BIBLID 0350–1426 (206) 43:1 p. 93–100

TEHNOLOŠKA, EKONOMSKA I EKOLOŠKA ANALIZA ZAMJENE ENERGENTA U BOLNIČKOM ENERGETSKOM SUSTAVU

BORIS DELAČ, ZMAGOSLAV PRELEC, BRANIMIR PAVKOVIĆ, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Vukovarska 58, 51000 Rijeka, Hrvatska

U radu je analizirana tehnička, ekonomska i ekološka strana zamjene energenta u energetskom sustavu bolničkog kompleksa. U postojećem stanju, toplinska energija za grijanje, pripremu PTV i potrebe praonice rublja proizvodi se putem toplovodnih i parnih kotlova u kotlovnici loženoj lakim loživim uljem. Provedena je satna simulacija godišnje potrebne topline za grijanje te modelirana potrošnja topline za zagrijavanje PTV i rada praonice rublja. Analizirane su tehničke, ekonomske i ekološke strane za slučaj korištenja kotlova na lako loživo ulje, slučaj uvođenja prirodnog plina i slučaj ugradnje kompresijskih dizalica topline s morem kao toplinskim izvorom (uz korištenje prirodnog plina za proizvodnju pare). Ekološka analiza obuhvatila je emisije CO_2, SO_2, NO_x te čestica, ovisno o korištenom energentu.

KLJUČNE REČI: zamjena energenta; emisije; energetski sustav; dizalica topline

TECHNOLOGICAL, ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL ANALYSIS OF ENERGY SOURCE REPLACEMENT IN A HOSPITAL ENERGY SYSTEM

The paper analyses the technical, economic and environmental aspects of energy source replacement in a hospital energy system. In the existing situation, thermal power for heating, DHW preparation and the hospital laundry service is generated by hot water and steam boilers in the boiler room in which light heating oil is used. An hourly simulation has been carried out for the annual heat demands for heating and then the heat consumption has been modelled for DHW heating and laundry service operation. The technical, economic and environmental aspects have been analysed for the case of using boilers with light heating oil, for the case of introduction of natural gas and for the case of installation of compression heat pumps with the sea as the heat source (combined with natural gas for vapour generation). The environmental analysis included the emissions of CO_2, SO_2, NO_x and particles, depending on the energy source used.

KEY WORDS: energy source replacement; emissions; energy system; heat pump

1. Uvod

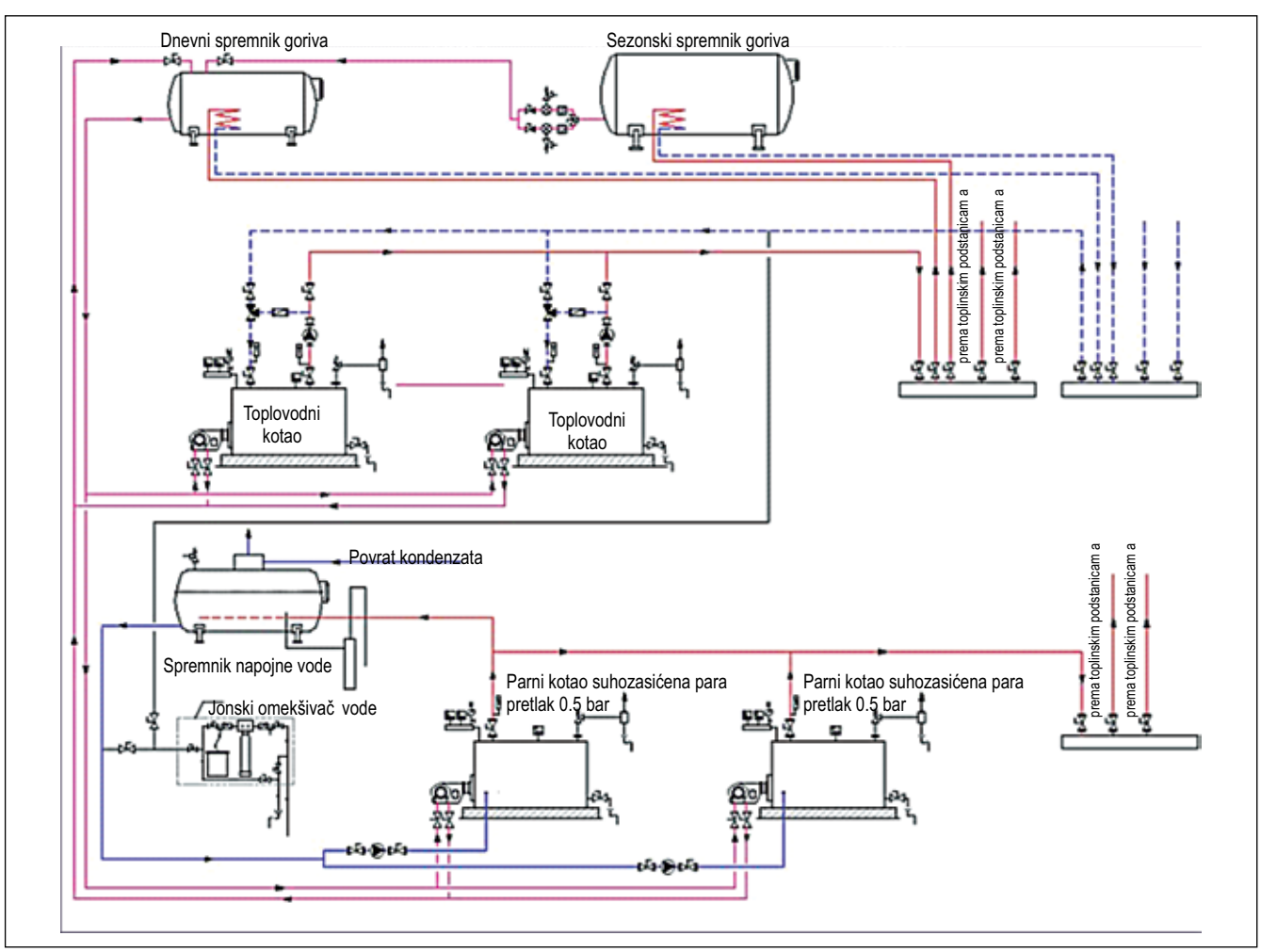
Za kompleks bolnice za ortopediju i rehabilitaciju u Rovinju, provedena je analiza koncepcije energetskog sustava. Kompleks se prostire uz samo more, na površini zemljišta od oko 20 ha. Sadrži sedamnaest samostojećih zgrada ukupne bruto površine oko 10.118 m^2. Sve zgrade povezane su na sustav grijanja. Većina zgrada izgrađena je u vrijeme Austro-Ugarske monarhije. Kompleks je otvoren tijekom cijele godine, ima oko 130 zaposlenika (sa sezonskim radnicima) te od 250 do 350 korisnika. Tijekom zime, prosječan broj korisnika je manji i iznosi oko 80.

Principijelna shema sustava prikazana je na slici 2. Za snabdijevanje toplinom predviđena je kotlovnica s dva toplovodna kotla (ukupnog učinka 3.480 kW), koji zagrijavaju vodu na polaznu temperaturu 90 °C i dva parna kotla (ukupnog učinka 1.775 kW), koji proizvode suhozasićenu vodenu paru pretlaka 0,5 bar. Prije 25–30 godina, svi su sustavi grijanja bolnice bili grijani parom, ali su naknadnim rekonstrukcijama objekti, koji se koriste veći dio godine, prilagođeni za grijanje toplovodnim sustavom. Veza kotlovnice i podstanica u objektima je putem ukopanih toplinski izoliranih cjevovoda kroz koje cirkulira topla voda temperature 90/70 °C.

Slika 1. Kompleks bolnice: 1 – portirnica, 2 – centar M.A.R.E., 3 – objekt III, 4 – spojni trakt – apartmani – odjel III – upravna zgrada, 5 – upravna zgrada, 6 – crkva, 7 – zgrada B, 8 – fizioterapija, 9 – kotlovnica, 10 – praonica rublja, 11 – kuhinja i restoran, 12 – odjel IV, 13 – izolirnica, 14 – staklenik, 15 – garaža, 16 – ex mrtvačnica, 17 – skladište, 18 – stolarske radionice, 19 – stambena jedinica

Osim kotlova, za pripremu potrošne tople vode prije 30 godina instalirana je dizalica topline, koja je kao toplinski izvor koristila morsku vodu, ili otpadnu toplinu iz sustava klimatizacije (rekuperacija topline).

Duž cijelog kompleksa provučene su pocinčane cijevi kojima je bila omogućena cirkulacija između akumulatora tople vode smještenog u strojarnici dizalice topline i bojlera u toplinskim podstanicama objekata, pri čemu je osnovna ideja rješenja bila da se voda, ugrijana radom dizalice topline, distribuira kao napojna voda u bojlere po podstanicama (umjesto hladne vode), pri čemu je u cijelom sustavu bila osigurana cirkulacija. Instalirana dizalica topline ogrjevnog je učinka na temperaturi vode u kondenzatoru 40/50 °C i temperaturi izlazne vode iz isparivača 7 °C (režim klimatizacije uz korištenje otpadne topline) iznosi 340 kW. Navedeni sustav nije zaživio, budući da je korisnik, nakon prvog primljenog računa za električnu energiju (koji je vjerojatno sadržavao i trošak za angažiranu električnu snagu), njegovo korištenje ocijenio preskupim. Time je zbog neprofesionalne odluke uništen sustav koji je svojim korištenjem mogao postići izrazito povoljne rezultate, a da se ne govori o tome



Slika 2. Principijelna shema postojećeg sustava

da su naknadno u objektima kompleksa postavljeni split uređaji, umjesto da se koristila postojeća dizalica topline.

Toplovodnim sustavom danas se grije većina objekata. Od ukupnog učinka ugrađenih potrošača topline, koji iznosi 2.100 kW, oko 660 kW namijenjeno je grijanju potrošne vode u bojlerima, a ostatak od 1.440 kW grijanju objekata. Kao ogrjevna tijela u većini prostora bolnice koriste se radijatori.

Na parnu kotlovnicu povezani su praonica rublja (373 kW) i kuhinja (347 kW). Pored tehnološke pare, za rad uređaja u praonici i dijela kuhinjske opreme, za ove se objekte te za još jedan (160 kW), para koristi za grijanje prostora i ventilacijskog zraka.

Za proizvodnju toplinske energije u kotlovnici kao energent se isključivo koristi lako loživo ulje čije emisije premašuju emisije konvencionalnih energenata korištenih u sličnim sustavima.

Iz navedenog razloga provedena je ekološka, energetska i ekonomska analiza sa satnom simulacijom potrošnje energije, kako bi se odredio optimalan sustav za proizvodnju toplinske energije u opisanom bolničkom kompleksu. Razmotren je i analiziran postojeći koncept sustava, a kao zamjena energenta pri rekonstrukciji razmotrena su dva rješenja: 1) uvođenje prirodnog plina sa zamjenom postojećih kotlova i 2) ugradnja kompresijskih dizalica topline s morem kao toplinskim izvorom za grijanje objekata i pripremu potrošne tople vode. Ekološka analiza obuhvatila je emisije CO_2, SO_2, NO_x čestica, ovisno o korištenom energentu. Navedene koncepcije sustava analizirane su i odabrano je najpovoljnije rješenje proizvodnje toplinske energije.

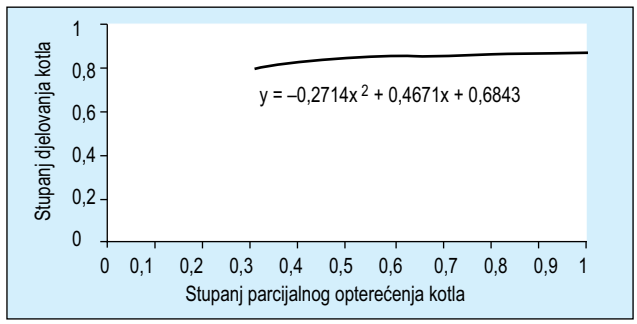
2. Potrošnja energenata

Toplinska energija proizvedena u toplovodnim kotlovima koristi se tijekom zime za grijanje prostora, zagrijavanje bazena te pripremu potrošne tople vode dok se u ljetnim mjesecima toplovodni kotlovi koriste za zagrijavanje većeg dijela potrošne vode. Radom parnih kotlova proizvodi se tehnološka para za praonicu rublja, rad kuhinjske opreme, zagrijavanje dijela prostora te zagrijavanje manje količine potrošne vode. Centralni rashladni sustav u kompleksu ne postoji.

Modeliranje godišnje potrošnje lakog lož ulja za proizvodnju toplinske energije u kompleksu provedeno je na bazi satne simulacije računalnim programom izrađenim od strane autora. Pri simulaciji je usvojen stvarni dnevni raspored vremena rada u objektu, dinamika potrošnje potrošne tople vode, dinamika rada praonice rublja, fizikalne karakteristike ovojnice i orijentacija ploha, utjecaj vanjske temperature i sunčevog zračenja, rasvjeta i drugi unutarnji dobici energije, čime je dobivena krivulja opterećenja sustava grijanja.

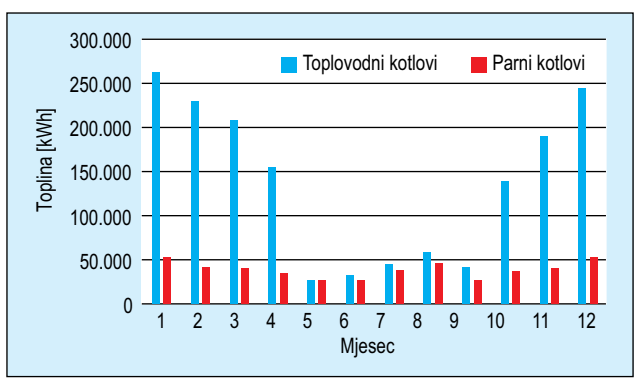
Simulacijom dobivena godišnja toplinska energija, koja se proizvodi putem toplovodnih kotlova, iznosi 1.668.949 kWh, dok putem parnih kotlova treba proizvesti 471.211 kWh toplinske energije. Za izračunavanje potrošnje lakog lož-ulja za proizvodnju navedene topline usvojena je donja ogrjevna moć goriva 11,3 kWh/kg i stupanj djelovanja kotla ovisan o stupnju parcijalnog opterećenja, prikazan na slici 3.

Potrošnja lakog loživog ulja u toplovodnim kotlovima dobivena na ovakav način iznosi 188.134 kg, dok se u parnim kotlovima troši 56.357 kg lož-ulja LS. Kad se ukupna, tako izračunata, potrošnja lakog lož-ulja od 244.491 kg usporedi s potrošnjom dobivenom od korisnika u iznosu od 278.165 kg, može se utvrditi zadovoljavajuća podudarnost modelirane i stvarne potrošnje. Razlog veće stvarne potrošnje lakog lož-ulja može se tražiti u ukupnoj iskoristivosti sustava proizvodnje toplinske energije koji sadrži gubitke kotla i gubitke sustava distribucije koji u predmetnom bolničkom kompleksu iznose oko 250.000 kWh zbog razgranate distribucijske mreže.



Slika 3. Stupanj djelovanja kotla u ovisnosti o stupnju parcijalnog opterećenja

Kako se dio objekata i sustava ventilacije u bolničkom kompleksu ne koristi, a dio sustava i objekata predviđen za gradnju prije 30 godina nikada nije napravljen, ukupni kapacitet kotlovnice znatno prelazi trenutne potrebe za toplinskim učinkom instalirane i korištene opreme. Maksimalni učinak, koji pokrivaju toplovodni kotlovi, dobiven korištenom simulacijom iznosi 810 kW, dok maksimalni učinak parnih kotlova iznosi oko 270 kW.



Slika 4. Toplinska energija koju proizvode kotlovi u kompleksu

Trenutačna cijena lakog loživog ulja iznosi 0,57 €/kg, a postoji mogućnost da se navedeno gorivo povuče s tržišta zbog prevelikog sadržaja sumpora. Trošak za proizvodnju toplinske energije toplovodnim i parnim kotlovima iznosi 139.360 €. Osim cijene samog energenta plaća se i naknada Fondu za zaštitu okoliša i energetsku učinkovitost zbog emisija SO_2 i NO_2, a u pripremi je i naknada za emisiju CO_2, sukladno europskim propisima. Naknada se plaća prema količini kao i podrijetlu emisija. Od 1. siječnja 2006. naknada za emisiju SO_2 i NO_x u Republici Hrvatskoj iznosi 40,5 €/t. Naknada za emisiju CO_2 nastalog izgaranjem goriva za grijanje, za zemlje Europske unije, još je u pripremi, iako se u velikom broju članica već plaća. Ukoliko se uvede, predviđane su naknade u iznosu od 4 € do 30 € po toni emisije, iako najrealnije izgleda da će naknada iznositi 15 €/t.

3. Emisije

Provedena ekološka analiza obuhvatila je emisije CO_2, SO_2, NO_x te čestica, ovisno o korištenom energentu. Kako se točne emisije i sastav dimnih plinova ne mogu utvrditi na jednostavan način jer ovise o konstrukciji i učinku kotla, stupnju opterećenja, izvedbi ložišta i načinu izgaranja, sastavu goriva te eventualnoj uporabi opreme za obradu dimnih plinova, smjernice za izračun emisija prilikom izgaranja preuzete su iz dostupne literature [1].

Emisiju sumpornih oksida uglavnom čini sumporni dioksid (SO_2) čiji je nastanak u potpunosti ovisan o sadržaju sumpora u energentu. Preko 95% sumpora iz goriva pretvara se u SO_2 dok se preostalih 1–5% pretvara u SO_3, a tek jedan manji dio odlazi sa česticama. Nasuprot loživom ulju koje sadrži veću količinu sumpora, količina emisije SO_2 za prirodni plin je zanemariva zbog neznatnog udjela sumpora u gorivu.

Emisija dušikovih oksida NO_x, koji nastaje izgaranjem ovisi o temperaturi plamena, koncentraciji dušika u gorivu, količini kisika za izgaranje, vremenu zadržavanja produkata sagorijevanja u zoni visokih temperatura kao i o načinu miješanja goriva sa zrakom. Razlikuju se termički NO_x (emisija nastala oksidacijom dušika iz zraka) te NO_x nastao oksidacijom dušika iz goriva. Dva su načina smanjenje emisije; prvi je vezan za samo izgaranje i uključuje ugradnju plamenika sa stupnjevitim dovođenjem zraka za izgaranje, te drugi znatno skuplji i odnosi se na obradu dimnih plinova nakon izgaranja.

CO_2 je staklenički plin čije se emisije ne mogu regulirati načinom izgaranja, budući da je količina emisija CO_2 proporcionalna sadržaju ugljika u gorivu te njegovoj potrošnji. Smanjenje emisije CO_2 može se postići kroz povećanje stupnja iskorištenja kotla, kako bi se smanjila potrebna količina energije goriva. Uz to, smanjenje emisije moguće je postići uz odvajanje i skladištenje CO_2 nakon izgaranja, što je skup i složen proces, a ta tehnologija je još u fazi razvoja. Oko 99% ugljika iz goriva tijekom izgaranja pretvara se u CO_2.

Emisija čestica ovisi o vrsti goriva, konstrukciji ložišta, pogonskim uvjetima i učinkovitosti uređaja za odstranjivanje.

Korištene emisije [1] izražene su po jedinici toplinske energije goriva kao u tablici 1.

Tablica 1. Emisije za analizirane energente

	Emisije [g/kWh]		
	Lako loživo ulje	Prirodni plin	Električna energija
CO_2	276	205	376
SO_2	0,167	0,001	–
NO_x	0,234	0,32	–
Čestice (PM 10)	0,01152	0,003204	–
Čestice (PM 2,5)	0,00288	0,003204	–

Izračunate emisije za postojeće stanje instalacije (s kotlovima na lako loživo ulje) prikazane su u tablici 2.

Tablica 2. Emisije za postojeće stanje – kotlovi na lako lož-ulje

SO_2 [kg]	NO_x [kg]	CO_2 [kg]	Čestice (PM 10) [kg]	Čestice (PM 2,5) [kg]
462,5	646	762.519	31,8	8,0

4. Prelazak na prirodni plin

Kako plinifikacija Istre nije završena, uvođenje prirodnog plina u predmetni bolnički kompleks nosi dodatne troškove osim same zamjene postojećih kotlova. Za prelazak na prirodni plin trebalo bi izgraditi plinsku mrežu u kompleksu, mjerno-redukcijsku stanicu, provesti zamjenu kotlova i plamenika te osigurati sigurne uvjete za rad (ventilaciju postojeće kotlovnice). Ukupna investicija za ovakav zahvat, koji uključuje rekonstrukciju sadašnje kotlovnice i gradnju plinskog priključka s razvodom do kotlovnice, procjenjuje se na oko 250.000 € [2].

Prirodni plin, kao gorivo, ekološki je prihvatljiviji od loživog ulja. Troškovi proizvodnje toplinske energije korištenjem prirodnog plina izračunate su s cijenom prirodnog plina za područje Istre, koja iznosi 0,067 €/kWh toplinske energije plina. Uz donju ogrjevnu moć od 9,261 kWh/m^3, cijena je 0,62 €/m^3. Visoka cijena energenta na navedenoj lokaciji proizlazi iz razloga što je područje Istre trenutno u procesu plinifikacije pa je distributeru odobrena nešto viša cijena od uobičajene.

Predmetna analiza uključuje primjenu kondenzacijskih toplovodnih kotlova. Karakteristika učinkovitosti kondenzacijskih toplovodnih kotlova dana je u ovisnosti o temperaturi povratne vode u sustavu grijanja i prikazana na slici 4. Gornju ogrjevnu moć plina, tj. toplinu kondenzacije dimnih plinova, moguće je iskoristiti kada se temperatura povratne vode u sustavu grijanja spusti ispod temperature rosišta dimnih plinova, koja za prirodni plin iznosi 57 °C. Prema prikazanim krivuljama kreirani su polinomi i izračunati stupnjevi djelovanja u ovisnosti o temperaturi povratne vode u kotao za svaki vremenski korak simulacije.

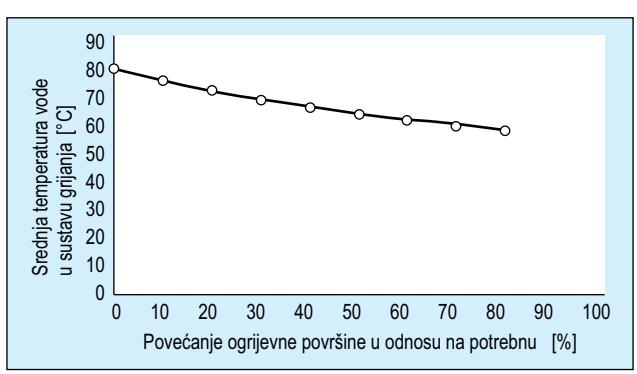
Kako je sustav radijatorskog grijanja projektiran prema normi DIN 4701, koja je vrijedila u vrijeme izgradnje sustava, sustav je znatno prekapacitiran jer navedena norma sadrži rezervu učinka za grijanje koja proizlazi iz rezerve za prekid rada te orijentaciju grijanog prostora.

Promjena potrebne srednje temperature ogrjevne vode s povećanjem ogrjevne površine radijatora izračunata je prema izrazu iz [3]:

$$\vartheta_{sr} = \vartheta_0 + \Delta\vartheta_n \cdot e^{\frac{\ln\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_n}}{1,3}}$$

gdje je:

ϑ_0 – temperatura zraka u prostoriji (20 °C);
$\Delta\vartheta_n$ – standardna srednja nadtemperatura (60 °C za sustav 90/70 °C i temperaturu zraka u prostoru 20 °C);
$\dot{Q}$ – učin ogrjevnog tijela;
$\dot{Q}_n$ – učin ogrjevnog tijela u standardnim uvjetima (u predmetnom slučaju za uvjete polaz/povrat 90/70 °C i temperaturu zraka 20 °C).

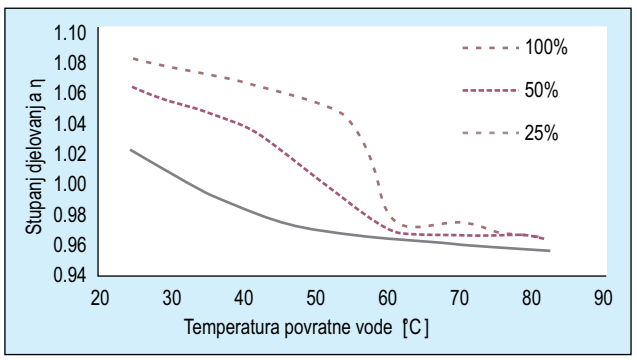


Slika 5. Smanjenje srednje temperature vode u sustavu grijanja s povećanjem ogrjevne površine radijatora u odnosu na stvarno potrebnu

Detaljnijim uvidom u instalirani učinak radijatorskog grijanja, utvrđeno je da su radijatori dimenzionirani za učinak oko 40–50% veći u odnosu na stvarnu potrebe, što znači da bi uz postojeće radijatore sustav mogao, umjesto režima polaz/povrat vode 90/70 °C, funkcionirati u sustavu 70/55 °C. Kontrolom je utvrđeno da postojeće pumpe zadovoljavaju potreban protok. Prema slici 7, temperatura polazne i povratne vode mijenja se s temperaturom vanjskog zraka. Temeljem krivulje kreiran je korelacijski polinom s

kojim je izračunata temperatura povratne vode za svaki vremenski korak.

Kako parni kotlovi proizvode niskotlačnu paru za rad termičkih uređaja kuhinje i praonice, za modeliranje potrošnje prirodnog plina u parnim kotlovima korištena je korelacija na slici 3.

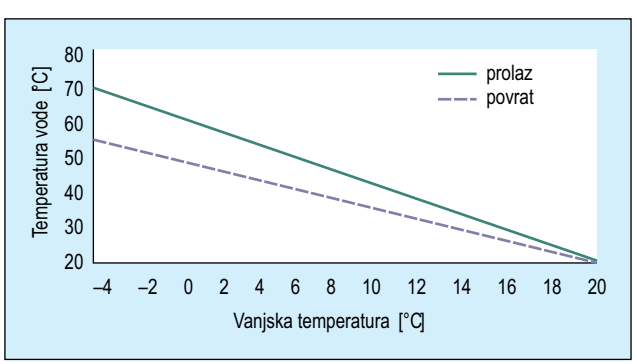


Slika 6. Stupanj djelovanja kondenzacijskog kotla o temperaturi povratne vode u kotao za različite stupnjeve opterećenja kotla [4]

Potrošnja prirodnog plina B [m^3] izračunata je prema izrazu:

$$B = \frac{Q}{H_d \times \eta}$$

gdje je Q [kWh] toplina u vremenskom koraku simulacije, a H_d donja ogrjevna moć prirodnog plina od 9,261 kWh/m^3. Za proizvodnju 1.668.949 kWh toplinske energije za grijanje objekata i većeg dijela PTV, radom toplovodnog kondenzacijskog kotla godišnje se troši 182.436 m^3 prirodnog plina, dok se za proizvodnju 471.211 kWh toplinske energije za zagrijavanje manjeg dijela PTV putem parnih kotlova troši dodatnih 68.834 m^3 prirodnog plina. Uz ranije navedenu cijenu energenta, ukupni godišnji troškovi iznose 155.788 €, što prelazi trenutne troškove za proizvodnju toplinske energije korištenjem lakog loživog ulja (139.360). Rekapitulacija emisija izračunata prema [1] prikazana je u tablici 3.



Slika 7. Promjena polazne i povratne temperature radijatorskog grijanja s temperaturom vanjskog zraka – temperaturni režim 70/55 °C

Tablica 3. Emisije za primjenu prirodnog plina

SO_2 [kg]	NO_x [kg]	CO_2 [kg]	Čestice (PM 10) [kg]	Čestice (PM 2,5) [kg]
2,4	746	477,414	7,5	7,5

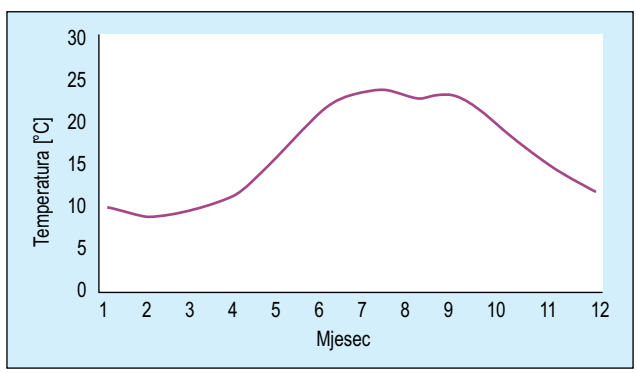
Zbog zanemarivog sadržaja sumpora u gorivu emisija sumpor-dioksida svedena je na minimum. Emisija ugljičnog dioksida smanjena je za oko 38%. Emisija dušičnih dioksida nešto je povećana.

5. Primjena kompresijskih dizalica topline

Kako je ranije rečeno, sustav radijatorskog grijanja znatno je predimenzioniran i mogao bi raditi u temperaturnom režimu polaz/povrat 70/55 °C.

Ovako sniženu temperaturu polazne vode moguće je postići kompresijskim dizalicama topline čak i pri projektnim uvjetima (kaskadna dizalica topline, economizer proces) ali je također moguće dizalicu topline upotrijebiti u bivalentno paralelnom načinu rada s postojećim kotlovima.

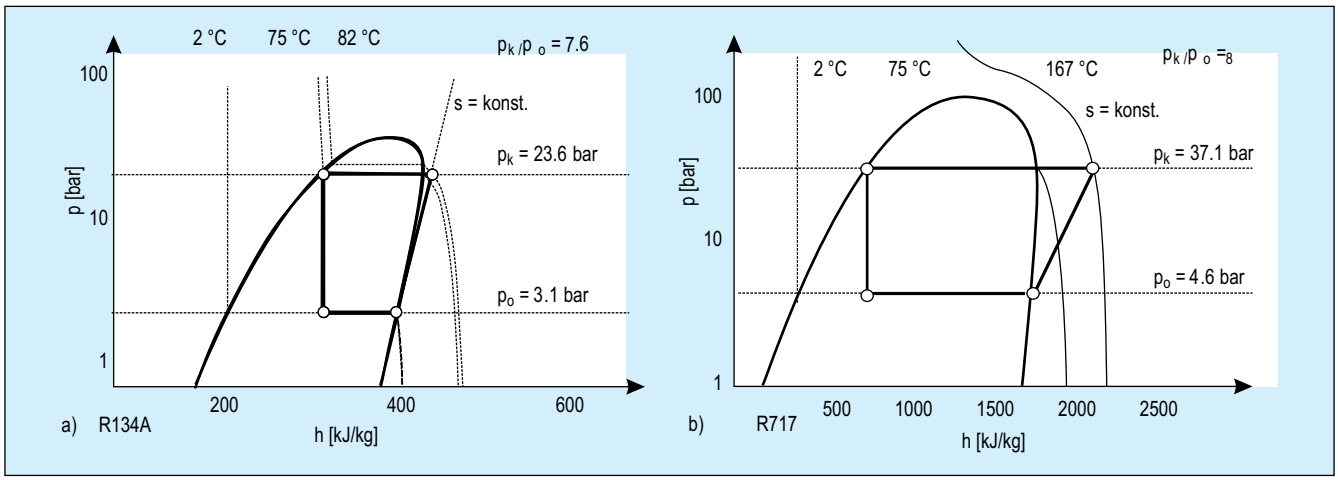
Uz sniženu polaznu temperaturu vode za radijatorsko grijanje te postojeću infrastrukturu za upotrebu dizalice topline voda–voda (postojanje upojnog bunara morske vode), kao logična zamjena za postojeće toplovodne kotlove nameće se primjena dizalice topline s morskom vodom kao toplinskim izvorom. More, zbog svoje relativno visoke temperature tokom cijele godine, predstavlja pogodan toplinski izvor. Temperatura mora za razmatranu lokaciju kreće se od 9 °C tokom zimskih mjeseci do 25 °C tokom ljeta, što omogućava visoke temperature isparivanja u odnosu na zrak kao toplinski izvor, a samim time i povoljniji faktor grijanja.



Slika 8. Godišnji tok temperature mora za lokaciju Rovinj [5]

Primjenjena dizalica topline morala bi omogućiti temperaturu polazne vode 70 °C u sustavu grijanja, koja bi bila adekvatna i za zagrijavanje potrošne tople vode, budući da se temperatura sanitarne tople vode mora periodično dizati iznad 60 °C radi sprečavanja pojave legionele. Trenutno na tržištu postoje uređaji koji rade s radnim tvarima R134a i R717. Konstrukcija ovakvih uređaja određena je svojstvima radnih tvari. Tako radna tvar R134a, zbog svojih specifičnosti, omogućava rad procesa između temperature isparivanja 2 °C i temperature kondenzacije 75 °C (izlazna temperatura vode iz kondenzatora 70 °C) s jednostupanjskom kompresijom. Pri tome temperatura na kraju kompresije iznosi 82 °C, što ne predstavlja problem s gledišta mogućeg zapaljenja ulja za podmazivanje kompresora (slika 9a). Iako kod radne tvari R717 kompresijski omjer ukazuje na mogućnost jednostupanjske kompresije, navedeni slučaj ne bi bio moguć zbog visoke temperature na kraju kompresije, koja iznosi 167 °C (slika 9b).

Jedan od prikladnih načina uklapanja jednostupanjskih uređaja u postojeće sustave prikazan je na slici 10a gdje je kotao direktno zamijenjen dizalicom topline niže kaskade, dok se u slučaju potrebe za višom temperaturom uključuje i dizalica topline više kaskade. Kaskadu ovdje čine zasebne dizalice topline povezane vodenim krugom. Dvostupanjski kompresijski uređaji (slika 10b) mogu nakon prvog stupnja kompresije imati ugrađen izmjenjivač topline – kondenzator te u slučaju potrebe za nižim polaznim temperaturama funkcionirati kao jednostupanjska dizalica topline. Drugi stupanj kompresije uključuje se kada postoji potreba za višim polaznim temperaturama. Postoje izvedbe takvih uređaja s radnom tvari R717, ali njihova proizvodnja nije serijska, već isključivo po narudžbi jer su takvi uređa-



Slika 9. Jednostupanjski parni kompresijski procesi: a) R134A, b) R717

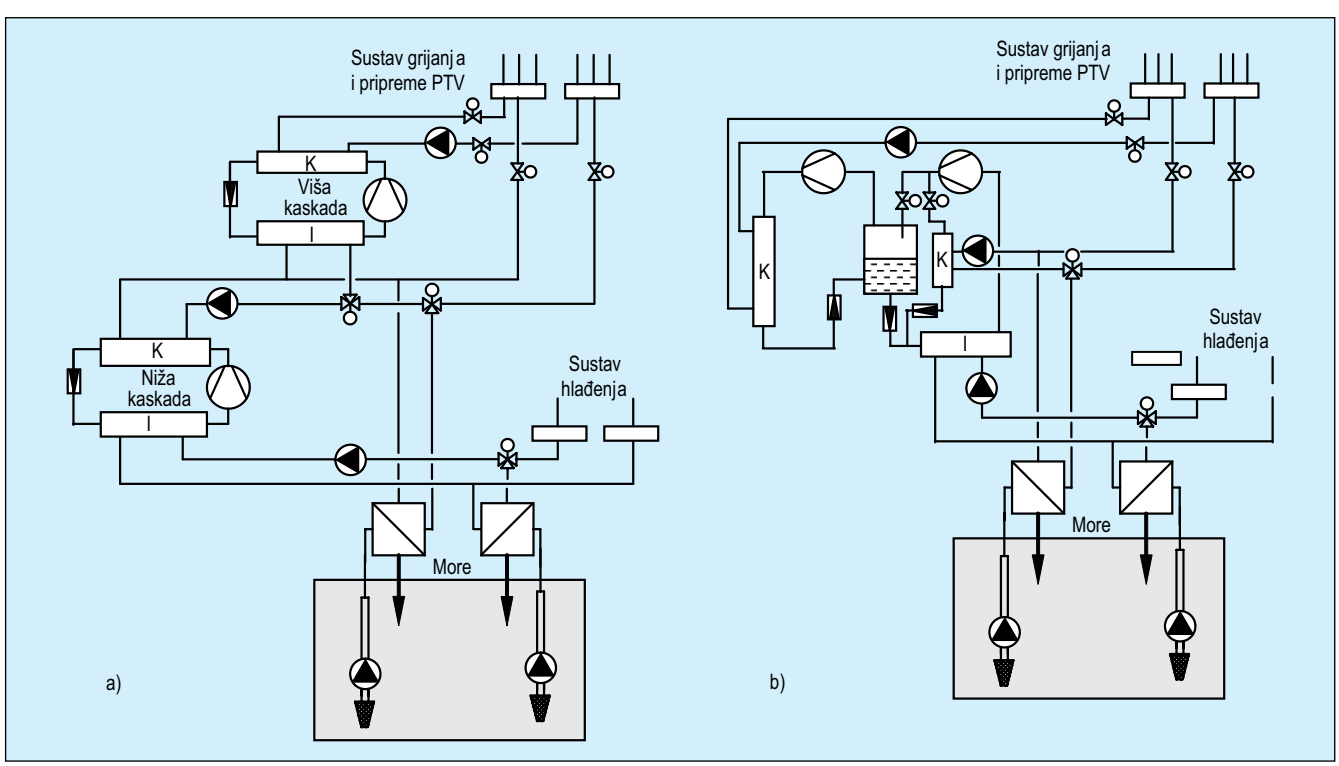
ji projektirani prema instalaciji, pa prateća dokumentacija i detaljnije informacije o karakteristikama ovih uređaja u radu nisu dostupne. Uređaj s radnom tvari R134A komercijalno je dostupan kao jednostupanjska srednjotemperaturna dizalica toplina.

Analizirana je primjena dizalice topline direktnom zamjenom postojećih toplovodnih kotlova, na način da se dizalice topline koriste za zagrijavanje objekata, bazenske vode i potpuno zagrijavanje potrošne tople vode. Tehnološka para za potrebe praonice rublja i rada kuhinjske opreme proizvodi se radom parnog kotla loženog prirodnim plinom.

Za predmetni sustav, konicpiran prema shemi na slici 10a, odabrane su dvije srednjotemperaturne dizalice topline učinka 480 kW na izlaznoj temperaturi vode iz kondenzatora 70 °C i izlaznoj vode iz isparivača 7 °C, koje rade u nižoj kaskadi. Za potrebe više kaskade predviđene su također dvije dizalice topline navednih karakteristika. Na slici 10a su zbog jednostavnosti prikazane po jedna dizalica topline u svakoj kaskadi.

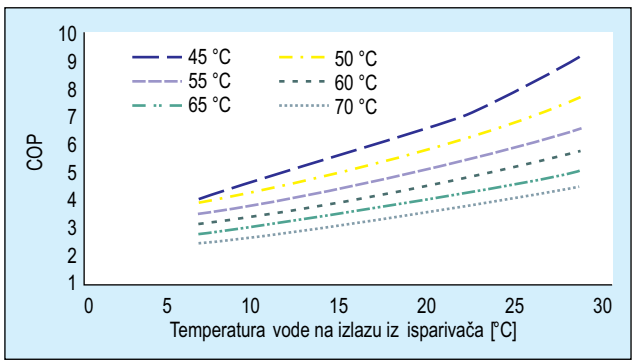
Prekretom na strani vode uređaj može raditi i kao rashladni uređaj. Morska voda hladi se za 5,5 °C u izmjenjivaču topline i predaje toplinu vodenom krugu koji direktno prolazi kroz isparivač i predaje toplinu dizalici topline. Ukoliko bi isparivač dizalice topline bio izveden iz titana, toplinu bi bilo moguće direktno dovesti morskom vodom. U tom slučaju bi bilo moguće hlađenje sustava. Ukoliko bi se dizalica topline koristila i za hlađenje, bilo bi potrebno ugraditi izmjenjivač topline prije kolektora sustava hlađenja kako voda u sustavu hlađenja ne bi došla u doticaj s morskom vodom pri izmjeni režima rada.

Temeljem specifikacije proizvođača kreirani su korelacijski polinomi koji opisuju ovisnost faktora grijanja o temperaturi izlazne vode iz isparivača, sve za različite temperature polazne vode u sustavu grijanja. Usvojena je temperatu-



Slika 10. a) jednostupanjske dizalice topline u kaskadi s vodom kao medijem za prijenos topline, b) dvostupanjska dizalica topline s međuhladnjakom odjeljivačem i dodatnim kondenzatorom prvog stupnja

ra na izlazu iz isparivača 7,5 °C niža od temperature morske vode.



Slika 11. Promjena faktora grijanja s temperaturom izlazne vode iz isparivača (za temperature izlazne vode iz kondenzatora 45/50/55/60/65 °C)

Ovisno o potrebnoj polaznoj temperaturi u sustavu grijanja te polaznoj temperaturi za zagrijavanje PTV, simuliran je rad dizalica topline obje kaskade. Dizalica topline gornje kaskade uključuje se kada je temperatura izlazne vode iz isparivača niža od 4 °C, a temperatura izlazne vode iz kondenzatora viša ili jednaka 60 °C. Pri tome dizalica topline donje kaskade zagrijava vodu koja izlazi iz kondenzatora na 38 °C te tako ugrijana voda predaje toplinu isparivaču dizalice topline gornje kaskade. Za ovakav slučaj rada sustava faktor grijanja je nešto nepovoljniji nego u slučaju korištenja samo donje kaskade, ali temeljem izrađene satne simulacije potreba za ovakvim načinom rada pojavljuje se tek oko 550 sati godišnje. Ovaj dio topline za zagrijavanje vode na potrebnu temperaturu mogao bi se zagrijavati i bivalentno kada bi se postojeći toplovodni kotao koristio za dogrijavanje vode na potrebnu temperaturu. Gornja granica temperature na izlazu iz kondenzatora razmatrane dizalice topline na radnu tvar R134a je 70 °C. Ako bi bila potrebna viša temperatura (što bi bio slučaj kada radijatori ne bi bili predimenzionirani), trebalo bi razmotriti primjenu dizalice topline koja radi s radnom tvari R717 ili ocijeniti isplati li se više kombinacija bivalentnog rada dizalice topline i postojećeg kotla.

Korištenjem izraza:

$$P = \frac{Q}{COP} \quad [\text{kWh}]$$

gdje je Q potrebna toplina u vremenskom koraku simulacije te COP faktor grijanja u vremenskom koraku, izračunata je potrošnja električne energije za pogon kompresora dizalice topline.

U slučaju potrebe za radom dizalice topline gornje kaskade, faktor grijanja računa se prema:

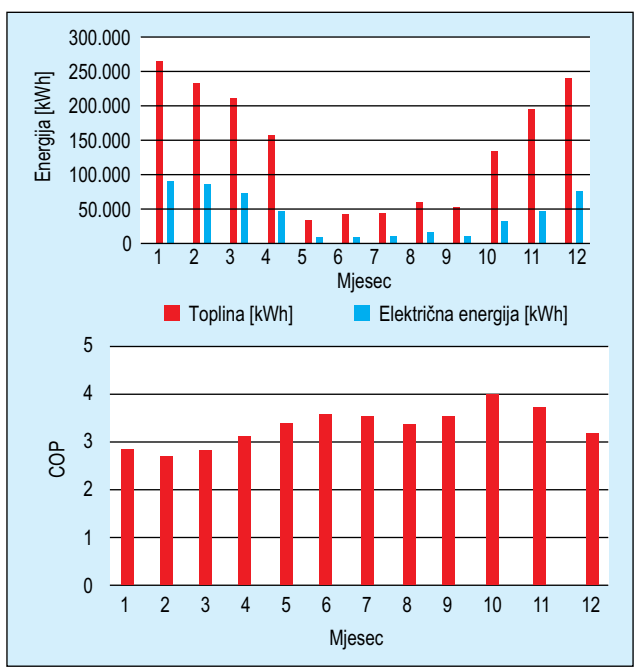
$$COP = \frac{Q_k + Q}{P} \quad [\text{kWh}]$$

gdje je Q_k toplina koja se predaje isparivaču gornje kaskade, Q potrebna toplina koja se predaje sustavu grijanja, a P utrošena električna energija u obje kaskade. Za proizvodnju 1.668.949 kWh toplinske energije, ovakvom koncepcijom sustava godišnje se troši 532.410 kWh, od čega 150.114 kWh u doba niže tarife te 382.296 kWh u doba više tarife. Srednji godišnji faktor grijanja iznosi 3,1. Srednji mjesečni faktori grijanja prikazani su na slici 11. Osim električne energije u višoj i nižoj tarifi, troškovi pogona uključuju i cijenu za angažiranu snagu. Troškovi analizirane varijante izračunati su s cijenom električne energije 0,064 €/kWh u doba niže tarife, 0,081 €/kWh u doba više tarife te 12 €/kW angažirane snage (mjesečni iznos). Godišnji trošak za angažiranu snagu iznosi 26.520 €, dok za samu energiju iznosi 40.573 €.

Osim električne energije za pogon kompresora, stavka koja nije zanemariva kod ovakvih sustava je električna energija za pogon crpki. Odabirom odgovarajućih crpki i simulacijom dinamike rada sustava, godišnje se za pogon crpki troši 71.870 kWh električne energije, što daje trošak od 5.322 € godišnje.

Za pripremu tehnološke pare, u ovoj varijanti predviđen je parni kotao smanjenog učinka, budući da je provedena simulacija pokazala da su postojeći kotlovi predimenzionirani. Potrošnja prirodnog plina izračunata je temeljem satne simulacije, uz stupanj djelovanja parnog kotla, uzevši u obzir parcijalna opterećenja prema slici 3. Potrošnja prirodnog plina iznosi 62.723 m^3 godišnje. Uz ranije navedenu cijenu prirodnog plina, godišnji trošak iznosi 38.888 €. Ukupni troškovi u analiziranoj varijanti iznose 111.304 €, tj. ušteda u odnosu na postojeće stanje je 28.056 € godišnje. Ukoliko se sagledaju samo troškovi toplinske energije proizvedene dizalicom topline, ovakav sustav donosi godišnju uštedu od 34.821 €.

Za rekonstrukciju postojećeg sustava na ovakav način, investicija temeljem [2] je procijenjena na 500.000 €.



Slika 12. Toplinska energija proizvedena dizalicom topline, utrošena električna energija, srednji mjesečni faktori grijanja

Tablica 4. Emisije za primjenu dizalice topline s morem kao toplinskim izvorom (toplovodno grijanje) i parnim kotlom na prirodni plin

SO_2 [kg]	NO_x [kg]	CO_2 [kg]	Čestice (PM 10) [kg]	Čestice (PM 2,5) [kg]
0,59	186	319,359	1,9	1,9

6. Zaključak

Iz ranije prikazanoga razvidno je kako prirodni plin, zbog visoke cijene, ne predstavlja povoljan energent te umjesto uštede donosi povećane troškove pogona. S ekološke strane, prelazak s lakog loživog ulja na prirodni plin donosi znatno manju emisiju sumpornih dioksida zbog neznatne

količine sumpora u gorivu. Naknada za emisiju SO_2 i NO_x izuzetno je mala, iznosi 40,5 €/t, te su uštede na samoj naknadi zanemarive. Emisija CO_2 smanjena je za oko 38%. Kako naknada za emisiju CO_2 još nije uvedena, gledano sa ekonomske strane, smanjenje emisije ne donosi trenutno ostvarivu uštedu. Kada bi se naknada naplaćivala 15 €/t emisije, godišnje bi se uštedilo 4.290 €.

Druga analizirana koncepcija rekonstrukcije sustava donosi godišnju uštedu od 28.056 € godišnje. Uz procijenjenu investiciju period povrata sredstava je oko 18 godina, a kada se parni kotlovi ne bi mijenjali novima na prirodni plin, period povrata bi bio i kraći. Gledano i s ekološkog stajališta, ova je koncepcija sustava povoljnija jer donosi najmanje emisije, ali uz relativno dugačak period povrata investicije.

Tablica 5. Usporedba investicijskih i pogonskih troškova

Energent	Investicija [€]	Trošak – grijanje i PTV [€]	Trošak – para [€]	Ušteda na postojeće [€]
Lož-ulje lako	–	107.237	32.123	–
Prirodni plin	250.000	112.727	42.677	–16.044
Dizalica topline i prirodni plin	500.000	72.416	38.888	28.056

Tablica 6. Usporedba emisija za razmotrene varijante

	SO_2 [kg]	NO_x [kg]	CO_2 [kg]	Čestice (PM 10) [kg]	Čestice (PM 2,5) [kg]
LU	462,5	646	762.519	31,8	8,0
PP	2,3	744	476.238	7,6	7,6
DT	0,59	186	319.359	1,9	1,9

7. Literatura

[1] *** EMEP/EEA Emission inventory guidebook, 2013. http://www.eea.europa.eu

[2] **Pavković, et al.,** *Detaljna energetska studija objekta: Bolnica za ortopediju i rehabilitaciju „Prim. dr. Martin Horvat“*, 2011.

[3] **Recknagel, Sprenger, Schramek,** *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*, Oldenbourg Industrieverlag München, 2008.

[4] **Watkins,** *Maximizing Boiler Plant Efficiency.*

[5] www.dhmz.hr

kgh

Građevinarstvo
Automotivi
Industrija

REHAU®
Unlimited Polymer Solutions

PERFEKTNA ENERGETSKA EFIKASNOST

NOVO REHAU SISTEMSKO REŠENJE - SADA UKLJUČUJUĆI TOPLOTNU PUMPU

Nova REHAU toplotna pumpa upotpunjuje energetski efikasne REHAU sisteme unutrašnjih instalacija u Vašem domu.
Perfektna usklađenost, ušteda energije, redukcija troškova i očuvanje okoline.
Najtoplija preporuka!

REHAU d.o.o., Stražilovska 7, 11272 Dobanovci, Tel.: +381 (11) 37 70 301, E-mail: beograd@rehau.com, www.rehau.rs