



Evropski kmetijski sklad za razvoj podeželja: Evropa investira v podeželje



Kaj je toplotno ugodje in kako vpliva na rabo energije v stavbah?

Inštitut za obnovljive vire energije in učinkovito rabo energije, INOVEKS d.o.o.

Cesta 2. grupe odredov 17, 1295 Ivančna Gorica, info@inoveks.si

Povzetek

V članku prikazujemo vpliv toplotnega okolja na zaznavo toplotnega ugodja. Na začetku je definirano človeško telo kot toplotni stroj in definirana toplotna oddaja človeškega telesa. Predstavljena je odvisnost produkcije toplote oziroma metabolizem v odvisnosti od standardnih aktivnosti. Definirani so osnovni parametri toplotnega okolja ter predstavljen parameter *PMV* za popis toplotnega okolja. Sledi predstavitev vpliva površinskih temperatur sten na toplotno ugodje in rabo energije. Na praktičnem primeru je za konstrukcijo, predstavljeno v članku Kako se pravilno lotiti energetske sanacije tipične stanovanjske hiše? [1] prikazan izračun kakšne so temperature zraka za enako toplotno ugodje pri neizoliranem in izoliranem objektu.

UVOD

Osnovni namen ogrevalnih, prezračevalnih in klimatskih naprav je zagotoviti pogoje za toplotno ugodje človeka. Kaj pa sploh je toplotno ugodje? Toplotno ugodje je stanje, ki izraža zadovoljstvo človeka s toplotnim okoljem, ki mu je izpostavljen. To je definicija s katero bi se najverjetneje strinjala velika večina ljudi, vendar je to hkrati tudi definicija, ki je ni mogoče enostavno prevesti v fizikalne parametre. Toplotno ugodje je namreč odvisno od mnogih parametrov (npr. temperature okolja, oblečenosti, telesne konstitucije, zdravja, starosti, letnega časa, aktivnosti, osvetlitve, hrupa, prisotnosti vonjav v zraku, psihičnega stanja človeka itd.). Ustrezno toplotno ugodje pa je osnova tudi za učinkovito rabo energije v stavbah.

ČLOVEŠKO TELO KOT TOPLOTNI STROJ

Celotno poglavje je povzeto iz knjige [2]. Človeško telo ima lastnost, da pri različnih aktivnostih in pri različnih pogojih okolice vzdržuje približno konstantno telesno temperaturo. Ta temperatura se doseže s cirkulacijo krvi po telesu. Pri cirkulaciji se kri ohlaja. Kri se ponovno ogreje v notranjih organih in tkivu človeka (v srcu, jetrih, ledvicah, mišicah, črevesju itd.) kot posledica postopnega zgorevanja beljakovin, maščob ter ogljikovih hidratov, kar je omogočeno z vdihavanjem kisika.

Za vzdrževanje konstantne temperature človeškega telesa je potrebna njena zelo natančna samoregulacija, za katero skrbi center za toploto v možganih. Zaznavala za regulacijo temperature človeka so končiči živcev v koži, ki vplivajo na nastajanje toplote v notranjosti človeka in delno na

toploto, ki jo človek odda. Prvi proces se imenuje kemijska regulacija temperature, drugi pa fizikalna regulacija temperature.

Kemijska regulacija temperature je upravljanje zgorevanja v notranjih organih. Ti so upravljani tako, da je zgorevanje beljakovin, maščob in ogljikovih hidratov, ter s tem nastajanje toplote, odvisno od temperature krvi. Poleg tega se v odvisnosti od človekovega občutenja hladu ali vročine pojavlja potreba za večjo ali manjšo aktivnost ter občutek lakote, ki je merodajen za vnašanje energije oziroma hrane.

Fizikalna regulacija temperature združuje veliko faktorjev, da se oddajanje toplote čim bolj prilagodi telesni temperaturi. Oddaja toplote se pri tem vrši na več načinov, to so:

- konvekcija toplote s površine človekovega telesa na zrak,
- prevod toplote na površinah v stiku,
- sevanje telesa na površine v okolici in obratno,
- hlapenje vode na koži,
- dihanje,
- izločanje, vnos hrane in drugo.

Izločanje, vnos hrane in drugi vplivi so majhni v primerjavi z ostalimi načini oddaje toplote, zato jih navadno zanemarimo.

Ko se niža temperatura zraka v človekovi okolici, se zmanjša dovod krvi do človekove kože, kar povzroči zniževanje temperature kože in posledično toplotno oddajo. Če temperatura zraka narašča, se dovaja več krvi v zunanje dele telesa. S tem se poviša temperatura kože, posledično pa tudi oddajanje toplote s konvekcijo in hlapenjem. Če povečan dovod krvi v zunanje dele telesa ne zadošča, da bi se telo dovolj ohladilo, potem začnejo delovati žleze znojnice v koži in telo začne izločati vodo. Hlapenje vode povzroči ohlajanje telesa (za hlapenje 1 l vode potrebujemo približno 2400 kJ energije). Intenzivnost hlapenja je odvisna od razlike tlaka vodne pare na koži in tlaka vodne pare v zraku. Tako trenutek znojenja pri enaki temperaturi zraka nastopi prej, če je vlažnost zraka večja.

Toplotno ravnotežje človeškega telesa popišemo z enačbo, ki povezuje akumulacijo toplote v telesu z metabolizmom, opravljenim mehanskim delom in toploto, oddano v okolico.

Metabolizem je toplota, proizvedena pri oksidaciji hrane v človeškem telesu. Metabolizem se navadno izrazi z enoto met, ki je definirana kot proizvedena toplota pri mirujoči in sedeči osebi, kar ustreza 58,2 W/m². V tehnični smernici CR 1752 [3] so podane vrednosti metabolizma za posamezne vrste aktivnosti, kar prikazuje naslednja tabela.

Druge vrednosti za metabolizem so podane v standardu ISO 8996 [4]. Vrednosti v prejšnji tabeli so navedene v W na površino golega človeškega telesa. Najpogosteje uporabljena enačba za določitev površine človeškega telesa pa je Du Boisova enačba iz leta 1916 [5]:

$$A_D = 0,202 \cdot m^{0,425} \cdot l^{0,725} \quad (1)$$

V zgornji enačbi predstavlja A_D površino človeškega telesa [m²], m maso telesa [kg] in l telesno višino [m]. Za 1,73 m visoko človeško telo z maso 70 kg (povprečno človeško telo) znaša povprečna površina telesa $A_D = 1,8$ m². Povprečna oseba s površino 1,8 m² ob sedeči aktivnosti (1,2 met oziroma 70 W/m²) torej oddaja 126 W toplotnega toka.

Tabela 1: Metabolizem v odvisnosti od aktivnosti

Aktivnost	Metabolizem	
	[W/m ²]	[met]
Naslanjanje	46	0,8
Sedenje, počivanje	58	1,0
Sedeča aktivnost (pisarne, stanovanja, šole)	70	1,2
Stoječa, lažja aktivnost (nakupovanje, laboratoriji, lahka industrija)	93	1,6
Stoječa, srednja aktivnost (prodajalci, domača opravila, delo za stroji)	116	2,0
Hoja s hitrostjo:		
2 km/h	110	1,9
3 km/h	140	2,4
4 km/h	165	2,8
5 km/h	200	3,4

PARAMETRI TOPLOTNEGA OKOLJA [2]

Parametre, ki opisujejo toplotno okolje, lahko razdelimo v dve skupini:

1. Direktno merjeni parametri: parametri, ki jih lahko direktno merimo s pomočjo ustrezne merilne opreme.
2. Analitično določeni indeksi okolja: parametri, ki jih izrazimo z različnimi analitičnimi modeli, upoštevajoč zakone telesne termoregulacije.

Direktno merjeni parametri okolja so na primer:

- temperatura zraka oziroma temperatura suhega termometra,
- temperatura mokrega termometra,
- temperatura rosišča,
- zračni tlak,
- parcialni tlak vodne pare in
- vlažnost zraka.

Poleg naštetih psihrometričnih veličin so lahko direktno merjeni še:

- hitrost zraka,
- temperatura površin v prostoru in
- temperatura globus termometra.

Pod **analitično določene parametre** štejemo na primer:

- Srednja sevalna temperatura: tista namišljena enotna temperatura vseh sten v prostoru, s katerimi bi človeško telo izmenjalo ravno toliko energije, kot je izmenja v dejansko opazovanem prostoru, kjer imajo stene različne temperature.
- Asimetrija sevalne temperature (Δt_{pr} , *radiant temperature asymmetry*): parameter je definiran kot razlika med sevalnima temperaturama dveh nasprotnih si površin majhnega ploskovnega elementa.

POPIS TOPLOTNEGA UGODJA S PARAMETROM *PMV* [2]

Toplotno ugodje izrazimo s parametrom *PMV* (*predicted mean vote*). *PMV* predstavlja srednjo vrednost odgovorov občutja okolja večje skupine ljudi, izpostavljenih določenemu bivalnemu okolju. Skala ima sedem vrednosti (Tabela 2).

Tabela 2: Vrednosti *PMV* in občutek oseb ob posamezni vrednosti

Vrednost	Občutek
+ 3	vroče
+ 2	toplo
+ 1	prijetno toplo
0	nevtravno
- 1	prijetno hladno
- 2	hladno
- 3	mrzlo

Notranje okolje lahko opišemo tudi z indeksi okolja, ki združujejo dva ali več merjenih parametrov v eno vrednost z namenom poenostaviti popis toplotnega okolja. Indeksi okolja lahko slonijo na teoretičnih podlagah ali empirično določenih relacijah. Nekateri izmed najbolj pogosto uporabljenih indeksov okolja so:

- Efektivna temperatura (*ET*, *effective temperature*): parameter so uvedli v ZDA leta 1923. Efektivna temperatura predstavlja pomemben korak k temu, da se ugodje v prostoru izrazi z eno samo številko. Efektivna temperatura je fiktivna temperatura, pri kateri bi imel človek enak občutek ugodja, kot ga ima pri kombinaciji temperature zraka, relativne vlažnosti in hitrosti zraka.
- Občutena temperatura (t_o , *operative temperature*): enotna temperatura namišljenega zaprtega prostora, s katerim bi človeško telo izmenjalo enako količino senzibilne toplote s sevanjem in konvekcijo, kot jo v dejanskem prostoru. ASHRAE standard 55 [6] to temperaturo uporablja kot spremenljivko okolja za določitev toplotnega ugodja.

- Vlažna nadomestna temperatura (t_{oh} , *humid operative temperature*): temperatura namišljenega prostora pri 100% relativni vlažnosti, v katerem oseba izmenja toliko toplote s sevanjem, konvekcijo in hlapenjem znoja, kakor jo izmenja v dejanskem prostoru.
- Indeks vpliva vetra na občuteno temperaturo (*WCI, Wind Chill Index*): empirični indeks, ki popisuje toplotne izgube iz cilindrične posode s sevanjem in konvekcijo s temperaturo površin 33 °C kot funkcijo temperature okolice ter hitrosti vetra.

VZROKI ZA NEUGODJE V PROSTORU [2]

Človek se v prostoru počuti ugodno, če je celotno telo v toplotnem ravnotežju z okolico. Če je en del telesa toplejši od drugega, se lahko pojavi občutek neugodja. Neenakomernost telesne temperature se lahko pojavi zaradi asimetričnega sevalnega polja, gibanja zraka (prepiha), vertikalnega temperaturnega gradienta ali toplih oziroma hladnih tal.

Asimetrično sevalno polje je posledica hladnih oziroma toplih površin v prostoru (okna, neizolirane stene, stroji, ogrevala ipd.). V stanovanjskih stavbah, pisarniških prostorih, restavracijah ipd. so najpogostejši vzroki neugodja v prostoru v zimskem času velika okna ter nepravilno dimenzionirana ogrevala, ki povzročijo asimetrijo sevalnega polja.

Prepih je definiran kot nezaželeno lokalno ohlajanje človeškega telesa zaradi gibanja zraka. Prepih velja za enega najbolj motečih faktorjev toplotnega ugodja, ne samo v stavbah, ampak tudi v avtomobilih, vlakih in na letalih. Kadar ljudje občutimo prepih, največkrat izrazimo željo po višji temperaturi zraka v prostoru ali celo po zaustavitvi sistemov za prezračevanje. Turbulenca hitrosti zraka ima dodaten vpliv na človeško ugodje. Višja kot je turbulenca, večje je neugodje.

Temperatura zraka v prostoru se v večini stavb viša v smeri od tal proti stropu. Če je ta temperaturni gradient v vertikalni smeri previsok, lahko nastopi občutek neugodja zaradi hladu v področju nog in/ali pretoplega zraka v področju glave. Eksperimentalni rezultati so pokazali, da je odstotek nezadovoljnih bistveno manjši v primeru, ko je temperatura zraka pri glavi nižja kot pri gležnjih, kot v obratnem primeru.

Na ugodje vpliva tudi temperatura tal. Temperatura tal ima znaten vpliv tudi na srednjo sevalno temperaturo prostora. Odziv uporabnika prostora na hladna tla je največkrat povišanje temperature zraka v prostoru, kar pomeni večjo rabo energije.

Temperatura, relativna vlažnost in hitrost zraka okolja, njihovo nihanje ter osebni parametri metabolizma in oblečenost človeka so faktorji, ki direktno pogojujejo toplotno oddajo človeka ter toplotno ugodje. Poleg teh faktorjev pa vpliva na toplotno ugodje še mnogo drugih.

KATEGORIJE TOPLOTNEGA OKOLJA PO CR 1752

V prejšnjih poglavjih so bile prikazane osnove, kako človek občuti toplotno okolje in vzroki za neugodje človeka v prostoru. Vse to je združeno v evropsko tehnično poročilo za dimenzioniranje prezračevanja notranjega okolja CR 1752 iz leta 1998 [3]. CR 1752 določa tri kategorije oziroma razrede toplotnega okolja. Tabela 3 prikazuje predpisane vrednosti odstotka nezadovoljnih ljudi za posamezne kakovostne razrede.

Tabela 3: Kategorije toplotnega okolja

Kategorija (razred)	PPD [%]	PMV	Odstotek nezadovoljnih zaradi prepiha [%]	Odstotek nezadovoljnih zaradi vertikalnega temperaturnega gradienta [%]	Odstotek nezadovoljnih zaradi toplih ali hladnih tal [%]	Odstotek nezadovoljnih zaradi asimetrije sevalnega polja [%]
A	< 6	-0,2 do 0,2	< 15	< 3	< 10	< 5
B	< 10	-0,5 do 0,5	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15	-0,7 do 0,7	< 25	< 10	< 15	< 10

VPLIV POVRŠINSKIH TEMPERATUR STEN NA TOPLOTNO UGODJE IN RABO ENERGIJE

Človek zaznava v prostoru kombinacijo površine temperature sten in temperature zraka. Če je hitrost nižja od 0,2 m/s velja, da je temperatura, ki jo človek občuti, $t_{obč}$, definirana kot polovična kombinacija temperature sten (in drugih površin) ter polovico temperature zraka [7]:

$$t_{obč} = \frac{t_{površin} + t_{zraka}}{2} \quad (2)$$

Kaj to pomeni za učinkovito rabo energije v stavbah? Poglejmo si preračun notranje temperature zraka za stene, predstavljene v člankih [1, 8]. Tabela 4 prikazuje konstrukcijo pred sanacijo.

Tabela 4: Lastnosti stene konstrukcij (od notranjosti navzven)

Sestava stene	<ol style="list-style-type: none"> 1. Podaljšana apnena malta 1800 – 1 cm 2. Apnena malta 1600 – 1,5 cm 3. Mrežasta in votla opeka 1200 – 29 cm 4. Pigmentna fasadna malta – 0,7 cm
---------------	---

Tabela 5 prikazuje toplotno prehodnost za omenjeno konstrukcijo. Ta znaša 1,295 W/(m²K), kar je približno štirikrat več od dopustne vrednosti, ki za to konstrukcijo znaša 0,28 W/(m²K).

Tabela 5: Izračunana in dovoljena toplotna prehodnost gradbenih konstrukcij analiziranega objekta

Gradbeni elementi stavb, ki omejujejo ogrevane prostore	U_{dej} [W/(m ² K)]	U_{max} [W/(m ² K)]
1. Zunanje stene in stene proti neogrevanim prostorom	1,295	0,28

Tabela 6 prikazuje preračun notranje temperature sten t_n v posameznih mesecih ogrevanja za neizolirano steno. Vidimo lahko, da je notranja površinska temperatura stene pri projektnih pogojih (zunaj je -13 °C) samo 14,65 °C, v januarju, kot najhladnejšem mesecu, ko je povprečna zunanja temperatura t_{ep} enaka -1 °C pa 16,59 °C.

Tabela 6: Izračun notranje temperature sten t_n v posameznih mesecih in pri projektnih pogojih

	t_{ep} [°C]	\dot{q} [W/m ²]	t_n [°C]
Januar	-1	27,26	16,59
Februar	1	24,66	16,92
Marec	6	18,17	17,73
April	10	12,98	18,38
Oktober	10	12,98	18,38
November	4	20,77	17,40
December	1	24,66	16,92
Projektna	-13	42,83	14,65

Tabela 7 prikazuje toplotno prehodnost integralno saniranega objekta, kot je bila predstavljena v prispevku [1]. Na steno smo namestili 12 cm grafitnega stiropora in s tem toplotno prehodnost gradbene konstrukcije znižali z 1,295 W/(m²K) na 0,221 W/(m²K).

Tabela 7: Izračunana toplotna prehodnost gradbene konstrukcije analiziranega objekta

Gradbeni elementi stavb, ki omejujejo ogrevane prostore		U_{dej} [W/(m ² K)]	U_{max} [W/(m ² K)]
1.	Zunanje stene in stene proti neogrevanim prostorom	0,221	0,28

Tabela 8 prikazuje preračun notranje temperature sten t_n v posameznih mesecih ogrevanja za neizolirano steno. Vidimo lahko, da je notranja površinska temperatura stene pri projektnih pogojih (zunaj je -13 °C) samo 19,09 °C, v januarju, kot najhladnejšem mesecu, ko je povprečna zunanja temperatura t_{ep} enaka -1 °C pa 19,42 °C.

Tabela 8: Izračun notranje temperature sten t_n v posameznih mesecih in pri projektnih pogojih za izolirano steno

	t_{ep} [°C]	\dot{q} [W/m ²]	t_n [°C]
Januar	-1	4,64	19,42
Februar	1	4,20	19,48
Marec	6	3,09	19,61
April	10	2,21	19,72
Oktober	10	2,21	19,72
November	4	3,54	19,56
December	1	4,20	19,48
Projektna	-13	7,29	19,09

Tabela 9 prikazuje kakšna mora biti temperatura zraka v prostorih za enako občuteno temperaturo, $t_{obč}=20$ °C, ki smo jo definirali z enačbo (1). Vidimo, da mora biti za enak občutek ugodja v neizoliranem objektu temperatura zraka precej višja kot v izoliranem objektu. To se skoraj vedno dogaja tudi v praksi.

Tabela 9: Izračun potrebne temperature zraka za $t_{obč}=20\text{ °C}$

	$t_{n\text{neizolirano}}$ [°C]	$t_{zrak\text{neizolirano}}$ [°C]	$t_{n\text{izolirano}}$ [°C]	$t_{zrak\text{izolirano}}$ [°C]
Januar	16,6	23,4	19,4	20,6
Februar	16,9	23,1	19,5	20,5
Marec	17,7	22,3	19,6	20,4
April	18,4	21,6	19,7	20,3
Oktober	18,4	21,6	19,7	20,3
November	17,4	22,6	19,6	20,4
December	16,9	23,1	19,5	20,5
Projektna	14,7	25,3	19,1	20,9

ZAKLJUČEK

V prispevku smo prikazali vpliv toplotnega ugodja na učinkovito rabo energije. Z definicijo površinske temperature stene smo na primeru stene brez in z izolacijo prikazali, da potrebujemo za enako toplotno ugodje v ogrevalni sezoni približno 2 °C višjo temperaturo zraka pri neizolirani v primerjavi z izolirano steno. To v praksi pomeni tudi približno 16 % višjo rabo energije. Pri izoliranem objektu tako lahko izkoristimo tudi ta potencial prihrankov.

LITERATURA

- [1] INŠTITUT ZA OBNOVLJIVE VIRE ENERGIJE IN UČINKOVITO RABO EKSERGIJE INOVEKS D.O.O. *Kako se pravilno lotiti energetske sanacije tipične stanovanjske hiše?* [na spletu]. 2019. Dostopno: https://www.inoveks.si/images/inOVEinURE/strokovniprispevki/02_Kako_se_pravilno_lotiti_energetske_sanacije_tipicne_stanovanjske_hise.pdf
- [2] MUHIČ, Simon. *Prenos toplote in snovi v stavbah*. Novo mesto: Fakulteta za tehnologije in sisteme, 2017. ISBN 978-961-6770-38-5.
- [3] CEN/TC 156. *CR 1752: Ventilation for buildings. Design criteria for the indoor environment*. Brussels: European Committee for Standardization. 1998
- [4] *ISO 8996:2004: Ergonomics of the thermal environment - Determination of metabolic rate*. 2004
- [5] MUHIČ, Simon. *Kakovost in distribucija zraka na delovnih mestih v zaprtih prostorih*. B.m., 2001. Magistrsko delo. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo.
- [6] ASHRAE. *Standard 55-2013: Thermal environment conditions for human occupancy*. 2013
- [7] RECKNAGEL, Herman idr. *Grejanje i klimatizacija 2012*. Vrnjačka Banja: Interklima, 2012. ISBN 978-86-82685-29-6.
- [8] INŠTITUT ZA OBNOVLJIVE VIRE ENERGIJE IN UČINKOVITO RABO EKSERGIJE INOVEKS D.O.O. *Kako se pravilno lotiti energetske sanacije energijsko zelo potratne hiše?* [na spletu]. 2019. Dostopno: https://www.inoveks.si/images/inUREinOVE/strokovniprispevki/01_Kako_se_pravilno_lotiti_energetske_sanacije_potratne_hise.pdf

OPOMBA

Operacija Informiranje in ozaveščanje o potencialu učinkovite rabe energije in obnovljivih virov energije za sonaravni razvoj (in.OVE.in.URE) je bila potrjena na drugem Javnem pozivu za izbor operacij za uresničevanje ciljev Strategije lokalnega razvoja na območju LAS STIK v letu 2017.