

**FIZIKALNI ASPEKT PRENOSA TOPLOTE KROZ PRIMJER
RJEŠAVANJA PROBLEMA POJAVE KONDENZACIJE KOD
TERMIČKE IZOLACIJE OBJEKATA**

**PHYSICAL ASPECT OF HEAT TRANSFER THROUGH THE
EXAMPLE OF SOLVING THE PROBLEM OF APPEARANCE OF
CONDENSATION IN THERMAL INSULATION OF OBJECTS**

mr.sc. Emir Hodžić, odgovorni projektant
Rudarski institut Tuzla
Tuzla

dr.sc. Amela Softić, vanredni profesor
Univerzitet u Tuzli
Tuzla

REZIME

Kada je u pitanju termička zaštita i održavanje zgrada, glavni cilj je minimiziranje toplotnih gubitaka i smanjenje energetske potrebe. U praksi se ovo postiže postavljanjem izolacionih materijala sa vanjske strane zida. Međutim, kod već sagrađenih objekata koji nemaju toplotnu izolaciju ili postojeća nije dovoljna, postavljanje nove izolacije se često vrši sa unutrašnje strane zida, što može dovesti do problema nastanka vlage.

S ciljem razumijevanja problema koji se javlju pri termičkoj izolaciji, u radu su razmotreni fizikalni aspekti prenosa toplote kroz materijal, te kroz primjere riješeni i objašnjeni slučajevi pojave kondenzacije unutar građevinskog elementa.

Ključne riječi: toplotna provodljivost, termička izolacija, tačka rosišta, pojava kondenzacije

ABSTRACT

The main goal of thermal requirements insulation and maintenance of buildings is minimization of thermal losses and reduction of energy. In practice, this is achieved by applying insulating materials on building envelopes. However, on already standing buildings that do not have thermal insulations or their existing insulation is not sufficient, placement of new insulation is often performed on the inner side of the wall, which can lead to the problem with moisture build-up.

In order to understand problems which occur with thermal insulation, the paper considers physical aspects of heat transfer through the materials, and through examples it solves and explains cases of appearance of condensation within the structural elements.

Key words: thermal conductivity, thermal insulation, dew point, condensation

1. UVOD - FIZIKALNE OSNOVE PRENOSA TOPLOTE

Toplotna zaštita zgrade je neophodna za smanjenje potrošnje energije, a samim tim i smanjenje zagađenosti atmosfere i očuvanje prirodnih resursa. Najveći dio potrošene energije u Evropi, oko 1/3, ide na zagrijavanje i rashlađivanje arhitektonskih objekata[3].

Jedna od mjera za poboljšanje energetske mjerno-tehničke stanja sa ciljem smanjenja primarne energije za grijanje, vjetrenje i hlađenje je kvalitetna toplotna izolacija, odnosno, sanacija fasade zgrade. Toplotna izolacija (termika) je dio fasade čija je funkcija smanjenje toplotnih gubitaka zgrade. Slojevite fasade na konstrukcijama, prema položaju toplotne izolacije, mogu biti: fasade sa toplotnom izolacijom položenom sa vanjske (hladnije) strane i fasade sa toplotnom izolacijom položenom sa unutrašnje (toplije) strane.

Nastanak vodene pare i njeno kretanje iz prostorije prema vani dovodi do kondenzacije vodene pare unutar konstrukcije fasade objekta. Vlažnost unutar zida je nepoželjna jer umanjuje toplotna svojstva i kreira preduslove za razvoj gljivica. Pojava mikroorganizama je postala učestalija posljednjih godina zbog neodgovarajućeg sistema toplotnog izoliranja. Obično se dešava kod neadekvatno položene toplotne izolacije sa unutrašnje strane zida, odnosno, ako se unutar zida nalazi barijera za vlažnost.

Zimi se kod grijanih zgrada toplota prenosi iz zgrade prema vanjskom prostoru, a količina toplote koja se na ovaj način gubi se nadoknađuje sistemom grijanja. Toplota predstavlja transport energije kroz granicu sistema pod uticajem razlike temperatura. Toplotni tok uvijek ima smjer od više ka nižoj temperaturi, tako da ako su temperature zraka u objektu i prostoru oko objekta različite, dolazi do prenosa toplote kroz fasadne elemente zgrade, iz prostora sa višom temperaturom prema prostoru sa nižom temperaturom. Prenos toplote iz zraka ka zidovima nastaje konvekcijom ili zračenjem. Jednom kada dođe do prenosa toplote do čvrstog materijala, dalje prenošenje toplote nastaje uglavnom kondukcijom, prema tome, provodljivost toplote je svojstvo materijala koja direktno utiče na toplotni fluks.

Toplotna provodljivost je svojstvo (građevinskog) materijala, da u manjoj ili većoj mjeri provode toplotu. Kao mjera toplotne provodljivosti materijala služi koeficijent toplotne provodljivosti λ i on je jednak gustini toplotnog toka kroz sloj materijala jedinične debljine za jediničnu razliku temperature na površini sloja. Materijali koji se koriste za toplotnu izolaciju moraju imati niske vrijednosti toplotne provodljivosti.

Vrijednost koeficijenta toplotne provodljivosti materijala zavisi od poroznosti, hemijskog sastava materijala, sadržaja vlage u materijalu i njegove temperature. Promjena koeficijenta λ proizilazi iz činjenice da svaki građevinski materijal, osim osnovne čvrste tvari, sadrži i veliki broj pora i šupljina ispunjenih zrakom. Iz tog razloga, navođenje vrijednosti koeficijenta toplotne provodljivosti ima smisla samo ako je navedena i gustina traženog materijala, te se u tablicama navode obje veličine zbog pravilnog izbora koeficijenta.

Veći porast vrijednosti koeficijenta provodljivosti kod manje vlažnosti objašnjava se time što se kod vlaženja materijala prvo ispune vodom manje pore i kapilari. Ovisnost koeficijenta toplotne provodljivosti je vezana za temperaturu materijala koja raste sa porastom njegove srednje temperature. Sa povećanjem temperature raste i vodljivost zraka u porama materijala, kao i prenošenje toplote zračenjem.

Toplota se dalje prenosi kroz materijal zida. Koeficijent toplotne provodljivosti materijala debljine d , zove se koeficijent toplotne propustljivosti $\Lambda = \lambda/d$ i mjeri se u W/m^2K . Recipročna vrijednost koeficijenta Λ je toplotni otpor (otpor toplotnoj propustljivosti) i označava se sa R , jedinice m^2K/W . Kod višeslojnih građevinskih elemenata govori se o koeficijentima toplotne propustljivosti i otpora pojedinih slojeva.

Toplota koja je prošla kroz zid prenosi se na vanjske površine zida u vanjski prostor. Koeficijent vanjskog prelaza toplote je jednak količini toplote koja u jedinici vremena pređe sa vanjske površine na vanjski zrak.

Za ocjenu toplotno-tehničkih svojstava građevinskih elemenata je potrebno poznavati temperature na graničnim površinama elemenata. Higrotermička održivost građevinskih dijelova ovisi i o količini vlage unutarnjeg prostora. Vlažan zrak je smjesa suhog zraka i vodene pare koja se obično naziva vlažnost zraka. Zrak ne može prihvatiti vodenu paru u neograničenoj količini i najveći mogući sadržaj vodene pare u zraku zavisi od temperature zraka. Što je temperatura zraka viša, on može primiti veću količinu vlage.

Masa vodene pare sadržane u jedinici volumena zraka je apsolutna vlažnost, dok odnos apsolutne vlažnosti i najveće moguće količine vlage koju bi zrak pri istoj temperaturi i pritisku sadržavao (potpuno zasićen) je relativna vlažnost ϕ . Relativna vlažnost zraka se može definisati i kao odnos parcijalnog pritiska vodene pare posmatranog vlažnog zraka i pritiska zasićenja pri određenoj temperaturi zraka $\phi = \frac{p}{p'}$. Pritisak vodene pare u zraku, pri postojećem stanju vlažnosti i temperature zraka, je parcijalni pritisak vodene pare p . Najveća moguća vrijednosti parcijalnog pritiska vode pare u zraku određene temperature je pritisak zasićenja p' .

Kada se nezasićeni zrak postepeno hladi, njegova relativna vlažnost postaje sve veća. Ako bi se zrak dalje hladio ispod t_s , višak vlage u zraku bi se kondenzovao. Temperatura t_s , pri kojoj relativna vlažnost zraka u procesu hlađenja postiže vrijednost $\phi = 1$, je temperatura rosišta.

Molekule vodene pare se kreću iz prostora sa višim parcijalnim pritiskom vodene pare prema prostoru sa nižim pritiskom. Vodena para iz zraka kondenzuje se na unutrašnjoj površini vanjskog elementa zgrade uvijek kada je temperatura te površine manja od rosišta zraka koji je dodiruje. Stvaranje kondenzata na vanjskim zidovima se može javiti tamo gdje postojeći pritisak pare dostiže pritisak pare pri zasićenju, odnosno, tamo gdje se povećanjem pritiska vodene pare ili padom temperature, dostiže stanje zasićenja ili tačka rosišta. Da bi se spriječila kondenzacija na površini, elementi zgrade moraju imati dovoljno veliku vrijednost otpora prolazu toplote.

Da bi se ustanovilo da li za neki element u određenim klimatskim uslovima dolazi do kondenzacije vodene pare koja se difuzijom kreće kroz materijal, potrebno je proračunati temperaturnu krivu i u poprečni presjek elementa nacrtati krivu pritisaka zasićene vodene pare i krivu parcijalnog pritiska vodene pare. Kriva parcijalnog pritiska vodene pare se može pronaći izjednačavanjem odnosa pada parcijalnog pritiska za pojedini sloj prema ukupnom padu parcijalnog pritiska sa obje strane elementa i odnos otpora difuzijskoj propustljivosti vodene pare promatranog sloja prema ukupnom otporu difuzijske propustljivosti građevinskog elementa. Kriva parcijalnog pritiska vodene pare predstavlja krivu stvarne promjene pritiska vodene pare unutar elementa. Na grafiku se kriva parcijalnog pritiska iscrtava pravolinijski u skladu sa propisima. [1], [2]

Vrijednost pritiska p_i i p_e određeni su s namjenom prostora i uslovima okruženja [1]:

$$\begin{aligned} p_i &= \varphi_i p_i' (kPa) \\ p_e &= \varphi_e p_{ei}' (kPa) \end{aligned} \quad (1)$$

gdje je φ_i relativna vlažnost zraka unutar prostora (%), φ_e relativna vlažnost vanjskog zraka (%), p_i' pritisak zasićenja vodene pare pri t_i (kPa) i p_{ei}' pritisak zasićenja vodene pare zraka okoline (kPa).

Uz krivu parcijalnih pritisaka, predstavlja se i prikaz zasićenja. Pošto su pritisci zasićenja veći od parcijalnih pritisaka pri istim temperaturama, kriva zasićenja u slučaju stacionarnog toka vodne pare treba biti iznad krive parcijalnih pritisaka. Ako se one sijeku, odnosno, računске vrijednosti parcijalnih pritisaka na nekom mjestu budu veće od vrijednosti pritiska zasićenja, teoretski dolazi do pojave kondenzacije vodene pare.

2. RAZMATRANJE USLOVA POJAVE KONDENZACIJE

Za utvrđivanje pojave kondenzacije određeno je temperaturno polje na granicama slojeva, a zatim raspodjela parcijalnih pritisaka vodene pare i pritisaka zasićenja za datu temperaturu po presjeku konstrukcije. Na mjestima gdje parcijalni pritisak zraka (prikazan plavom bojom) dostiže vrijednosti pritiska zasićenja (prikazan crvenom bojom) doći će do pojave kondenzacije.

Da bi se proučili faktori koji utiču na pojavu kondenzacije u konstrukciji, na grafičkom prikazu su praćena pomjeranja tačke mjesta kondenzacije vodene pare za različite uslove. Unutrašnja površinska temperatura na fasadi mora biti viša od rosišta za prosječnu unutrašnju temperaturu i vlažnost zraka.

U fizičko-građevinskom proračunu konstrukcije razmatrana su, za naše područje, dva najčešće korištena materijala za gradnju: siporeks blok i beton. Takođe, kako slojevite fasade, mogu imati toplotnu izolaciju položenu sa vanjske strane ili sa unutrašnje strane konstrukcije, u razmatranje su uzeta oba slučaja.

Za inicijalni proračun (Tabela 1.) su uzete vrijednosti temperatura i relativnih vlažnosti vanjskog zraka definisanim odgovarajućim tehničkim propisima (-5°C i 90%). Relativna vlažnost i temperatura unutrašnjeg vazduha prostorije usvaja se prema projektnim uslovima s obzirom na namjenu objekta/prostorije.[2]

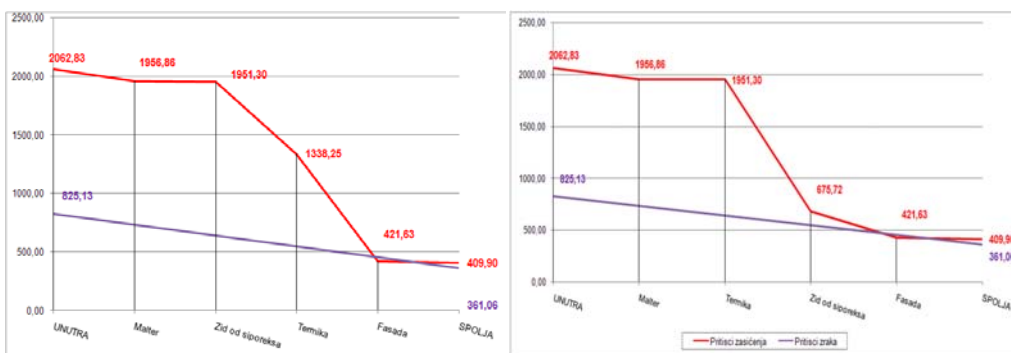
Tabela 1. Inicijalni proračun temperaturnog toka

Unutrašnja temperatura	$\theta_i =$	18,0 °C							
Unutrašnja vlažnost zraka	$\varphi_i =$	40,0 %							
Vanjska temperatura	$\theta_e =$	-5,0 °C							
Vanjska vlažnost zraka	$\varphi_e =$	90,0 %							
r.br.	Naziv sloja	Debljina	Koef. Toplotne provodljivosti	Otpor toplotnom protoku	Faktor otpora difuzije vodene pare	Temperaturni pad u sloju	Temperaturni pad između slojeva	Pritisaci zasićenja vodenom parom	Pritisaci zraka
		d(m)	λ (W/mK)	R (m ² K/W)	μ	Δv	v	p_{sat} (Pa)	p_i p_e
1	UNUTRA			0,133			18,0	2062,83	825,13
						0,836			
2	Malter	0,010	1,40	0,007	30,0	0,045	17,16	1956,86	
							17,12	1951,30	
3	Zid od siporeksa	0,250	0,27	0,926	2,2	5,821			
							11,30	1338,25	
4	Termika	0,100	0,04	2,500	20,0	15,716			
							-4,42	421,63	
5	Fasada	0,010	0,19	0,053	2,0	0,331	-4,75	409,90	
						0,251			
6	SPOLJA			0,040			-5,00	401,18	361,06

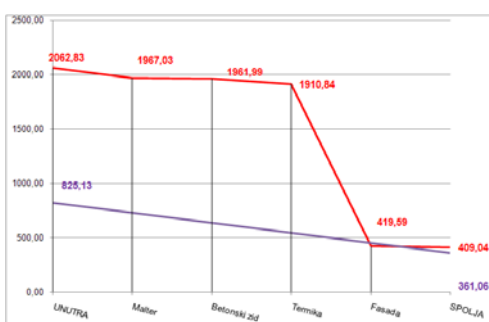
Za ove uslove proračunom dobijeni temperaturni tok, odnosno, raspodjela parcijalnih pritisaka vodene pare i pritisaka zasićenja za datu temperaturu na granicama elemenata konstrukcije prikazan je grafički (Slika 1.).

Za konstrukciju sa siporeks blokom, kod toplotne izolacije postavljene sa vanjske strane, uočava se da se tačka rosišta nalazi na spoju toplotne izolacije i fasade. U slučaju postavljanja toplotne izolacije sa unutrašnje strane, do pojave kondenzacije vlage dolazi unutar zida od siporeksa.

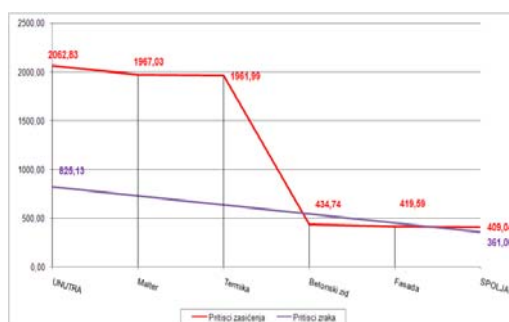
Za konstrukciju sa betonom, kod toplotne izolacije postavljene sa vanjske strane, vidi se da je presjek parcijalnog pritiska i pritiska zasićenja takođe na spoju toplotne izolacije i fasade, dok u slučaju postavljanja toplotne izolacije sa unutrašnje strane do kondenzacije vodene pare dolazi unutar toplotne izolacije prema spoju sa zidom. U ovom slučaju se stvaraju uslovi za razvoj mikroorganizama.



a) zid od siporexa



b) betonski zid

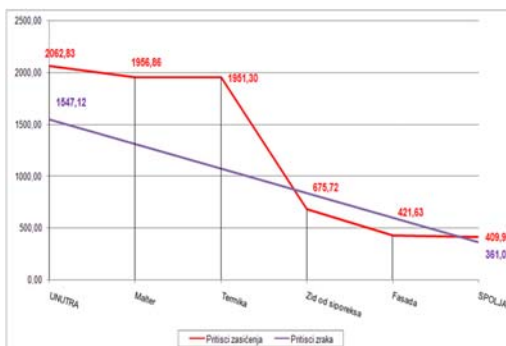


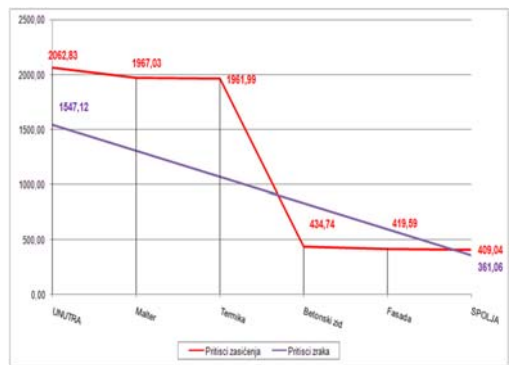
Slika 1. Grafički prikaz provedenog proračuna sa ulaznim vrijednostima definisanim propisom

Na slici 2. je prikazan slučaj kada je povećana vrijednost vlažnosti zraka u prostoriji na 65%, kao što je prilikom korištenja kuhinje i kupatila. Sa grafičkog prikaza se vidi da, kod zida od siporexa sa toplotnom izolacijom postavljenom s vanjske strane, sa povećanjem unutrašnje vlažnosti vazduha dolazi do pomjeranja tačke rosišta dublje unutar toplotne izolacije, dok se kod toplotne izolacije postavljene sa unutrašnje strane zida, tačka rosišta pomjerila unutar toplotne izolacije prema spoju sa zidom. Kod konstrukcije sa betonskim zidom, i u izvedbi sa toplotnom izolacijom sa vanjske strane i sa toplotnom izolacijom s unutrašnje strane, u ovom slučaju se uočava pomjeranje tačke rosišta dublje unutar toplotne izolacije.



a) zid od siporexa

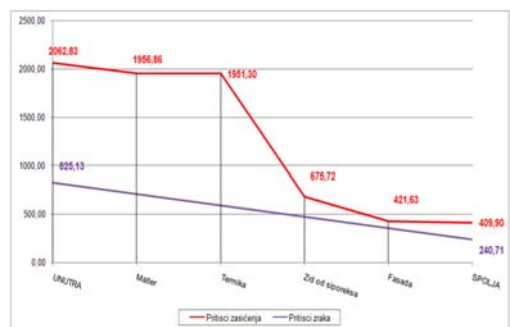




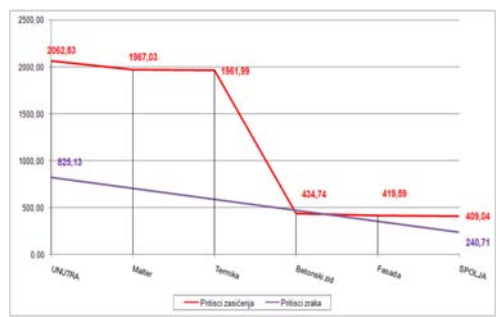
b) zid od betona

Slika 2. Grafički prikaz provedenog proračuna sa povećanim vrijednostima vlažnosti vazduha unutar

Slika 3. prikazuje slučaj kada je smanjena vlažnost zraka vani, iako je temperatura ostala relativno niska. Ovim razmatranjem se htjelo pokazati da, kada je vani manja vlažnost zraka, dolazi do pomjeranja tačke rosišta van konstrukcije. U oba slučaja postavke toplotne izolacije uz zid od siporexa, kao i kod betonskog zida sa toplotnom izolacijom sa vanjske strane ne dolazi do pojave difuzije unutar konstrukcije, dok se kod betonskog zida sa toplotnom izolacijom s unutrašnje strane tačka rosišta nalazi na granici toplotne izolacije i betonskog zida.



a) zid od siporexa



b) zid od betona

Slika 3. Grafički prikaz provedenog proračuna sa smanjenim vrijednostima vlažnosti vazduha vani

U toku izvođenja proračuna, razmotren je i uticaj promjene debljine termičkog sloja na pojavu kondenzacije. Iako je očigledno da bi se sa debljim termičkim slojem, i u vanjskoj i u unutrašnjoj primjeni, postizale veće energetske uštede, ne uočava se značajan uticaj debljeg sloja termike na mjesto pojave difuzije vodene pare unutar konstrukcije.

3. ZAKLJUČAK

Provedenim proračunom je uočeno da položaj termičke izolacije utiče na pojavu kondenzacije vodene pare sa unutrašnje strane konstrukcije. Ovaj pojava je posebno izražena kada je ona se unutrašnje strane zida, što za posljedicu može imati pojavu buđi i gljivica na zidu. Generalno, do ovog problema dolazi kod niskih vanjskih temperatura, sa velikim postotkom vlažnosti zraka. Takođe, problem se pokazao izraženiji kod betonskih zidova, zbog njegovih nepovoljnijih termičkih karakteristika.

Kako ne možemo uticati na parametar vlažnosti zraka vani, pokazalo se da je potrebno obratiti posebnu pažnju na nivoe vlažnosti zraku u prostorijama. U prostorijama čija namjena uzrokuje povećanje vrijednosti vlažnosti zraka, neopodno je vjetrenje, odnosno, ugrađivanje uređaja koji izvlače višak vlage iz prostorije.

Generalno gledano, kondenzovana vodena para neće izazvati štetu u materijalu ako je vlažnost materijala manja od najveće dozvoljene vlažnosti za taj materijal. Građevinski element u kojem se kondenzovala vodena para mora zadovoljiti i uslov da se ukupna količina u njemu kondenzovane pare na završetku perioda difuzije može isušiti kroz period difuzionog isušenja. U daljem, detaljnijem, razmatranju bilo bi potrebno uzeti u obzir ukupno vrijeme pojave difuzije i vrijeme isušivanja.

4. LITERATURA

- [1] JUS U.J5.520 Metoda proračuna difuzije vodene pare u zgradama, Beograd, 1980.,
- [2] JUS U.J5.600 Tehnički uslovi za projektovanje i građenje zgrada, Beograd, 1980.,
- [3] Todorović M., Bogner M., Denić N.: O izolaciji, ETA, Beograd, 2012.

