove energetske krize. Doba jeftine nafte prošlo je zauvijek, a alternativni izvori energije postaju sve konkurentniji. Porasla je i ekološka osviještenost, kao i želja da se smanji emisija stakleničkih plinova. U međuvremenu je jako napredovala tehnologija. Zahvaljujući intenzivnom razvoju znanosti sintetizirani su materijali izvanrednih svojstava pomoću kojih možemo poboljšati efikasnost postojećih izvora i trošila energije, ali i uvoditi potpuno nove.

Što je energija?

Energija je svojstvo sustava, skalarna fizikalna veličina koja se mjeri u džulima ($1 \text{ J} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$). Kao takva ona je aditivna, a ukupna energija, tj. zbroj svih energija svih sustava u svemiru je konstantan. Može poprimiti različite oblike, pa tako može biti potencijalna, kinetička, toplinska, elektromagnetska, kemijska, nuklearna, energija mase. Energija je kvantizirana veličina, što znači da promjena energije ne može biti manja od

neke najmanjeg iznosa, kvanta energije. Povezana je s vremenom, pa je u kratkom vremenskom intervalu slabije određena nego li u dugom. Energija sustava sastavljenog od velikog broja čestica povezana je s entropijom, odnosno s brojem različitih stanja koje sustav može poprimiti. Sustav će češće imati energiju koja se ostvaruje na veći broj različitih načina. Toplina je posebna vrsta energije i ne može se sasvim pretvoriti u neki drugi vid energije.

U suvremenoj fizici, energija predstavlja osnovni koncept, a to znači da suvremene fizikalne probleme fizičari najčešće razmatraju preko energije. Želimo li razumjeti modernu fiziku dobro je razumjeti što je energija i koje sve oblike poprima. Evo što o energiji kaže nobelovac Richard Feynman u svojim Predavanjima iz fizike:

«...postoji određena veličina, koju zovemo energijom, koja se ne mijenja u mnogostrukim promjenama kroz koje priroda prolazi. To je apstraktna ideja, jer predstavlja matematički princip; kaže da postoji numerička veličina koja se ne mijenja kad se nešto dogodi. Nije to opis mehanizma, ili nečeg konkretnog; samo čudna činjenica da možemo izračunati neki broj, pa kad završimo s promatranjem prirode koja izvodi svoje trikove i izračunamo taj broj ponovo, on je isti.»

Nemojte se zabrinjavati ako većinu gore navedenog niste razumjeli. Fizikalni zakoni su čisti *ekstrakt* prirode, i izuzetno ih je teško uočiti vlastitim iskustvom. Skriveni su uzrok potpuno različitim i neočekivanim pojavama. Koja je npr. sličnost munje i magneta? Osim toga bit fizikalnih zakona je da se ne mogu izvesti iz drugih principa – u matematici su to aksiomi – stoga ih moramo prihvatiti ali nipošto ne i razumjeti. Pomoću tih zakona trebamo objašnjavati prirodu i njene trikove. Ali koje sve trikove moramo upoznati da bi točno izračunali veličinu o kojoj govori Feynman? O tome kako je to nimalo laka zadaća svjedoči nam povijest fizike.

Još malo povijesti

Od davnina čovjek razmišlja, kako o vječnosti tako i o neuništivosti stvari od koje je svijet napravljen. Tales iz Mileta smatrao je da je količina vode ta koja je stalna. Isaac Newton je smatrao da je to masa, pa je u svom čuvenom djelu *Principia* uveo zakon očuvanja mase. To je bila napredna ideja jer u njegovo doba nije bilo lako dokazati da se npr. izgaranjem komada drva ukupna masa ne mijenja. Trebalo je jako dugo da shvatimo da je ta supstanca energija ili »masa-energija«.

Krajem 17. stoljeća Gottfried Wilhelm Leibniz matematički je formulirao izraz za *živu silu* (*vis viva*). Smatrao da je u mehaničkom sustavu od nekoliko tijela, zbroj umnožaka masa tih tijela i kvadrata njihovih brzina (mv^2) konstantan. Leibniz je zapravo prvi formulirao izraz za energiju gibanja. Riječ *energija* prvi puta upotrijebio je Thomas Young 1807. godine. Princip oču-

vanja energije gibanja vrijedio je samo približno i to samo ako je trenje bilo malo, a sudari elastični, dok je princip očuvanja ukupne količine gibanja, odnosno umnoška mv , vrijedio uvijek. Bez obzira na to, Leibnizov princip polako je ulazio u upotrebu, jer je za rješavanje složenijih inženjerskih problema bilo potrebno uzeti u obzir oba principa.

Početak korištenja energije toplinskih strojeva u 18. stoljeću donio je i nove inženjerske probleme koje je trebalo rješavati. Za to je bila potrebna nova formulacija *žive sile*. Znalo se da tijela u gibanju trenjem gube brzinu, i da se pritom razvija toplina. Nije li i toplina neka vrsta *vis vivae* – karika koja nedostaje? Sredinom 18. stoljeća Mihail Vasiljevič Lomonosov iznio je postavio je začetak kinetičke teorije topline – toplina je po njemu posljedica gibanja čestica koje se taru jedna o drugu. Godine 1783, Antoine Lavoisier i Pierre-Simon Laplace iznjeli su kaloričnu teoriju, po kojoj je toplina tvar – fluid koji prelazi s toplijeg tijela na hladnije. Godine koje slijede pokazat će da je Lomonosov bio bliži istini. Proučavajući toplinu koja se razvije prilikom bušenja topovskih cijevi, Sir Benjamin Thompson grof Rumford 1798. godine zaključio je da su kinetička energija i toplina međusobno povezane univerzalnom konstantom te da se toplina razvijena iz gibanja može točno predvidjeti.

Početak 19. stoljeća bilo je važno povećati korisnost parnog stroja. Godine 1824. Nicolas Carnot pokazao je da maksimalna korisnost idealnog toplinskog stroja ovisi samo o razlici temperatura toplog i hladnog spremnika, te da se cjelokupna toplina nikako ne može potpuno pretvoriti u koristan rad. Konstruktori budućih toplinskih strojeva dobili su važno mjerilo uspješnosti svoje konstrukcije. U to doba nije se znalo da je toplina vrsta energije. Mnogi (uključujući samog Carnota) smatrali su ispravnom kaloričnu teoriju, po kojoj je toplina fluid čije strujanje pokreće strojeve, baš kao što voda pokreće kotač vodenice. Bilo je jasno da se dio topline može pretvoriti u mehaničku energiju, ali tek je engleski fizičar i pivar James Prescott Joule 1843. godine pokusima pokazao da se mehanička energija može potpuno pretvoriti u toplinu. To je učinio pomoću aparature u kojoj se uteg spuštao pokrećući lopatice uronjene u vodu. Potencijalna energija utega pretvarala se u kinetičku energiju lopatica, te trenjem prelazila u toplinu zagrijavajući vodu, što je Joule mjerio pomoću termometra. Njegov eksperiment bio je ključan dokaz za mehanički ekvivalent topline, uz konstantu pretvorbe energije ($1 \text{ kcal} = 4,2 \cdot 10^3 \text{ J}$) koju koristimo i danas, s tim da je jedinica za energiju nazvana po Jouleu, a konstantu poznajemo kao specifični toplinski kapacitet vode. Svojim je pokusima Joule pokazao da je toplina također energija – karika koja je nedostajala. Sada je bilo moguće formulirati zakon očuvanja energije. Pokazavši da radom sile trenja može stvoriti novu toplinu ujedno je srušio i kaloričnu teoriju po kojoj je ukupna količina toplinskog fluida bila nepromjenjiva.

Koliko energije trošimo?

Za svoje biološke potrebe čovjek dnevno potroši 1500–2000 kcal energije ili oko $7 \cdot 10^6 \text{ J/dan}$ ($1 \text{ kcal} = 4,2 \cdot 10^3 \text{ J}$). Ako na Zemlji ima $7 \cdot 10^9$ stanovnika, tada je ukupna biološka godišnja potrošnja energije čovječanstva jednaka $7 \cdot 10^6 \text{ J/dan} \times 7 \cdot 10^9$ stanovnika $\times 365 \text{ dan/god} \approx 2 \cdot 10^{19} \text{ J/god}$. Ukupna potrošnja energije čovječanstva u 2005. god. iznosila je $4 \cdot 10^{20} \text{ J}$, što je dvadeset puta više od bioloških potreba čovječanstva. Omjer energije i vremena ukokjemu se ona proizvede/potroši je snaga koja se izražava vatima ($W = \text{J/s}$), koje možemo lako izraziti u J po godini: $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} \times 365 \text{ dan/god} \times 24 \text{ h/dan} \times 3600 \text{ s/h} = 3 \cdot 10^7 \text{ J/god}$. Stoga ova potrošnja energije odgovara neprekidnom radu izvora energije snage $4 \cdot 10^{20} / 3 \cdot 10^7 = 1,3 \cdot 10^{13} \text{ W}$. Budući da tipična nuklearna elektrana ima snagu od 10^9 W , utrošena energija je energija ekvivalentna energiji 13 000 nuklearnih elektrana. Snaga tipične vjetroelektrane je oko 10^6 W , pa nuklearnu elektranu možemo zamijeniti sa 1000 vjetroelektrana. To znači da trošimo energiju neprekidnog rada 13 milijuna vjetroelektrana.

Gustoća energije

Jedan od najvažnijih parametara za iskoristivost izvora energije je količina energije koju je moguće pohraniti po jedinici njegove mase. Tablica 1 prikazuje gustoće energija raznih izvora izražene u MJ/kg, pri čemu je $1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$. Energija od 1 MJ može zagrijati 10 litara vode za 24 °C , što je dovoljno za jedno brzo tuširanje. Kao budući spremnici i izvori energije posebno su zanimljive baterije i kondenzatori zbog svoje visoke efikasnosti. Vidimo da su vrijednosti gustoće energije za neke baterije blizu 1 MJ/kg . Želimo li konstruirati električni automobil, moramo procijeniti kolika je masa baterija potrebna za zamjenu litre npr. dizelskog goriva. Korisnost dizelskog motora je oko 30 %, dok je korisnost električnog motora zajedno s baterijom trostruko veća. Zbog toga bi umjesto svakog kilograma dizel-goriva trebali ponijeti $46 / 0,6 / 3 = 25 \text{ kg}$ Li-ionskih baterija (vidi tablicu 1). Odmah je jasno da je za bilo kakvu ozbiljniju primjenu gustoća energije od 1 MJ/kg donja granica. Ipak, električni pogon pokazuje se puno isplativijim u gradskoj vožnji, u kojoj se električni motor, za razliku od dizelskog, isključuje dok automobil stoji.

Koliko smo efikasni?

Energiju koristimo u raznim oblicima pa je zbog toga često moramo pretvarati iz jednog oblika u drugi. Prilikom pretvorbe dio energije pretvara se u neželjene oblike. Želimo li biti dobri gospodari moramo o tome voditi brigu. Tablica 2 prikazuje stupanj korisnosti za neke pretvorbe energije. Stupanj koristi ovisi o našim tehnološkim dostignućima, ali je najčešće ograničen fizikalnim zakonima.

Zanimljiv je podatak i trošak prijevoza. To je omjer uložene energije i umnoška težine s prevaljenim putom. Općenito vrije-

Tablica 1. Gustoće energija raznih izvora.

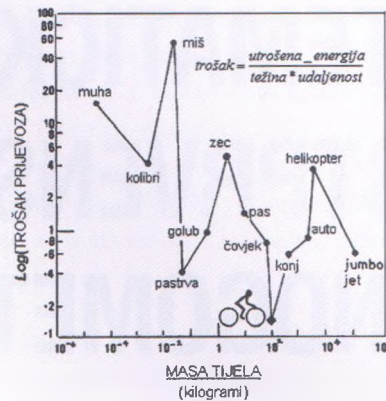
Izvor energije	gustoća MJ/kg	Izvor energije	gustoća MJ/kg
anihilacija tvari i antitvari * mc^2	9×10^{10}	tekući vodik + kisik	13
fuzija vodika	3×10^8	kućni otpad	4
fisija uranija	8×10^7	TNT	4
vodik	143	zrak na 300 bar	1
prirodni plin	54	LiSOCl ₂ Baterija	2
dizelsko gorivo	46	regenerativna gorivna ćelija	1,6
biodizel	42	Li-ionska baterija	0,6
masnoće	38	Zn-zrak baterije	0,6
etanol	30	zamašnjak	0,5
metanol	20	NiCd Baterija	0,2
šećer	17	ultrakondenzator EESstor	1,0
lignit	16	kondenzator	0,002
drvo	14	voda na 100 m visine	0,001

Tablica 2. Koeficijent korisnosti (η) za neke pretvorbe energije.

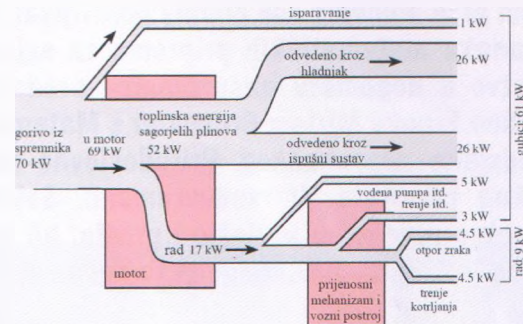
Uredaj	Pretvorba	η / %
električni generator	mehanička u električnu	98
elektromotor	električna u mehaničku	95
plinska peć	kemijska u toplinsku	95
gorivna ćelija	kemijska u električnu	50
molekularni motor	kemijska u mehaničku	50
parna turbina	toplinska u mehaničku	45
dizelski motor	toplinska u mehaničku	30
benzinski motor	toplinska u mehaničku	20
fotocelija	radijacijska u električnu	20
list biljke	svjetlosna u kemijsku	12
fluorescentna svjetiljka	električna u svjetlosnu	20
obična žarulja	električna u svjetlosnu	3

di da se masivniji objekti kreću uz manji trošak, te da je najisplativije kretanje kroz vodu. Ipak fascinira podatak da najmanji trošak kretanja ima biciklist (sl. 1).

Istovremeno je fascinantna neefikasnost automobila. Slika 2 prikazuje na što se sve troši gorivo iz spremnika automobila. Korisni rad, prilikom kretanja automobila, troši se na savlada-



Slika 1. Trošak prijevoza za neka živa bića i prijevozna sredstva prema podacima iz Vance A. Tucker, "The Energetic Cost of Moving About," *American Scientist*, July-August 1975, 413-419.



Slika 2. Prikaz potrošnje goriva osobnog automobila.

vanje otpora zraka i trenja kotrljanja. On čini samo 9 kW / 69 kW = 13 % energije goriva. Iz podataka sa slike možemo izračunati i koeficijent korisnosti toplinskog stroja $\eta = 17 \text{ kW} / 69 \text{ kW} = 25 \%$.

Literatura

1. J. Andrews and N. Jelley, *Energy science: principles, technologies, and impacts*, Oxford University Press, New York 2007.
2. N. Spielberg and B. Anderson, *Seven Ideas that Shook the Universe*, John Wiley and Sons, New York 1987.
3. Edward De Bono, *Povijest izuma: od kotača do računala*, Marjan tisak d.o.o. Split, 2005.
4. <http://en.wikipedia.org>
5. <http://www.our-energy.com/hr>

* Anihilacijom se sva masa pretvori u energiju te stoga ovo predstavlja apsolutni maksimum gustoće energije. Iznos u tablici možete lako izračunati i sami. Sjetite se samo slavne $E = mc^2$, formule koja kaže upravo kolika se energija može dobiti ukoliko se zadana masa m u potpunosti pretvori u energiju. Gustoća energije je omjer energije i mase, dakle E/m , odnosno $mc^2/m = c^2$; najveća moguća gustoća energije jednaka je kvadratu brzine svjetlosti! (Ako mislite da nešto ovdje ne valja s mjernim jedinicama, varate se jer $J = \text{kg m}^2/\text{s}^2$, pa je dakle $J/\text{kg} = \text{m}^2/\text{s}^2$)