

Povećanje energetske efikasnosti kroz toplotnu izolaciju zgrade i prelazak sa daljinskog grejanja na grejanje pomoću toplotne pumpe: termomehanička i ekonomska analiza

Enhancing Energy Efficiency Through Thermal Insulation of the Building and Transfer from District Heating to Heating by Heat Pump: A Thermomechanical and Economic Analysis

Nedžad Rudonja, Miloš Banjac, Milan Gojak, Ružica Todorović

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija

Rezime - Povećanje energetske efikasnosti postojećih objekata značajno doprinosi smanjenju troškova za pokrivanje energetskih potreba objekata, zagađenju životne sredine, emisiji CO₂ i slično. Poboljšanje karakteristika termičkog omotača objekata i primena toplotnih pumpi su česte mere koje preduzimaju investitori, odnosno korisnici objekata. U ovom radu data je tehn-ekonomska analiza primene toplotne izolacije na posmatranom objektu, koja uključuje aktuelne cene svih potrebnih radova i materijala. Takođe, za razmatrani objekat urađena je ekonomska analiza prelaska sa sistema daljinskog grejanja na sistem grejanja visokotemperaturnom toplotnom pumpom vazduh-voda.

Cljučne reči - energetska efikasnost; toplotna izolacija; toplotne pumpe; tehn-ekonomska analiza, energetski pregled.

Abstract - Increasing the energy efficiency of existing buildings significantly contribute to reducing costs for meeting the buildings' energy needs, environmental pollution, CO₂ emissions, and similar factors. Improving the characteristics of the building envelope and the application of heat pumps are common measures undertaken by investors or building users. This paper presents a techno-economic analysis of the application of thermal insulation on the examined building, including current prices of all necessary works and materials. Additionally, an economic analysis was conducted for the transition of the considered building from a district heating system to a high-temperature air-to-water heat pump heating system.

Index Terms - energy efficiency; thermal insulation; heat pumps, techno-economic analysis; energy audit.

I UVOD

Strategijom razvoja energetike Republike Srbije do 2040. godine definisani su ciljevi razvoja energetskog sektora, koji uključuju dekarbonizaciju, što podrazumeva i smanjenje emisije štetnih gasova koje se postiže povećanjem energetske efikasnosti, odnosno primenom obnovljivih izvora energije [1]. Najveće

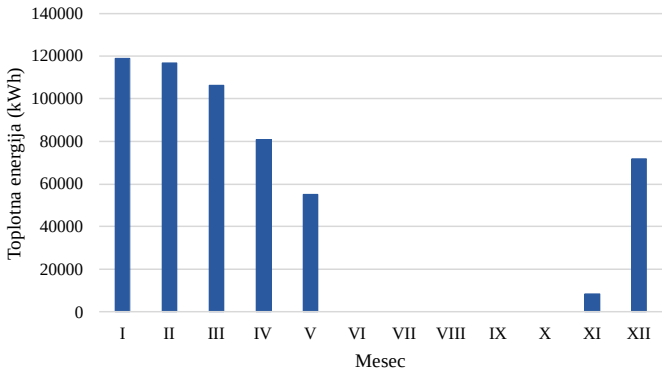
povećanje energetske efikasnosti u sektoru zgradarstva može se postići primenom toplotne izolacije objekata koji nisu toplotno

izolovani i/ili ugradnjom energetski efikasnih sistema, poput toplotnih pumpi. Toplotne pumpe predstavljaju efikasan način povećanja energetske efikasnosti i smanjenja emisije ugljen-dioksida. Njihovom primenom emisija ugljen-dioksida može se smanjiti i do deset puta [2]. Na izbor toplotne pumpe može se uticati više parametara, a najznačajniji su: vrsta toplotnog izvora (voda, vazduh, zemlja i sl.), temperatura grejnog medijuma (npr. temperatura vode u sistemu grejanja ili temperatura vazduha u sistemu klimatizacije), vrsta sistema grejanja (radijatorsko grejanje, grejanje putem ventilator-konvektora, podno grejanje, vazdušno i sl.), grejna snaga toplotne pumpe, radni medijum toplotne pumpe i sl. [3]. Usled promenljive cene energenata, materijala, opreme i uređaja povezanih sa energetskom efikasnošću, ali i cene radova, iznova se nameće pitanje ekonomske isplativosti preduzetih mera, odnosno pitanje perioda povratka investicija u energetsku efikasnost. Shodno navedenom u ovom radu sa termomehaničke i ekonomske tačke gledišta razmatran je objekat na kome bi bilo moguće primeniti mere energetske efikasnosti koje bi uključile ugradnju toplotne izolacije, a potom i toplotne pumpe. Cene opreme i radova dobijene su ispitivanjem tržišta ili principom slobodne ponude. Objekat odabran za analizu predstavlja tipični primer objekata koje koristi javni sektor Republike Srbije.

II POSTOJEĆE STANJE OBJEKTA

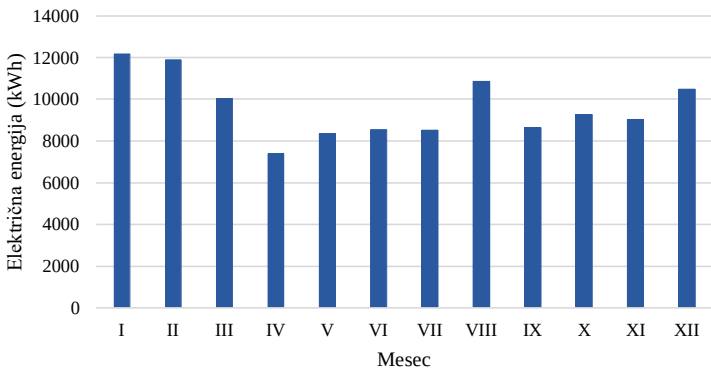
Predmet analize jeste zgrada u javnom sektoru locirana u Beogradu, neto površine grejanog prostora 4840 m². Ukupna zapremina grejanog prostora zgrade iznosi 15800 m³. Zgrada je slobodno stojeća i zbog svoje izolovanosti od ostalih objekata pogodna je za ovu analizu. Zgrada se sastoji od podruma, prizemlja, prvog i drugog sprata. Kako bi se dobili što pouzdaniji ulazni podaci za zgradu je urađen energetski pregled kojim je utvrđeno postojeće stanje, popis svih uređaja u kojima se koristi električna energija, izmerene su dimenzije svih potrebnih građevinskih elemenata, poput dimenzija prostorija, prozora, vrata i sl. Takođe, za ovaj objekat prikupljeni su podaci o isporučenoj toplotnoj i električnoj energiji za 2023. godinu.

Zgrada se dnevno koristi 11 sati, dok su subota i nedelja neradni dani, tokom kojih se korišćenje energije svodi na tehnički minimum. Zgrada je priključena na sistem daljinskog grejanja Beogradskih elektrana i poseduje kalorimetar koji je tokom 2023. godine detektovao potrošnju od ukupno 557803 kWh toplotne energije. Isporučena toplotna energija za objekat na mesečnom nivou tokom 2023. godine data je na Slici 1.



Slika 1. Isporučena toplotna energija preko sistema daljinskog grejanja tokom 2023. godine

S druge strane, isporučena električna energija tokom 2023. godine na mesečnom nivou prikazana je na Slici 2, što u zbiru daje godišnju utrošenu električnu energiju od 111122 kWh.



Slika 2. Utrošena električna energije tokom 2023. godine (kWh)

Na osnovu prethodne slike može se zaključiti da se električna energija najviše koristi tokom zimskih meseci, što ukazuje na to da korisnici objekta koriste električnu energiju za dogrevanje objekta. Na osnovu strukture potrošača date u Tabeli 1. jasno je da se za dogrevanje prostora koriste lokalni klima uređaji (split sistemi). U Tabeli 1. date su i informacije o svim potrošačima koje su korišćene tokom procesa modeliranja, kao i procenjeno vreme rada tokom nedeljnog ili mesečnog perioda. Angažovanje pojedinih potrošača tokom ovih perioda procenjeno je na osnovu informacija dobijenih od korisnika objekta.

Tabela 1. Struktura potrošača električne energije u objektu

Naziv	Br.	Snaga (W)	Ukupno nedeljno ang.	Zauzetost (%)	God. utr. el. en. (kWh/god)
Računari	140	250	35 h/n	70	44713
Fotokopir uređaji	36	150	40 h/n	5	563
Split sistemi	68	1100	40 h/m	70	25133
Frižideri	12	350	12 h/d	30	9198
Bojleri	14	1500	40 h/n	20	8760
Mikrotal. reme	2	800	40 h/n	10	334
Aparat za kafu	2	1000	40 h/n	35	1460
Kompresor	2	1100	40 h/n	20	918
Televizori	2	300	20 h/n	50	313
Lab. oprema	1	9900	40 h/n	10	2065
Rasveta			10 h/n		17666
					111122

II MODELIRANJE TERMIČKIH PERFORMANSI OBJEKTA

Za proračun termičkih performansi objekta korišćen je RET Screen expert softver u kojem je napravljen model dinamičkog ponašanja objekta. Validacija ovog dinamičkog modela ponašanja objekta u pogledu potrošnje energije izvršena je na osnovu podataka prikazanih na Slici 1. (validacija proračunske toplotne energije), odnosno na Slici 2. (validacija proračunske potrošnje električne energije).

Dinamički model objekta je kreiran na način da se simulacijom za neizolovan objekat godišnje potrebe za toplotnom i električnom energijom dobijene simulacijom razlikuju od izmerenih vrednosti (Slike 1. i 2.) za najviše ± 5%, a što je u skladu sa ASHRAE standardom [4] koji predviđa da razlika između simuliranih (modelskih, proračunskih) i stvarnih podataka treba da bude manja od 10%, kako bi model bilo moguće smatrati validnim.

Kao što je prethodno bilo navedeno izmerena potrošnja toplotne energije tokom 2023. godine za objekat iznosila je 557803 kWh. Potrošnja toplotne energije dobijena na osnovu modela iznosila je 535558 kWh. Na osnovu ovih podataka dobija se da je greška modela u odnosu na realan slučaj približno 4%. Potrošnja električne energije tokom 2023. godine iznosila je 115220 kWh, dok je na osnovu modela dobijena potrošnja od 111122 kWh, što čini grešku od 3,6 % u odnosu na realne vrednosti.

Analiza unapređenja energetske efikasnosti objekta razmatrana je u dva koraka. Prvi korak obuhvatio je analizu poboljšanja energetske efikasnosti objekta putem postavljanja toplotne izolacije objekta, dok je drugi korak bila analiza primene toplotne pumpe koja bi za potrebu grejanja objekta zamenila sistem daljinskog grejanja.

III POVEĆANJE ENERGETSKE EFIKASNOSTI OBJEKTA UGRADNJOM TOPLOTNE IZOLACIJE

Za analizirani objekat razmatrana je ugradnja toplotne izolacije na spoljašnjem zidu objekta, tj. na spoljašnjem zidu koji nije ukopan. Ukupna površina ovog zida iznosi približno 3200m². Zid sastoji se od sledećih slojeva:

- krečni malter, debljine 2 cm,
- red pune opeke gustine 1600 kg/m³, debljine 10 cm,
- krečni malter, debljine 2 cm,
- red pune opeke gustine 1600 kg/m³, debljine 25 cm,
- krečni malter, debljine 2 cm,
- red pune opeke gustine 1600 kg/m³, debljine 10 cm,
- cementni malter, debljine 2 cm.

Proračunska vrednost koeficijenta prolaženja toplote [5] za predmetni spoljašnji zid iznosi $U_T = 1,040 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

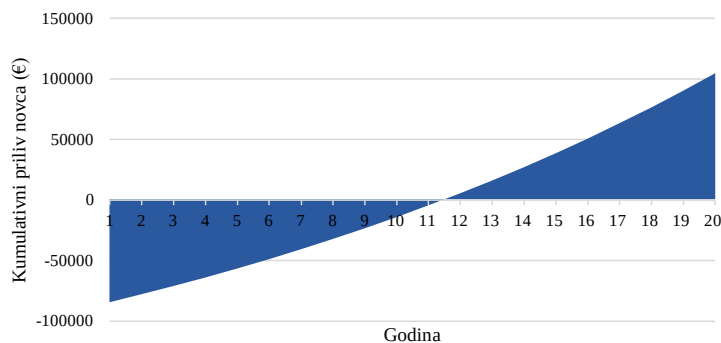
Kao izolacioni materijal razmatrana je kamena vuna Front Rock Max Plus [6] debljine 10 cm. Nakon postavljanja sloja kamene vune na spoljašnji zid koeficijent prolaženja toplote imao bi vrednost $U_T = 0,262 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Investicioni troškovi ugradnje izolacije na osnovu ispitivanja tržišta, po sistemu slobodne ponude, iznose:

- montaža građevinske skele 1,5 €/m²,
- najam skele 0,4 €/m²,
- demontaža građevinske skele 1,3 €/m²,
- kamena vuna Front Rock Max Plus debljine 10 cm, 15 €/m²,
- završni sloj fasade (Cerezit CT60/64), 2 €/m²,
- zanatski radovi 7,5 €/m².

Dakle, za postavljanje ukupno 3200 m² izolacije od kamene vune investicioni troškovi su približno 88640 €.

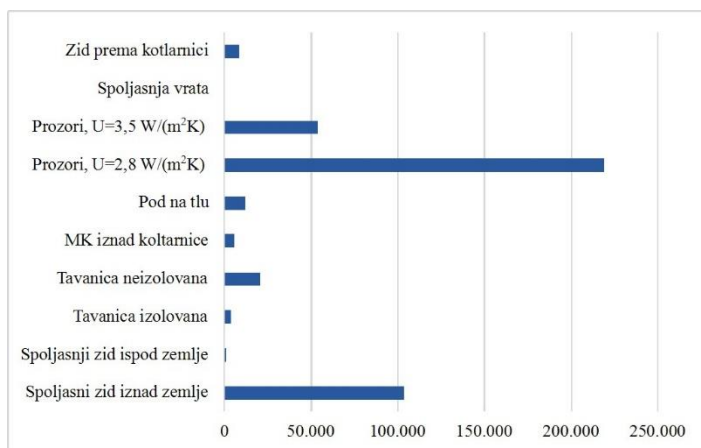
Nakon ugradnje toplotne izolacije potrošnja toplotne energije na godišnjem nivou smanjila bi se sa 535,6 MWh na približno 469,3 MWh, što dovodi do godišnje uštede od 66,3 MWh u potrošnji toplotne energije. Koristeći trenutnu cenu toplotne energije koja iznosi približno 0,09 €/ kWh, a koja je trenutno približno jednaka i ceni električne energije, dolazi se do godišnje uštede za toplotnu energiju do 5960 €. Ovo kao rezultat daje da je prost period otplate (vrednost investicije podeljena godišnjom uštedom) 14,9 godina.

Ako se posmatrani projekat razmatra u periodu od 20 godina i ako je godišnja stopa inflacije 4,5 %, povraćaj uloženog novca se dešava nakon 11,5 godina, a što je dato na Slici 3.



Slika 3. Kumulativni priliv novca i povratak investicije

Kada se analiziraju dobijeni rezultati može se zaključiti da je dobijeno vreme povratka investicije u toplotnu izolaciju u ovom slučaju znatno duže nego što je dobijeno u drugim radovima [7]. Razlog leži u činjenici da spoljašnji zidovi na posmatranom objektu imaju ne toliko veliku vrednost koeficijenta prolaženja toplote, pa je i uticaj postavljanja toplotne izolacije na smanjenje ukupnih toplotnih gubitaka manji. Takođe, struktura toplotnih gubitaka na samom objektu po pojedinim elementima termičkog omotača objekta utiče na sam period povratka investicije. Za osnovni slučaj (neizolovan objekat), prema rezultatima dobijenim iz modela, struktura toplotnih gubitaka po pojedinim elementima termičkog omotača je data na Slici 4.



Slika 4. Godišnji gubici toplote po elementu termičkog omotača (kWh)

Dakle, najveći doprinos povećanju energetske efikasnosti na ovom objektu dala bi zamena prozora. Iz ovog razloga je i period otplate nešto duži od onog koji se najčešće javlja (6-8 godina).

IV POVEĆANJE ENERGETSKE EFIKASNOSTI OBJEKTA UGRADNJOM TOPLOTNE PUMPE

Posmatrani objekat toplotnu energiju dobija preko sistema Beogradskih elektrana. Režim grejanja u objektu je 80/60°C.

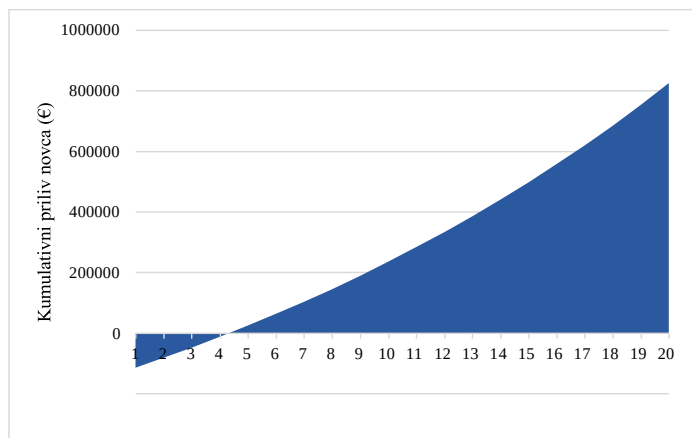
Na osnovu validiranog modela izvršen je proračun potrebne energije za grejanje za slučaj izolovanog objekta. Na osnovu sprovedenog proračuna utvrđena je potrebna energija za grejanje tokom jedne godine i iznosi približno 375 MWh. Na osnovu ovih podataka izabrana je visokotemperaturna toplotna pumpa vazduh-voda, koja bi u postojećem objektu zamenila toplotni

izvor (daljinsko grejanje). Izbor toplotne pumpe takođe je sproveden u softveru RETScreen, a na osnovu površine prostora koji se greje, potrebne količine toplote za grejanje, rada sistema grejanja (11 h), odnosno meteoroloških podataka. Na osnovu modela dobijeno je da je potrebna snaga toplotne pumpe 232 kW. Za potrebe sistema grejanja izabrane su dve toplotne pumpe Black HT Evo italijanskog proizvođača Enerblue [8]. Snaga pojedinačne toplotne pumpe iznosi 133 kW. Sezonski koeficijent grejanja iznosi 3,01. Toplotna pumpa poseduje inverterski pogonjene kompresore što značajno doprinosi energetske efikasnosti sistema. Troškovi implementacije toplotne pumpe u objekat su sledeći:

- troškovi nabavke toplotne pumpe – 125 000 €,
- troškovi freona R513A, 7 boca (77 kg) – 5100 €,
- ugradnja toplotne pumpe sa pratećom armaturom – 12 500 €, (10% od cene toplotne pumpe)

Dakle, ukupni investicioni troškovi bili bi 142600 €.

Ukupni troškovi održavanja toplotne pumpe na godišnjem nivou procenjeni su na vrednost od 1% od vrednosti investicije [9], tj. na 1430 €. Usled rada toplotne pumpe dolazi do veće potrošnje električne energije u odnosu na osnovni slučaj (grejanje objekta preko sistema daljinskog grejanja). U ovom slučaju ukupna potrošnja električne energije porasla bi na 235,6 MW, što bi dovelo do godišnjeg troška za električnu energiju od približno 21228 €. Dakle, u odnosu na slučaj grejanja izolovanog objekta troškovi za utrošenu energiju objekta (toplotna i električna) bi se smanjili sa vrednosti 52242 € na vrednost 21228 €. Na osnovu ovih podataka, dobija se da je prost period otplate investicije u toplotnu pumpu 4,8 godina, dok bi u slučaju uzimanja u obzir inflacije ovaj period iznosio 4,4 godine - Slika 5.



Slika 5. Kumulativni priliv novca i povratak investicije

V ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata dobijenih u ovom radu može se zaključiti da se prilikom primene mera energetske efikasnosti mora voditi računa o ekonomskoj isplativosti predložene mere. U ovom radu je pokazano da period povratka investicije u toplotnu

izolaciju objekta može biti i duži od 10 godina. Rezultati proračuna na konkretnom objektu pokazali su da je sa stanovišta korisnika predmetnog objekta prelazak sa sistema daljinskog grejanja na sistem grejanja toplotnom pumpom ekonomski opravdan i da se povratak investicije može očekivati i za nepunih 5. godina.

ZAHVALNICA

Rezultati prikazani u ovom radu su rezultat istraživanja podržanog od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija RS po Ugovoru 451 – 03 – 137/2025 – 03/200105 od 04.02.2025. god.

LITERATURA

- [1] <https://www.mre.gov.rs/tekst/8334/-strategija-razvoja-energetike-republike-srbije-do-2040-godine-sa-projekcijama-do-2050-godine.php>, [pristupljeno 10.2.2025]
- [2] M., Clausse et al., River water heat pumps to decarbonise district heating and promote the resilience of hydrosystems: Technico-economic, environmental and sociological challenges, *Energy Nexus*, vol. 16, p. 100325, 2024, doi.org/10.1016/j.nexus.2024.100325
- [3] W. Pan, M. Cooper, Decision criteria for selecting air source heat pump technology in uk low carbon housing, *Technology Analysis & Strategic Management*, vol. 23, no. 6, pp. 623–637, 2011. doi.org/10.1080/09537325.2011.585030
- [4] Ashrae standard 90.1 Energy standard for buildings except low-rise residential buildings. 2019.
- [5] Rulebook of energy efficiency, official gazette of the republic of serbia 61/2011 (2011).
- [6] <https://www.rockwool.com/rs/primena-proizvoda/pregled-svih-proizvoda/izolacija-spoljasnjeg-zida/kontaktne-fasade-sr/frontrock-max-plus/>, [pristupljeno 15.12.2024]
- [7] I., Bulatovic, M., Todorovic, Analiza uticaja načina gradnje stambenih objekata na potrebnu toplotu za grejanje za klimatsko područje Beograda, 41. *Međunarodni kongres o KGH*, Beograd, Srbija, decembar 2023.
- [8] <https://enerblue.it/en/high-temperature-heat-pumps-low-gwp-gas/black-ht-evo-> <https://hvac.science/is-heat-pump-maintenance-expensive/?form=mg0av3>.

AUTORI

Nedžad Rudonja – vanr. profesor, nrudonja@mas.bg.ac.rs, ORCID [0000-0001-6260-9215](https://orcid.org/0000-0001-6260-9215)

Miloš Banjac – red. profesor, mbanjac@mas.bg.ac.rs, ORCID [0000-0001-8659-8581](https://orcid.org/0000-0001-8659-8581)

Milan Gojak – red. profesor, mgojak@mas.bg.ac.rs, ORCID [0000-0003-0637-5746](https://orcid.org/0000-0003-0637-5746)

Ružica Todorović – vanr. profesor, rtodorovic@mas.bg.ac.rs, ORCID [0000-0002-9268-3448](https://orcid.org/0000-0002-9268-3448)