

2 O energiji

Energija, pojmovi i odnosi koji je određuju

Na početku govorit ćemo o energiji.

Zašto? Tri su razloga tome.

Prvi, to nam je zadatak: naš se fakultet u osnovi bavi s dva (životna) tijeka: s tijekom energije i tijekom informacija, koji je isto samo strujanje energije.

Informacija je samo oblik energije: mi se međusobno vidimo i čujemo, izmjenjujemo informacije (energiju koju naše tijelo osigurava transformirajući „kemijsku energiju“ unesenu hranom), jedino i samo zbog toga što energija struji između nas i obavlja rad u našim osjetilima.

Pritom, razmatrat ćemo samo onaj prvi tijek, tijek energije. Preciznije, bavit ćemo se većinom pretvorbama najrazličitijih oblika energije u (mehanički) rad: energetske procese pridobivanja (mehaničkog) rada koji se odvijaju u termoelektranama, hidroelektranama, solarnim, vjetroelektranama i nuklearnim elektranama.

(Pretvorbom mehaničkog rada u električnu energiju u sinkronim generatorima, zatim električne energije u korisne oblike energije i u informaciju, i sa svime povezanim s takvim transformacijama, bave se drugi predmeti i udžbenici).

No, zbog sve veće važnosti „obnovljivih izvora energije“ u proizvodnji električne energije, predstaviti ćemo i tzv. „direktne (neposredne, izravne) pretvorbe“ u električnu energiju, pretvorbe što se odvijaju bez uključivanja toplinske energije u energetske procese. Zvuči jednostavno; u osnovi i jest.

Koji je **drugi** razlog?

Taj razlog dobro poznajete: zbog važnosti energije (i informacije).

Čuli ste,

energija je osnova života, bez energije nema života, itd, itd.

I to je točno.

Energija je materijalna osnova svake civilizacije, a oblici energije koji su dostupni, koji se rabe, određuju stupanj razvoja te civilizacije.

Dostupnost su i opskrbljenost energijom doista preduvjeti ne samo djelovanja i rasta gospodarstva već i pukog održanja života. No, pitanje je, kako se opskrbljivati energijom? Primjerice, električnom? Što biste odgovorili, kako biste glasovali, postavi li se referendumsko pitanje izgraditi ili ne nuklearnu elektranu u Hrvatskoj? Da, ne? U svakom slučaju bilo bi neodgovorno (i nedopustivo) odlučivati ne ovlada li se prije toga znanjem i razumijevanjem koje će otkloniti donošenje odluke temeljene na neznanju, nerazumijevanju, predrasudama, manipulacijama, strahovima i/ili lijepim željama i snovima. Bavit ćemo se stoga energijom na „najdirektniji način“ kako bismo

spoznali što je to energija, kako se opskrbljujemo energijom, kako upotrebljavamo energiju, kako rješavamo problem koji nazivamo "problemom opskrbe energijom". *(Kako to da uopće postoji takav problem kad je energija nestvoriva ni uništiva: postoji oduvijek i postojat će uvijek?)*

Izučavat ćemo energetske procese u elektroenergetskom sustavu (s kojim se pak potanko bavi jedan od profila studija na našem fakultetu: „**Elektroenergetika**“).

Elektroenergetski je sustav danas još uvijek najveći, najrasprostranjeniji, najutjecajniji, najneophodniji, najsloženiji (najkompliciraniji) i najskuplji tehnički sustav.

Kako to?

Jer je zadatak elektroenergetskog sustava opskrba električnom energijom, a električna je energija oblik energije na kojem se razvija naša civilizacija, na kojem počiva naša civilizacija.

I, konačno, **treći** je razlog, da bismo mogli razumjeti rad elektroenergetskog sustava, odnosno proizvodnju i opskrbu električnom energijom (eksergijom).

Naime, usprkos navedenom, malo znademo o energiji i to malo što znamo zaboravimo ili pogrešno shvaćamo.

Pokušajmo stoga najprije odgovoriti na pitanje: **što je energija?**

Pokušajmo definirati energiju.

Moramo odmah reći:

ne postoji jednostavna, „dobra“, općeprihvaćena definicija energije.

Zašto?

Razumjet ćemo spomenemo li nekoliko definicija koje se najučestalije rabe.

Primjerice:

1. Energija je sposobnost obavljanja (mehaničkog) rada.

Je li je to dobra definicija energije?

Ne, nije. Zašto?

Zato što ništa ne definira. **Rad (mehanički rad) je samo oblik energije.** Jedan pojam "definiramo" pomoću drugog, koji je isti, možda samo (nekima) bolje poznat.

(Morali bismo sada definirati što je to (mehanički) rad, pa zatim pojmove kojima se definira rad itd., itd.)

Ni brojne druge definicije energije nisu upotrebljivije. Pogledajmo:

2. **Energija je jedan od osnovnih oblika materije.**
(To je točno, no beskorisno: čemu služi takva definicija? **Materija jest tvar plus energija.**)
3. **Energija je svojstvo materije da može biti transformirana u rad i/ili toplinu.**
(**Materija = tvar + energija**; definiranje energije pomoću energije: rad i toplina jesu energija, oblici energije.)
4. **Energija je sposobnost izazivanja promjene.**
(Točno i lijepo rečeno, ali isto tako i beskorisno za naša razmatranja.)
5. **Energija je „ono“ što mijenja stanje zatvorenog sustava kada prelazi njegove granice.**
(Točno, no ne sveobuhvatno: postoje i drugi oblici energije uz one koji „mijenjaju stanje zatvorenog sustava“. Drugi oblici uz mehanički rad, toplinsku energiju i rad trenja, oblika što prelaze granice zatvorenog sustava i mijenjaju mu stanje. Osim toga, što je to „**zatvoreni sustav**“?)
6. **Energija je temeljno svojstvo koje posjeduje svaki fizički sustav. Energija je fizičkog sustava u određenom stanju definirana kao mehanički rad potreban da se promijeni stanje sustava od nekog početnog stanja (zvanog referentno) do danog (promatranog) konačnog stanja.**
(Nedostatna i nejasna definicija: koje je to početno i konačno stanje, što je s drugim oblicima energije bez kojih se, u većini slučajeva, ne će moći promijeniti stanje sustava od početnog do konačnog?)

Zašto ne postoji prihvatljiva (dobra) definicija energije?

Dva su razloga: jedan subjektivni, drugi objektivni.

Subjektivni: mi, ljudi, ne znamo što je to energija premda se sve, doslovce sve, što se događa na Zemlji svodi, u što ćemo se uvjeriti, samo na **energetske procese:**

- pretvorbe oblika energije, odnosno
- strujanje i izmjenu energije.

(I mi se, kako smo već istaknuli, međusobno vidimo i čujemo samo zbog toga što energija struji između nas. U protivnom, bili bismo i glupi i sljepi; jeste li se ikad upitali bili stvarno mogao vidjeti „nevidljivi čovjek“ / lik brojnih filmova / ?)

Međutim, znamo se služiti energijom.

Objektivni razlog: kako se povećava naše znanje o nekom pojmu, predmetu ili sadržaju, to smo skloniji, i to možemo, sve više apstraktno razmišljati o njima. U tom slučaju, posljedično, s porastom našeg znanja svaka definicija postaje ubrzo ograničavajućom. (Ne obuhvaća nova saznanja.)

Ljudsko biće, međutim, ne voli ne znati. Izmišlja zbog toga aksiome (*aksiom je temeljno načelo čija se valjanost i istinitost prihvata bez dokaživanja*, „*prastina*“), odnosno, ono što ne

zna proglasi osnovnim pojmom. A osnovni se pojam ne može definirati – ne postoji još "osnovniji pojam".

Drugim riječima, energija je osnovni pojam; dakle, ne može se definirati.

Usprkos tome, budući da je proces učenja najlakše započeti s definicijama, pa čak i osnovnih pojmova i odnosa, to se i čini tako. A zatim se kasnije takve definicije nadopunjuju ili odbacuju.

Zbog toga ćemo, premda je, naglasimo, svaka definicija energije nedorečena, jer jedan osnovni pojam definiramo pomoću drugih osnovnih pojmova, ipak prihvatiti jednu od navedenih definicija:

„energija je sposobnost obavljanja rada (mehaničkog rada)“.

Zašto baš tu definiciju?

Jer ćemo pomoću te definicije, za naše potrebe, moći podijeliti sve oblike energije u skupine kako nam to odgovara. Zasad, u dvije skupine. Kasnije, u tri.

Prvu će skupinu sačinjavati oblici energije koji se mogu pohraniti, akumulirati, uskladištiti, nagomilati, sačuvati u masi (tvari) i zadržati svoj oblik u vremenu – kroz određeno dulje vrijeme barem.

To su „stalni ili stacionarni oblici energije“. Zvat ćemo ih još i „*unutrašnjom energijom*“ jer se pohranjuju u tijelu (sustavu) kao cjelini, ali i u razinama građe tijela (sustava): molekulama, atomima i jezgri atoma.

Drugu će skupinu tvoriti tzv. „*prijelazni oblici energije*“.

To su oblici energije čiji se oblik ne može zadržati u vremenu; oni postoje samo u trenutku kad jedan od stacionarnih oblika mijenja svoj oblik odnosno kad energija prelazi, struji s tijela na tijelo, sustava na sustav nevezano uz masu (tvar).

Kako ćemo to učiniti?

Definirat ćemo prvo pojmove **(mehanički) rad i sila**.

Što je **(mehanički) rad**? Sjetimo se definicije iz „Fizike“.

(Tu ćemo definiciju, za naše potrebe, morati promijeniti i dopuniti.)

- **Mehanički je rad svladavanje sile na putu: rad je učinjen, rad se obavlja, ako se hvatište sile pomaklo, pomiče u pravcu djelovanja sile.**

(Podsjetimo, to je bitno za našu („novu“) definiciju rada, pravac ima dva smjera.)

Što je **sila**?

- Sila je svako ono djelovanje koje nastoji promijeniti, ili je promijenilo, brzinu, odnosno položaj, i/ili oblik i/ili obujam tijela (sustava) na koji djeluje.

Pojednostavit ćemo promatranja i krenuti od četiri temeljne prirodne sile (ne „interakcije“) svijeta u kojem živimo:

- *gravitacijska*, beskonačnog doseg, jakost opada s kvadratom udaljenosti;
- *elektromagnetska* („drží“ elektrone u atomu), beskonačnog doseg, jakost opada s kvadratom udaljenosti;

(Magnetska sila nastaje kao posljedica električnih promjena, npr. gibanja naboja. Magnetska je sila stoga relativistička električna pojava. /Elektromagnetska sila kontrolira „svijet“ atoma i molekula i omogućuje život./)

- *jaka nuklearna* („drží“ protone i neutrone u jezgri atoma), dosega 1 fermi¹ (10^{-13} cm), jakost opada mnogo brže nego li s kvadratom udaljenosti, i
- *slaba nuklearna sila*² („određuje“ kako se jezgra raspada sadrži li višak protona ili neutrona), dosega mnogo manjeg od jednog fermija, kako bismo razvrstali (klasificirali) oblike energije.

Tablica 2-1 Temeljne sile

Teorija (trenutačna)	Sila	Medijatori	Relativna jakost [#]	Opadanje jakosti sile s udaljenošću	Doseg
kromodinamika	jaka nuklearna	gluon	10^{38}	$1/r^7$	$1,4 \cdot 10^{-15}$ m
elektrodinamika	elektromagnetska	foton	10^{36}	$1/r^2$	beskonačan
flavordinamika	slaba nuklearna	W i Z bozon	10^{25}	$\frac{e^{-m_W r}}{r}$	10^{-18} m
geometrijska dinamika (ne kvantna)	gravitacijska	graviton	10^0	$1/r^2$	beskonačan

[#]Aproksimacije. Točna jakost ovisi o uključenim česticama i energijama.

2.1 Klasifikacija oblika energije

Čim postoji sila, postoji i polje sile (prostor u kome se osjeća djelovanje sile, u kome djeluje sila) i, posljedično, postoji i potencijalna energija koja se pohranjuje (akumulira) u tvari. Primjerice, električna i/ili gravitacijska potencijalna energija energija je

¹ Jedinica fermi nije jedinica Međunarodnog sustava jedinica, no, u počast Fermiju, čovjeku koji je prvi proveo kontroliranu nuklearnu fisiju 1942. godine, učestalo se rabi.

² Elektromagnetska i slaba nuklearna sila spojene su u jednu silu, tzv. elektroslabu silu što, međutim, za naša razmatranja nije bitno.

akumulirana u rasporedu električnih naboja, odnosno tijela (sustava) u gravitacijskom polju neke mase.

*Naziv „električna potencijalna energija“ nastao je kao rezultat gledanja na svaki izvor struje kao na nabijeni kondenzator. Ako je, naime, u kondenzatoru pobranjen naboj Q pri naponu U , električna je potencijalna energija jednaka produktu QU [J]. ($AsV=J$) Neka se baterija, npr., može promatrati na potpuno isti način, samo što je naboj Q u njoj posljedica kemijskih reakcija. Isto vrijedi i za električnu mrežu elektroenergetskog sustava u kojoj naboj Q potječe od elektromagnetskog međudjelovanja u proizvodnom dijelu elektroenergetskog sustava (u sinkronim generatorima elektrana). Pojam je pak „električna energija“ namijenjen drugoj svrsi. Njime opisujemo **tranzijent** u procesu pretvaranja električne potencijalne energije u neki drugi oblik: mehanički rad, potencijalnu, kinetičku, rasvjetnu, unutrašnju kaloričku energiju, ...*

Zbog postojanja četiriju sila, postoji šest stalnih oblika, stacionarnih oblika energije koji se mogu akumulirati, uskladištiti, sakupiti, nagomilati, pohraniti u tvari i sačuvati svoj oblik kroz određeno dulje vrijeme. Te ćemo oblike energije kratko nazivati **unutrašnjom energijom**.

To su:

1. **gravitacijska potencijalna energija,**
2. **električna (elektromagnetska) potencijalna energija,**
3. **nuklearna energija,**
(fuzije i fisije / fisija je, pojednostavnjeno, električna potencijalna energija na razini jezgre atoma; oslobađa se kad odbojna električna sila prevlada privlačnu jaku nuklearnu silu/),
4. **kinetička energija,**
(zbog djelovanja jedne ili više sila),
5. **energija mirovanja ($E = mc_{sv}^2$) koju tijelo (sustav) posjeduje jer posjeduje masu, i**
6. **unutrašnja kalorička energija (UKE).**

(U tijelu /sustavu/, s definiranim granicama, UKE energija je akumulirana na razini molekula /ili atoma radi li se o sustavu izgrađenom od atoma/. Jednaka je sumi kinetičke energije molekula (energiji translacije, rotacije i vibracije) i potencijalne energije pridružene vibracijama molekula /privlačenje i odbijanje molekula/. Naime, mehanička se energija /zajednički naziv za sumu kinetičke, potencijalne, elastične i rotacijske energije tijela/ može akumulirati ne samo u tijelu kao cjelini već i na razini molekula koje se kreću i međusobno privlače i odbijaju. /Odnosno, i na razini atoma radi li se o jednoatomske kemijske elementu ili krutim tvarima./ Molekule čvrstih tijela titraju /vibriraju/ oko svojih srednjih položaja, pa i tu postoji stalna pretvorba potencijalne u kinetičku energiju i obratno. Prosječna (translatorska) brzina molekula proporcionalna je temperaturi tijela.)

Ostali su oblici energije prijelazni. To su oblici energije koji prelaze s tijela na tijelo, sa sustava na sustav, nevezano uz masu, bez posredovanja mase (nisu pohranjeni u masi):

1. **mehanički rad ili kraće rad,**

2. toplinska energija,

3. električna (elektromagnetska) energija i

(Električna je energija, ponovimo, tranzijent u procesu pretvorbe energije elektromagnetskih polja / elektrostatičkih i magnetskih /, stvorenih mehaničkim odvajanjem elektrona od jezgre atoma, u neki drugi oblik energije. Elektroenergetski je sustav najkompliciraniji tehnički sustav upravo zbog činjenice da je električna energija prijelazni oblik energije; oblik koji se ne može direktno pohraniti i onda po volji rabiti u vrijeme kada nam to odgovara.)

4. rad trenja

(Rad je trenja mehanički rad kojim se svladavaju sile trenja / sile što tangencijalno djeluju na granicu tijela / i / ili otpora / naprezanja / pretvoren u unutrašnju kaloričku energiju).

Svi ostali oblici energije, različitih naziva, samo su oblici koji pripadaju jednom od nabrojanih. Primjerice, ono što zovemo **mehaničkom energijom** zajednički je naziv za sumu ovih **stalnih, stacionarnih** oblika energije koji se pohranjuju u tijelu (sustavu) kao **cjelini**:

- kinetičke,
- gravitacijske potencijalne,
- elastične potencijalne i
- rotacijske energije sustava (tijela).

U mehaničku se energiju dakle ne uključuju oblici unutrašnje energije poput nuklearne, kemijske i unutrašnje kaloričke energije.

Mehanička se energija često (pogrešno) naziva radom, odnosno mehaničkim radom, budući da je u povratljivim (reverzibilnim, povratnim, obratnim) procesima u potpunosti pretvoriva u mehanički rad te da količinu mehaničke energije koja je prešla sa sustava na sustav iskazujemo radom (mehaničkim radom). Drugim riječima, mehanički je rad prijenos mehaničke energije, no, istaknimo, ne samo mehaničke energije.

Mehanička je energija nagomilani oblik energije, stacionarni, stalni oblik energije, dok je rad (mehanički rad) prijelazni oblik energije koji se javlja samo u trenucima kada mehanička energija, ali i unutrašnja kalorička energija, posredovanjem sila, koje djeluju između sustava (tijela), prelazi s jednog sustava na drugi (s jednog tijela na drugo).

Mehanički je rad, sasvim općenito, količina energije izmijenjene između sustava i okolice (drugih sustava). Ne uključuje energiju izmijenjenu posredstvom toplinske energije. Mehanički je rad prijelazni oblik energije koji se javlja samo u trenucima kada mehanička energija i/ili unutrašnja kalorička energija, posredovanjem sile, prelaze sa sustava na sustav, a po iznosu je jednak umnošku komponente sile u smjeru puta i prevaljenog puta.

(Toplinska energija, pokazat ćemo, prelazi spontano, samoinicijativno i nezaustavljivo sa sustava na sustav (s tijela na tijelo) jedino i odmah postoji li razlika između temperatura sustava / tijela /.)

Od stalnih, stacionarnih oblika energije "nema nikakve koristi". Tek kad se ti oblici energije pretvaraju u prijelazne oblike koji počinju strujati između tijela (sustava, prostora) oni omogućuju uporabu, korištenje energije za potrebe stvaranja i održavanja života i razuma. Energija struji pritom uvijek iz prostora

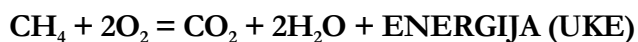
veće gustoće energije u prostor manje gustoće. (*Emitiranje energije sa Sunca u svemir.*) Taj je proces spontani, samonikli, samopoticajni i samoodržavajući: odvija se dok se ne izjednače početno nejednolike raspodjele gustoće energije. Primjerice, toplinska energija počinje strujati čim postoji razlika u temperaturama tijela: tijelo više temperature posjeduje veću gustoću UKE, pa započinje strujanje energije. UKE tijela više temperature, i zbog toga veće gustoće, pretvara se u toplinsku energiju koja struji na tijelo niže temperature. Tamo se pretvara u UKE i time raste gustoća UKE tijela početno niže temperature do izjednačenja s gustoćom UKE tijela iz kojeg struji toplinska energija. Posljedica je sniženje temperature toplijeg tijela (smanjenje gustoće UKE) i povišenje temperature hladnijeg tijela (povećanje gustoće UKE) sve do izjednačenja temperatura tijela (izjednačenja gustoća UKE). Veličina je tijela (ukupna količina pohranjene UKE) pritom nebitna; ne utječe na smjer prenošenja energije.

2.1.1 O unutrašnjoj kaloričkoj, kemijskoj i nuklearnoj energiji

Što je unutrašnja kalorička energija još ćemo bolje razumjeti kada razmotrimo što su, pojednostavnjeno, no dostatno točno za naša razmatranja, kemijska i nuklearna energija.

Kemijska je energija, posredovanjem fotosinteze, uskladištena Sunčeva energija. Ona je oblik unutrašnje energije akumuliran u tvari na razini atoma (oslobađa se pri promjeni rasporeda elektrona oko jezgre atoma, a jezgra se pritom ne mijenja), ona je električna potencijalna energija akumulirana u rasporedu atoma u molekuli, koja se, u svakidašnjem životu, naziva kemijskom energijom.

Naime, među atomima djeluju sile, pa je to znak da postoji poseban oblik energije kojoj se iznos mijenja s promjenom veza među atomima, odnosno, s promjenom kemijskog spoja. U tehničkim primjenama oslobađa se najčešće izgaranjem (izgaranje je ubrzani proces oksidacije) koje pregrupira atome u molekulama. Primjerice, razmotrimo izgaranje metana (plina najzastupljenijeg u prirodnom plinu). Što se događa za vrijeme tog (energetskog) procesa? U osnovi, atomi se ugljika, vodika i kisika, u molekulama metana i kisika, pregrupiraju stvarajući nove molekule (nove kemijske elemente): ugljik-dioksid (ugljični dioksid) i vodu (vodu paru). Svi su atomi i dalje tu, „na broju“, ali u novoj formaciji (rasporedu) atoma u molekulama pohranjena je manja količina električne potencijalne energije nego li u početnoj:

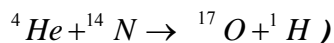


Višak se električne potencijalne energije „oslobađa“ u obliku unutrašnje kaloričke energije pohranjene u skupinama molekula produkata izgaranja koje su na visokoj temperaturi i velikih brzina i zato velikog iznosa unutrašnje kaloričke energije: produkti su izgaranja u plinovitom agregatnom stanju.

(Na temperaturi od dvadeset stupnjeva celzijusa (20 °C) i pod normalnim tlakom (1 atm = 0,101325 MPa = 1,01325 bar; 1 bar = 10⁵ Pa /paskala/; 1 Pa = 1 N/m²) brzina je molekule H₂ 1690 m/s, a O₂ 425 m/s. Pritom je broj sudara molekula 10¹⁰ u sekundi.)

Nuklearna energija energija je koja se oslobađa u nuklearnim transformacijama, tj. pri promjeni strukture atomskih jezgara. Da se energija oslobađa pri spontanom nuklearnim transformacijama, tj. „radioaktivnom raspadu“, bilo je poznato već brzo nakon otkrića radioaktivnosti (A. H. Becquerel, 1896.) Radioaktivni raspad, međutim, kao izvor energije može biti zanimljiv samo u specijalnim situacijama i za male snage. *(Posredno se energija radioaktivnog raspada u unutrašnjosti Zemlje iskoristava prigodom korištenja geotermalne energije.)* Za energetske su pak iskorištavanje nuklearne energije najvažnije transformacije jezgre atoma izazvane vanjskim djelovanjem na jezgru atoma koja se ostvaruju naletom ili ulaskom u atomsku jezgru neke čestice ili druge jezgre; takve transformacije nazivamo nuklearnim reakcijama.

(Prvu nuklearnu reakciju ostvario je E. Rutherford 1919. godine bombardirajući jezgre dušika α -česticama; pritom su opaženi protoni velikih energija. Odvijanje reakcije simbolički opisuje relacija:



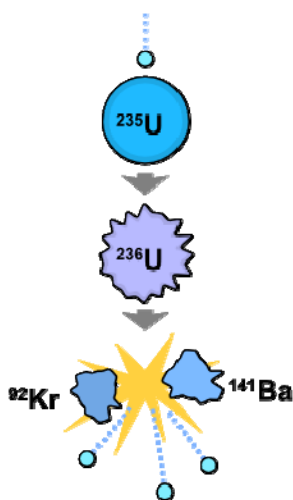
Nuklearnu fisijsku energiju (energiju cijepanja jezgre), pojednostavnjeno promatrano, možemo također smatrati električnom potencijalnom energijom ali akumuliranoj na razini jezgre atoma. Radi se o električnoj potencijalnoj energiji akumuliranoj u skupini i položaju naboja (protona) i neutrona u jezgri. Naime, da bi se u nekom prostoru skupio (sakupljao) istoimeni električni naboj, mora se obaviti (obavljati) rad; mora se svladati (svladavati) resultantna Coulombova sila, kojom se istoimeni naboji odbijaju na putu dovođenja naboja. (Rad se osigurava transformacijom iz nekog stalnog oblika energije.) Jer je rad oblik energije, a energija je neuništiva, to se obavljeni rad ne može izgubiti: pohranjuje se u obliku električne potencijalne energije određene količinom i rasporedom protona (naboja) i neutrona u jezgri atoma. Istoimeni naboji (protoni), međutim, odbijaju se silom, električnom silom, Coulombovom silom: da bi ostali na okupu u jezgri atoma mora protiv djelovanja Coulombove sile djelovati neka druga (privlačna) sila - to je jaka nuklearna sila koja djeluje i koja se javlja između nukleona: proton-proton, proton-neutron, neutron-neutron, kad se te čestice dovoljno približe jedna drugoj. *(Jaka nuklearna sila ne djeluje na elektrone pa stoga ne utječe niti na kemijske procese.)*

Pogledajmo što se dalje događa na primjeru jedinog „prirodnog“ fisionog elementa, uranija-235, prirodnog elementa s kojim je provediva lančana reakcija, prirodnog kemijskog elementa (postoje u što smo se uvjerali i „umjetni“ kemijski elementi) s najvećim brojem protona u jezgri: jezgra uranija sadrži 92 protona. Između svih tih protona djeluje Coulombova sila nastojeći ih razdvojiti: svaki proton djeluje na preostale, svi preostali djeluju na njega. Coulombova sila je elektromagnetska sila, dakle, sila beskonačnog dosega, a jakost joj opada obrnuto proporcionalno kvadratu razmaka između naboja. Razdvajanju protona protivi se jaka nuklearna sila. Ona je jača od Coulombove sile, no njezin je doseg ograničen: na pojedini proton ne djeluju jakom nuklearnom silom oni nukleoni koji su izvan dosega djelovanja jake nuklearne sile. Uz to, jakost nuklearne sile opada mnogo brže nego li obrnuto proporcionalno kvadratu razmaka između protona. U slučaju jezgre uranija-235 resultantna jaka nuklearna sila upravo uravnotežuje resultantnu Coulombovu silu što djeluje na pojedini proton. No, ta je ravnoteža labilna: jezgra samo što se nije raspala pod djelovanjem električnih sila odbijanja. Dostatan je „lagani udarac“ o jezgru i ona će se raspasti: Coulombova će sila nadvladati jaku nuklearnu. Pritom se jezgra uranija raspada u dva (iznimno rijetko u tri) dijela, nastaju dva ili više (tri) neutrona, a oslobađa se dio električne potencijalne energije pretvorivši se (većinom) u UKE dijelova nastalih raspadom jezgre uranija. (Raspadom jezgre uranija nastaju jezgre

drugih kemijskih elemenata.) Ljudsko je biće naučilo kako izazvati raspad jezgre uranija-235: neutronom valja pogoditi jezgru, Slika 2-1.

(Neutron je čestica bez naboja pa na nju ne djeluje Coulombova sila kada prolazi oblak elektrona oko jezgre atoma, odnosno, kada se približava jezgri atoma.)

Tim nastaje jezgra uranija-236. Povećana veličina jezgre, što i dalje sadrži 92 protona, izaziva neravnotežu: smanjuje se veličina sumarne jake nuklearne sile, na pojedine protone, u odnosu na Coulombovu te se, posljedično, jezgra uranija-236 raspada. Nastaju pritom, u ovom slučaju, barij i kripton i tri neutrona koji zatim mogu izazvati raspad idućih jezgara: to je princip rada nuklearnih reaktora (elektrana) ali i „rada“ (eksplozije) nuklearne („atomske“) bombe.



Slika 2-1 Raspadanje jezgre uranija-235

Unutrašnja kalorička energija, koja se dobiva izgaranjem (oksidacijom), nastaje na račun gubitka energije atoma koji ulaze u spoj. Tako atomi vodika i kisika imaju veću energiju, dok su rastavljeni, nego ti isti atomi u spoju H_2O . Želimo li H_2O opet rastaviti u elemente, treba za to potrošiti energiju i taj je potrošak jednak energiji dobivenoj izgaranjem. Drugim riječima, molekulama H_2O treba dovoditi energiju da bi se rastavile u elemente iz kojih su izgrađene. Ta energija, koju treba dovesti molekuli spoja, da bi se rastavila na atome iz kojih je načinjena, naziva se „**energijom vezanja**“ te molekule.

Slične su prilike i kod jezgre atoma; jezgra je načinjena iz protona i neutrona. Ta jezgra ima manju energiju, nego te čestice, kad su svaka za sebe. Primjerice, pokušamo li približiti dva protona i dva neutrona kako bismo formirali jezgru helija, protoni će se međusobno odbijati: što ih drži zajedno u jezgri helija? Odgovor leži u činjenici da je atom helija lakši od sume dva protona, dva neutrona, i dva elektrona. Nešto je mase odvojenih čestica pretvoreno u energiju koja je prešla u okolicu (raspršena u okolicu) kad je stvorena jezgra helija. I sada, prije nego li se jezgra helija ponovno rastavi u sastavne čestice, ista količina (odvedene) energije mora biti pretvorena u masu; ukoliko nije raspoloživa, jezgra se helija ne može raspasti. Ta se energija naziva energijom vezanja. Dakle, energija je vezanja jezgre energija koju treba potrošiti da bi se atomska jezgra rastavila u zasebne protone i neutrone (od kojih je načinjena). Kod atomske jezgre energija je vezanja vrlo velika tako da se može registrirati gubitak mase pomoću relacije:

$${}_Z^A M + \frac{E}{c_{sv}^2} = Z \cdot {}_1^1 H + (A - Z) \cdot {}_0^1 n.$$

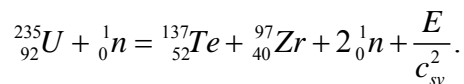
Energija E , koja se iz ove relacije može izračunati, energija je vezanja jezgre atoma ${}_Z^A M$:

$$E = c_{sv}^2 \left[Z \cdot {}_1^1 H + (A - Z) \cdot {}_0^1 n - {}_Z^A M \right],$$

a izraz u zagradi defekt je mase:

$$\delta m = Z \cdot {}_1^1 H + (A - Z) \cdot {}_0^1 n - {}_Z^A M$$

Razmotrimo sada ponovno cijepanje jezgre U-235 pogođene neutronom. Neka se reakcija ovog puta odvija ovako:



Budući da neutroni nemaju električnog naboja, to onda bedem električnog potencijala, koji okružuje jezgru, za neutron ne postoji pa i najsporiji neutron (neutron najmanje energije) može ući u jezgru u slobodnu energetska razinu za neutrone u jezgri. Time u jezgri nastaje nova situacija koja ima važne posljedice. Naime, u promatranom slučaju (U-235), broj je neutrona u jezgri neparan, pa je energija posljednjeg neutrona u jezgri, budući da nema svojeg para, razmjerno visoka. Dolaskom neutrona izvana sparuje se taj posljednji neutron i zbog toga se njegova energija smanjuje. To oslobađanje energije neparnog neutrona, kad je dobio svoj par, daje energiju oscilacije jezgre, kod koje onda odbojne električne sile prevladavaju i jezgra se rascijepi u dva približno jednako teška dijela, koji se odbijaju električnom silom i zato se razdvajaju velikom brzinom. U procesu nastaju i dva do tri brza neutrona. Ukupna količina gibanja produkata jednaka je nuli budući da je jezgra U-235 na početku mirovala, a neutron, koji je u nju ušao, imao je malu brzinu. Što je međutim s bilancom energije? Kolika je energija oslobođena cijepanjem jezgre U-235? Poznajemo li mase produkata cijepanja, tu energiju lako određujemo iz gubitka mase mirovanja:

$$E = c_{sv}^2 \cdot \delta m = c_{sv}^2 \cdot \left[{}_{92}^{235}U + {}_0^1n - ({}_{52}^{137}Te + {}_{40}^{97}Zr + 2{}_0^1n) \right]$$

Međutim, možemo je i procijeniti („procijeniti“, budući da energija oslobođena za vrijeme fisije nije samo električna potencijalna energija oslobođena „preuređenjem rasporeda“ nukleona), npr. ukoliko ne poznamo defekt mase (nemamo mogućnosti izmjeriti ga), izračunamo li rad što ga obavi električna sila rastavljajući jezgre telurija i cirkonija koje su se dodirivale u trenutku početka razdvajanja. Označimo li s \mathbf{r}_1 polumjer prve, a s \mathbf{r}_2 polumjer druge jezgre, onda je razmak njihovih središta u trenutku nastanka $(\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2)$, a električna potencijalna energija

$$E_{el} = \frac{Z_1 e \cdot Z_2 e}{4\pi\epsilon_0 (r_1 + r_2)}.$$

$Z_1 = 52$ je redni broj prve jezgre, $Z_2 = 40$ druge, a e je naboj elektrona. Polumjer r jezgre bilo kojeg atoma može se izračunati iz njegovog masenog broja:

$$r = R_0 A^{\frac{1}{3}}$$

gdje je $R_0 = 1,4 \cdot 10^{-15}$ metara. Provede li se račun, dobivamo da se u našem slučaju radi o energiji $E_{el} \approx 200$ MeV što se slaže s dosad rečenim.

Zaključno, međutim, valja istaknuti i naglasiti da današnja energetska tehnologija upotrebljava (rabi) samo relativno slabe prirodne sile: gravitaciju i elektromagnetizam. Daleko jača, jaka nuklearna sila, sadrži neusporedivo više. No, eksploatacija svijeta ispod jednog fermija i razvoj "nuklearne vještine" (iskorištavanje jake nuklearne sile) još su uvijek (veoma) daleka budućnost. Da niti ne spominjemo poznavanje pretvorbe većih količina (sve) mase u energiju.

2.2 O opskrbi Zemlje energijom

Postavimo sada pitanje: otkud energija na Zemlji?

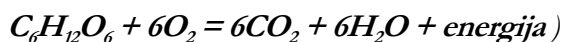
Najviše, i presudnu količinu, energije Zemlja dobiva izravno (direktno), ili neizravno (indirektno), od Sunca. Bez te energije ne bi bilo života na Zemlji. Ona omogućuje održavanje srednje temperature Zemlje, a akumulira se pomoću fotosinteze u zelenim biljkama i u nekim bakterijama i algama u oceanima.

Uloga je kemijske energije pritom ključna. Naime, fotosintezom se dio dozračene Sunčeve energije, u obliku svjetlosti (elektromagnetsko zračenje vidljivo okom), pretvara u kemijsku energiju pohranjenu u stvorenim organskim molekulama.

Za fotosintezu su potrebni, između ostalog, voda i ugljik-dioksid (ugljični dioksid). Za vrijeme dok je biljka izložena svjetlosti apsorbira ugljik-dioksid (ugljični dioksid) a ispušta kisik. Tijekom fotosinteze biljka kroz korijen uzima hranjive tvari:



(U suprotnom procesu, procesu oksidacije, izgaranja, oslobađa se energija uz istodobno stvaranje CO_2 :



Na fotosintezi se, njenom minulom radu točnije, još uvijek, i dugo će se, temelji naša (Zemljina) opskrba energijom: fotosinteza omogućuje proizvodnju hrane i goriva. Taj je proces započeo prije oko tri milijarde godina na našem planetu omogućujući stvaranje kisika u atmosferi i fosilnih goriva koja se nalaze u tlu. U njima je, pomoću fotosinteze, pohranjena energija Sunčevog zračenja (prijelazni oblik energije) transformirana u kemijsku energiju (stacionarni oblik energije). Tako akumulirana kemijska energija, tijekom milijuna godina, kroz hranidbeni lanac i djelovanje tlaka i temperature, zapravo su današnji primarni energetske izvori u obliku ugljena, sirove nafte i prirodnog plina.

(Spaljivanjem se goriva akumulirana kemijska energija nemilice troši i nepovratno smanjuje: oko 90% energetske potreba čovječanstva osigurava se danas izgaranjem ugljena, nafte i prirodnog plina.)

Međutim, vrlo se mali dio dozračene Sunčeve energije akumulira posredstvom fotosinteze: tek 0,023%. (Prema nekim analizama, Slika 2-2, 0,1%.)

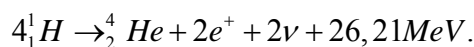
Nadalje, od energije preuzete djelovanjem fotosinteze, samo 45% ostaje u biljkama u obliku materije, a ostatak od 55% vraća se tzv. disanjem u atmosferu. Netoprirast nastao djelovanjem fotosinteze na Zemlji godišnje iznosi $164 \cdot 10^9$ tona, od čega se 2/3 takve materije proizvodi na kontinentima, a 1/3 u oceanima.

2.2.1 Sunčevo zračenje

„Sunčevo zračenje“ opći je naziv za energiju koju Sunce emitira u svemir. Izvor su Sunčeve energije fuzione nuklearne reakcije, kao npr. spajanje dvaju atoma vodika u atom helija, spajanje dvaju atoma helija u atom berilija, pretvorba berilija u litij itd. Međutim, **najvažniji je izvor Sunčeve energije odvijanje ovakve termonuklearne fuzije na Suncu:**

- 4 atoma vodika spaja se u helij i pritom se oslobađaju goleme količine energije: 0,75% mase pretvara se u energiju (0,7% prema nekim autorima), dok se u današnjem najboljem, ljudima poznatom procesu, procesu fisije, samo 0,1 % mase pretvara u energiju;

- nastaje jezgra helija, 2 pozitrona i 2 neutrina, i oslobađa energija koja iznosi 26,21 MeV



- 4,2 i nešto milijuna tona u sekundi gubitak je mase Sunca (pretvorba mase u energiju)

(No, zasad, to nas ne brine: Sunce će potrajati još kojih 5 milijardi godina prije nego li se pretvori u „crvenog diva“.);

- samo milijarditi dio emitirane energije Sunca dopire do Zemlje.

Energija je, koja se formira i pohranjuje u unutrašnjosti Sunca, unutrašnja kalorička energija: transformirana energija fuzije. Pretvara se u toplinsku energiju i prenosi prema površini (kondukcijom /vođenjem, provođenjem/) s koje se emitira u obliku elektromagnetskog zračenja. Osim tog postojanog zračenja, Sunce povremeno emitira i pljuskove elektrona, protona i električki nabijenih jezgara nekih elemenata.

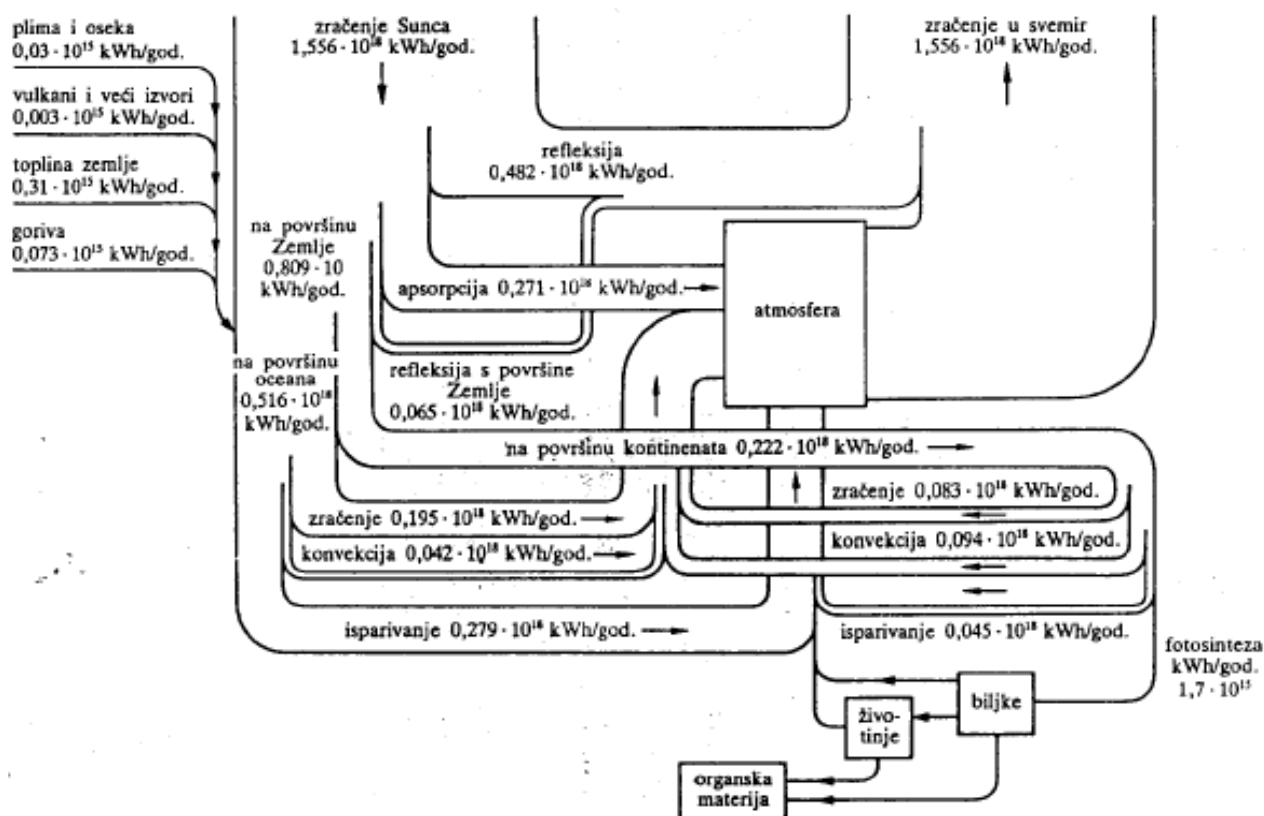
Sunčevo je zračenje elektromagnetsko zračenje. Nastaje kada atomi ili molekule, u kojima je pohranjena unutrašnja kalorička energija, emitiraju elektromagnetske valove.

Približno pola Sunčevog zračenja što dopire do Zemlje vidljivi je dio elektromagnetskog spektra; drugi je dio pretežito infracrveno zračenje s malim postotkom ultraljubičastog zračenja. Naime, ako su temperature tijela veće od oko 800 K, tijela počinju zračiti uz infracrveno zračenje i vidljivu svjetlost, a pri vrlo visokim temperaturama, osim infracrvenog i vidljivog zračenja, emitiraju i ultraljubičasto zračenje.

2.2.2 O prijemnostima Sunčeve energije

Spomenimo sada proturječnosti (kontroverzije, nesuglasice, nesporazume, nerazumijevanja, prijemnosti) povezane s mogućnošću zadovoljavanja energetskih

potreba Zemlje Sunčevom energijom. Istaknimo ponovno, Sunčeva je energija energija koja nastaje u unutrašnjosti Sunca za vrijeme termonuklearne fuzije. Spajanjem četiriju jezgara vodika u helij oslobađa se energija od $26,21 \text{ MeV} = 1,17 \cdot 10^{18} \text{ kWh}$ za svaku jezgru helija. Ta se energija prenosi prema površini Sunca s koje zrači u Svemir: $3,3 \cdot 10^{27} \text{ kWh}$ godišnje. Od toga dopire do Zemlje, do vrha Zemljine atmosfere točnije, tek, približno, milijarditi dio: $1,56 \cdot 10^{18} \text{ kWh}$ godišnje. Od te energije, dozračene do vanjskog ruba Zemljine atmosfere, oko 30% reflektira se u svemirski prostor, oko 47% pretvara se u toplinu i emitira kao infracrveno zračenje (elektromagnetsko zračenje), oko 23% troši se na isparivanje vode i oborinski ciklus u troposferi, a samo se mali dio troši na fotosintezu (0,023% /0,1%/), pretvara u energiju vjetra, i slično, Slika 2-2. Naime, od Sunčeve se energije, dozračene do ruba atmosfere, $0,482 \cdot 10^{18} \text{ kWh}$ godišnje (odmah) neposredno reflektira u svemir. Osim toga jedan dio energije koji stigne do Zemljine površine također se reflektira bez promjene valne duljine: $0,065 \cdot 10^{18} \text{ kWh}$ godišnje. $0,271 \cdot 10^{18} \text{ kWh}$ godišnje Sunčeve energije apsorbira atmosfera pri njezinom prolasku kroz atmosferu. Do Zemljine površine tako dopire i utječe na toplinske procese energija od $0,738 \cdot 10^{18} \text{ kWh}$ godišnje, ili 47,4% one koja sa Sunca stiže do vanjskog ruba Zemljine atmosfere. Od te energije dio se reemitira u obliku infracrvenog zračenja, a ostatak se ili konvekcijom (način prijelaza toplinske energije) predaje atmosferi ili se njime isparuje voda s oceana i kontinenata. I ta se količina energije također, u obliku entalpije vodene pare, prenosi u atmosferu. Ako se pretpostavi da je energija koja dopire do Zemljine površine proporcionalna ploštini, do oceana stiže $0,516 \cdot 10^{18} \text{ kWh}$ godišnje, a na kontinente $0,222 \cdot 10^{18} \text{ kWh}$ godišnje. Od dozračene energije reflektira se kao infracrveno zračenje nešto manje od 38%, bez obzira na to je li riječ o kopnenoj ili vodenoj površini. (Energija konvekcijom prenesena u atmosferu znatno je veća na kontinentima nego na oceanima, a za energiju isparivanja po jedinici površine vrijedi obrnuto.) Sva energija Sunčeva zračenja konačno zrači u atmosferu, pa se na taj način održava toplinska ravnoteža na Zemlji.



Slika 2-2 Zemljina energijska bilanca

Sunčevo se zračenje na vrhu Zemljine atmosfere (zračenje što dopire do vanjskog ruba Zemljine atmosfere) naziva **ekstraterestičkim zračenjem**. Njegova srednja vrijednost, koja se naziva i **solarnom (Sunčevom) konstantom**, iznosi 1366 W/m^2 . (Sunčeva se konstanta mijenja za približno 6,9% kroz godinu: od 1412 W/m^2 u siječnju do 1321 W/m^2 u srpnju kao i za nekoliko promila tijekom dana.)

To je snaga Sunčeva zračenja na jediničnu površinu okomitu na smjer Sunčevih zraka na srednjoj udaljenosti Zemlje od Sunca, i to na vrhu Zemljine atmosfere, tako da ne postoji utjecaj apsorpcije i raspršenja u atmosferi. Međutim, pri prolasku kroz atmosferu Sunčevo zračenje slabi jer se djelomično raspršuje na molekulama plinova i česticama prašine, a djelomično ga apsorbiraju plinovi (ozon, vodena para, ugljični dioksid i dr.) te kad dopre do Zemlje snage je (prosjeak na Zemljinoj površini) nešto veće od 160 W/m^2 . S druge strane, gustoća je energije u New Yorku oko 400 W/m^2 ; bi li bilo isplativo zauzeti toliko golemu površinu na kojoj bi se prikupljala Sunčeva energija za energetske potrebe grada New Yorka? Pokraj toga, uvjerit ćemo se, eksergija je Sunčeve energije na površini Zemlje jako mala. Posljedično, trebamo raspolagati s velikim količinama eksergije (materijala) kako bismo osigurali iskorištavanje Sunčeve energije. Kako to razumjeti? Daruje li vam netko šaku riže, preživjet ćete dan s količinom energije pohranjene u riži. Međutim, razbacajte li se ta količina riže preko teritorija Hrvatske umrijet ćete od gladi (nedostatka energije) prije nego li prikupite svu rižu.

Rješenje je, dakle, prikupljanje Sunčevog zračenja (Sunčeve energije) na vrhu Zemljine atmosfere i prenašanje (bez /velikih/ gubitaka) na Zemlju. To je problem kojeg treba riješiti.

Konačno, da bi se dobila potpuna Zemljina energetska bilanca, valja energiji Sunčeva zračenja dodati „vlastitu“ energiju Zemlje („geotermalnu energiju“ i energiju plime i oseke) i ljudsko djelovanje.

Geotermalna se energija može smatrati fosilnom nuklearnom energijom. Ona je zbroj unutrašnje kaloričke energije nastale raspadanjem radioaktivnih elemenata koji se nalaze u Zemljinoj kori (u prvom redu uranija, torija i kalija), procesa koji se spontano, samopoticajno razvija i održava u unutrašnjosti Zemlje, i unutrašnje kaloričke energije od nastanka Zemlje: „Zemljine topline“ koja se provođenjem pojavljuje na površini. Pritom je 80% geotermalne energije energija radioaktivnog raspadanja, a 20% energija je od nastanka Zemlje. Energija plime i oseke pak rezultat je gravitacijskog djelovanja Sunca i Mjeseca, ali i rotacije Zemlje. Ni jedan od tih oblika energije nije posljedica Sunčeva zračenja, a njihov je udio u ukupnoj energiji na Zemlji jako malen, manji od 0,04% Sunčeve energije koja dopire do Zemljine površine, pa se stoga rijetko razmatra. Slično, i ljudsko se djelovanje na Zemljinu energetska bilancu uobičajeno ne promatra budući da ono, u današnjim razmjerima, ne utječe na globalnu toplinsku (termičku) ravnotežu.

2.3 O energiji, eksergiji i anergiji

Upoznali smo jednu mogućnost podjele (klasifikacije) oblika energije. Upoznajmo sada i drugu. I opet ćemo krenuti od prihvaćene definicije energije:

energija je sposobnost obavljanja rada.

No, morat ćemo prije toga malo pozornije razmotriti što to znači „obavljanje rada“, što je to (mehanički) rad?

Zbog toga ćemo prihvatiti promijenjenu definiciju mehaničkog rada, koja će se (malo) razlikovati od (poznate nam) definicije iz „Fizike“:

„neki je sustav obavio pozitivni rad, za vrijeme nekog procesa, ako se jedino vanjsko djelovanje tog sustava može svesti na podizanje tereta.“

Zašto mijenjamo definiciju rada? Zašto prihvaćamo ovakvu definiciju? Što je „sustav“? Zašto naglašavamo „pozitivni rad“? Što je „proces“? Što znači „jedino vanjsko djelovanje“? Što je „teret“?

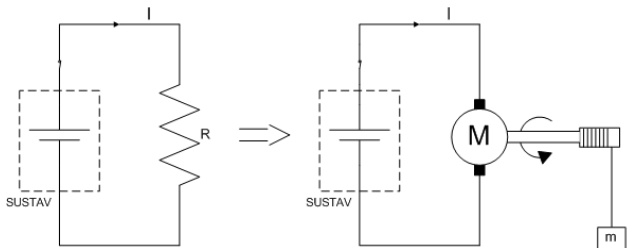
Krenimo redom. Zašto mijenjamo definiciju i prihvaćamo novu?

Postavimo pitanje: obavlja li se rad ako električna struja, koja nastaje transformacijom iz kemijske energije baterije (*baterija je sustav*), protječe kroz radni otpornik, slika 2-3? (*Svladava li se pritom sila na putu? Postoji li pomak hvatišta sile?*)

Makroskopski (fenomenološki) promatrano, a tako ćemo odsad (uglavnom) promatrati energetske pretvorbe i procese, prema „definiciji iz Fizike“, ne! Ne

svladava se sila na putu (nema pomaka hvatišta sile u pravcu djelovanja sile), posljedično, nikakav se rad ne obavlja!

Što, međutim, protječe li ta ista struja, ne kroz otpornik, slika 2-3, nego kroz električni motor? Obavlja li se sada rad? Očito, da. Električna se energija u električnom motoru pretvara u mehanički rad kojim se podiže masa u polju sile teže Zemlje. Kemijska se energija baterije (sustava) posredovanjem električne energije i mehaničkog rada pretvara u potencijalnu energiju „tereta“: sustav (baterija) obavlja rad. Zato mijenjamo definiciju.



Slika 2-3 Električna energija oblik je mehaničkog rada

Što je „sustav“?

Sustav je (odabrani) predmet opažanja, promatranja, praćenja, proučavanja, izučavanja, analize, studiranja, razmatranja, ...

Sustav može biti bilo što ili tko: foton, elektron, atom, dio ili cijela termoelektrana, svemir. Može biti ljudsko biće ili životinja, ljudsko ili životinjsko tijelo ili dio (dijelovi). Može biti i zrakoprazan prostor. (*Npr., kolika je eksergija 1 m^3 vakuuma?*)

Sve što nije sustav, okolica je (sustava).

Okolicu sustava mogu pojedinačno ili sumarno predstavljati zrak (atmosfera), tlo i voda, no, isto tako i različiti drugi sustavi s kojima promatrani sustav međudjeluje (komunicira) izmjenjujući energiju i/ili masu (tvar, materiju).

(U našim ćemo razmatranjima upotrebljavati tri pojma: okolina, okolica i okoliš. „Okolina“ – sa sociološkim značenjem: „Okolina (ili sredina) u kojoj se djeca svakodnevno kreću uvelike utječe na njihov razvoj.“ „Okolica“ – s prostornim značenjem: „Okolica je Zagreba privlačna izletnicima.“ „Okoliš“ – s ekološkim značenjem: „Okoliš industrijske četvrti Zagreba nezdrav je za stanovanje.“)

Granica sustava odvaja sustav od okolice, od ostalih sustava.

Granica sustava može biti fizička ili pomišljena (apstraktna, nematerijalna: npr, matematički definiranom graničnom plohom), čvrsta ili pomična: volumen (obujam, zapremina) sustava može biti stalan (konstantan) ili promjenljiv.

Većina sustava koje ćemo promatrati bit će (jesu) **tvarni sustavi**, tj. oni sadržavaju masu (tvar, materiju) iako katkad mogu sadržavati samo energiju.

(U našim će razmatranjima (većinom) masa biti u takvom agregatnom stanju koje se malim otporom suprotstavlja promjeni oblika: bit će u fluidnom stanju. Promjena oblika fluida (deformacija fluida) naziva se strujanjem.)

Svaki sustav posjeduje niz **osobina** (dobar, lijep, pametan, spretan, marljiv, suzdržan, masa, tlak, temperatura, obujam, oblik, gustoća, broj elektrona, neutrona, boja, količina i oblik akumulirane energije,...) koje se mogu opažati i, neke, barem u načelu, mjeriti tj. kvantitativno iskazati.

Mjerljive se osobine sustava (masa, tlak, volumen, temperatura, gustoća, ...) nazivaju **fizikalna svojstva** ili **svojstva** a katkad i **funkcije**.

Stanjem sustava naziva se sklop (skup) njegovih (fizikalnih) svojstava, odnosno, **stanje** je sustava (fizikalno, kemijsko, emotivno, ...) određeno njegovim svojstvima.

Nije potrebno poznavati sva svojstva promatranog sustava da bi se njegovo stanje moglo jednoznačno definirati i razlikovati od bilo kojeg drugog mogućeg stanja.

Svojstva (funkcije) koja su određena isključivo stanjem sustava, a ne načinom (putom, procesom) na koji je dotično stanje postignuto, nazivaju se veličine (funkcije) stanja. Matematički, te funkcije (veličine) posjeduju svojstvo **totalnog (potpunog) diferencijala**.

Sustav međudjeluje (komunicira) sa svojom okolicom (s drugim sustavima) jedino i samo tako (ne postoji druga mogućnost) da izmjenjuje energiju i/ili masu, odnosno i oblike energije koji su akumulirani u masi što prelazi granice sustava ulazeći i izlazeći iz sustava. Pritom se mijenja stanje sustava (fizikalno i/ili kemijsko). *(Zašto vidimo, čujemo?)*

Sustav se ne definira, definiraju se odnosi između sustava i okolice koji su posljedica postojanja četiriju vrsta sustava:

- **zatvoreni sustav (ZS):** granice su sustava neprelazne za masu. Masa je zatvorenog sustava time nepromjenljiva i poznata. (Pretpostavljamo da, za naša razmatranja, tako dugo dok nisu uključeni nuklearni procesi, vrijedi princip očuvanja mase: „masa je nestvoriva niti uništiva“. Naime, energije s kojima ćemo se susretati, a koje nisu nuklearnog porijekla, toliko su male da im je relativistička masa E/c_{sv}^2 zanemariva u odnosu prema masi sustava.) Energija može prelaziti granice zatvorenog sustava. (Radi se pritom, očito, o prijelaznim oblicima energije);
- **otvoreni sustav (OS):** granice su otvorenog sustava prelazne za masu i energiju. Zbog toga je, u najopćenitijem slučaju, masa otvorenog sustava promjenljiva i nepoznata (količinski);
- **adijabatski sustav (AS):** granice su adijabatskog sustava neprelazne za toplinsku energiju. (To je idealizacija realnosti kako bi se mogli provesti proračuni promjene entropije /gubitaka eksergije/.) Ostali oblici energije, kao i masa, mogu prelaziti granice adijabatskog sustava;

- izolirani sustav (IS): granice su izoliranog sustava neprelazne kako za masu tako i za energiju. (Npr., svemir, odnosno, termos-boca /idealizacija realnosti/.)

Zašto naglašavamo „pozitivni rad“?

Rad je, podsjetimo se, u „Fizici“ definiran ovom jednažbom:

$$W_{12} = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{s} = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} \cdot \vec{c} dt =$$

$$= \int_{t_1}^{t_2} \left\{ F_x [x(t), y(t), z(t)] x'(t) + F_y [x(t), y(t), z(t)] y'(t) + F_z [x(t), y(t), z(t)] z'(t) \right\} dt [J]$$

(Sila je, u općem slučaju, funkcija puta, brzine i vremena.)

Dakle, mehanički je rad jednak skalarnom produktu vektora sile i vektora pomaka njezina hvatišta:

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{s} = F \cdot ds \cdot \cos\varphi = F \cdot c dt \cdot \cos\varphi [J].$$

Jednažbu, za naše potrebe, prilagođujemo tako da na desnoj strani dodajemo minus ispred integrala:

$$W_{12} = - \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{s} = - \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} \cdot \vec{c} dt [J]$$

odnosno,

$$dW = - \vec{F} \cdot d\vec{s} = -F \cdot ds \cdot \cos\varphi = -F \cdot c dt \cdot \cos\varphi [J].$$

Ta je promjena pitanje dogovora – nije vezana uz fizikalnost mehaničkog rada.

Obrazložimo zašto stavljamo predznak minus.

Djeluje li sila na sustav tako da se njezino hvatište kreće u smjeru djelovanja sile, mehanički se rad dovodi sustavu. (Sila obavlja rad na sustavu: taj se rad pretvara u kinetičku i/ili potencijalnu i/ili unutrašnju kaloričku energiju i pohranjuje u sustavu.) Uobičajeno je da se takav mehanički rad u elektroenergetici označi negativnim predznakom. Ako, naprotiv, sila djeluje nasuprot smjeru gibanja hvatišta, sustav obavlja (predaje u okolicu) mehanički rad: sustav svladava silu na putu. Pritom se mehanički rad dobiva transformacijom iz mehaničke energije (kinetičke, potencijalne, ...) i/ili unutrašnje kaloričke energije pohranjenih u sustavu; obavljanjem mehaničkog rada smanjuje se količina unutrašnje energije (kinetičke, potencijalne, unutrašnje kaloričke energije /pretpostavljamo pritom da su i nuklearna i kemijska energija već pretvorene u unutrašnju kaloričku energiju/) sustava. Takav rad označujemo pozitivnim predznakom. Zašto? Zadatak je energetske procesa proizvodnja eksergije transformacijom iz oblika unutrašnje energije. Najrazličitiji su sustavi pritom samo posrednici; ne pretrpljuju nikakve (konačne) promjene. Drugim riječima, unutar sustava odvijaju se pretvorbe unutrašnje energije u eksergiju (mehanički rad i/ili

električnu energiju) i tu eksergiju sustav predaje u okolicu (drugim sustavima u kojima će se obavljati transformacije u korisne oblike energije). Zbog toga se onda takav (zahtijevani) smjer tijeka (strujanja) eksergije (mehaničkog rada, električne energije) dogovorno označava pozitivnim predznakom.

Na kraju, naglasimo: **mehanički se rad pojavljuje samo uz međusobno djelovanje sustava i njegove okoline; posrednik je međudjelovanja sila.**

Što je „proces“?

Proces je promjena stanja sustava iz jednog u drugo, odnosno, prijelaz promatranog sustava iz nekog početnog stanja (1), stanja neposredno prije početka odvijanja procesa (npr, prije početka djelovanja neke sile), u neko konačno, završno stanje (2) postignuto neposredno nakon svršetka procesa (npr, nakon što je sila prestala djelovati), pri čemu se mijenja jedno ili više, pa čak i sva svojstva sustava.

(Proces se odvija jer sustav izmjenjuje energiju i/ili masu s okolicom, s drugim sustavima. Energija i/ili masa izmjenjuju se, pokazat ćemo, zbog djelovanja sile /sila/ i/ili temperaturnih razlika između sustava i okoline.)

Proces može biti bilo kakav, sustav može biti bilo što ili tko.

Ilustrirajmo dosad rečeno jednostavnim primjerom: odgovorimo na upit ovog „problema“: Promatrajmo dvije (prozirne) čaše ispunjene do polovice: u jednoj je bijelo, a u drugoj crno vino. Određena se količina, recimo žličica, bijelog vina izvadi iz prve čaše i prenese u drugu, u crno vino; smjesa se vina zatim dobro promiješa. Nakon toga se ista količina (žličica), sada jednolike mješavine vina, iz druge čaše vrati u prvu. Pitanje je: ima li u prvoj čaši manje crnog vina nego li u drugoj bijelog ili obratno? Ili, možda su te količine jednake?

Odgovor znademo, intuitivno. Međutim, kako ga protumačiti (objasniti, dokazati njegovu točnost)?

Inženjerstvo je materijalizacija znanosti: u osnovi valja postići da uvijek "nešto" radi "nešto". ("Nešto" i "nešto" može biti bilo što. Recimo program koji mijenja font slova, ili sinkroni generator, visokonaponski prekidač, nuklearni reaktor, ...) Ono je sklop najrazličitijih znanstvenih i neznanstvenih disciplina i utjecaja (političke primjerice). Iako se najvećim dijelom temelji na egzaktnim znanstvenim disciplinama, inženjerstvo uključuje i najrazličitije neznanstvene i heurističke discipline kao i kompromis (mirenje, nagodbu, suglasje) između realnosti, egzaktnosti i nužnih pojednostavljenja (idealizacija) fizičkih pojava i zbivanja kako bi (numerički) matematički proračuni bili provedivi, kako bi se (uopće) moglo dobiti (upotrebljivo /ili bilo kakvo/) numeričko rješenje nekog problema. (Na primjer, „inženjersko“ /upotrebljivo/ rješenje nije toliko veliki sustav diferencijalnih jednadžbi da ga ne može riješiti današnje elektroničko računalo; inženjer će ih, primjerice, pretvoriti u algebarske jednadžbe, tako da promatra samo stacionarna stanja, kako bi dobio numeričko rješenje.) Matematički proračuni nisu pritom sami sebi svrha: omogućuju predviđanje ponašanja tehničkih sustava. (Predviđanje je, međutim, povezano s budućnošću, budućnost s neizvjesnošću, neizvjesnost s vjerojatnošću: zato inženjeri moraju dobro poznavati i teoriju vjerojatnosti (teoriju pouzdanosti) i matematičku statistiku.) Tek kad mogu predvidjeti ponašanje nekog tehničkog sustava, inženjeri smatraju da o njemu nešto znaju. Npr., inženjer zadužen za let zrakoplova između Zagreba i New Yorka mora do detalja znati što će se dogoditi sa zrakoplovom: kojom će rutom letjeti, kojom brzinom, na kojoj visini, koliko će dugo trajati let, kolika će biti potrošnja goriva, što ako se promjene zračne struje, što ako se dogodi kvar (kvarovi), itd, itd.) No, premda

matematika svojom dubokom logikom upućuje inženjerstvo (inženjera), ona ne može potvrditi valjanost inženjerskih rješenja. Njih potvrđuju pokusi ili praksa: što se stvarno događa u odnosu na predviđena događanja. Inženjer zatim prihvaća ili odbacuje rješenja prosuđujući kako se blisko tehnički sustav ponaša u odnosu na predviđanja. Drugim riječima, inženjer rješava probleme i provjerava rješenja. Ne bira probleme; rješava ih kako „pristižu“. Pritom postupak rješavanja mora biti što „ekonomičniji“: inženjer se ne će služiti teorijama relativnosti daje li zadovoljavajuće rješenje „klasična (Newtonova) mehanika“, ne će posegnuti za Maxwellovim jednadžbama ako zadovoljavajuće rješenje može dobiti primjenom Ohmovog zakona. Temeljni zadatak (većine) inženjera nije stoga potraga za novim znanjima i saznanjima, znanje mu je alat. Što bolji alat, što veće znanje, to bolje. (Dakako, inženjer i stvara alat. Ali onda je alat problem koji treba riješiti. U tom slučaju obogaćuje čovječanstvo novim spoznajama.)

(Kako se školuje inženjer? Proučavanjem inženjerskih predmeta kojih je zadatak podučiti razmišljanjima i djelovanjima primjerenim inženjerima.)

Vratimo se sada našem „problemu“. Spomenuli smo, probleme ćemo, povezane s energetske pretvorbama i procesima, rješavati primjenjujući četiri principa očuvanja (mase, količine gibanja, energije i momenta količine gibanja), princip rasta entropije i jednadžbu stanja tvari. Drugim riječima, moći ćemo (matematički egzaktno) rješavati samo probleme (do) sa šest nepoznanica. No, ti su principi primjenjivi i na mnogobrojne jednostavnije probleme: poput „našeg“ sa čašama. Da bismo ga riješili, dostajat će primjena samo principa očuvanja mase: „masa je nestvoriva i neuništiva“. Kako?

Zamislamo svaku od čaša okruženu imaginarnom granicom. U tom slučaju, povezano s našim pitanjem odnosno „procesom“, čaša postaje otvoreni sustav, a vino u čaši masa otvorenog sustava.

Promatramo prvo ukupan (ne obaziremo se na boju) prijelaz vina (mase) preko jedne od granica otvorenog sustava, npr., onog što početno sadrži bijelo vino. Budući da ista količina mase (žličica vina) prelazi granicu u jednom i u drugom smjeru (prvo oduzimamo masu /žličicu vina/ otvorenom sustavu, da bismo je zatim vratili) to je **ukupan** prijelaz vina, očito, jednak nuli („masa je nestvoriva i neuništiva“):

$$\delta m = 0.$$

(Simbol će δ u našim izučavanjima značiti ovo:

δ = konačna vrijednost (2) neke fizikalne veličine (svojstva) sustava – početna vrijednost (1) te veličine

Simbolom Δ označavat ćemo malu količinu neke fizikalne veličine: Δm znači malu količinu mase, dm diferencijalnu, beskonačno malu.)

Drugim riječima vrijedi:

$$\delta m = m_2 - m_1 = 0.$$

Pritom je m_1 masa otvorenog sustava (masa vina u prvoj čaši) prije početka odvijanja procesa, a m_2 masa otvorenog sustava (masa vina u prvoj čaši) nakon završetka procesa kojem je podvrgnut otvoreni sustav. Sam se pak proces sastoji u oduzimanju žličice bijelog vina, stavljanju tog bijelog vina u čašu s crnim, miješanju smjese, kako bismo dobili jednoliku, i zatim vraćanju žličice smjese u čašu s bijelim vinom. (Naglasili smo, proces može biti bilo kakav tijekom najrazličitijih događanja koja imaju početak i kraj.)

Promatrajmo sada ukupan prijelaz bijelog vina.

Koliko bijelog vina nije vraćeno nazad u prvu čašu (čašu s bijelim vinom)?

*Neka ta količina bude mase $\times [\text{kg}]$. Tada, budući da je **ukupan** prijelaz mase (vina) jednak nuli, masa $\times [\text{kg}]$ crnog vina mora iz druge čaše biti prenesena u prvu.*

Odgovor je dakle: koliko u čaši s bijelim vinom ima crnog vina, toliko u čaši s crnim vinom ima bijelog vina: cijeli je proces simetričan.

Je li je zaključak točan, rješenje točno? Jest, uz jedan uvjet: gustoće vina moraju biti jednake

$$\rho_{\text{bijelog vina}} = \rho_{\text{crnog vina}}$$

Nije li ispunjen taj uvjet, u realnosti ne mora biti, problem postaje stohastičke (vjerovatnosne) prirode i, najvjerovatnije, ne može se egzaktno riješiti. (Potrebne su daljnje pretpostavke koje mogu, ali i ne moraju biti ispunjene.)

Očito, tražeći odgovor na postavljeno pitanje, snijesno smo idealizirali realnost, pojednostavnili odnose, što je uobičajeni inženjerski postupak, kako bismo dobili rješenje, odnosno, kako bismo pojednostavnili fizičke, a time i matematičke modele, do razine da uopće možemo dobiti (nekakvo, bilo kakvo) rješenje. Ono bitno pritom, inženjer mora znati prepoznati, odabrati i poznavati pretpostavke, i biti ih svjestan u svakom trenutku, uz koje vrijedi rješenje i samim time ograničenja rješenja: inženjerska je prosudba ponaša li se sustav zadovoljavajuće prema predviđanjima rješenja. („Zadovoljavajuće“ rješenje svodi se na odgovor na pitanje: može li se upravljati sustavom i predvidjeti njegovo ponašanje na temelju dobivenog rješenja?) Ukoliko da, rješenje se prihvaća kao točno. U suprotnom, istražuju se druge mogućnosti (drugi putovi). Ne može li dobiti numerička rješenja, inženjer prihvaća da ne može (ne zna) riješiti razmatrani problem. U našem slučaju, čak i ako uvjet jednakih gustoća nije ispunjen, rješenje smatramo točnim (inženjersko rješenje mora biti pravodobno i jednostavno, da bi bilo optimalno: najracionalnije i najekonomičnije), jer možemo zanemariti utjecaj razlike gustoća vina na rezultat provedene analize. (Možemo li? Konačan bi odgovor dalo, potvrdilo ili odbacilo rješenje, tek precizno mjerenje gustoća i količina vina u čašama.)

Razmotrimo dalje još jedan primjer. U žimi ste grudu snijega spremili u hladnjak, u duboko smrzavanje. Ljetos ste je izvadili iz hladnjaka i zapitali se u kojem će se vremenu rastopiti?

Ništa više ne znamo o grudi snijega. Ni masu, ni obujam, ni temperaturu, ni temperaturu okoline. (Kada bismo poznavali neke od tih podataka mogli bismo dobiti točniji (egzaktniji) odgovor na pitanje služeći se (jako kompliciranom) znanstvenom disciplinom koja se bavi prijelazom toplinske energije.) Zbog toga morat ćemo se poslužiti „inženjerskim pristupom“. U ovakvim, i sličnim slučajevima, u prvom koraku inženjer „opaža“ što se događa. Ako je moguće „oponaša“ zatim događanja. (Nastoji ponoviti opaženo, po mogućnosti u laboratorijskim uvjetima.) Pritom „apstrahira“, odvaja nebitno od bitnog, nastojeći identificirati, prepoznati problem ili zadatak (ono što se želi riješiti ili učiniti) i postaviti fizikalni model (fizikalni opis događaja ili problema).

U našem slučaju, što će se dogoditi i dogoditi? Opišimo fizikalni model događanja.

Gruda je snijega ohlađena ispod 0 °C. Toplinska energija, oblik energije koji nezvezano uz masu može prelaziti sa sustava na sustav, prelaziti će iz okoline na grudu snijega (zbog razlike temperatura kako ćemo kasnije pokazati) i pretvarati se u unutrašnju kaloričku energiju grude snijega. (Energija je neuništiva.)

(Brzina prijelaza i količina toplinske energije bit će proporcionalna razlici temperatura okolice i grude snijega i veličini grude snijega (površini grude snijega preko koje prelazi toplinska energija).)

Prijelazom toplinske energije rast će temperatura grude snijega, zbog povećanja količine, što znači gustoće unutrašnje kaloričke energije, do temperature topljenja i zatim ostati konstantnom sve dok se snijeg (led) ne preobrazi u vodu.

(Za vrijeme preobrazbe dovodit će se i dalje toplinska energija, no ona će se sva „trošiti“ na tu preobrazbu (svladavat će se međumolekularne sile prigodom odvajanja molekula leda do razmaka molekula tvari u kapljevitom agregatnom stanju), i zbog toga ne će više rasti temperatura grude za vrijeme topljenja.)

Tek nakon što je gruda snijega cijela rastopljena, prijelazom će toplinske energije iz okolice temperatura te vode rasti sve do temperature okolice kada će se uspostaviti toplinska ravnoteža (jednakost gustoća energije) s okolicom i prestati prijelaz toplinske energije.

Postavimo sada matematički model, koji će nam omogućiti kvantitativan odgovor na pitanje („nakon kojeg će se vremena gruda snijega rastopiti?“), i hipotezu. (Hipoteza ovdje znači formuliranje mogućeg objašnjenja zbivanja.)

Pretpostavit ćemo da je gruda snijega kugla radijusa r , dakle volumena

$$V = \frac{4}{3} r^3 \pi.$$

(Dakako, gruda snijega nije (idealna) kugla, no matematiku možemo primjenjivati samo na matematičke objekte; u ovom slučaju model kugle je dobar jer nije suviše kompliciran i jer dobro opisuje realnost.)

Poznajemo li brzinu s kojom se smanjuje volumen kugle (grude snijega) moći ćemo odrediti vrijeme kad će volumen nestati. Odaberimo stoga **hipotezu** o brzini kojom se volumen grude snijega mijenja (smanjuje zbog topljenja). Jedna je mogućnost pretpostaviti da se volumen smanjuje brzinom proporcionalnoj površini grude.

(Mogli smo odabrati i neki drugi model, no ovaj nam se čini odgovarajućim budući da nas „Fizika“ uči (Fourierov zakon /fizički model/) da je količina toplinske energije koja prelazi na tijelo proporcionalna površini tijela: toplinska energija prelazi preko površine tijela. /Inženjer uvijek povezuje prirodne znanosti i matematiku./)

Dakle je naš matematički model:

$$\frac{dV}{dt} = -k(4r^2\pi).$$

Derivacija odgovara brzini, a predznak minus naznačuje da se volumen grude snijega smanjuje za vrijeme promatranog procesa, $r \downarrow$, k je faktor proporcionalnosti.

(Faktor proporcionalnosti je „uvijek tu“ kad se povezuju kroz različite odnose različite matematičke ili fizičke veličine: bez faktora proporcionalnosti u većini slučajeva ne bi jednadžbe dimenzijski „štimale“; ne zaboravljajte ga ni kad je vrijednosti 1 i bez dimenzije.)

Postavljamo još jednu hipotezu:

$$k = \text{konst.} \text{ (?!?)}$$

Pretpostavili smo da je faktor proporcionalnosti konstantan. Ta je pretpostavka jako „nategnuta“, no, jako, jako pojednostavnjuje matematički model. (Rekli smo, inženjerski pristup „pomiruje“ realnost i pojednostavnjenje matematičkih modela; često vrlo uspješno jer, između ostalog, omogućuje iterativno poboljšavanje modela.)

O čemu ovisi k ?

Najvjerojatnije o mnogo „toga“ (mnogo parametara): o temperaturi i veličini grude snijega, o temperaturi okoline (zraka), o vlaži u zraku, o strujanju zraka, o insolaciji (direktnoj i indirektnoj) o ... itd., bilo bi jako komplicirano naći funkcionalnu ovisnost faktora proporcionalnosti o svim tim veličinama.

No, to još nije sve: nedostaje nam barem još jedan podatak da bi naš pristup (fizički i matematički model) „profunkcionirao“. Bez da uključimo još neka opažanja (pokus i mjerenje) nema ničega da nas „vodi“ kroz matematički model. Npr., ustanovimo

„potrebno vrijeme da se određeni postotak grude snijega rastopi“.

(Pokus i mjerenje omogućuju stvaranje uvjeta za provjeru točnosti hipoteza.)

Pokusom i mjerenjem utvrdjemo da se uz uvjete koji prevladavaju

„ $1/4$ grude snijega rastopila za 2 h (dva sata)“.

Vratimo se sada ponovno našem matematičkom modelu. Moramo obaviti proračun kako bismo ustanovili predviđa li naš matematički model točno zbivanja.

Imamo:

$$V = \frac{4}{3} r^3 \pi \quad \text{ i } \quad \frac{dV}{dt} = -k (4r^2 \pi).$$

Označimo s

$V = V_p$ početni volumen kad je $t = t_p = 0$ (trenutak vađenja grude snijega iz hladnjaka), a s

$V = V_2 = \frac{3}{4} V_p$ volumen nakon isteka 2 sata kad je $t = t_2 = 2 \text{ h}$ (Očito je $V = V(t)$)

Moramo naći:

$$t = t_{\text{topljenja}} \equiv t_i \text{ kad je } V_{\text{konačno}} \equiv V_k = 0.$$

Možemo li $\frac{dV}{dt}$ izraziti i na neki drugi način?

Možemo:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dr} \cdot \frac{dr}{dt}. \text{ Dakle je:}$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{4}{3}\pi \cdot (3r^2) \frac{dr}{dt} = 4r^2\pi \frac{dr}{dt},$$

pa imamo

$$4r^2\pi \frac{dr}{dt} = -k(4r^2\pi), \text{ odnosno, } \frac{dr}{dt} = -k \text{ ili } dr = -kdt \quad (\text{Radijus se smanjuje konstantnom brzinom!})$$

Dobili smo jednostavnu diferencijalnu jednadžbu čije će nam rješenje (odmah je možemo integrirati) odgovoriti na pitanje kolika je promjena radijusa nakon isteka dva sata ($r_{\text{početno}} = r_p$) i pomoći ustanoviti čemu je jednak faktor proporcionalnosti:

$$\int_{r_p}^{r_2} dr = - \int_{t_p=0}^{t_2=2h} kdt \Rightarrow r_2 - r_p = -2k \Rightarrow k = \frac{r_p - r_2}{2}.$$

Odredili smo tako vrijednost faktora proporcionalnosti!

Vrijeme trajanja topljenja bit će onaj trenutak kad radijus grude snijega postane jednak nuli:

$$\int_{r_p}^0 dr = - \int_0^{t_t} kdt \Rightarrow 0 - r_p = -k t_t \Rightarrow k t_t = r_p.$$

Dobivamo:

$$t_t = \frac{r_p}{k} = \frac{2r_p}{r_p - r_2} = \frac{2}{1 - \left(\frac{r_2}{r_p}\right)}; \quad \frac{r_2}{r_p} = \frac{\left(\frac{3}{4\pi}V_2\right)^{\frac{1}{3}}}{\left(\frac{3}{4\pi}V_p\right)^{\frac{1}{3}}} = \left(\frac{V_2}{V_p}\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{\frac{3}{4}V_p}{V_p}\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{3}{4}\right)^{\frac{1}{3}} \approx 0,91$$

$$t_t \approx \frac{2}{1-0,91} \approx 22 \text{ sata.}$$

Ako se dakle 1/4 grude snijega otopi za 2 sata, 20 sati trebat će da se otopi preostali dio.

Je li ovaj model dobar? Tek provjera u praksi mjerenjem može dati odgovor. Nije li, predstoji prikupljanje podataka i dotjerivanje modela.

(Je li problem isključivo akademski? Nije. Sve veći nedostatak vode (ne samo pitke) možda će uskoro zahtijevati dopremanje ledenjaka i santi leda do mjesta uporabe.)

Što znači „jedino vanjsko djelovanje“?

Električnu smo energiju, slika 2-3, mogli pretvoriti u unutrašnju kaloričku energiju, koja bi se zatim pretvorila u toplinsku, kojom bismo zagrijavali vodu pretvarajući je u paru (toplinska energija dovedena vodi pretvorila bi se u unutrašnju kaloričku energiju vode odnosno pare), paru bismo odveli u parnu turbinu u kojoj bi se konačno entalpija pare pretvorila u mehanički rad (dobiven na osovini turbine) kojim će se podići teret. To, očito, ne bi bilo „jedino djelovanje“.

Što je „teret“?

Teretom nazivamo masu u polju sile teže Zemlje. (*Zemlja je neinercijski sustav. Polje je sile teže Zemlje suma polja gravitacijske sile kojom Zemlja privlači neku masu i polja centrifugalne sile.*) Podizanje je tereta svladavanje sile na putu, odnosno obavljanje mehaničkog rada.

Što dakle znači „energija je sposobnost obavljanja rada“?

To drugim riječima znači da se energija pretvara u rad, odnosno, da se rad obavlja na račun energije, odnosno, da bi se moglo raditi, treba raspolagati s energijom.

(Govori se: "on je pun energije", a ne: "on je pun rada", za nekoga tko može puno raditi.)

U kojim količinama?

U količinama većim, odnosno, u graničnom slučaju, jednakim količini obavljenog rada.

O čemu to ovisi?

Mehanički se rad uvijek i u potpunosti može pretvoriti u energiju. Primjerice, u unutrašnju kaloričku energiju (odnosno toplinsku energiju): npr, trenjem. Međutim, neki se oblici energije ne mogu uvijek i u potpunosti pretvoriti u mehanički rad; prema 2. glavnom stavku termodinamike postoje tri oblika (vrste) energije s obzirom na mogućnost pretvorbe u mehanički rad.

Podsjetimo kratko na neke pojmove i sadržaje, koji su vam poznati, i koje ćemo kasnije dopuniti i proširiti; i opet samo u mjeri zadovoljenja naših potreba.

Što je 2. glavni stavak termodinamike?

Niz formulacija (sudova). 2. glavni stavak termodinamike sažima iskustva i logička razmišljanja povezana s energetske transformacijama oblikujući ih u brojnije iskaze (o kojima ćemo govoriti). U osnovi odgovara na pitanje kako to da postoji problem opskrbe energijom kad je energija neuništiva niti stvoriva. Ne tvrdi da je nešto nemoguće već samo jako, jako, jako malo vjerojatno. (2. glavni stavak termodinamike nije zakon jer ne može direktnim argumentima ništa potvrditi ili dokazati; otuda riječ „stavak“.)

Što je termodinamika?

Najkraće, znanost o energiji i entropiji, odnosno, o pravilnostima koje upravljaju procesima pretvorbi energije.

Dakle, prema 2. glavnom stavku termodinamike postoje tri oblika (vrste) energije s obzirom na mogućnost pretvorbe u mehanički rad:

- **eksergija:** to su mehanička i električna energija koje se u, nazovimo to zasad tako, „idealnim procesima“ u potpunosti pretvaraju u mehanički rad odnosno međusobno ili u bilo koji drugi oblik energije. (Dakle, i mehanički je rad eksergija, uz mehaničku i električnu energiju, jer se u potpunosti pretvara u sve druge oblike energije.);
- **energija:** to su nuklearna energija, kemijska energija, unutrašnja kalorička energija, toplinska energija, rad trenja (rad trenja je mehanički rad kojim se svladavaju sile trenja i otpora, odnosno naprezanja prigodom deformacije tijela, pretvoren u unutrašnju kaloričku energiju). Radi se o oblicima energije koji se, zbog prirodnih ograničenja, ne mogu u potpunosti pretvoriti u mehanički rad, u eksergiju; i
- **anergija:** to su oblici energije koji se, i opet zbog prirodnih ograničenja, ne mogu pretvoriti u mehanički rad niti u bilo koji drugi oblik energije. To je unutrašnja kalorička energija akumulirana u okolini, točnije u podsustavima okoline: tlu, vodi i zraku, na temperaturi i tlaku okoline. (Unutrašnja kalorička energija mora, primjerice, koja je akumulirana energija dozirana sa Sunca i energija radioaktivnog raspada u unutrašnjosti Zemlje, odnosno i energija svih sustava u termodinamičkoj ravnoteži /nuklearnoj, kemijskoj, toplinskoj i mehaničkoj/ s okolicom.)

(Neuspjeli su pokušaji pretvorbe anergije u eksergiju pokušaji pretvaranja oslobođene energije prigodom smrzavanja voda početkom zime, pokušaji pretvorbe unutrašnje kaloričke energije mora u eksergiju pomoću samo jednog toplinskog spremnika (brod plovi po moru koristeći se unutrašnjom kaloričkom energijom mora) i slični. Takvi se pokušaji nazivaju „perpetuum mobile druge vrste“.)

Uvođenjem se pojmova eksergija, energija i anergija prva dva glavna stavka termodinamike mogu i ovako formulirati:

- **1. glavni stavak termodinamike** (analitički oblik principa očuvanja, održanja, konzervacije energije):

U svim procesima ostaje zbroj eksergije i anergije sačuvan i jednak energiji:

$$\text{EKSERGIJA} + \text{ANERGIJA} = \text{konstanta} = \text{ENERGIJA}.$$

(To je u skladu s očuvanjem energije jer su eksergija i anergija energije.)

- **2. glavni stavak termodinamike** (princip rasta entropije):

Svaka se energija sastoji od eksergije i anergije od kojih jedna može imati vrijednost nula:

$$\text{ENERGIJA} = \text{EKSERGIJA} + \text{ANERGIJA}.$$

Što to znači? Zašto navodimo takve definicije prvih dvaju stavaka termodinamike?

Da bismo razumjeli „o čemu se tu radi“ kada govorimo o „problemu opskrbe energijom“; da bismo razumjeli zašto se energija ne može stalno u potpunosti pretvarati u mehanički rad (eksergiju /električnu energiju/).

(Pokušaji pretvaranja toplinske energije, odnosno bilo kojeg oblika energije, stalno i u potpunosti (cjelovitosti) u mehanički rad / eksergiju/ pripadaju također kategoriji perpetuum mobile druge vrste.)

Opskrba se energijom svodi stvarno na opskrbu eksergijom.

Naime, za naš je život potrebna energija, ali ne bilo kakva energija, već eksergija; takva energija koja se, jednostavnim procesima, može pretvarati u mehanički rad i druge korisne oblike energije (mehanički rad, toplinsku, kemijsku i rasvjetnu energiju). Zadatak je, dakle, proizvoditi eksergiju. Recimo, želite glačati. Što vam treba? Glačalo treba ugrijati, učiniti vrućim. Kako se to nekada radilo? Pretvorbom kemijske energije (izgaranjem ugljena ili drva); takvo glačalo sada postoji samo u muzejima (u zemljama koje raspolažu električnom energijom). Danas nam, naime, za to treba električna energija koja će se u glačalu pretvarati u unutrašnju kaloričku energiju povisujući temperaturu glačala na željeni iznos.

Većina se energijskih procesa stoga, kojima se osigurava opskrba eksergijom, svodi, u što ćemo se uvjeriti, na odvajanje eksergije od anergije u energiji. (Zato i govorimo o proizvodnji eksergije.) Eksergija se dalje iskorištava u najrazličitijim procesima, a anergija odvodi u okolicu; nema kamo drugdje.

Potrošači, međutim, služeći se eksergijom, troše eksergiju jer se za vrijeme iskorištavanja eksergije, ne radi li se o „idealnim“ već o „realnim“ procesima, eksergija pretvara u anergiju i postaje nepovratno izgubljena. Samo u "idealnim procesima" eksergija se ne pretvara u anergiju, njena količina ostaje konstantna. No, što su „idealni procesi“? Kažemo li to su „procesi u kojima se eksergija ne pretvara u anergiju“, zapleli smo se u „circulus vitiosus“. Upitajmo stoga prvo: što je idealno, tko je idealan? Ono, onaj što se, koji se ponaša prema našim očekivanjima. Međutim, naša su očekivanja različita. Ne mogu se kvantitativno uspoređivati ni mjeriti. Zbog toga ćemo trebati idealne procese opisati nekako drukčije kako bismo ih mogli kvantificirati (*u tom će se slučaju idealni procesi morati ponašati prema rezultatima naših matematičkih modela*), na primjer ovako:

- „idealni“ su procesi **povratljivi** (povratni), reverzibilni procesi, a
- „neidealni“ procesi su **nepovratljivi** (nepovratni), ireverzibilni procesi: to su realni procesi, procesi koji se stvarno odvijaju u svijetu u kojem obitavamo,

(Idealni se, povratljivi, reverzibilni procesi, golemom većinom, odvijaju nažalost samo „na papiru“, samo u našim „idealiziranim“ / pojednostavljenim/ matematičkim modelima.)

pa s obzirom na vladanje eksergije i anergije u energetske procesima vrijedi sljedeće:

- a) u svim se nepovratljivim (nepovratnim) procesima pretvara eksergija u anergiju;
- b) samo u povratljivim (povratnim) procesima ostaje eksergija konstantna;
- c) nemoguće je anergiju pretvoriti u eksergiju; proces u kojem bi se anergija pretvarala u eksergiju je nemoguć.

Budući da su naši (realni) energetske procesi nepovratljivi, transformacije oblika energije uzrokom su smanjivanja zaliha eksergije jer se jedan njezin dio pretvara u anergiju.

U svim procesima ostaje dakle, prema 1. glavnom stavku termodinamike, principu očuvanja energije, energija konstantna, ali ona gubi mogućnost transformacije to više što je više eksergije pretvoreno u anergiju.

Problem se opskrbe energijom javlja prema tome jer pretvorbe energije (realni, nepovratljivi procesi) uzrokuju gubitak eksergije koji treba nadoknađivati, i jer povećanje broja stanovnika Zemlje i povećanje standarda zahtijeva proizvodnju novih (dodatnih) količina eksergije.

Koji su procesi povratljivi odnosno u kojem bi slučaju bili povratljivi (povratni)?

Kvalitativne odgovore znadete, barem djelomično.

Povratljivi je proces onaj koji se može odvijati kako u jednom tako i u drugom, povratnom, obratnom, suprotnom smjeru, vraćajući se u početno stanje prolazeći kroz ista stanja u obratnom smjeru, a da nigdje u procesu (sustavu podvrgnutom procesu) ili okolici ne zaostanu neke trajne, vidljive (zabilježive) promjene.

(Na primjer, njihalo pomaknuto iz položaja ravnoteže. Kada ne bi bilo trenja, njihalo bi njihalo vječno. Potencijalna bi se energija (eksergija) pretvarala u kinetičku energiju (eksergiju) i obratno. Drugim riječima, eksergija bi ostala sačuvana, stalna, konstantna. Zbog trenja, međutim, koje se javlja prolaskom njihala kroz zrak, dio se eksergije / kinetičke ili potencijalne energije / troši na svladavanje sile trenja: obavlja se mehanički rad (rad trenja) koji se pretvara u unutrašnju kaloričku energiju njihala, zatim se unutrašnja kalorička energija njihala pretvara u toplinsku energiju koja prelazi u okolicu pretvarajući se u unutrašnju kaloričku energiju okolice, dakle anergiju. Njihalo se zbog toga ne može vratiti u početni položaj: proces je nepovratljiv, nepovratan, ireverzibilan. Da bismo vratili njihalo u početno stanje (početni položaj) treba obaviti mehanički rad: svladavati silu težu. Taj rad možemo dobiti samo transformacijom iz nekog raspoloživog oblika energije; time će zaostati trajna, zabilježiva promjena (promjena koja se može registrirati) u okolici, (sustavima okolice): manjak eksergije i višak anergije. U makrosvijetu ne postoje (potpuno) reverzibilni (povratljivi, povratni) procesi, ali se neke pojave približuju takvim procesima.)

Kvantitativne odgovore na postavljena pitanja omogućuje razmatranje promjena fizikalne veličine nazvane **entropija**.

Što je entropija, o tome ćemo kasnije detaljnije govoriti. Zasad kažimo samo ovo:

entropija je jednaka omjeru ukupne količine toplinske energije koja se izmjenjuje između sustava i okolice i temperature pri kojoj se to događa.

Pritom vrijedi za adijabatski sustav (AS grade sustav u kojem se odvijaju energetske procesi i okolica):

- ostaje li entropija AS konstantna, dakle promjena, prirast entropije jednak nuli, $ds_{AS} = 0$, za vrijeme energetskih procesa, u adijabatskom se sustavu

odvijaju povratljivi procesi, idealni procesi: sva eksergija ostaje sačuvana, ništa se eksergije ne pretvara u anergiju;

- raste li entropija AS, $ds_{AS} > 0$, radi se o nepovratljivim, realnim procesima. Što je veći porast entropije, to je promatrani proces lošiji, dalje od povratljivog: više se eksergije pretvara u anergiju;
- smanjuje li se entropija AS, $ds_{AS} < 0$, radi se o nemogućim procesima: pokušajima pretvaranja anergije u eksergiju (perpetuum mobile druge vrste).

Zašto promatramo zbivanja u adijabatskom sustavu?

Jer adijabatski sustav zadovoljava gore postavljene odnose (potvrdit ćemo to kasnije) s obzirom na to da je entropija, točnije, promjena entropije, definirana ovom diferencijalnom jednačbom:

$$ds = dq/T + d[\text{procesi koji uzrokuju proizvodnju entropije}]/T \text{ [J/kgK]}.$$

Npr., ako se radi o trenju (proces kojim se proizvodi entropija):

$$ds = \frac{dq}{T} + \frac{\left| dw_{\text{trenja}} \right|}{T} \text{ [J/kgK]}.$$

Promjena se entropije, naime, dijeli na strujanje entropije (dq/T) i na proizvodnju entropije (npr, $\left| dw_{\text{trenja}} \right|/T$). Drugi je član uvijek veći od nule, a predznak prvog člana ovisi o predznaku toplinske energije. Objasniti ćemo kasnije zašto je toplinska energija što se dovodi sustavu, što ustrojava u sustav, pozitivna, a ona koja se odvodi iz sustava, istrojava iz sustava, negativna. S dovođenjem toplinske energije sustavu povećava se naime entropija sustava: u njega struji entropija. Obratno vrijedi istrojava li toplinska energija iz sustava; entropija se sustava smanjuje, struja entropije napušta sustav.

(To nije u suprotnosti s dosad rečenim da se entropija ne može smanjivati jer to vrijedi samo za adijabatski sustav kojemu se ne može ni dovoditi ni odvoditi toplinska energija.)

S druge strane, rad je trenja uvijek negativan, jer se može samo dovoditi u sustav, pokazat ćemo to, zato uzimamo njegovu apsolutnu vrijednost. Naime, rad trenja povećava entropiju sustava jer se, nakon pretvorbe u unutrašnju kaloričku energiju, u obliku toplinske energije dovodi sustavu.

Budući da toplinska energija može imati i pozitivni i negativni predznak, što posljedično znači povećanje ili smanjenje entropije sustava, promjena entropije adijabatskog sustava može biti jednaka nuli ($ds_{AS} = 0$) samo ako je $w_{\text{trenja}} = 0$, tj. ako su procesi mehanički povratljivi (rad trenja jednak je nuli – ne postoje sile trenja) i ako se unutar adijabatskog sustava ne odvijaju nepovratljivi procesi tj. procesi koji uzrokuju proizvodnju (porast) entropije (prijelaz toplinske energije preko konačnih razlika temperature, ekspanzija bez obavljanja mehaničkog rada itd.), odnosno, samo ako se odvijaju povratljivi procesi izjednačavanja početno nejednolike raspodjele gustoće energije. (Npr., prijelaz toplinske energije na povratljivi način.)

(Što to točno znači, odnosno koji uvjeti, uz zahtjev da nema trenja, moraju biti ispunjeni kako bi proces bio povratljiv, razmotrit ćemo kasnije.)

Dakle, za vrijeme se iskorištavanja ili proizvodnje eksergije dio eksergije u realnim, nepovratljivim procesima pretvara u anergiju.

Koliki dio?

Pokazat ćemo, gubitak je eksergije direktno proporcionalan produktu temperature okolice i prirasta entropije adijabatskog sustava, pa se određuje tako da se riješi diferencijalna jednačba:

$$d(\text{gubitak eksergije}) = T_{\text{ok}} ds_{\text{AS}}.$$

T_{ok} je temperatura okolice, a ds_{AS} je promjena entropije adijabatskog sustava; jednaka je algebarskoj sumi promjene entropije okolice i promjene entropije sustava:

$$ds_{\text{AS}} = ds_{\text{ok}} + ds_s$$

Tu ćemo jednačbu riješiti kasnije, a sada ćemo najprije promatrati i opisivati energetske pretvorbe i procese u termoelektranama.