

# Prijenos topline ljudskog tijela

---

**Mardešić, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split, University of Split, Faculty of science / Sveučilište u Splitu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:166:933580>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-05**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Science](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



Sveučilište u Splitu  
Prirodoslovno – matematički fakultet

# **PRIJENOS TOPLINE LJUDSKOG TIJELA**

Završni rad

Ivan Mardešić

Split, rujan 2017.

## **Zahvala**

Zahvaljujem se svojoj mentorici doc. dr.sc Larisi Zoranić koja mi je svojim stručnim savjetima pomogla i motivirala tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se dr.sc Petru Stipanoviću za napravljenu predložak za rad koji mi je pomogao oko tehničkih problema u izradi rada te time uštedio mnogo vremena.

Zahvalio bih se i svim profesorima i asistentima koji su uvijek bili uslužni te svojim radom prenijeli znanje na mene tijekom mog obrazovanja.

Također zahvaljujem kolegama i prijateljima koji su uvijek bili uz mene. Na kraju bih se najviše zahvalio mojim roditeljima koji su me stalno podupirali bez kojih ovo ne bi bilo moguće.

## Temeljna dokumentacijska kartica

Sveučilište u Splitu  
Prirodoslovno – matematički fakultet  
Odjel za fiziku  
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Hrvatska

Završni rad

### Prijenos topline ljudskog tijela

Ivan Mardešić

Sveučilišni preddiplomski studij Fizika

#### Sažetak:

U ovom radu ćemo promatrati prijenos topline ljudskog tijela s okolinom. Opisat ćemo glavne procese izmjene topline kroz fizikalne zakone i primjere. Nakon što fizikalno opišemo svaki proces prijenosa topline u čovjeka, aproksimacijama ćemo odrediti izmjenu topline. Primjeri su uzeti iz svakodnevnog života. Cilj je publici približiti ovu temu, dati fizikalni opis procesa čovjeka s okolinom. Primjeri su inovativni dio rada opisani uz pomoć formula i podatka iz literature.

**Ključne riječi:** Toplina, zračenje, temperatura, isparavanje, kondukcija, konvekcija

**Rad sadrži:** 14 stranica, 1 slika, 1 tablica, 7 literaturnih navoda. Izvornik je na hrvatskom jeziku

**Mentor:** doc. dr. sc. Larisa Zoranić

**Ocjenjivači:** doc. dr. sc. Larisa Zoranić  
dr. sc. Željka Sanader  
mag. Viktor Cikojević

**Rad prihvaćen:** 22. 9. 2017.

Rad je pohranjen u knjižnici Prirodoslovno – matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Splitu.

<b>Basic documentation card</b>
---------------------------------

University of Split  
Faculty of Science  
Department of Physics  
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Croatia

Bachelor thesis

**Loss of body heat**

Ivan Mardešić

University undergraduate study programme Physics

**Abstract:**

In this paper we will discuss heat transfer within the human body and its interaction with the environment. Main processes will be described with physical laws and examples will be provided. After a physical description, approximations will be used to determine the heat transfer. examples are taken from day to day life. The main goal of the paper is to make the reader acquainted with the subject and to physically describe human interaction with his environment, regarding heat. examples are my contribution to this subject with formulas and data taken from the literature.

**Keywords:** Heat, temperature, radiation, evaporation, conduction, convection

**Thesis consists of:** 14 pages, 1 figure, 1 table, 7 references. Original language: Croatian

**Supervisor:** Dr. Larisa Zoranić

**Reviewers:** Dr. Larisa Zoranić  
Dr. Željka Sanader  
Mag. Viktor Cikojević

**Thesis accepted:** September 22, 2017.

Thesis is deposited in the library of the Faculty of Science, University of Split.

## Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Radijacija ljudskog tijela .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Konvekcija .....</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Kondukcija .....</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Prijenos topline isparavanjem vode .....</b>	<b>10</b>
<b>6</b>	<b>Primjer biciklista .....</b>	<b>12</b>
<b>7</b>	<b>Zaključak .....</b>	<b>13</b>
<b>8</b>	<b>Literatura.....</b>	<b>14</b>

# 1 Uvod

Termodinamika je grana fizike koja proučava toplinu i temperaturu te njihovu povezanost s energijom i radom. U prvoj polovici 19. stoljeća dolazi do osnivanja termodinamike te je za to najzaslužniji francuski fizičar Nicolas Carnot. Dolazi do industrijske revolucije u Europi te fizičari tog razdoblja promatraju toplinske strojeve i donose zakone termodinamike. Postoje tri zakona termodinamike, a u ovom radu će nam biti najpotrebniji prvi zakon termodinamike koji nam govori da se toplina koju mi unesemo u sustav pretvori promjenu unutarnje energije sustava i na obavljeni rad. Matematički napisano:

$$\delta Q = dU + \delta W \quad (1.1)$$

gdje smo s  $U$  označili unutarnju energiju,  $Q$  toplinu, a rad s  $W$ . Ovo se još zove zakon očuvanja energije jer vidimo da vrijedi jednakost, te točno znamo kako se rasporedila energija.

Ljudsko tijelo isto možemo promatrati kao toplinski stroj koji je u stalno interakcijom s okolinom te svakog trenutka izmjenjuje toplinu. Unosimo hranu, odnosno molekule proteina, masti i ugljikohidrata te procese povezane s unosom, potrošnjom i skladištenjem energije nazivamo metabolizam. Energija u gore navedenim molekulama se nalazi u kemijskim vezama te razgradnjom tih molekula, odnosno pucanjem tih kemijski veza, oslobađa se energija. Taj dio metabolizma nazivamo katabolizam. Jedna od najvažnijih molekula koju stvaramo katabolizmom naziva se adenzin trifosfat. Ta molekula nastaje fosforilacijom adenzin difosfata molekule na račun energije koju smo dobili razgradnjom hrane. Kasnije adenzin trifosfat, viskoenergijsku molekulu koristimo u anabolizmu odnosno stvaranju molekula potrebnih za naše tijelo ili kada vršimo neki vanjski rad. Naravno sve te reakcije nisu 100% učinkovite te se opušta toplina u tim reakcijama, tako sada kada smo su kratkim crtama objasnili ideju metabolizma možemo prvi zakon termodinamike napisati kao

$$dU = \delta Q_{\text{loss}} + \delta Q_{\text{met}} - \delta W \quad (1.2)$$

gdje je  $Q_{\text{loss}}$  toplina predana okolini,  $Q_{\text{met}}$  toplina metabolizma o kojoj smo sad pričali. Mi ljudi smo toplokrvna vrsta živih bića, te naša temperatura tijela je približno konstanta. Vidimo da nema te topline koja se metabolički dobije da bi temperatura našeg tijela padala zbog topline koje mi ispuštamo u okolinu, a znamo da se to ne događa. Naravno, i okolina nama predaje toplinu te u ovisnosti na vanjske uvjete mi želimo ili što više predati toplinu okolini i hladimo se (ljeti), ili želimo smanjiti gubitak topline (zimi). Postoje 4 načina gubitka topline:

radijacijom, konvekcijom i kondukcijom, znojenjem i isparavanjem vode preko disanja. Konvekcija je usmjereno gibanje fluida u kojem topliji fluid predaje toplinu hladnijem, a kondukcija je prijenos topline izravnim dodirom. Najviše topline se preda radijacijom - preko 50% , pa zatim konvekcijom i kondukcijom, a najmanje znojenjem[1]. U ovom radu ćemo se baviti prijenosom topline ljudskog tijela i to negativnim, odnosno bazirati ćemo se na prijenos topline iz čovjeka prema okolini.



## 2 Radijacija ljudskog tijela

Sva zagrijana kruta tijela zrače elektromagnetske valove. Emisija postoji na svim temperaturama i za kruta tijela spektar je kontinuiran za razliku od fluida u kojem je spektar diskretan. Njemački fizičar Max Planck izveo je formulu zračenja crnog tijela, idealnog tijela koji upija i zrači sve valne duljine. Planck je prihvatio Boltzmanovu ideju kvantizacije energije. Pokazat ćemo da valnu jednadžbu elektromagnetskog vala možemo povezati s jednadžbom harmoničkog oscilatora.

$$\psi(\vec{r}, t) = a(t)e^{i\vec{q}\vec{r}} \quad (2.1)$$

Gdje

$$a(t) = Ae^{-i\omega t} \quad (2.2)$$

Predstavlja vremensku amplitudu elektromagnetskog vala, a s  $\omega$  smo označili kutnu frekvenciju,  $\vec{r}$  vektor položaja, te smo valni vektor u smjeru širenja vala definirali formulom:

$$\vec{q} = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{s}_0 \quad (2.3)$$

$\lambda$  nam predstavlja valnu duljinu elektromagnetskog vala, a  $\vec{s}_0$  vektor koji nam govori smjer širenja vala. Vidimo da dvostrukom derivacijom po vremenu jednadžbe (2.2) dobivamo jednadžbu gibanja harmoničkog oscilatora kutne frekvencije  $\omega$ .

$$\ddot{a}(t) = -\omega^2 a(t) \quad (2.4)$$

Energija linearnog harmoničkog oscilatora je kvantizirana i iznosi

$$E_n = \hbar\omega \left( n + \frac{1}{2} \right), n = 0, 1, 2 \dots \quad (2.5)$$

Svakom linearnom harmoničkom oscilatoru pridružena je i prosječna energija pobuđenja

$$\bar{E}(\vec{q}) = \hbar\omega \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1} = \hbar\omega \hat{n} \quad (2.6)$$

Planck je elektromagnetnom zračenju pridjelio i čestična svojstva s energijom  $\hbar\omega$ , te je ukupnu energiju pridruženom elektromagnetskom valu frekvencije  $\omega$   $\hat{n}\hbar\omega$ . Te čestice energije  $\hbar\omega$  nazivamo fotonima, te onda  $n\hbar\omega$  definirao kao ukupnu energiju fotona frekvencije  $\omega$ .  $\hbar$  je

konstanta koja se naziva reducirana Planckova konstanta i iznosi  $1.055 \cdot 10^{-34}$  J s. k nam predstavlja Boltzmannovu konstantu koja iznosi  $1.381 \cdot 10^{-23}$  m<sup>2</sup> kg s<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup> i s T smo označili temperaturu. Numerirali smo je po valnim vektorima  $\vec{q}$ . Frekvenciju titranja vala možemo napisati preko  $\vec{q}$  pomoću relaciju (2.7) gdje smo s c označili brzinu svjetlosti u vakumu. ( $c = 299\,792\,458$  m/s)

$$\omega = qc \quad (2.7)$$

Vidimo da u jednadžbi (2.6) prvi faktor predstavlja energiju fotona, a drugi faktor predstavlja broj fotona energije  $\hbar\omega$  na temperaturi T. Budući da elektromagnetnom valu u vakumu pridružena dva stupnja slobode titranja, ukupni broj fotona na temperaturi T množimo s 2 i sumiramo po svim valnim vektorima

$$N = 2 \sum_{\vec{q}} \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1} \quad (2.8)$$

Množeći (2.8) s  $\hbar\omega$  dobivamo ukupnu fotonsku energiju. Prelazeći s sume po  $\vec{q}$  na integral po frekvenciji dobivamo izraz za gustoću energije po volumenu.

$$u_{\omega} = \int \frac{\hbar \omega^3}{\pi^2 c^3 e^{\frac{\hbar\omega}{kT}}} d\omega \quad (2.9)$$

Možemo se sa frekvencije prebaciti na valnu duljinu te Planckov zakon za intezitet tada glasi:

$$\frac{u_{\lambda}}{A} = \frac{2hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1)} d\lambda \quad (2.10)$$

Integrirajući po svim valnim duljinama dobivamo Stefan – Boltzmannov zakon

$$u = \sigma T^4 \quad (2.11)$$

$\sigma$  je konstanta koja iznosi  $5.67 \cdot 10^{-8}$  W m<sup>-2</sup> K<sup>-4</sup>, A je površina ozračena, a u je energija po jedinici površine i jedinici vremena. Jednadžba (2.11) je izraz za crno tijelo, a da bi odredili tok energije za realno tijelo moramo pomnožiti s konstatnu  $\varepsilon$  koju nazivamo stupanj emisije koji može imati vrijednosti između 0 i 1. Za ljudsku kožu iznosi između 0.95 i 0.99[1]. Gubitak topline ljudskog tijela radijacijom zadan je formulom

$$-\left(\frac{dQ}{dt}\right) = uA = \varepsilon\sigma T^4 A \quad (2.12)$$

gdje nam je T temperatura kože, a A površina kože. Isto tako kako ljudsko tijelo zrači elektromagnetskim zračenjem tako i okolina oko nas zrači.

Wienov zakon nazivamo formulu (2.13) koja govori koja je najvjerojatnija valna duljina zračenja za određenu temperaturu[2]

$$\lambda = \frac{0.29}{T} \text{ K cm} \quad (2.13)$$

Uvrštavajući 310 K (36.85°C) kao temperaturu čovjeka dobivamo najvjerojatniju valnu duljinu zračenja od 9.35 μm, što spada u infracrveno zračenje.

U jednadžbi (2.12)  $T^4$  mijenjamo s  $(T_{koža}^4 - T_a^4)$ .  $T_{koža}$  predstavlja temperaturu kože, a  $T_a$  temperaturu okoline. Dalje možemo napisati:

$$(T_{koža}^4 - T_a^4) = (T_{koža} - T_a) \cdot (T_{koža}^3 + T_{koža}^2 T_a + T_{koža} T_a^2 + T_a^3) \quad (2.14)$$

Koristimo sada aproksimaciju za sobne temperature u kojoj jednadžbu (2.12) zamjenjujemo s lineranom jednadžbom:

$$-\left(\frac{dQ}{dt}\right) = \lambda_{rad} \cdot (T_{koža} - T_a) \quad (2.15)$$

$$\lambda_{rad} = (T_{koža}^3 + T_{koža}^2 T_a + T_{koža} T_a^2 + T_a^3) \varepsilon \sigma A \approx 13.95 \text{ Js}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad (2.16)$$

Ova aproksimacija vrijedi samo za temperature kože između 30°C i 40°C, te za temperature okoline između 0°C i 40°C, a to su uvjeti u kojima se čovjek najčešće nalazi [7].

### 3 Konvekcija

Konvekciju smo već definirali kao prijenos topline preko fluida. U fluide spadaju plinovi i tekućine. Razlikujemo dvije konvekcije, jednu zbog strujanja fluida i slobodnu koja se događa zbog toga što tijelo zračenjem zagrije okolni zrak koji se širi i diže, a njegovo mjesto zauzima hladniji zrak. Newtonov zakon hlađenja nam govori da gubitak topline je proporcionalan s razlikom temperature tijela i okoline.

$$-\frac{1}{A} \left( \frac{dQ}{dt} \right) = h_c (T_{kože} - T_{zraka}) \quad (3.1)$$

Gdje  $h_c$  je factor konvekcije,  $T_{kože}$  je temperatura kože, a  $T_{zraka}$  temperature zraka blizu kože.  $h_c$  se mjeri u  $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , te za zrak u slobodnu konvekciju iznosi 0.5-1000, a za strujanje zraka 10-1000  $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ [4]. Za tanjur koji stoji u mirnom zraku koeficijent iznosi 4.5  $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , a na vjetru brzine 2m/s iznosi 12  $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ [3].

Kada je temperature sobe jednaka temperature zraka oko kože, ukupni tok topline iznosi

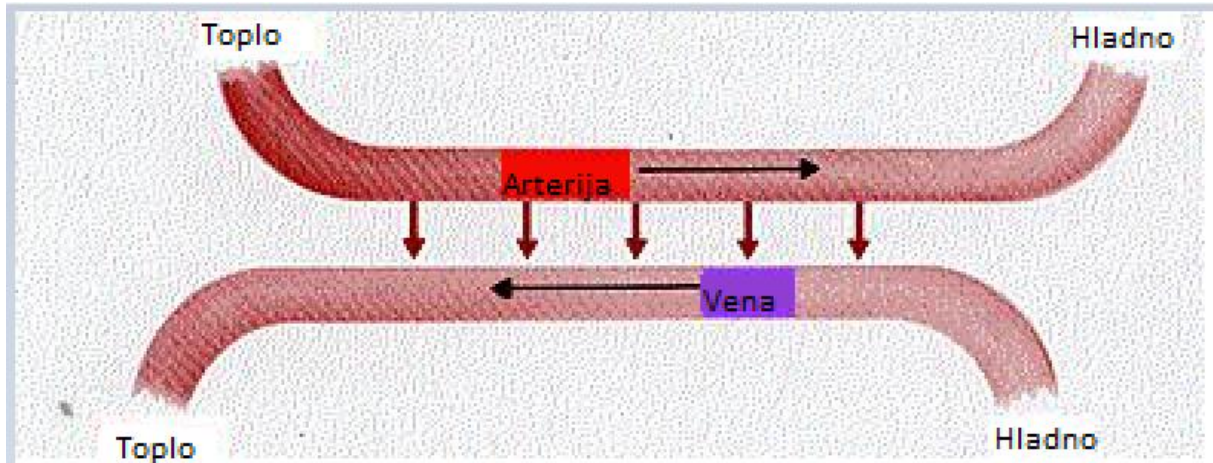
$$-\frac{1}{A} \left( \frac{dQ}{dt} \right) = (h_r + h_c)(T_{kože} - T_{zraka}) \quad (3.2)$$

gdje je  $h_r$  radijacijski toplinski koeficijent. Opisali smo vanjsku konvekciju, ali postoji i konvekcija unutar tijela zbog protoka krvi i drugih tjelesnih tekućina. Ona ne mijenja srednju temperaturu tijela, nego mijenja raspodjelu temperature u tijelu. Kada krv nam iz središta tijela putuje u ruku, promjenu topline računamo formulom:

$$-\left( \frac{dQ}{dt} \right) = F_m c \Delta T_{krv} \quad (3.3)$$

$F_m$  je masa po jedinici vremena,  $c$  specifični toplinski kapacitet, a  $\Delta T_{krv}$  promjena temperature krvi. Naravno  $\frac{dQ}{dt}$  nije nimalo trivijalno odrediti, morali bi znati fiziologiju čovjeka, tok u krvnim žilama, elektrokemijske gradijente... Kao jedan od primjera unutrašnjeg toka topline je tok između venskih i arterijskih krvnih žila. Vene se vraćaju iz tkiva prema srcu pa zato njima putuje hladnija krv, a arterije idu iz srca prema tkivu te njima teče toplija krv. Da bi smanjili gubitak topline u rukama arterije i vene su vrlo blizu međusobno tako da arterije predaju toplinu venama. Razlog tome je da se smanji gubitak topline okolnom tkivu jer nam je vitalnije zadržati temperaturu stalnu u središtu tijela. Zato zimi primjetimo da su nam ruke vrlo hladne zbog očuvanja topline tijela, te čovjek trenjem ili puhanjem toplog zraka

iz usta zagrijava ruke. Slika 1 prikazuje tok topline u suprotnim smjerovima, te kako topla krv u arteriji zagrijava venu.



*Slika 1. Tok topline u suprotnim smjerovima između arterije i vene. Slika preuzeta sa[4]*

Zamislimo primjer gole osobe koja stoji u prostoriji između dva velika otvorena prozora te struji zrak brzine  $v = 3 \text{ m/s}$ , temperature  $2^\circ\text{C}$ . Temperatura kože stavimo  $36.5^\circ\text{C}$ , a površina kože iznosi  $A = 1.8 \text{ m}^2$ . Osoba stoji 30 sekunda na tom strujanju zraka. Koeficijent konvekcije za голу osobu s obzirom na brzinu zraka iznosi  $h_c = 8.3 v^{0.5}$ [1]. Koristeći formulu (3.1) dobivamo da je osoba izgubila  $\Delta Q \approx 26782 \text{ J}$ .

## 4 Kondukcija

Kondukcija je prijenos topline direktnim dodirrom. Zakon kondukcije je još poznat i pod nazivom Fourierov zakon koji nam govori da je prijenos topline proporcionalan konstantni  $K$  koja ovisi o materijalu i nazivamo je termalna konduktivnost materijala, i gradijentu temperature, te je mjerimo u  $W/m \text{ } ^\circ C$ . U jednoj dimenziji zakon izgleda:

$$\frac{1}{A} \left( \frac{dQ}{dt} \right) = -K \frac{dT}{dx} \sim -K \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (4.1)$$

gdje je  $\Delta T$  razliku temperature između dva materijala, a  $\Delta x$  debljina materijala.  $A$  nam je površina na kojoj se događa prijelaz topline. Znak ‘-’ smo uveli tako da znamo da toplinu predaje tijelo više temperature. Označimo  $\Delta x$  s  $L$  te definiramo prijelazni toplinski koeficijent s  $h_t = \frac{K}{L}$ , te dobivamo

$$\frac{1}{A} \left( \frac{dQ}{dt} \right) = -h_t \Delta T \quad (4.2)$$

Definiramo veličinu  $I = \frac{1}{h_t}$  koju nazivamo izolacija. Često se mjeri u jedinicama Clo.  $1 \text{ Clo} = 0.155 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ C \text{ W}^{-1}$ . Gol čovjek ima  $0 \text{ Clo}$  izolaciju, čovjek u laganom odjelu  $0.7-1.0 \text{ Clo}$ , a čovjek u polarnom odjelu  $3-4 \text{ Clo}$ . Izolacija robe je približno  $0.25 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ C \text{ W}^{-1}$  po centimetru debljine robe[1]. U tablici 1 su navedene termalne konduktivnosti i specifični toplinski kapaciteti po volumenu za neke organe ljudskog tijela.

Navedimo primjer u kojem osoba stavi cijelu ruku do ramena u led temperature  $0^\circ C$ , te tako drži jednu minutu. Temperatura kože iznosi  $36.5^\circ C$ . Cijelu ruku zamjenimo s aproksimacijom valjka dužine  $L = 60 \text{ cm}$ , i radijusa  $r = 3.5 \text{ cm}$ . Zanima nas konduktivnost između leda i ruke, a sloj koji razdvaja neka bude masno tkivo. Stavimo pretpostavku da  $\Delta r = 3 \text{ mm}$  je debljina sloja masti s termalnom konduktivnosti  $K = 0.19 \text{ W/m-K}$  (Tablica 3). Dodirna površina nam je površina  $A = 2\pi rL$ . Koristeći formulu (4.1), te zamjenom  $\Delta x$  za  $\Delta r$  (vrijedi kada je  $\Delta r \ll r$ ). Na kraju dobijemo da osoba predaje topline približno  $\Delta Q \approx -16732 \text{ J}$  u toj jednoj minuti dok drži cijelu ruku u ledu.

**Tablica 1.** Vrijednosti termalne konduktivnosti i specifičnog toplinskog kapaciteta po volumenu za neke navedene organe.[1]

---

Organ	Termalna konduktivnost K(W/m-K)	Specifični toplinski kapacitet po volumenu $c_v$ (MJ/m <sup>3</sup> - K)
Koža – vrlo topla	2,80	3,77
Koža – hladna	0,34	3,77
Potkožno masno tkivo	0,19	1,96
Mišić	0,64	3,94
Kost	1,16	2,39
Srce	0,59	3,94
Jetra	0,57	3,78
Bubreg	0,54	4,08
Mozak	0,81	
Cijelo tijelo		4,12

## 5 Prijenos topline isparavanjem vode

Isparavanje je proces prijelaza iz tekućeg agregatnog stanja u plinovito. U tom procesu dolazi do promjene topline, ali ne i temperature, već se ta energija koristi za prijelaz faze. Toplina koja je potrebna za isparavanje iznosi

$$Q = mL \quad (5.1)$$

m nam predstavlja masu tekućine, a L je latentna topline isparavanja po masi.

Promatrat ćemo gubitak topline preko znojenja i preko disanja. Prvo promatramo znojenje. Latentna topline isparavanja vode iznosi  $L = 2.25 \cdot 10^6$  J/kg, ali budući da se znoj ne sastoji samo od vode već ima i natrijevog klorida i drugih spojeva znoj ima latentnu toplinu isparavanja  $L = 2.43 \cdot 10^6$  J/kg[3]. Znojenje se događa kod jačeg fizičkog rada u kojem se ubrzava metabolizam, u stresnim situacijama u kojem djeluju hormoni te daju signal za mnogo kemijskih reakcija istovremeno ili kod visokih vanjskih temperatura. Za isparavanje znoja potreba energija dolazi iz našeg tijela. Ovaj proces ovisi o razlici tlakova vodene pare do kože i vodene pare u zraku kraj kože. Znamo da kada je vlažno izgleda nam da je temperatura i viša nego što je u stvarnosti i teže nam je funkcionirati. Isparavanje kroz kožu možemo opisati formulom

$$\frac{dQ}{dt} = h_i A (p_s - p_0) \quad (5.2)$$

gdje smo s  $h_i$  označili faktor isparavanja,  $p_s$  tlak vodene pare do kože a  $p_0$  tlak vodene pare u zraku.

Drugi način gubitka tjelesne topline je disanje. Udišemo hladniji zrak nego što nam je temperatura tijela i suhi zrak, te izdišemo topli zrak koji je pun vodenom parom. Gubitak topline disanjem računamo formulom:

$$-\left(\frac{dQ}{dt}\right) = \rho_{zrak} c_{zrak} (T_{izdah,zrak} - T_{udah,zrak}) \frac{dV}{dt} + L_{voda} (\rho_{izdah,voda} - \rho_{udah,voda}) \frac{dV}{dt} \quad (5.3)$$

$\rho$  nam predstavlja gustoću (zraka ili vodene pare), T temperatura zraka izdaha ili uздаha,  $\frac{dV}{dt}$  promjenu volumena udaha odnosno izdaha zraka po vremenu.



Izračunajmo pomoću relacije (4.3) koliki je gubitak topline osobe koja udiše zrak temperature  $20^{\circ}\text{C}$ , vrlo suh zrak s 0% vlažnosti te udahne 6L/min, te naravno izdahne jednako zraka temperature  $37^{\circ}\text{C}$  vlažnosti 100%. Gustoća zraka pri  $20^{\circ}\text{C}$  iznosi  $1.205\text{ kg/m}^3$ , a toplinski kapacitet zraka  $1000\text{ J/kg K}$  [6]. Gustoća vodene pare iznosi  $0.044\text{ kg/m}^3$  (100% vlažnosti zraka i parcijalni tlak  $6279.4\text{ Pa}$  [1]). Uvršavanjem u formulu dobivamo  $\left(\frac{dQ}{dt}\right) = -11.95\text{ W}$ . Prvi pribrojnik koji ovisi o razlici temperature nam je pridonio s  $-2.05\text{ W}$ , a drugi koji ovisi o razlici vlažnosti uzdaha i izdaha iznosi  $-9.9\text{ W}$ . Vidimo u ovom primjeru da smo puno više topline izgubili pomoću opuštanja vodene pare iz pluća nego direktnim udisanjem hladnijeg zraka. Naravno, ovaj omjer bi se promjenio u primjeru kojemu bi bilo vlažnije i hladnije, te bi tada izgubili puno više topline udisanjem hladnijeg zraka.

## 6 Primjer biciklista

Navedimo jedan primjer u kojemu ćemo koristiti svaki proces promjene topline, za razliku od prošlih primjera gdje smo gledali posebno svaki proces izmjene topline. Uzmemo za primjer biciklistu koji je po noći vozio i trenutno je stao. Temperatura zraka iznosi  $25^{\circ}\text{C}$ , gustoća zraka  $\rho = 1.184 \text{ kg/m}^3$ , a temperatura biciklista  $37^{\circ}\text{C}$ , te biciklist nosi robu izolacije  $I = 0.2 \text{ clo} = 0.031 \text{ m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$  koja prekriva površinu  $A = 0.5 \text{ m}^2$ . Ukupna površina kože biciklista iznosi  $1.9 \text{ m}^2$ . Budući da biciklist vozi njegov metabolizam se ubrzao, te  $(\frac{dQ}{dt})_{met} = 500\text{W}$ , a s tim umorom i diše brže pa mu je  $\frac{dV}{dt} = 10 \text{ L/min}$  i zrak koji izdiše je  $37^{\circ}\text{C}$ . Na sreću biciklista vlažnost zraka iznosi 0%.

Prvo ćemo izračunati formulom (2.15) utjecaj zračenja te dobivamo da je  $(\frac{dQ}{dt})_r = -167.4 \text{ W}$ . Nakon toga izračunamo gubitak konvekcijom formulom (3.1). Faktor konvekcije za normalno odjevenu osobu i zrakom dok miruje iznosi  $h_c = 2.68 \text{ W/m}^2\text{K}$  [1]. Na kraju dobivamo  $(\frac{dQ}{dt})_{konv} = -61.1 \text{ W}$ .

Kombinirajući definiciju izolacije  $I$  i formule (4.2) dobivamo gubitak topline kondukcijom  $(\frac{dQ}{dt})_{kond} = -96.77 \text{ W}$ .

Izračunamo koliko je topline izgubio disanjem koristeći formulu (5.3) te dobivamo  $(\frac{dQ}{dt})_{disanje} = -19.2 \text{ W}$ .

Zanima nas još koliko biciklist mora izgubiti topline da bi temperatura tijela ostala jednaka, a jedini način nam je ostao znojenjem.  $-(\frac{dQ}{dt})_{znojenje} = 500\text{W} - 344.5\text{W} = 155.5 \text{ W}$ .

## 7 Zaključak

U ovom radu smo promatrali različite prijenose topline u ljudskom tijelu. Primarni cilj je bio fizikalno objasniti svaki prijenos topline te ga kasnije prikazati i objasniti na primjeru čovjeka. Počeli smo s radijacijom jer je ona najutjecajnija od svih prijenosa topline. Objasnili smo ideju Planckovog zračenja crnog tijela, te Stefan-Boltzmannovim zakonom direktno primijenili na zračenja ljudskog tijela. Nakon zračenja smo prešli na konvekciju jer je ona iduća po utjecaju na prijenos topline u čovjeka. Za konvekciju smo vidjeli da nije samo ona bitna za vanjski prijenos topline prema okolini nego da nam je itekako važna za distribuciju topline unutar tijela, te smo naveli jedan zanimljivi proces toka topline u suprotnim smjerovima te primijenili na arterijske i venske žile. Dalje smo se bavili kondukcijom koji je razlog izravnog dodira te smo još spomenuli izolaciju. Na poslijetku smo opisali prijenos topline pomoću znojenja i disanja. Ideja rada je bila fiziku približiti svakodnevnom životu i znanstveno objasniti svakodnevne procese vezano uz prijenos topline. Često čujemo u razgovorima ljudi da svi ljudi zrače pa ponekad čujemo rečenicu „vlaga je u zraku, teže se živi“, a kod starijih ljudi nije rijetka rečenica: „Nemoj stati na strujanje zraka“, te sam htio da osoba nakon pročitano rada shvati osnovne ideje prijenosa topline i zašto ljudi zapravo govore gore navedene rečenice. Dakle, moj doprinos ovoj temi je bio, naravno idejama i formulama iz literature, navesti neke primjere koji su dovoljno jednostavni te pokrijepiti ih brojevima, tako da je osobi lakše predočiti koliki je utjecaj za različite prijenose topline, odnosno da detaljnije shvati jer čitajući samo formule ne dobije se takvo shvaćanje cjeline kao kod primjera. Ovo može biti uvod u biofiziku, znanost koja koristi fizikalne zakone i ideje te ih direktno primjenjuje u biologiji, odnosno u ovom radu na čovjeku.

## 8 Literatura

- [1] Irving P. Herman, Physics of the Human Body, Springer, 2007
- [2] Prof. dr. Vladimir Šips, Školska knjiga, Zagreb 1990
- [3] Mile Dželalija, environmental physics , Split 2004
- [4] URL: [http://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d\\_430.html](http://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d_430.html) (9. 9. 2017.).
- [5] URL: <http://www.biology-pages.info/H/HeatTransport.html><http://www.biology-pages.info/H/HeatTransport.html> (9.9.2017)
- [6] URL: [http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d\\_156.html](http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html) (17.9.2017)
- [7] Physics in Medicine, Chapter 2. Energy Household of the Body, 2.3 Heat losses of body: URL: <https://www3.nd.edu/~nsl/Lectures/mphysics/> (19.9.2017)