

UTICAJ SNIŽENJA TEMPERATURE GREJNOG FLUIDA SISTEMA CENTRALNOG GREJANJA NA POTROŠNJU ENERGIJE

THE INFLUENCE OF THE DECREASE IN THE HEAT TRANSFER
FLUID'S TEMPERATURE IN THE CENTRAL HEATING SYSTEM ON
ENERGY CONSUMPTION

PREDRAG RADIVOJEVIĆ i NEBOJŠA LUKIĆ,
Mašinski fakultet Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac

U radu je analizirano funkcionisanje sistema centralnog grejanja u uslovima snižene temperature vode u sekundarnom vodu, kao i uticaj tog sniženja na smanjenje toplotnih gubitaka u transportu grejnog fluida.

Potrebno sniženje je ostvareno uvećanjem postojećih radijatora u objektu nepromenjenih termičkih karakteristika. Radi ispitivanja međusobnog uticaja, sistem centralnog grejanja je posmatran u sklopu sistema daljinskog grejanja.

Pokazano je da sa snižavanjem srednje temperature sekundarne vode u sistemu centralnog grejanja, rastu uštede pri transportu grejnog fluida u primarnom i sekundarnom vodu. Analiza ekonomičnosti je pokazala da je moguće naći optimalnu vrednost ulaganja u sistem centralnog grejanja.

In this paper, an analysis has been made for the central heating system's operation at decreased water temperature, and the influence of such decrease on the reduction of heat losses during the transport of the heat transfer fluid. The decrease was achieved by increasing the existing radiator in a facility of unchanged thermal characteristics. For the purpose of investigating their mutual influence, the central heating system was connected with the district heating system. The analysis has shown that by decreasing the mean water temperature in the pipeline of the central heating system, the saving in transport of the heat transfer fluid in the primary and secondary pipeline was increased. The efficiency analysis has shown that it is possible to determine a value of optimum investments in the central heating system.

Ključne reči: temperatura sekundarne vode; sistem centralnog grejanja; ušteda energije; toplotni gubici

Key words: secondary water temperature; central heating system; energy saving; heat loss

1. Uvod

Niža temperatura sekundarne vode u grejnim telima podrazumeva razmenu toplote pri sniženim vrednostima temperature fluida na ulazu odnosno na izlazu iz grejnog tela, u odnosu na vrednosti koje su definisane referentnim temperaturnim nivoom (na primer 90/70/20°C). Kada funkcioniše na nižem temperaturnom nivou, grejno telo razvija manju toplotnu snagu od grejnog opterećenja prostorije, pa je zarad oču-

vanja termičke ravnoteže u prostoriji, uz zadržavanje postojeće toplotne izolacije, potrebno povećati površinu postojećeg grejnog tela, ili eventualno uvećavati protok fluida kroz radiator, što je teže izvodljivo uz dodatne uslove. Kako je polazni uslov razmatranja da protok u sistemu mora biti konstantan (zbog čega se iz daljeg razmatranja mogu isključiti eventualni gubici i uštede vezani za rad cirkulacione pumpe), sledi da se termička ravnoteža može održati jedino odgovarajućim povećanjem površine razmene toplote grejnog tela. Snižavanjem temperature vode u sekundarnom i primarnom vodu očekuju se uštede energije zbog smanjenja transportnih gubitaka, naročito u dugačkim primarnim vodovima. Korišćenjem formiranog matematičkog modela zgrade i pratećeg softvera tokom simulacija, vršeno je procentualno povećanje površine grejnog tela od 0 do 100%, čime je izazivano snižavanje srednje temperature vode u radiatorima, a samim tim i u primarnom vodu. Radi uštede u prostoru, u radu neće biti prikazani dijagrami u kojima su posmatrane veličine date u funkciji temperature radnog fluida na ulazu u grejno telo, već samo u funkciji povećanja površine grejnog tela. Dijagrami sa temperaturnom zavisnošću mogu se naći u [1].

2. Opis sistema

Sistem čini prostorija sa svim spoljnim zidovima, poznatog grejnog opterećenja, u kojoj se nalazi grejno telo u sklopu dvocevnog sistema grejanja, a koje je povezano preko sekundarnih transportnih vodova sa pločastim razmenjivačem toplote u podstanici. Pločasti razmenjivač toplote ima ulogu lokalnog toplotnog izvora, kome se toplota iz energane dovodi preko primarnih transportnih vodova. Pretpostavljeno je da je razmenjivač toplote savršeno izolovan i da se faktor gubitaka u razmenjivaču može zanemariti. Takođe su zanemarene dužine delova transportnih vodova koje se nalaze u prostoriji podstanice, tj. smatra se da se transportni vodovi celom svojom dužinom nalaze van prostorije podstanice. Grejni fluid je voda.

Na osnovu matematičkog modela sistema, koji je detaljno opisan u [1], na razvojnoj platformi MS VB.NET 2003, razvijen je softverski paket „Sistem CG“. U tom softverskom paketu je izvršen niz simulacija funkcionisanja sistema pri nižim srednjim temperaturama u sekundarnom vodu, uz istovremeno variranje različitih parametara sistema, a u cilju određivanja trenda promene vrednosti toplotnih gubitaka i nastalih ušteda energije.

U tabelama 1, 2 i 3 dati su podaci o elementima sistema, koji su korišćeni prilikom izvršavanja simulacija u softveru „Sistem CG“.

3. Analiza rezultata simulacije funkcionisanja sistema

Kao referentne, usvojene su temperature 90/70/20°C, pri čemu je temperatura vode 90°C na ulazu i 70°C na izlazu iz grejnog tela, a temperatura vazduha u prostoriji 20°C. Odgovarajuće procentualno povećanje površine grejnog tela za taj temperaturni nivo je 0%, tj. nema povećanja površine. Dalje je vršeno procentualno povećanje površine grejnog tela do 100%, u koracima od po 20%. Paralelno sa povećanjem površine grejnog tela, kao posledica se snižavala potrebna srednja temperatura sekundarne vode u radiatorima.

Kao rezultat izvršenih simulacija dobijeni su toplotni gubici i odgovarajuće uštede energije u transportnim vodovima, nastale kao posledica snižavanja srednje temperature vode u radiatorima počev od referentnog nivoa 90/70/20°C, pa do približno 65/45/20°C [1], odnosno pri povećanju površine grejnog tela od 0 do 100%.

Rezultati su posebno dati u funkciji procentualnog povećanja površine grejnog tela, a posebno u funkciji temperature vode na ulazu u grejno telo. To je urađeno zato jer se smatra da je interesantno pratiti promenu gubitaka i ušteda i u funkciji površine grejnog tela i u funkciji temperature vode na ulazu u grejno telo. Svi gubici su svedeni na jedinicu dužine cevovoda, kako bi se rezultatima dao opšti karakter i kako bi njihovo međusobno poređenje imalo smisla. U ovom radu su prikazani samo dijagrami relativnih ušteda, dok se dijagrami gubitaka mogu videti u [1].

Tabela 1. Pregled podataka o transportnim vodovima

Naziv voda	Cev					Izolacija		Način postavljanja voda	Dubina ukopav. cevi [mm]	Temperatura zemlje [°C]	Maseni protok vode kroz cevi [kg/s]
	Materijal	Spoljašnji prečnik [mm]	Debljina zida [mm]	Dužina [m]	Term. otpor usled zaprlj. cevi [W/m ² K]	Materijal	Debljina [mm]				
Primarni Razvodni	Čelik	48,3	2,6	5000	0	Mineralna vuna	100	Ukupan	600	3	2,00
Primarni Povratni	Čelik	48,3	2,6	5000	0		100		600	3	2,00
Sekundarni Razvodni	Bakar	38,0	2,0	100	0		100		600	3	0,59
Sekundarni Povratni	Bakar	38,0	2,0	100	0		100		600	3	0,59

Tabela 2. Pregled podataka o razmenjivaču toplote

Materijal	Broj ploča [-]	Dužina ploče [mm]	Širina ploče [mm]	Razmak između ploča [mm]	Debljina ploče [mm]	Faktor naboranosti [-]	Ugao nabora [°]	Faktor toplotnih gubitaka [%]	Maseni protok kroz primar ^{*)} [kg/s]	Maseni protok kroz sekundar [kg/s]
Čelik	3	740	102	2,7	0,5	1,17	45	0	2,00	0,59

^{*)} Navedena vrednost važi u slučaju simulacija sa različitim vrednostima t_{SPF} , kao i sa različitim brojem ploča razmenjivača toplote.

Tabela 3. Pregled podataka o grejnom telu i prostoriji

Toplotna snaga po rebru, ϕ_n [W]	Eksponent toplotne snage, n [-]	Grejno opterećenje prostorije [kW]	Protok vode kroz grejno telo [kg/s]	Broj rebara pri 90/70/20°C [-]	UTP prostorije [°C]
155	3	50	0,59	323	20

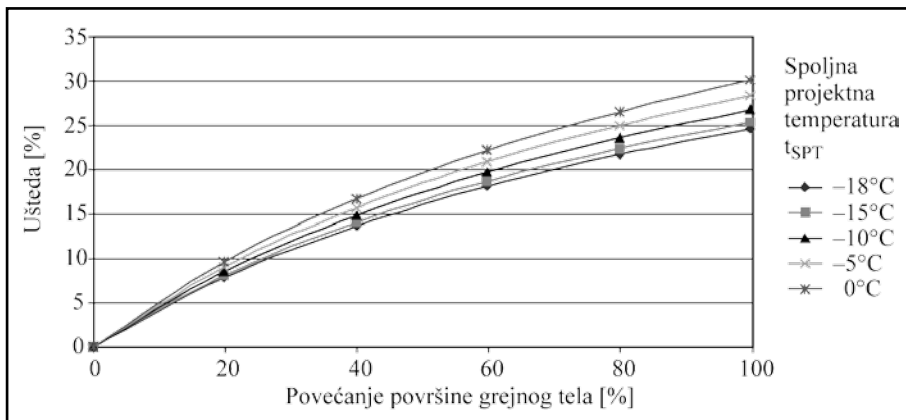
Relativne uštede energije u transportnim vodovima se dobijaju iz izraza:

$$u = \frac{\dot{Q}_{gL}^{0\%} - \dot{Q}_{gL}^{P\%}}{\dot{Q}_{gL}^{0\%}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

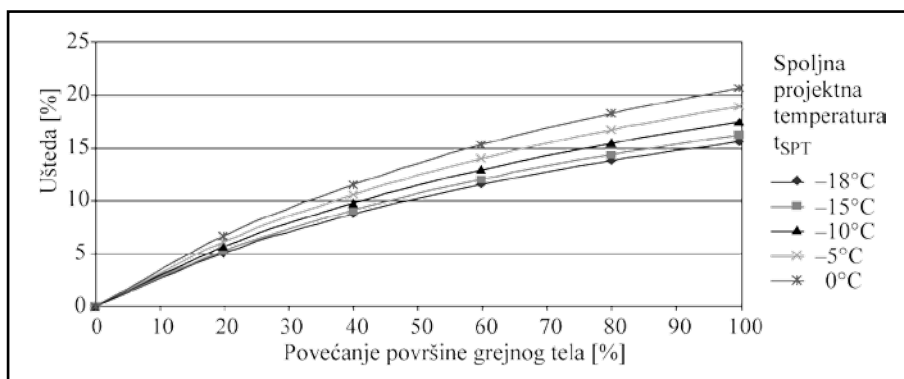
gde su sa $\dot{Q}_{gL}^{P\%}$ označeni jedinični gubici u [W/m] pri povećanju površine grejnih tela od $P\%$. Na dijagramima na slikama 1 i 2 prikazana je zavisnost relativnih ušteta od povećanja površine grejnog tela. Vidi se da uštede energije u transportnim vodovima pri snižavanju temperature vode na ulazu u grejno telo od 90°C do nekih 65°C, odnosno odgovarajućem povećanju površine grejnog tela od 0% do 100% rastu i mogu dostići vrednosti do 15% kod primarnih, i do 25% kod sekundarnih transportnih vodova pri spoljnoj projektnoj temperaturi od -18°C.

Sa povišenjem SPT (do 0°C) opadaju gubici, a rastu relativne uštede. Uštede u sekundarnoj mreži pri snižavanju SPT kreću se do 10% pri povećanju površine grejnog tela od 20%, pa do 30% pri povećanju površine od 100% (sl. 1). U primarnoj mreži se te uštede kreću do 7% pri 20%, odnosno do 21% pri 100%-tnom povećanju površine razmene toplote grejnog tela (sl. 2).

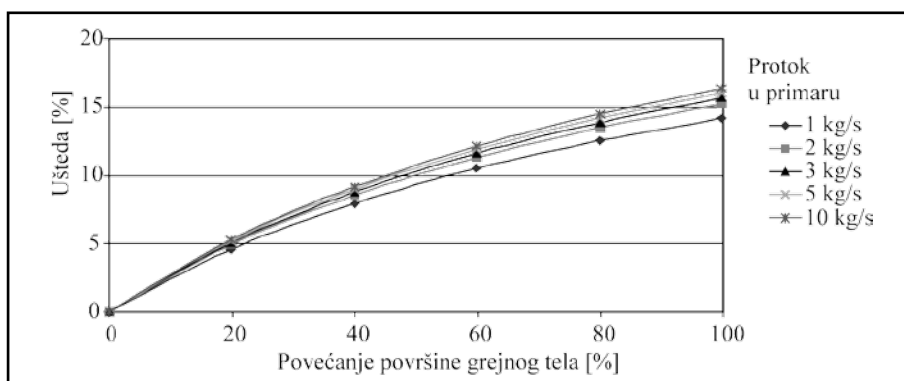
Promena protoka u primaru i promena veličine površine razmenjivača toplote u podstanici utiču na gubitke i uštede u primarnoj mreži, ali nemaju uticaja na dešavanja u sekundarnoj mreži, koja mora prema usvojenom matematičkom modelu, u svakom scenariju da zadovolji toplotne zahteve prostorije.



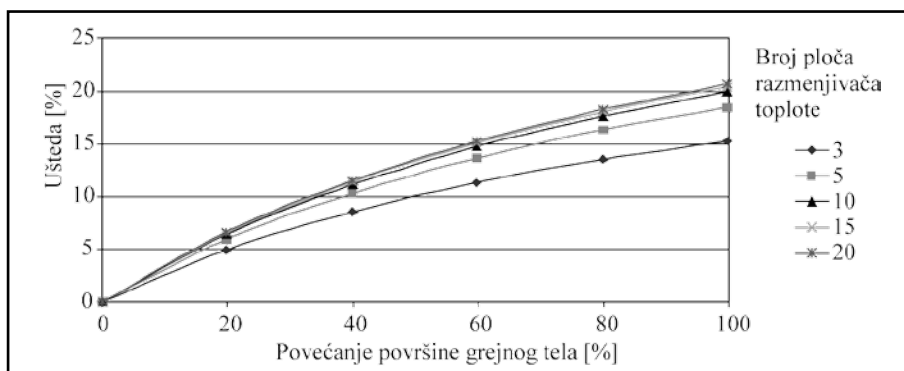
Slika 1. Relativne uštede u sekundarnom vodu u funkciji povećanja površine grejnog tela



Slika 2. Relativne uštede u primarnom vodu u funkciji povećanja površine grejnog tela



Slika 3. Relativne uštede u primaru u funkciji povećanja površine grejnog tela, a pri različitim protocima u primaru



Slika 4. Relativne uštede u primaru u funkciji povećanja površine grejnog tela, a pri različitom broju ploča pločastog razmenjivača toplote

Povećanjem protoka u primarnoj cevnoj mreži smanjuju se gubici i povećavaju uštede u primaru (sl. 3). Gubici vezani za rad cirkulacionih pumpi koji nastaju pri povećanju protoka u primarnoj mreži nisu uzeti u obzir, jer je prevashodna želja bila da se istakne uticaj promene protoka na transportne gubitke odnosno uštede. Zbog malih ušteta i očekivano velikih gubitaka na cirkulacionoj pumpi, ovaj scenario za realne uštede energije nije interesantan.

Povećanjem broja ploča razmenjivača toplote smanjuju se gubici u primarnoj mreži, a povećavaju odgovarajuće uštede (sl. 4). Povećavanje broja ploča u nedogled nema smisla, jer nije praćeno proporcionalnim povećanjem ušteta.

4. Analiza ekonomičnosti

Optimizacijom sistema daljinskog grejanja mogu se ostvariti značajne uštede. Postoji čitav niz studija u kojima se analiziraju performanse ovih sistema u cilju smanjenja gubitaka i povećanja ušteta [2–11]. Dužina cevne mreže sistema daljinskog grejanja može iznositi više desetina, pa čak i stotina kilometara (npr. dužina cevne mreže sistema daljinskog grejanja u Moskvi iznosi oko 600 km [7]). Cilj daljeg izlaganja je da se pokaže kako snižavanje temperature razmene toplote u lokalnim pod-sistemima centralnog grejanja utiče na uštede u transportnim vodovima čitavog sistema daljinskog grejanja.

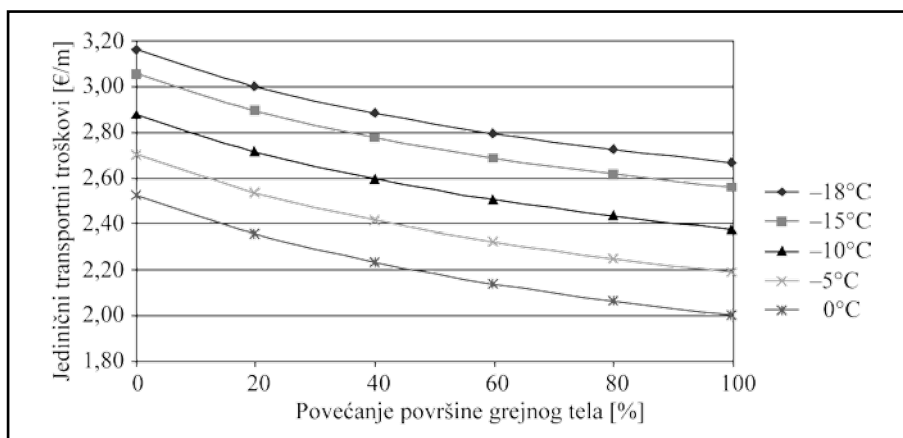
Da bi se to uradilo, na primarnu mrežu iz dosadašnjeg izlaganja (tab.1, primarni vodovi) priključeno je 50 objekata (tab. 3). Karakteristike sekundarne mreže i razmenjivača toplote svakog od tih objekata odgovaraju karakteristikama sekundarnih vodova iz tab. 1 odnosno razmenjivača toplote iz tab. 2. Pretpostavljeno je da sistem funkcioniše 12 časova dnevno, 30 dana mesečno i 6 meseci godišnje, što odgovara ukupnom broju od 2160 h godišnje. Posmatran je vremenski period od 30 godina koji približno odgovara maksimalnom veku trajanja grejnih tela, koja bi nakon isteka tog perioda mogla biti zamenjena novim. Takođe je pretpostavljeno da tržišna cena toplotne energije iznosi 45 €/MWh, odnosno 0,0972 €/W, a cena grejnih tela po jedinici toplotne snage 0,05 €/W.

U takvom sistemu su jedinični transportni troškovi [€/m] na godišnjem nivou dati sa:

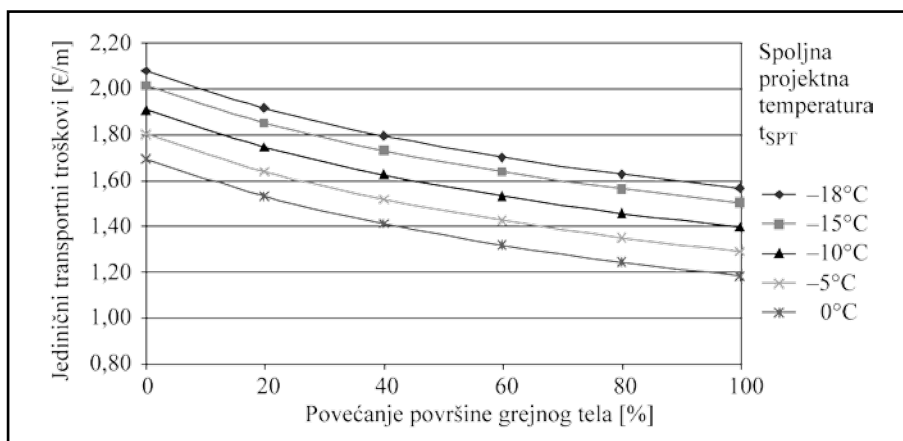
$$K_L = \frac{\dot{Q}_{gL}}{10^6} \cdot c_E \cdot n_h \quad (2)$$

gde su \dot{Q}_{gL} [W/m] jedinični transportni gubici, c_E cena energije [€/MWh], a n_h [h] broj radnih sati godišnje. Na sl. 5 i 6 prikazani su pomenuti jedinični transportni troškovi u primarnoj i sekundarnoj mreži na godišnjem nivou, a u funkciji povećanja površine grejnog tela. Očigledno je da se troškovi smanjuju uporedo sa povećanjem površine grejnog tela, a povećavaju sa snižavanjem vrednosti spoljne projektne temperature.

Na sl. 7 je prikazan dijagram toka isplate investicija u toku 30-godišnjeg perioda, sa naznačenim karakterističnim vrednostima. Vidi se da se investicija u 20% povećanja površine razmene toplote grejnog tela isplaćuje potpuno za 15,5 godina, a investicija u 100% povećanja – za 24,7 godina. Potrebno je napomenuti da prikazane uštede predstavljaju razliku transportnih troškova pri nultom i posmatranom povećanju površine grejnih tela u toku datog vremenskog perioda.



Slika 5. Jedinični transportni troškovi u primaru na godišnjem nivou, dati u funkciji povećanja površine grejnog tela, a pri različitim spoljnim projektnim temperaturama



Slika 6. Jedinični transportni troškovi u sekundaru na godišnjem nivou, dati u funkciji povećanja površine grejnog tela, a pri različitim spoljnim projektnim temperaturama

Troškovi se računaju prema jednačini:

$$K = \sum (K_L \cdot L) \cdot n_g \quad [€] \quad (3)$$

gde je sa L [m] označena dužina cevovoda, a n_g [-] broj godina. Uštede nastale pri snižavanju temperature vode u sekundaru, odnosno investicijom u povećanje površine grejnih tela date su jednačinom:

$$U = (K^{0\%} - K^{P\%}) \cdot n_g \quad [€] \quad (4)$$

a vrednosti ulaganja jednačinom:

$$K_A = \dot{Q}_p \cdot \frac{P\%}{100} \cdot c_{gt} \cdot n_o \quad [€] \quad (5)$$

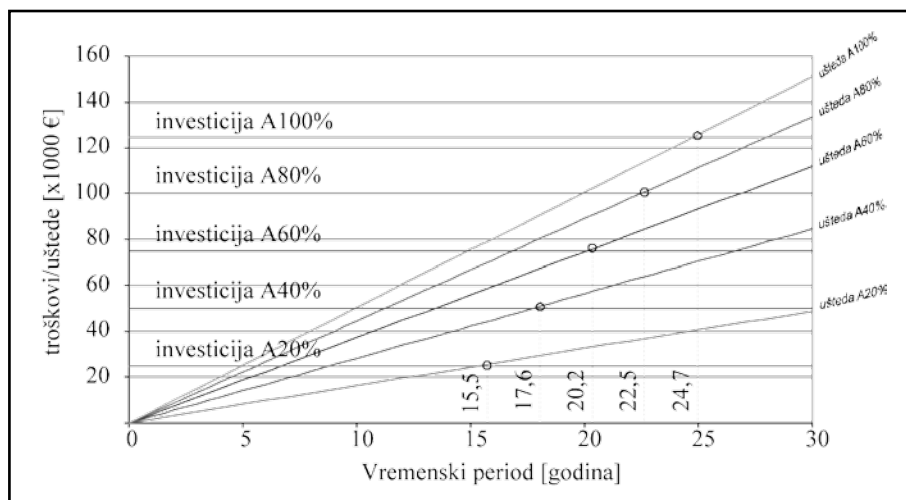
u kojoj je \dot{Q}_p potrebno toplotno opterećenje jednog objekta [W], c_{gt} [€/W] cena grejnog tela po jedinici toplotne snage, a n_o [-] broj objekata. Izjednačavanjem jednačina (4) i (5) ($U = K_A$) i rešavanjem po n_g , dobija se amortizacioni period, tj. vremenski interval u kome se uloženi kapital vraća (presek krivih ušteta i ulaganja). Nakon tog perioda sistem počinje da ostvaruje dobit.

Na dijagramu na sl. 8 prikazani su prihodi od ušteta koji se javljaju u transportnim vodovima pri povećanju površine grejnih tela, a nakon navršenih 30 godina korišćenja sistema. Na drugoj ordinati su prikazana ulaganja koja odgovaraju povećanju površine grejnih tela. Površina između krivih ušteta u transportu i krive vrednosti investicija u grejna tela predstavlja dobit, koja se ostvaruje 30 godina nakon završetka investicionih radova, a pod ranije navedenim uslovima.

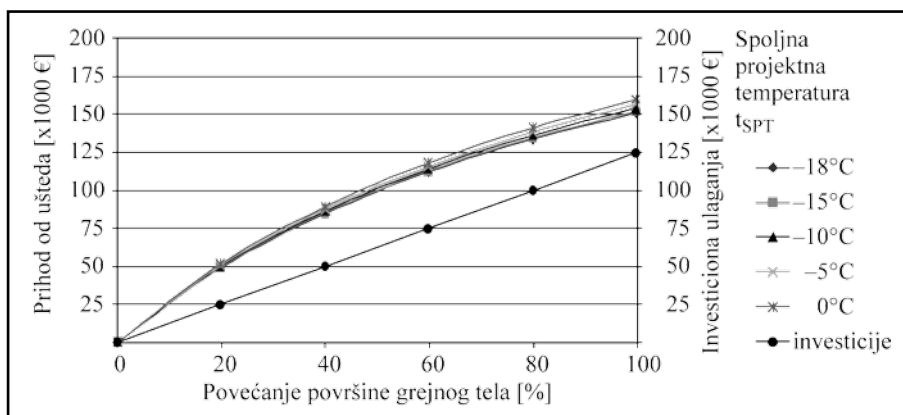
Dobit se računa kao razlika prihoda od ušteta i ulaganja, tj.:

$$G = U - K_A \quad [€]. \quad (6)$$

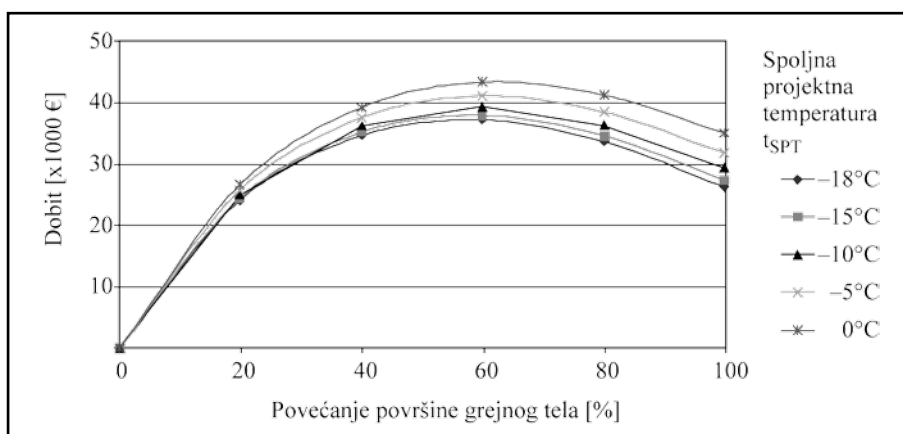
Na dijagramu na sl. 9 prikazana je pomenuta dobit. Interesantno je primetiti da krive dobiti imaju maksimum. To znači da se može naći optimalna vrednost povećanja površine grejnih tela, odnosno optimalan temperaturni nivo razmene toplote. U razmatranom primeru optimalne vrednosti iznose oko 60% povećanja površine grejnih tela, odnosno kada temperatura grejnog fluida na ulazu u grejno telo iznosi oko 72,5°C [1].



Slika 7. Dijagram toka isplate investicija u toku 30-godišnjeg perioda



Slika 8. Prihod od ušteda u transportnim vodovima nakon 30-godišnjeg perioda i vrednost ulaganja u 50 objekata, u zavisnosti od povećanja površine grejnog tela, a pri različitim spoljnim projektnim temperaturama



Slika 9. Dobit nakon 30-godišnjeg perioda, u zavisnosti od povećanja površine grejnog tela, a pri različitim spoljnim projektnim temperaturama

5. Zaključak

U cilju očuvanja termičke ravnoteže u prostoriji, a pri konstantnom protoku grejnog fluida u sekundarnim transportnim vodovima, snižavanje srednje temperature sekundarne vode u sistemima centralnog grejanja mora biti praćeno povećanjem površine razmene toplote pripadajućih grejnih tela (sličan efekat može da ima i dodatna izolacija zgrade). Snižavanjem temperature sekundarne vode smanjuju se gubici i u primarnim i u sekundarnim transportnim vodovima, odnosno smanjuju se ukupni gubici u transportnim vodovima, dok uštede rastu.

Povišavanjem *SPT* takođe opadaju gubici, ali rastu relativne uštede. Promena protoka u primaru i promena veličine površine razmenjivača toplote u podstanici uti-

ču na gubitke i uštede u primarnoj mreži, ali nemaju uticaja na dešavanja u sekundarnoj mreži. Povećavanjem broja ploča razmenjivača toplote smanjuju se gubici u primarnoj mreži, a povećavaju odgovarajuće uštede. Povećavanje broja ploča u nedogled nema smisla, jer nije praćeno proporcionalnim povećanjem ušteda.

Analiza ekonomičnosti povećanja površine razmene toplote grejnih tela kroz komparaciju sa ostvarenim uštedama, pokazuje da se uštede neznatno smanjuju sa snižavanjem vrednosti spoljne projektne temperature. Manji jedinični transportni troškovi će se javiti pri višim vrednostima t_{SPT} , jer su sa njima gubici manji. Krive dobiti imaju maksimum. To znači da se može naći optimalna vrednost povećanja površine grejnih tela, odnosno optimalan temperaturni nivo razmene toplote. Taj maksimum je jako osetljiv na usvojenu cenu energije, koja će u budućnosti evidentno rasti. Takođe se može pretpostaviti da će cene radijatorskih tela padati, a toplotna opterećenja objekata biti sve manja.

Literatura

- [1] **Radivojević, P.**, *Uticaj sniženja temperaturnog nivoa razmene toplote u sistemima centralnog grejanja na potrošnju energije*, magistarski rad, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Kragujevac, 2007.
- [2] **Adamo, I., G. Cammarata, A. Fichera, L. Marletta**, *Improvement of a district network through thermoeconomic approach*, *Renewable Energy* 10 (2–3) (1997), 213–216.
- [3] **Baker, D. K., S. A. Sherif**, *Heat transfer optimization of a district heating system using search methods*, *International Journal of Energy Research*, 21 (1997), 233–252.
- [4] **Benonysson, A., B. Bohn, H. F. Ravn**, *Operational optimization in a district heating system*, *Energy Conversion Management* 36 (5) (1995), 297–314.
- [5] **Bohn, B.**, *On transient heat losses from buried district heating pipes*, *International Journal of Energy Research* 24 (2000) 1311–1334, 2163–2173.
- [6] **Bojić, M., N. Trifunović, S. I. Gustafsson**, *Mixed 0–1 sequential linear programming optimization of heat distribution in a district-heating system*, *Energy Building* 32 (2000), 309–317.
- [7] **Çomaklı, K., B. Yüksel, Ö. Çomaklı**, *Evaluation of energy and exergy losses in district heating network*, *Applied Thermal Engineering* 24 (2004), 1009–1017.
- [8] **Gustavsson, L.**, *District heating systems and energy conservation*, *Energy* 19 (1) (1994), 81–91.
- [9] **Jonsson, G., A. Holtsberg, V. Jonsson**, *Modelling technique for estimating hot tap water consumption in district heating systems*, in: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A, Journal of Power and Energy* 208 (2) (1994), 79–87.
- [10] **Madsen, H., K. Sejling, H. T. Søgaard, O. P. Palsson**, *On flow and supply temperature control in district heating systems*, *Heat Recovery Systems CHP* 14 (6) (1994), 613–620.
- [11] **Nielsen, H.A., H. Madsen**, *Modelling the heat consumption in district heating systems using a grey-box approach*, *Energy and Buildings* 38 (2006), 63–71.