

Crni kalorimetar kućne izrade

Tine Golež

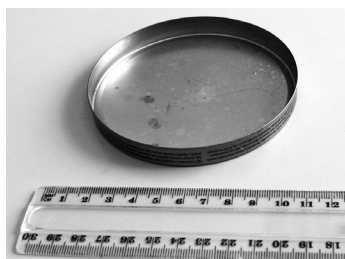
Uvod

Kalorimetrijsko mjerenje svjetlosnog toka je jednostavne izvedbe i ne zahtijeva puno mjerne opreme. Zapravo, dok ju sami izrađujemo, oponašamo prave fizičare koji često sami dizajniraju i grade mjerne uređaje za svoja mjerenja.

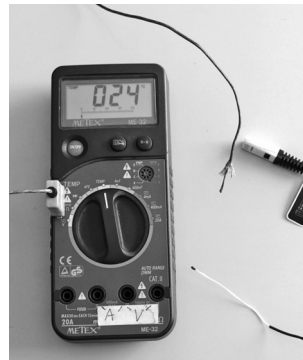
Mjerenje svetlosnog toka s crnim kalorimetrom je primjer neselektivnog instrumenta. Pocrnjena ploha jednako dobro apsorbira vidljivu svjetlost, infracrvenu i ultraljubičastu, koje su također prisutne u sunčevoj svjetlosti. Zato je pogodan za mjerenje solarne konstante (snaga zračenja na površini Zemlje) i još brojne druge pokuse sa svjetlošću.

Izrada

Uzmemo limeni poklopac posude (slika 1) promjera oko 10 cm. Potom rastalimo oko 600 g olova i izlijemo u poklopac, ili ga rastalimo u samom poklopcu. Dobivamo plosnati valjak visine oko 7 mm. Sa strane valjka izbušimo malu rupicu za temperaturni senzor, dubine oko 3 cm (to je teško postići svrdlom, može se uraditi čeličnim čavlom). Senzor (slika 2) učvrstimo u rupici, a potom valjak s jedne strane začađimo plamenom svijeće.



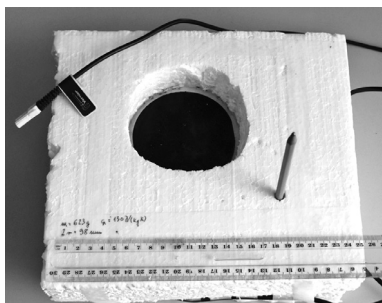
Slika 1. Poklopac za rastaljeno olovo.



Slika 2. Dvije temperaturne sonde. Donja (na svijetloj žici) je dio računalnog mjernog sistema Vernier, gornja se prikopča na univerzalni digitalni mjernik.

Temperaturna sonda spojena na računalo omogućuje mjerenje porasta temperature kada na crnu stranu kalorimetra dolazi sunčeva svjetlost ili jaka žarulja. U nedostatku računalnog sučelja, poslužit će i sonda spojena na unimer. Tada ručno, npr. svakih 5 sekundi zapisujemo temperature, dok se sonda grije. Svakako je bolje imati više mjernih točaka, vremenski raspoređenih unutar dvije minute, koje će nas uvjeriti u postojanje intervala u kojem temperatura linearno raste s vremenom.

Pazimo da ne diramo začađenu plohu, jer to odstranjuje čađu. Radi bolje zaštite, kontrole svjetlosnog toka i smanjenja konvekcije zraka, kalorimetar ugradimo u kućište od stiropora. U gornjoj polovici stiropora izbušimo rupu i umetnemo kalorimetar tako da svjetlost pada okomito na začađenu stranu (slika 3).

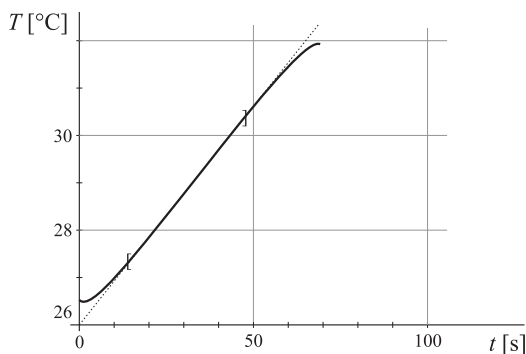


Slika 3. Crni kalorimetar u stiropornom kućištu. Olovka pomaže pri određivanju okomitog upada zračenja Sunca. Temperaturna sonda trajno je fiksirana u valjak. Žica ide između dvije polovine stiropora.

Sunce

U literaturi nalazimo da je solarna konstanta jednaka 1365 W/m^2 . Ta vrijednost varira od 1320 W/m^2 u srpnju do 1410 W/m^2 u prosincu zbog eliptičnosti Zemljine putanje. Htjeli bi znati koliki postotak tog zračenja dosegne do površine našeg planeta.

Tu vrijednost određuje više čimbenika, najvažnije su vremenske prilike na dan mjerenja, posebno količina vodene pare ili kapljica u zraku. Značajno utječe i visina Sunca na nebu, nisko Sunce znači i puno duži put zraka kroz atmosferu i veću apsorpciju. Osim direktnog zračenja na površinu pada i raspršeno zračenje, pa treba izabrati čisto nebo tamnije, ljubičaste boje, te po mogućnosti veću nadmorsku visinu. Dio raspršene svjetlosti se raspršio nakon refleksije s površine Zemlje. A kalorimetar ne bilježi odakle je svjetlost, nego samo ukupan tok zračenja.



Slika 4. Mjerenje na Jadranskoj obali. Mjerenje po vedrom srpanjskom danu, oko podne. Temperatura crnog kalorimetra je svake sekunde rasla za skoro desetinku stupnja, tj. pet i pol stupnjeva u minuti.

Napravljen instrument ima radijus mjerne površine 0.049 m, masu 0.623 kg olova, specifičnog toplinskog kapaciteta $c_p = 130 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$. Refleksivnost čađave površine je manja od 0.05, što znači da absorbira bar 95% upadne svjetlosti. Priključak temperature sonde povežemo s računalom putem sučelja, usmjerimo kalorimetar prema Suncu i počnemo bilježenje temperature (slika 4).

Grijanje kalorimetra pomoću upadne svjetlosti izrazimo ovako:

$$0.95jSt = mc_p\Delta T.$$

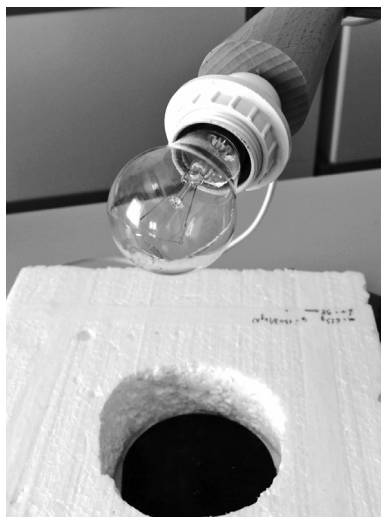
Kvocijent $\frac{\Delta T}{t}$ odgovara nagibu tangente kroz izabrani interval mjernih točaka. Njega odredimo pomoću računalnog programa za obradu. Pri ovom mjerenju je iznosio $0.092 \text{ }^\circ\text{C/s}$. Svjetlosni tok prikazemo kao produkt dva razlomka (prvi je svojstvo kalorimetra, a drugi izmjerena vrijednost):

$$j = \frac{mc_p}{0.95S} \cdot \frac{\Delta T}{t}.$$

Odatle izračunamo, $j = 1040 \text{ W/m}^2$. To je sasvim prihvatljiv rezultat, vjerojatno točan unutar par postotaka. Istog dana oko 9 sati ujutro je snaga svjetlosnog toka bila manja, 960 W/m^2 .

Žarulja

Dobro znamo da žarulje s volframovom niti imaju vrlo slabu svjetlosnu iskoristivost. Upravo zato se u EU zabranjuje prodaja i uvoz takvih žarulja. U našem fizikalnom kabinetu ih imamo nekoliko u zalihi, pa se latimo mjerenja (slika 5).



Slika 5. Žarulja je postavljena 18 cm iznad crnog kalorimetra.

Sredinu žarulje učvrstimo 18 cm iznad crnog kalorimetra (plohe, ne kućišta). Za žarulju nominalne snage 100 W. Mjerač snage pokazuje 105 W, a za 25 W mjerač žarulje pokazuje 26.7 W (slika 6).



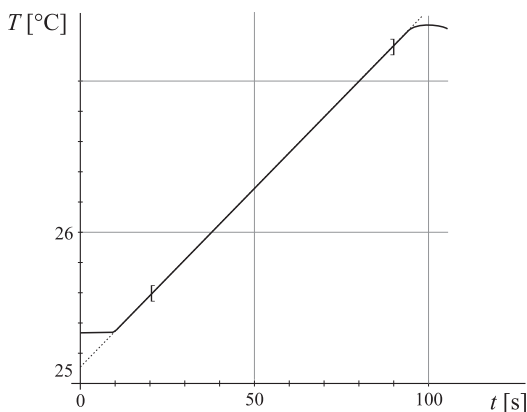
Slika 6. Mjerilo snage. Priključena žarulja je troši 26.7 W.

Takva žarulja ne svijetli izotropno (jednako u svim smjerovima). Izvršimo dva mjerenja: prvo s držačem volframove niti u vodoravnom položaju, i drugo u uspravnom. Očekujemo da prvi položaj najbrže grije donju plohu, a drugi najsporije. Različiti položaji mijenjaju mjerenu vrijednost brzine grijanja (slika 7).



Slika 7. Lijevi položaj žarulje najjače grije donju površinu, srednji najmanje, a desni je negdje između.

Graf $T(t)$ pokazuje da temperatura doista linearno raste s vremenom, ali kratko nakon uključanja (nekoliko sekundi). Kasnije se javljaju odstupanja zbog konvekcije i prijenosa topline. Brzina zagrijavanja je $0.02466\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ (slika 8). Četiri decimalna mjesta u rezultatu: 0.02466 su previše, moramo priznati da je bitno veća greška u samoj postavi pokusa, jer svi dijelovi kalorimetra nisu jednako udaljeni od žarne niti.



Slika 8. Žarna nit također jednoliko zagrijava crni kalorimetar.

Na mjesto crnog kalorimetra postavimo svjetlomjer. On pokazuje 510 lx (luksa).

Pokus ponovimo, a žarulju okrenemo u položaj na sredini slike 7. Sada je brzina zagrijavanja $0.0160\text{ }^{\circ}\text{C/s}$. Mjerenje sa svjetlomjerom daje 340 lx. Izračunajmo oba omjera. Brzina zagrijavanja se umanjila za faktor $1.54 (= 0.02466/0.0160)$, a osvijetljenost za $1.5 (= 510/340)$. Zbog mjerne pogreške moguće je da su oba omjera jednaka. To ustvari i očekujemo, jer se smanjio i ukupni tok i tok vidljive svjetlosti.

Kako žarulja troši energiju?

Znamo da žarulja s niti većinu električne energije isijava u obliku infracrvene svjetlosti. Nekoliko postotaka čini vidljiva svjetlost. Ali nit također zagrijava žarulju i okolni zrak. Procijenit ćemo koliki udio snage ne pripada zračenju.

Imamo nekoliko nepoznanica. Žarulja nije izotropna, izmjerili smo 50% veći svjetlosni tok u smjeru najjačeg zračenja. Odoka odredimo sredinu: žarulja bi u svim smjerovima zagrijavała kalorimetar brzinom $0.020\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, za udaljenost 18 cm od središta žarulje. Podaci o crnom kalorimetru su isti kao u opisu mjerenja solarne konstante. Jednadžba grijanja kalorimetra upadnim zračenjem je

$$0.95jSt = mc_p\Delta T.$$

Za kvocijent $\frac{\Delta T}{t}$ uzmimo srednju vrijednost, koja bi odgovarala izotropnom zračenju: $0.020\text{ }^{\circ}\text{C/s}$. Jednadžbu preoblikujemo u umnožak dvaju razlomaka

$$j = \frac{mc_p}{0.95S} \cdot \frac{\Delta T}{t},$$

odakle dobijemo $j = 226\text{ W/m}^2$.

Sada to pomnožimo s površinom sfere radijusa 18 centimetara ($r = 0.18\text{ m}$). Dobijemo

$$P = j \cdot 4\pi r^2 = 92\text{ W}.$$

Pogrešku procijenimo na 5%. U svakom slučaju očekujemo da je snaga zračenja (vidljive i infracrvene svjetlosti) manja od 105 W električne snage koju je za ovu žarulju odredilo mjerilo električne snage. Ocjenjujemo, da na prijenos topline i konvekciju otpada oko 10% utrošene energije.

I još žarulja manje snage

Na kraju usporedimo žarulje od 100 W i 40 W. Obje smo okrenuli tako da nit maksimalno žari prema dolje. Mjerenje snage daje 105 W, a mjerenje crnim kalorimetrom $0.0244\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ brzinu grijanja. Za drugu žarulju izmjerili smo točno nominalnu snagu, 40 W (podrazumijeva se da jeftine žarulje mogu znatnije odstupati od nominalne snage). Tada je crni kalorimetar izmjerio brzinu zagrijavanja $0.00599\text{ }^{\circ}\text{C/s}$. Omjer električnih snaga žarulja je 2.6, a omjer brzina zagrijavanja 4.1 ($= 0.0244/0.00599$). Temperatura niti i stakla žarulje od 100 W je viša, pa očekujemo da se veći udio snage troši zračenjem. Energija grijanja je proporcionalna temperaturi, ali zračenje raste s temperaturom na četvrtu potenciju.

Luksmetar pokazuje da žarulja od 100 W osvjetljava 538 lx (na 18 cm), a žarulja od 40 W samo 162 lx. Preračunato u konverziju električne energije u svjetlost, jača je žarulja skoro 30% efikasnija. Takav omjer spominju i tvornički katalozi, koji navode lumene po W snage za žarulje različite snage.

Upitajmo se, kako se to slaže s mjerenjem po kojem žarulja od 40 W zrači četvrtinu energije, koju zračenjem daje žarulja od 100 W. Ocijenimo žarulju od 40 W. U prosjeku sije koliko i izotropni izvor gustoće toka koji bi dao brzinu grijanja $0.0049\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ (postupak dobivanja srednje vrijednosti je isti kao za prethodnu žarulju).

Crni kalorimetar je opet 18 cm udaljen od žarne niti. Upadno zračenje zagrijava kalorimetar, što izrazimo jednadžbom

$$0.95jSt = mc_p\Delta T.$$

Kvocijent $\frac{\Delta T}{t}$ smo ocijenili na $0.0049\text{ }^{\circ}\text{C/s}$. Izrazimo j direktno

$$j = \frac{mc_p}{0.95S} \cdot \frac{\Delta T}{t},$$

odakle izračunamo $j = 55\text{ W/m}^2$.

Ukupna snaga je opet

$$P = j \cdot 4\pi r^2 = 22\text{ W}.$$

Pogrešku procjenimo na 5%. To znači da polovica energije odlazi u obliku zagrijavanja i konvekcije. Žarulja od 40 W ima manje ugrijanu nit, staklo i kućište, što se jasno vidi pri hlađenju zračenjem.

Zaključak

Članak je pisan iz prakse za praksu. Zato vas pozivamo da izradite opisani crni kalorimetar, koji omogućuje poučna i zorna fizička mjerenja. Dvije stvari vrijede u radu učitelja fizike: Nema škole koja bi kupila svu mjernu aparaturu koju poželi upotrijebiti u pokusima. S nešto umijeća nešto valja i izraditi. Drugo, učitelj mora težiti tomu da većinu pokusa i mjerenja doista napravi u razredu, jer to učenicima prikazuje bit fizike.

Najnesigurniji podatak je toplinski koeficijent olova (ovisi o primjesama i točnosti mase) i refleksija čađavog sloja. Manji udio greške uzrokovan je hlađenjem kalorimetra. Obje greške su bitne pri apsolutnim mjerenjima, ali pri relativnim (okretanje žarulje, usporedba dviju žarulja) ne utječu mnogo, jer uglavnom radimo s omjerima.