

Energija, nove mogućnosti

Ivica Aviani, Institut za fiziku
(draft verzija 1, za internu upotrebu)

Uvod

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 viseće 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 pokreće i brodove te omogućuje otkrića novih kontinenata. Vodenice i vjetrenjače, preteče današnjih hidroelektrana i vjetroelektrana, postat će uskoro pogonski strojevi manufakture, i mjesta na kojima će nicati nova naselja.

Sve do 18. stoljeća naša se civilizacija razvija na bazi energije životinjskih i ljudskih mišića,

te na kinetičkoj energiji vode i vjetra, dok se toplinska energija koristi samo za zagrijavanje. Možemo reći da se, sve do otkrića parnog stroja, razvoj civilizacije u potpunosti temelji na obnovljivim izvorima energije, te da čovjek korištenjem energije okoline ne narušava prirodnu ravnotežu. Intenzivni razvoj civilizacije nastaje tek kada je čovjek 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 stroj koristio sje 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 poboljšanja 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 davnoj 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 ugljičnog dioksida, veća od one koju biljke fotosintezom mogu razgraditi, čime se povećava koncentracija CO₂ u atmosferi. Danas znamo da je ugljični dioksid odgovoran za efekt staklenika, odnosno za globalno zagrijavanje. Jedini izlaz su izvori energije koji ne stvaraju staklenične 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 i skoka cijena nafte. Francuska je npr. izgradila veliki broj nuklearnih elektrana koje danas zadovoljavaju čak oko 80% njenih energetske potrebe. 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 stakleničnih 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 ($1J=1\text{ kgm/s}^2$). 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 nekog 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 Richad Feynman u svojim Lekcijama 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 brojku 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 supstance od koje je svijet napravljen. Thales iz Mileta smatrao je da je količina vode ta koja je stalna. 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 *vis vivu* (silu života). 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. Izraz energija prvi puta upotrijebio je Thomas Young 1807. godine. Princip očuvanja 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 sile života. Znalo se da tijela u gibanju trenjem gube brzinu, i da se pritom razvija toplina. Nije li i toplina neka vrsta *vis vive* – karika koja nedostaje? Godine 1783, Antoine Lavoisier je iznio kinetičku teoriju topline, dok je Pierre-Simon Laplace iznio kaloričnu teoriju, po kojoj je toplina vrsta fluida koji prelazi s toplijeg tijela na hladnije. Godine koje slijede pokazat će da je Lavoisier bio u pravu. Proučavajući toplinu koja se razvije prilikom bušenja topovskih cijevi Count Rumford je 1798. godine zaključio je da su kinetička energija i toplina međusobno povezane univerzalnom konstantom te da se toplina razvijena iz gibanja može točno predvidjeti.

Početakom 19. stoljeća bilo je važno povećati korisnost parnog stroja. Godine 1824. Nicholas 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. Vrijedila je kalorična teorija, 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 James Prescott Joule 1843. godine pokusima pokazao da se mehanička energija može potpuno pretvoriti u toplinu. U njegovoj aparaturi uteg se 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 pokusima Joule je 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 $7 \cdot 10^6$ 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 $7 \cdot 10^6 \text{ J/dan} \times 7 \cdot 10^9 \text{ stanovnika} \times 365 \text{ dan/god} = 2 \cdot 10^{19} \text{ J/god}$. Ukupna potrošnja energije čovječanstva u 2005. god. iznosila je $4 \cdot 10^{20} \text{ J/god}$, što je dvadeset puta više od bioloških potreba čovječanstva. Lako možemo izračunati da je snaga od $1 \text{ W} = 3600 \times 24 \times 365 = 3 \cdot 10^7 \text{ J/god}$. 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.

Obnovljivi izvori energije

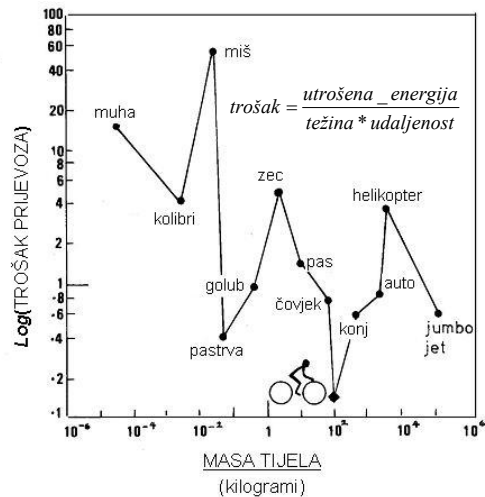
Kao mogući obnovljivi izvori energije, na raspolaganju su nam solarna energija, koja dolazi od sunčevog zračenja, geotermalna energija, koja dolazi od topline Zemljine unutrašnjosti i planetarna energija, koja se očituje kao plima i oseka. Zbog radioaktivnog raspada izotopa teških jezgara, unutrašnjost Zemlje stalno se zagrijava, ali postoji i toplinski tok prema hladnijoj površini. Zbog toga je ravnotežna temperatura unutrašnjosti oko 4000 K, a krenemo li od površine Zemlje prema unutrašnjosti na svakih 30 m dubine temperatura se povisi za oko 1 K. Ova se

energija može koristiti bušenjem Zemljine kore i ubrizgavanjem vode kao izmjenjivača topline. Tako dobivena energija je, za sada, još uvijek skupa u usporedbi s drugim izvorima energije. Plima i oseka nastaju zbog gravitacijskog privlačenja prvenstveno Mjeseca, manjim dijelom i Sunca, te rotacije Zemlje. Gravitacijska sila deformira površinu oceana, stvarajući ispupčenja na strani najbližoj, i najdaljoj Mjesecu. Zbog rotacije Zemlje taj poremećaj obilazi Zemlju stvarajući plimu i oseku dva puta dnevno. Visinska razlika je u prosjeku manja od 0.5 m, ali na nekim mjestima može iznositi i do 12 m, te biti vrlo povoljna za pogon hidroelektrane.

Gustoća energije

Jedan od najvažnijih parametara za iskoristivost izvora energije je količina energije koju je moguće pohraniti po jedinici njegove mase. Tablica 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 l vode za 24 K, 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 dizel 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). 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.

izvor energije	gustoća MJ/kg	izvor energije	gustoća MJ/kg
mc ²	9×10 ¹⁰	tekući vodik + kisik	13
fuzija vodika	3×10 ⁸	kućni otpad	4
fisija urana	8×10 ⁷	TNT	4
vodik	143	zrak na 300 bar	1
prirodni plin	54	LiSOCl ₂ Baterija	2
dizelsko gorivo	46	regenerativna goriva 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



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

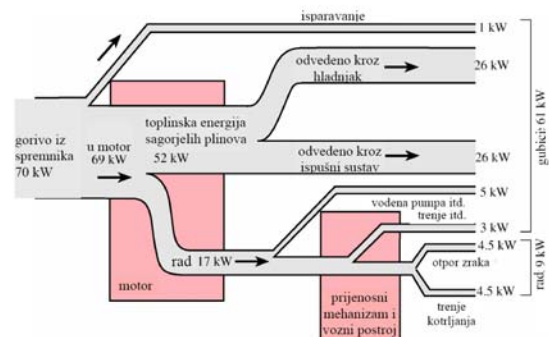
Koliko smo efikasni?

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 prikazuje stupanj korisnosti za neke pretvorbe energije. Stupanj koristi ovisi o našim tehnološkim dostignućima, ali je najčešće limitiran fizikalnim zakonima.

Uređaj	pretvorba	Kori snost
Električni generator	Mehanička u električnu	98%
Elektromotor	Električna u mehaničku	95%
Plinska peć	Kemijska u toplinsku	95%
Goriva 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%
Fotoćelija	Radijacijska u električnu	20%
List biljke	Svjetlosna u kemijsku	12%
Fluorescentna svjetiljka	Električna u svjetlosnu	20%
Obična žarulja	Električna u svjetlosnu	3%

Zanimljiv je podatak i trošak prijevoza. To je omjer uložene energije i umnoška težine s prevaljenim putom. Općenito vrijedi da se masivniji objekti kreću uz manji trošak, te da je najisplativije kretanje kroz vodu. Ipak fascinira podatak da najmanji trošak kretanja ima biciklist.

Istovremeno je fascinantna neefikasnost automobila. Slika prikazuje na što se sve troši gorivo iz spremnika automobila. Korisni rad, prilikom kretanja automobila, troši se na savladavanje otpora zraka i trenja kotrljanja. On čini samo $9 \text{ kW} / 69 \text{ kW} = 13\%$ energije goriva. Iz podataka sa slike možemo izračunati i koeficijent korisnosti toplinskog stroja $\eta = 17 \text{ kW} / 69 \text{ kW} = 25\%$.



Prikaz potrošnje goriva osobnog automobila.

Vjetroelektrane

Oko 1% sunčeve energije pretvara se u energiju vjetra. Sunce nam pak isporučuje 10000 puta više energije nego što nam je potrebno, pa kad bi iskoristili samo 1% energije vjetra bilo bi to sasvim dovoljno za ukupne potrebe čovječanstva. Teorijski, vjetrenjača može iskoristiti 16/27 ili 59% snage vjetra. To je zbog toga, jer je za normalan rad vjetrenjače potrebno omogućiti stalan protok zraka, što znači da dio kinetičke energije vjetra ostaje neiskorišten.



Sustav vjetroelektrana na paškom brdu Ravne.

Kod nas postoje dva sustava vjetroelektrana. Na paškom brdu Ravne sustav se sastoji od sedam vjetroelektrana pojedinačne snage 850 kW, pri čemu je ukupna snaga sustava 6 MW. Visina stupa svake turbine iznosi 49 metara, a promjer rotora 52 metra. Drugi sustav nalazi se na lokaciji Trtar Krtolin, kod Šibenika. Ovaj sustav sastoji se od 14 vjetroturbina pojedinačne snage 800 kW.



Sustav vjetroelektrana na lokaciji Trtar Krtolin kod Šibenika

Ukupna snaga sustava je 14 MW. Svu proizvedenu energiju u idućih 15 godina otkupljivat će Hrvatska elektroprivreda. Do 2010. godine u Hrvatskoj se planira instalacija vjetroelektrana ukupne snage 170 MW, što iznosi oko 4% ukupne snage električne energije u Hrvatskoj. Planirane lokacije su: Ponikve-Ston, Čičarija, Vrataruša-Senj i Pometeno brdo-Klis. Važno je napomenuti da će na lokaciji kod Klisa, tvornica *Rade Končar* postaviti prve vjetroelektrane hrvatske proizvodnje.

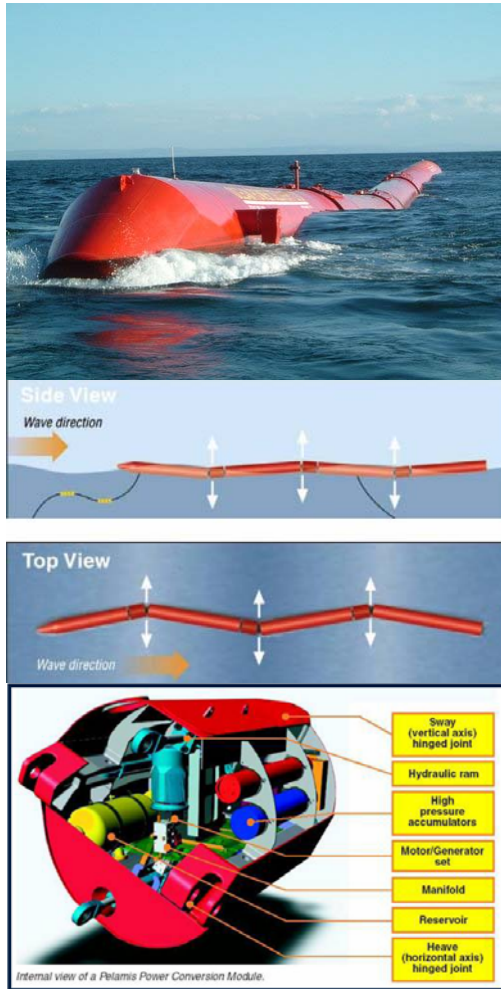
Zadatak:

Kolika je teorijska snaga vjetrenjače u sustavu Ravne ako vjetar puše brzinom $v = 10 \text{ m/s}$?

Snaga vjetra dolazi od njegove kinetičke energije $P = E_k/t = mv^2/2t$ pri čemu je $m/t = \rho Sv$ masa zraka gustoće ρ koja u jedinici vremena prođe kroz površinu S vjetrenjače. Proizlazi da snaga vjetra $P = \rho Sv^3$ raste s kubom brzine vjetra. Promjer rotora naše vjetrenjače je $2r = 52 \text{ m}$, pa je površina vjetrenjače $S = r^2\pi = 26^2\pi = 2100 \text{ m}^2$. Zbog toga je snaga vjetra $P = \rho Sv^3 = 1.3 \text{ kg/m}^3 \cdot 2100 \text{ m}^2 \cdot (10 \text{ m/s})^3 = 2.7 \text{ MW}$. Snaga vjetrenjače je $0.59 \cdot P = 1.6 \text{ MW}$

Energija valova

Veliki dio energije vjetra pretvara se u energiju valova. Pelamis je jedan od najzanimljivijih europskih projekata za iskorištavanje energije valova. Uređaj se sastoji se od četiri cilindrična segmenta promjera 3,5 m ukupne duljine 140 m. Segmenti plutaju na valovima i međusobno se izvijaju prateći oblik valova. Povezani su hidrauličkim vezama, čije pomicanje pumpa ulje u visokotlačni rezervoar. Ulje pod visokim tlakom pokreće hidraulični motor koji kontinuirano pokreće električni generator. Snaga svakog od segmenata otprilike je jednaka snazi jedne vjetroelektrane.



Prva komercijalna farma postavljena je 2006. godine u Portugalu u Aguçadora Wave Parku. Sastoji se od tri Pelmis P-750 s modula ukupne snage od 2.25 MW. Do 2009. god. Planira se instalacija 28 novih uređaja ukupne snage 52.5 MW. Vrijednost investicije je 70 mil.EUR.

Reverzibilne elektrane

Reverzibilne elektrane dragocjene su za sustav opskrbe električnom energijom jer predstavljaju sustav pohrane viška energije. One mogu pohraniti višak energije nastale npr. u nekoj udaljenoj termoelektrani ili vjetroelektrani.

Višak električne energije koji nastaje kada je potrošnja energije umanjena, npr. noću, koristi se u reverzibilnoj hidroelektrani za pumpanje vode u akumulacijsko jezero smješteno na visini. Pritom se, uz pomoć

snažnih električnih pumpi, električna energija pretvara u gravitacijsku potencijalnu energiju vode. $E_p = mgh$. Za vrijeme pojačane potrošnje, kada u sustavu nedostaje energije, ova se energija, u električnom generatoru, ponovo pretvara u električnu energiju i vraća natrag u energetski sustav. Kod nas postoje dvije reverzibilne hidroelektrane. To su reverzibilna HE Velebit na rijeci Zrmanji i reverzibilna HE Lepenica kod Fužina.



Reverzibilna HE Velebit na rijeci Zrmanji. Kad je potrošnja energije mala, energija se sprema pumpanjem vode iz donjeg jezera u gornju akumulaciju na visini 559 m iznad donjeg jezera.

Zadatak:

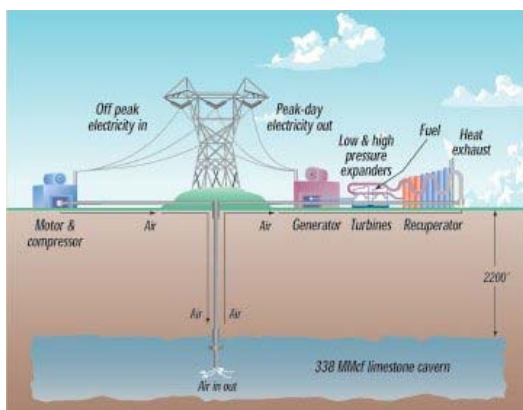
Usporedite gustoću energije vode u akumulacijskom jezeru HE Velebit na visini $h = 559$ m s gustoćom energije benzina koja iznosi oko 30 MJ/kg.

$E/m = gh = 10 \text{ m/s}^2 \cdot 559 \text{ m} = 6 \cdot \text{kJ/kg}$
Gustoća energije ove vode je oko 5000 puta manja od gustoće energije benzina.

Energija komprimiranog zraka

Izotermna kompresija je reverzibilni proces. To znači da mehaničku energiju koju pospremimo izotermnim tlačenjem zraka u obliku energije plina, možemo dobiti natrag izotermnom ekspanzijom bez gubitaka. Da bi to ostvarili, rezervoar mora biti dobro termički povezan s okolinom, jer treba odvoditi toplinu koja se razvija prilikom kompresije a, prilikom ekspanzije

dovoditi toplinu iz okoline, kako se zrak ne bi hladio. U praksi se rezervoaru volumena V dodaje stlačen zrak iz okoline. U idealnom slučaju možemo pohraniti energiju $E = pV \ln(p/p_{\text{atm}})$ jednaku energiji idealnog plina pri tlaku p , gdje je p_{atm} atmosferski tlak. Kao spremište stlačenog zraka može se koristiti prostor podzemnih špilja ili starih rudnika. Na ovaj način radi reverzibilna termoelektrana E.N Kraftwerk Huntorf u Njemačkoj snage 290 MW i termoelektrana Alabama Electric Corporation u McIntosh, Alabama, USA, snage 110 MW.



Princip rada reverzibilne termoelektrane s izotermnom kompresijom zraka u podzemnu šupljinu.

Ova godina trebala bi biti revolucionarna u korištenju komprimiranog zraka kao goriva. Najveći indijski proizvođač vozila Tata Motors, zajedno s MDI grupom iz Francuske, trebao bi započeti serijsku proizvodnju malog gradskog hibridnog automobila CityCat na komprimirani zrak. Uz zračni motor snage 20 kW automobil



CityCat - automobil na komprimirani zrak čija se serijska proizvodnja očekuje u kolovozu 2008.

postiče brzinu od 90 km/h, s radijusom kretanja od 100 km, dovoljno za dva dana gradske vožnje. Spremnik stlačenog zraka izrađen je od ugljičnih vlakana. Tlak zraka iznosi do 300 bara, a spremnik bi se u specijaliziranim punionicama mogao napuniti za oko tri minute ili, za oko pet sati kućnim kompresorom. Ovakav automobil ne zagađuje okolinu na mjestu rada jer, zapravo koristi energiju velikih udaljenih elektrana. Kako je koeficijent korisnosti velikih elektrana i dvostruko veći od koeficijenta korisnosti motora s unutrašnjim sagorijevanjem, u konačnici je i globalno zagađenje je značajno manje. Osim toga emisiju štetnih plinova puno je lakše kontrolirati u velikim sustavima - elektranama.

Zadatak:

Koliko energije sadrži u rezervoar od 300 l zraka pri tlaku od 300 bar?

$E = pV \ln(p/p_{\text{atm}}) = 300 \cdot 10^5 \text{ Pa} \times 0.3 \text{ m}^3 \times \ln(300) = 50 \text{ MJ}$. Ova energija odgovara energiji sadržanoj u oko 1.5 l benzina. Međutim, motor na komprimirani zrak nije toplinski stroj i njegova je korisnost i trostruko veća od korisnosti benzinskog motora, pogotovo u gradskoj vožnji, što znači da je energetske ekvivalent komprimiranog zraka odgovara oko 4,5 l benzina, što je dovoljno za 100 km vožnje štedljivim automobilom.

Zamašnjak

Zamašnjak najčešće vezemo uz industrijsku revoluciju i zastarjelu tehnologiju. Malo tko ga se danas sjeća kao korisne naprave, a rijetko je koji učenik čuo za njega, pa kad se pojavi u nekom zadatku iz fizike, nitko ni ne zna o čemu se zapravo radi. Međutim, zamašnjaci koje trenutno razvija NASA s ciljem pohranjene energije u obliku kinetičke energije vrtnje zamašnjaka, rezultat su vrhunske tehnologije. To su valjci izrađeni od posebnog materijala koji lebde na magnetskim ležajevima u vakuumu i okreću se frekvencijom i do 1000 okretaja u sekundi. Uz takvu frekvenciju akceleracija na udaljenosti

od $r = 25\text{cm}$ od središta vrtnje iznosi čak $a = r\omega^2 = 10^6\text{g}$! Uz elektromagnetski prijenos energije vrtnje omogućuju izuzetnu efikasnost i visoku gustoću energije. Pohranjena energija $E = I\omega^2/2$ proporcionalna je momentu inercije I i kvadratu kutne brzine ω . Zbog toga je povoljnije koristiti čvršći materijal uz veću kutnu brzinu nego li materijal velike gustoće. To jasno vidimo ako energiju vrtnje izrazimo preko centrifugalne sile kojoj je izložena molekula na obodu valjka $E \sim rF_{cf}$. Vidimo odmah da treba odabrati materijal koji, bez deformacije, može izdržati što veće naprezanje. Za izradu zamašnjaka se, zbog toga, koriste relativno lagani kompozitni materijali.



G2 Flywheel modul i zamašnjak <http://spacepower.grc.nasa.gov/> radi pri frekvenciji od 30000 okr/min. Modul odlikuje dugo vrijeme života $10^5 - 10^7$ ciklusa punjenja-pražnjenja, visoka gustoća energije 0.5 MJ/kg, te velika izlazna snaga 3 - 133 kWh, i efikasnost od 90%.

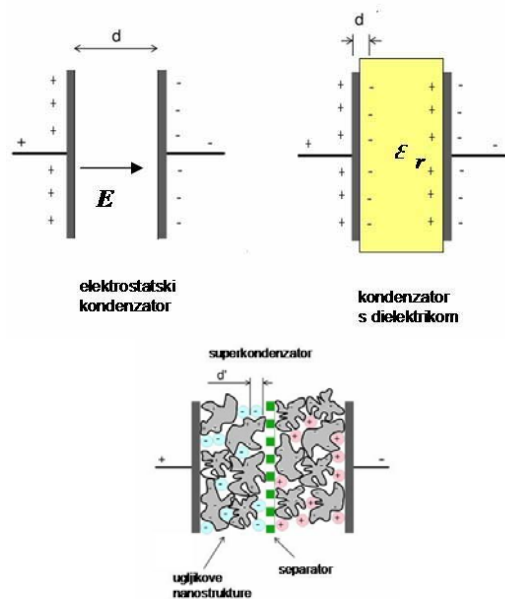


Superkondenzatori

U kondenzatoru koji se sastoji od dviju ravnih elektroda površine S udaljenih za d možemo pohraniti elektrostatsku energiju jednaku $W = V\epsilon_0 E^2/2$, gdje je jakost E električnog polja u prostoru između ploča, $V = Sd$ volumen između ploča kondenzatora, a ϵ_0 dielektrična konstanta vakuuma. Uzmemo li u obzir da za električno polje približno vrijedi $E = U/d$, gdje je U napon između elektroda, za energiju dobivamo $W = \epsilon_0 U^2 S/d$. Ovaj izraz možemo tumačiti na slijedeći način. Ako imamo dvije bliske plohe nabijene suprotnim nabojem, tada je u prostoru između njih uskladištena energija statičkog električnog polja. Ova energija proporcionalna je površini ploha, a obrnuto proporcionalna njihovoj udaljenosti. Želimo li u kondenzator pohraniti više energije, moramo povećati površinu i smanjiti razmak između sloja suprotnih naboja -dipolnog sloja. Razmak možemo smanjiti tako da, između ploča kondenzatora, ubacimo dielektrično sredstvo. Tada će se između svake metalne elektrode i plohe dielektrika formirati bliski dipolni sloj i time se bitno smanjiti efektivni d (vidi sliku). Zapravo će se efektivni d smanjiti ϵ_r puta koliko iznosi relativna dielektrična konstanta dielektričnog sredstva. Razmak se može dodatno smanjiti ako se jedna elektroda zamijeni elektrolitom, odnosno ionskim vodičem. Tada se dipolni sloj i električno polje formiraju samo u vrlo tankom sloju na elektrodi, debljine nekoliko nanometara.

Kod superkondenzatora napravljen je bitan iskorak. Površina elektroda višestruko je povećana uz pomoć poroznih elektroda. Elektrode su nanočestice grafita ili isprepletene ugljikove nanocjevčice u međusobnom električnom kontaktu. Presvučene su nanometarskim slojem izolatora uronjene u

elektrolit. Dipolni sloj formira se u vrlo tankom sloju, između plohe nanočestice i elektrolita. Superkondenzatori mogu imati ogroman kapacitet i do 3000 F, ali njihov radni napon je mali i iznosi svega oko 2 V. Energija koju možemo pohraniti u tipični superkondenzator, $W = \frac{1}{2}CU^2 = 6000$ J, dovoljna je tek za zagrijavanje 1.5 l vode za 1 K. Međutim, za razliku od baterije, superkondenzatori mogu razviti veliku snagu i imati gotovo neograničen broj ciklusa punjenja-pražnjenja. Zbog toga već nalaze široku primjenu, npr. u hibridnim vozilima gdje služe za pohranu kinetičke energije automobila za vrijeme kočenja.

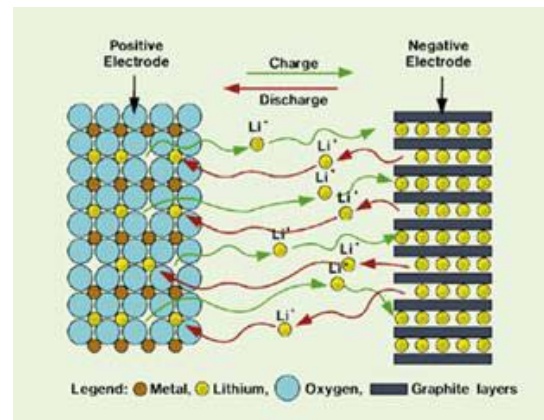


Kod elektrolitskog kondenzatora kapacitet je značajno povećan u odnosu na elektrostatički jer je jako smanjena udaljenost elektroda, dok je kod superkondenzatora još višestruko povećana površina elektroda.

Prava revolucija sa superkondenzatorima tek se očekuje. Ultrakondenzatori s feroelektričnim barij-titanatom $BaTiO_3$ koji se odlikuje gigantskom dielektričnom konstantom, u stanju su raditi na naponima od 3000 V. Kako energija raste s kvadratom napona u ove kondenzatore moguće je pohraniti puno više energije. ove kondenzatore bit će moguće koristiti za pogon automobila. Američka kompanija EESOR tvrdi da su uspjeli konstruirati kondenzatore gustoću energije od 1MJ/kg.

Baterije

U baterijama, energija je pohranjena u vidu kemijske energije. Jedan od sastavnih atoma baterije kemijski može biti vezan na dva različita načina. Jedna od veza ima višu energiju, pa atom spontano želi prijeći u stanje niže energije, tj. prijeći iz jedne veze u drugu. Kada bi ove kemijske spojeve doveli u neposredni kontakt, kemijska reakcija odvila bi se brzo, a energija bi se oslobodila naglo u vidu topline. U bateriji ovi su spojevi prostorno razdvojeni, a kemijska energija oslobađa se kontrolirano, tako da atom po atom putuje od jednog spoja do drugog. Baterija se sastoji od elektroda i elektrolita. Atom o kojem je riječ putuje s jedne elektrode na drugu. On to radi tako da se ionizira, pa njegov elektron prolazi kroz vanjski krug baterije, a pozitivni ion kroz samu bateriju, odnosno kroz elektrolit. Na drugoj elektrodi elektron i ion se ponovo spoje u atom, pri čemu se atom veže u novi spoj. Elektron u vanjskom krugu može izvršiti korisni rad. Energije kemijske veze su reda veličine 1eV, pa baterije imaju napon oko 1V.



Litij-ionska baterija.

Baterija koja se danas sve češće upotrebljava je Li-ionska baterija. Zbog velike gustoće energije koristi se u mobilnim uređajima, prijenosnim računalima, hibridnim automobilima. Ova baterija prikazana je na slici. Atom litija rado se kemijski veže na metalni oksid, pa je jedna elektroda napravljena od metalnog oksida (npr. $LiCoO_2$). Druga elektroda je od grafita. Prilikom nabijanja baterije ion litija odvaja se iz $LiCoO_2$, prolazi kroz elektrolit i ulazi između grafenskih ravnina na grafitnoj

elektrodi gdje se neutralizira primanjem elektrona iz vanjskog kruga. Prilikom izbijanja litij se ponovo ionizira i spontano vraća na početnu elektrodu. Tamo se kemijski veže oslobađajući energiju kemijske veze. Njegov elektron ga slijedi putujući u vanjskom krugu.

Literatura

J. Andrews and N. Jelley, *Energy science: principles, technologies, and impacts*, Oxford University Press, New York 2007.

N. Spielberg and B. Anderson, *Seven Ideas that Shook the Universe*, John Wiley and Sons, New York 1987.

Edward De Bono, *Povijest izuma: od kotača do računala*, Marjan tisak d.o.o. Split, 2005.

<http://en.wikipedia.org>

<http://www.our-energy.com/hr/>