



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje



Andre Biloglav, Marko Riljin

Energetski potencijal korištenja topline otpadnih voda grada Zagreba

Zagreb, 2024.

Ovaj rad izrađen je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu (FSB) pod vodstvom mentora, prof. dr. sc. Vladimira Solde na Zavodu za termodinamiku, toplinsku i procesnu tehniku i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2023./2024.

Andre Biloglav, Marko Riljin

SADRŽAJ

SADRŽAJ	ii
POPIS SLIKA	iv
POPIS TABLICA.....	vi
POPIS OZNAKA	vii
1.MOTIVACIJA	1
2.PREGLED LITERATURE	3
3. CILJEVI I HIPOTEZA RADA	5
4. TEHNOLOGIJE KORIŠTENJA TOPLINE OTPADNIH VODA	6
4.1. Energija otpadnih voda.....	6
4.2. Povrat energije unutar jednog objekta.....	8
4.3. Povrat energije iz neobrađenih otpadnih voda	9
4.3.1. Iskorištavanje topline otpadnih voda izmjenjivačem unutar kanalizacije.....	12
4.4. Povrat energije iz obrađenih otpadnih voda	16
4.4.1. Postrojenje za obradu otpadnih voda	16
5. SUSTAVI DALJINSKOG GRIJANJA I HLAĐENJA	20
5.1. Općenito o daljinskom grijanju i hlađenju	20
5.2. Pregled sustava daljinskog grijanja i hlađenja	21
5.3. Četvrta generacija sustava	24
6. PROČISTAČ OTPADNIH VODA GRADA ZAGREBA.....	27
6.1. Osnovne informacije	27
6.2. Opis rada pogona.....	32
6.2.1. Prvi stupanj čišćenja.....	32
6.2.2. Drugi stupanj čišćenja	33
6.2.3. Obrada mulja.....	34

6.3. Obrada podataka.....	35
7. POTENCIJAL KORIŠTENJA IZVORA/PONORA TOPLINE OTPADNIH VODA GRADA ZAGREBA ZA DIZALICU TOPLINE.....	38
7.1. Sustav dizalica topline.....	38
7.2. Rezultati proračuna na dnevnoj razini.....	46
7.3. Rezultati proračuna na godišnjoj razini.....	49
7.3.1. Ušteda energije i smanjenje emisije ugljikova dioksida u atmosferu	53
8.RASPRAVA.....	55
9.ZAKLJUČAK	56
ZAHVALA.....	57
SAŽETAK.....	58
SUMMARY	59
POPIS LITERATURE	60

POPIS SLIKA

Slika 1. Obnovljivi izvori energije [23]	6
Slika 2. Osnovna shema sustava dizalice topline [24]	7
Slika 3. Temperature otpadnih voda tijekom godine u Zurichu[12]	7
Slika 4. Iskorištavanje topline otpadnih voda jedne kuće	8
Slika 5. Izmjenjivač topline tipa cijev u cijevi [25]	9
Slika 6. Shema kanalizacijske mreže u Belmontu, Massachusetts [26].....	10
Slika 7. Izmjenjivač topline unutar kanalizacije [13].....	11
Slika 8. Indirektni sustav dizalice topline s dodatnim međuizmjenjivačem topline [13]	12
Slika 9. Biološko onečišćenje izmjenjivača topline [27]	13
Slika 10. Pad iznosa koeficijenta prijelaza topline i porast iznosa pada tlaka medija uslijed onečišćavanja površine izmjenjivača topline [29]	14
Slika 11. Bivalentni sustav grijanja [28]	15
Slika 12. Izmjenjivači topline tipa Therm-Liner A i B [14].....	15
Slika 13. Primjer spajanja modularnog izmjenjivača topline s dizalicom topline [14].....	16
Slika 14. Postrojenje za obradu otpadnih voda [16].....	17
Slika 15. Dijagram toka razina čišćenja u postrojenju za obradu otpadnih voda.....	18
Slika 16. Kanalizacijski mulj korišten kao gnojivo u poljoprivredi.....	18
Slika 17. Pojednostavljeni prikaz sustava daljinskog grijanja [17].....	20
Slika 18. Pojednostavljen prikaz voda-voda sustava dizalice topline	21
Slika 19. Usporedba temperatura polaza i povrata ogrjevnog medija u trećoj i četvrtoj generaciji sustava daljinskog grijanja [34].....	23
Slika 20. Pregled generacija sustava daljinskog grijanja i hlađenja [33]	24
Slika 21. Koncept četvrte generacije sustava daljinskog grijanja [4]	26
Slika 23. Sustav za mehaničko čišćenje otpadnih voda	29
Slika 24. Mastolov i pjeskolov za izdvajanje masti i pijeska.....	29
Slika 25. Sustav za dodavanje kisika i bakterija za razgradnju.....	30
Slika 26. Digestori za bioplin.....	30
Slika 27. Sustav za uklanjanje najsitnijih nečistoća	31
Slika 28. Izlaz pročišćene otpadne vode prema rijeci Savi	31
Slika 29. Pužna crpka [30]	32
Slika 30. Trošenje materijala [31]	32
Slika 31. Presjek kroz crpnu stanicu [22].....	33

Slika 32. Presjek taložnika [22].....	34
Slika 33. Proizvodnja bioplina iz kanalizacijskog mulja kao početne sirovine [32].....	35
Slika 34. Grafikon protoka vode [m^3/dan] kroz zagrebački pročištač otpadnih voda.....	36
Slika 35. Grafikon temperature vode [$^{\circ}\text{C}$] na izlazu iz pročištača otpadnih voda	37
Slika 36. Shema sustava dizalice topline	39
Slika 37. T-s dijagram s karakterističnim točkama procesa.....	42
Slika 38. Dijagram krivulje grijanja.....	44
Slika 39. Dijagram promjene faktora grijanja u karakterističnom danu mjeseca siječnja	48
Slika 40. Dijagram promjene vrijednosti toplinskog učinka kondenzatora u karakterističnom danu mjeseca siječnja	48
Slika 41. Dijagram promjene privedene snage kompresoru u karakterističnom danu mjeseca siječnja.....	49
Slika 42. Faktor grijanja – prosječni po mjesecu u 2023.godini	51
Slika 43. Toplinska energija preuzeta na kondenzatoru na mjesečnoj razini u 2023.godini ...	52
Slika 44. Ukupan rad kompresora na mjesečnoj razini u 2023.godini.....	52

POPIS TABLICA

Tablica 1. Volumni protoci otpadne vode u Postrojenju za pročišćavanje otpadnih voda u Zagrebu.....	36
Tablica 2. Temperatura otpadne vode u Postrojenju za pročišćavanje otpadnih voda u Zagrebu	37
Tablica 3. Satna raspodjela temperature otpadne vode na izlaznom presjeku CUPOVZ-a.....	39
Tablica 4. Satna raspodjela volumnog protoka otpadne vode na izlaznom presjeku CUPOVZ-a	40
Tablica 5. Temperature i osnovne pretpostavke proračuna.....	43
Tablica 6. Karakteristična satna raspodjela vanjske temperature zraka u gradu Zagrebu u mjesecu siječnju	44
Tablica 7. Termodinamičke vrijednosti točaka kružnog procesa u određenom trenutku rada (između 12 i 13 sati u karakterističnom danu mjeseca siječnja) sustava dizalice topline.....	46
Tablica 8. Vrijednosti snaga i faktora grijanja u određenom trenutku rada (između 12 i 13 sati u karakterističnom danu mjeseca siječnja) sustava dizalice topline	47
Tablica 9. Specifična toplinska potreba stanova prikazana na mjesečnoj razini	50
Tablica 10. Energetska i ekološka usporedba dva različita sustava grijanja.....	54

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ϑ	$^{\circ}\text{C}$	Relativna temperatura
T	K	Apsolutna temperatura
φ	%	Relativna vlažnost
Φ	W	Toplinski tok
k	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	Koeficijent prolaza topline
A	m^2	Površina
α	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	Koeficijent prijelaza topline
δ	m	Debljina
λ	$\frac{W}{m \cdot K}$	Toplinska provodnost
\dot{V}_v	$\frac{m^3}{s}$	Volumenski protok
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	Gustoća
h	$\frac{J}{kg}$	Specifična entalpija
V	m^3	Volumen
h	m	Visina
τ	h	Vrijeme
m	kg	Masa
c	$\frac{J}{kg \cdot K}$	Specifični toplinski kapacitet
q	$\frac{W}{m^2}$	Gustoća toplinskog toka
q_m	$\frac{kg}{s}$	Maseni protok
s	$\frac{J}{kg \cdot K}$	Specifična entropija
η	%	Učinkovitost
p	Pa	Tlak
P	W	Snaga

w	$\frac{J}{kg}$	Specifični rad
d	m	Promjer
η	Pa·s	Dinamička viskoznost
ν	$\frac{m^2}{s}$	Kinematička viskoznost
w	$\frac{m}{s}$	Brzina
L	m	Duljina
B	m	Širina
R	$\frac{m^2 \cdot K}{W}$	Toplinski otpor

1.MOTIVACIJA

Spaljivanjem fosilnih goriva kao neobnovljivih izvora energije raste koncentracija stakleničkih plinova u atmosferi što dovodi do njezina globalnog zagrijavanja i posljedično negativnih klimatskih promjena na Zemlji. Vođeni idejom održivog razvoja, razvoja koji će omogućiti podmirenje svih potreba današnjih generacija bez da ugrozi mogućnosti budućih naraštaja da ostvare isto, države članice Europske unije bile su primorane reagirati. Dvije najupečatljivije direktive koje su potpisane su one kojima se cilja da udio obnovljivih izvora energije u ukupnoj potrošnji energije do 2030. godine iznosi 45% i da do 2050. godine područje Europske unije bude klimatski neutralno, što znači da za proizvodnju energije više se neće koristiti fosilna goriva [1]. Republika Hrvatska, kao članica EU, prihvatila je navedene zahtjeve.

Glavni koraci prema ostvarivanju klimatski neutralne Europe gdje neće biti dodatnog nakupljanja stakleničkih plinova u atmosferi viđeni su u široj upotrebi obnovljivih izvora energije, ali i u boljem iskorištenju postojećih energetske sustava. Faktor iskorištenja ili učinkovitosti definiran je kao omjer dobivene i utrošene energije i njegovim povećanjem, osim što će se ostvariti financijska dobit, u isto vrijeme smanjiti će se već navedeni štetan utjecaj na okoliš.

Najveći udio utrošene energije na području EU pada na područje zgradarstva i to u mjeri od gotovo 40% [2] i jasno je da ako se namjeravaju ostvariti svi oni ciljevi iz navedenih direktiva potrebno je što učinkovitije isporučiti energiju korisnicima u kućanstvima i zgradama. Upravo u tome leži motivacija iza napravljenog rada da se energija za grijanje i hlađenje unutrašnjih prostora zgrada i kuća dovodi preko daljinskog izvora. Detaljnije, energija će se isporučivati preko sustava dizalica toplina koji će koristiti otpadne vode kao svoj toplinski izvor, odnosno ponor.

Dizalice topline uređaji su gdje se toplina prenosi s toplinskog spremnika niže temperature (izvodi se na isparivaču) na toplinski spremnik više temperature (izvodi se na kondenzatoru) uz privedenu kompenzacijsku energiju (mehanički rad ili toplinska energija). Jedni od osnovnih parametara koji utječu na učinkovitost rada takvih sustava, temperature su toplinskih spremnika. Vrste dizalica toplina koje su daleko najkorištenije na području EU, ali i svijeta one su koje na toplinskim spremnicima koriste zrak kao toplinski izvor i toplinski ponor. Glavna prednost zraka je ta što je kao toplinski medij uvijek dostupan, ali istovremeno

je podložan naglim i negativnim temperaturnim promjenama što često dovodi do pada učinkovitosti takvih sustava. Otpadne vode zimi su toplije od zraka, a ljeti hladnije i nakon provedenog postupka čišćenja tih voda i odvođenja na izmjenjivač topline može se ostvariti značajno veća učinkovitost sustava za grijanje i hlađenje iz medija koji bi svakako bio odbačen kao nepoželjan i njegov energetska potencijal ne bi se ni iskoristio.

2.PREGLED LITERATURE

Zahtjevi za energijom u zgradarstvu su veliki i kako bi se ostvarili planovi Europske unije o korištenju većeg udjela energije iz obnovljivih izvora potrebno je istraživati alternativne načine iskorištavanja energije u našoj okolini. Jedan od tih načina je i korištenje topline otpadnih voda. Na taj način ne samo da se smanjuje potrošnja energije, nego se smanjuju i emisije ugljikova dioksida (CO_2) i dušikovih oksida (NO_x) plinova kako je pokazano u [3]. Ovakvi pristupi postaju sve važniji u kontekstu postizanja ciljeva održivog razvoja i smanjenja ekološkog otiska urbanih sredina. Upotrebom dizalica topline kao izvora toplinske energije omogućuje se grijanje u niskotemperaturnom režimu, za razliku od tradicionalnog visokotemperaturnog režima koji se koristi u centraliziranim toplinskim sustavima, kao što su toplane u Hrvatskoj.

H. Lund et al. [4] iznosi da primjenom daljinskog grijanja četvrte generacije koja isporučuje niskotemperaturni režim grijanja krajnjim korisnicima mogu se iskorištavati toplinski izvori nižih temperatura kao što su otpadne vode. Time daljinsko grijanje kao najefikasniji sustav grijanja dodatno pridonosi energetske učinkovitosti zgrada tj. osigurava minimalnu potrošnju energije uz postizanje optimalne ugodnosti boravka i korištenja zgrade. Također piše da sustav daljinskog grijanja četvrte generacije treba integrirati u pametni energetske sustav, što podrazumijeva usklađivanje elektroenergetskog sustava s toplinskim i plinskim mrežama, čime se dodatno povećava fleksibilnost i stabilnost ukupnog energetske sustava. B. Schön [5] u svome radu navodi da pri korištenju otpadnih voda veliki problem predstavlja onečišćenje površina izmjene topline i to smanjuje učinkovitost sustava. Glavni uzročnici onečišćenja su čvrste čestice nečistoće i mikroorganizmi koji stvaraju biofilm koji se lijepi za površine aparata. Prema istraživanjima navedenima u [6], čak i nakon čišćenja, koeficijent prijelaza topline kod određenih tipova izmjenjivača topline ne vraća se na početnu vrijednost, već ostaje niži, što ukazuje na trajni utjecaj onečišćenja. Različiti tipovi izmjenjivača topline otpadnih voda imaju različite stupnjeve otpornosti na onečišćenja, što je važan faktor pri odabiru odgovarajuće tehnologije za specifične primjene. Ovisno o tipu i dizajnu izmjenjivača, onečišćenja mogu imati različit utjecaj na njihov rad pa je od ključne važnosti kontinuirano istraživanje i razvoj tehnologija koje mogu smanjiti ili eliminirati ove probleme.

Nagpal et al. [7] daje pregled načina izvedbe sustava za povrat topline otpadnih voda od najjednostavnijeg na razini jedne komponente (npr. otpadna voda nakon tuširanja direktno

ide u izmjenjivač topline gdje predgrijava vodu za tuširanje) preko složenijeg sustava za građevinu u cjelini do najsloženijih sustava korištenja topline otpadnih voda na razini gradskih četvrti prije ili u pročistaču otpadnih voda. Sustavi za građevinu u cjelini i na razini pročistača vode mogu se kombinirati s dizalicama topline jer imaju dovoljne protoke vode za pravilan rad dizalica topline. Sara Simona Cipolla i Marco Maglionico [8] analizirali su fluktuacije temperature otpadnih voda u kanalizacijskom sustavu grada Bologne u odnosu na njihov protok i vanjsku temperaturu zraka. Analizom je ustanovljeno da je temperatura otpadnih voda približno konstantna i da dnevne fluktuacije temperature vanjskog zraka nemaju veliki utjecaj na temperaturu otpadnih voda. Također je pokazano da je i protok otpadnih voda približno konstantan te da na njegovu promjenu utječe količina oborina u određenim periodima. M. Aprile et al. [9] napravili su model sustava za daljinsko grijanje i hlađenje građevina dizalicom topline koja koristi toplinu otpadnih voda i proveli su cjelogodišnju simulaciju sustava uključujući i djelomična opterećenja.

Schröder et al. [22] opisuje projekt infrastrukturnih objekata za potrebe izgradnje Centralnog uređaja za pročišćavanje otpadnih voda Zagreba (CUPOVZ) prema ponudi Zagrebačkih otpadnih voda (ZOV). Prikazani su objekti koji se nalaze u sastavu CUPOVZ-a ili služe njegovoj realizaciji. Opisana je tehnologija čišćenja otpadnih voda te obrade i odlaganja mulja, a ukratko i svi glavni objekti cijelog projekta. Autori članaka [33] i [34] analiziraju mogućnosti novih sustava daljinskog grijanja i hlađenja četvrte i pete generacije. Upravo je to doprinos ovog rada, pokazati mogućnost daljinskog grijanja i hlađenja na području grada Zagreba koristeći otpadne vode u funkciji toplinskog spremnika. Korištenje otpadnih voda kao toplinskog spremnika na području Zagreba predstavlja važan korak prema ostvarivanju ciljeva održivog razvoja i energetske tranzicije na lokalnoj razini.

3. CILJEVI I HIPOTEZA RADA

Hipoteza rada: Iskorištavanjem topline otpadnih voda grada, moguće je povećati udio obnovljivih izvora energije u ukupnoj potrošnji toplinske energije za grijanje i pripremu potrošne tople vode u gradu Zagrebu.

Cilj rada: Razvoj cjelogodišnjeg modela rada dizalice topline voda-voda s priključkom na daljinski sustav grijanja četvrte generacije. Kao ulazni podaci koriste se količine i temperature pročišćenih voda sa Centralnog pročištača otpadnih voda grada Zagreba.

Pregledom literature uočene su brojne prednosti korištenja topline otpadnih voda kao obnovljivog izvora energije. Pritom su se pojavila sljedeća istraživačka pitanja:

1. Koliki je potencijal za iskorištavanje topline otpadnih voda u Zagrebu?
2. Kakve su razlike u izvedbi i eksploataciji takvog sustava i već postojećeg sustava daljinskog grijanja?
3. Donosi li novi sustav uštedu u korištenju energenata i ako da, koliko?
4. Donosi li novi sustav smanjenje emisija ugljikova dioksida (CO₂) i ako da, za koliko?

4. TEHNOLOGIJE KORIŠTENJA TOPLINE OTPADNIH VODA

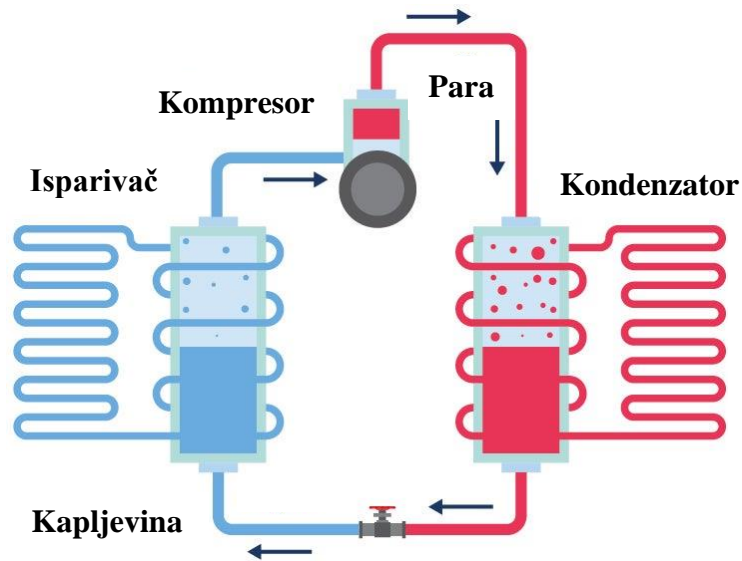
4.1. Energija otpadnih voda

Energija sunca, vjetra, vode, geotermalna energija, biomasa prepoznati su kao obnovljivi izvori energije, a primjerice dizalice topline, fotonaponski moduli i kotlovi na pelete su tehnički sustavi koji za proizvodnju energije koriste obnovljive izvore (Slika 1).



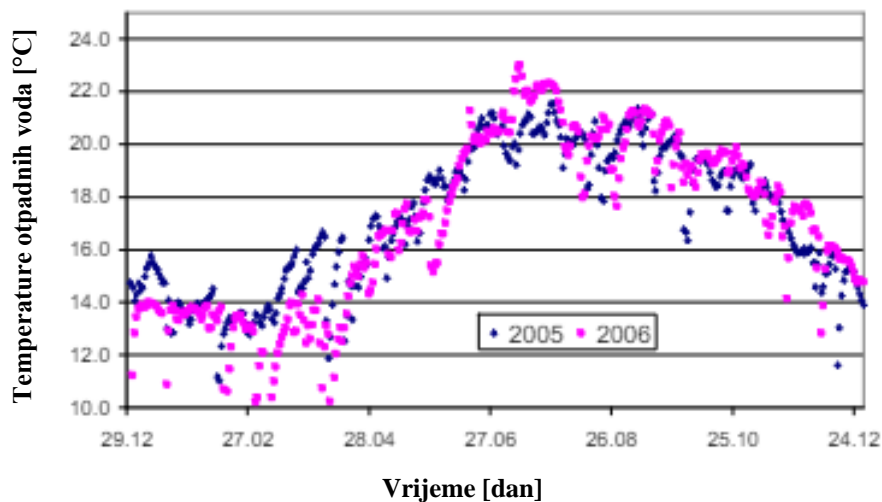
Slika 1. Obnovljivi izvori energije [23]

No manje je poznato ili još uvijek je nedovoljno poznato, da postoji veliki potencijal energije obnovljiva izvora koja se može iskoristiti kroz proces obrade otpadnih voda, biootpada ili krutog otpada [10]. Otpadne vode potječu iz kućanstava iz naselja i gradova, tvornica i industrijskih pogona te mogu nastati kao produkt poljoprivrednih djelatnosti [11]. U [7] se navodi da je temperatura otpadnih voda većinom između 10 °C i 25 °C tijekom godine, ovisno o godišnjem dobu i lokaciji (Slika 3). Također se kao potencijal otpadnih voda navodi da imaju velik protok koji je gotovo konstantan tokom cijele godine. Zbog toga otpadne vode imaju dobre preduvjete da posluže kao toplinski spremnik za dizalice topline (Slika 2). U zimskim mjesecima one su više temperature od vanjskog zraka dok su u ljetnim mjesecima niže temperature od vanjskog zraka.



Slika 2. Osnovna shema sustava dizalice topline [24]

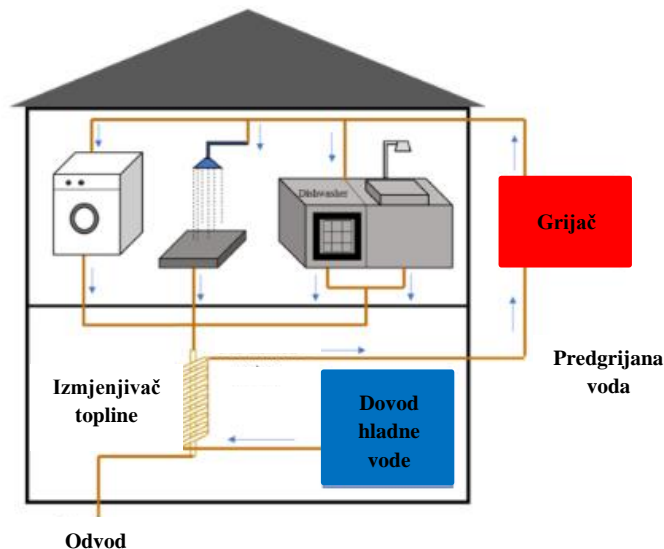
Dakle, upotrebom otpadnih voda kao toplinskog spremnika umjesto vanjskog zraka rad dizalice topline biti će učinkovitiji. Osnovna podjela načina iskorištavanja topline otpadnih voda može biti kategorizirana u tri osnovne grupe: povrat energije unutar jednog objekta, povrat energije iz neobrađenih otpadnih voda (direktno iz kanalizacije) i povrat energije unutar postrojenja za obradu otpadnih voda [7].



Slika 3. Temperature otpadnih voda tijekom godine u Zurichu[12]

4.2. Povrat energije unutar jednog objekta

Najmanji i najjednostavniji od sustava povrata energije iz otpadnih voda je povrat energije na razini jednog objekta (npr. obiteljska kuća) kao što je prikazano na Slika 4. Neka istraživanja pokazala su da 30 do 40% gubitaka energije građevine čini upravo topla otpadna voda koju se ispušta u kanalizaciju. Ta topla voda može biti voda iskorištena za tuširanje, voda iz perilice rublja ili perilice posuđa.



Slika 4. Iskorištavanje topline otpadnih voda jedne kuće

Postavljanjem izmjenjivača topline u odvod otpadnih voda omogućen je povrat određene količine toplinske energije. Topla otpadna voda izmjenjuje toplinu sa nadolazećom hladnijom vodovodnom vodom i predgrijava je. Time se smanjuje potrebna količina energije koju mora isporučiti izvor topline da bi zagrijao vodu na temperaturu korištenja. Postoji više tipova izmjenjivača topline koji se koriste u te svrhe, a najčešće su vertikalna izvedba sa tzv. „gravity film heat exchanger-om“ (GFX) i horizontalna izvedba sa izmjenjivačem tipa cijev u cijevi koji je prikazan na Slika 5. Prednost ovakvog sustava je jednostavnost i niska cijena investicije.



Slika 5. Izmjenjivač topline tipa cijev u cijevi [25]

4.3. Povrat energije iz neobrađenih otpadnih voda

Pod pojmom neobrađene otpadne vode misli se na otpadne vode iz kanalizacije koje nisu prošle proces obrade u postrojenjima za pročišćavanje. U današnje vrijeme kad je gradska kanalizacija pristupačna većini građana postoji veliki potencijal za iskorištenje energije iz tih otpadnih voda. Za razliku od postrojenja za obradu otpadnih voda koja su većinom izvan gusto naseljenih gradskih predjela, kanalizacijska mreža je izrazito gusta i pristupačna u gradskim naseljima. Slika 6 prikazuje shemu kanalizacijske mreže grada Belmonta. Također količina vode u kanalizaciji odnosno njezin protok je dovoljan da bi ga se moglo upotrijebiti kao toplinski izvor/ponor kod primjene dizalica topline. To daje mogućnost izgradnje strojarnice u kojoj bi se odvijalo iskorištenje toplinske energije otpadnih voda unutar samih gradskih naselja, a time i lakšu distribuciju ogrjevnog/rashladne energije krajnjim korisnicima.

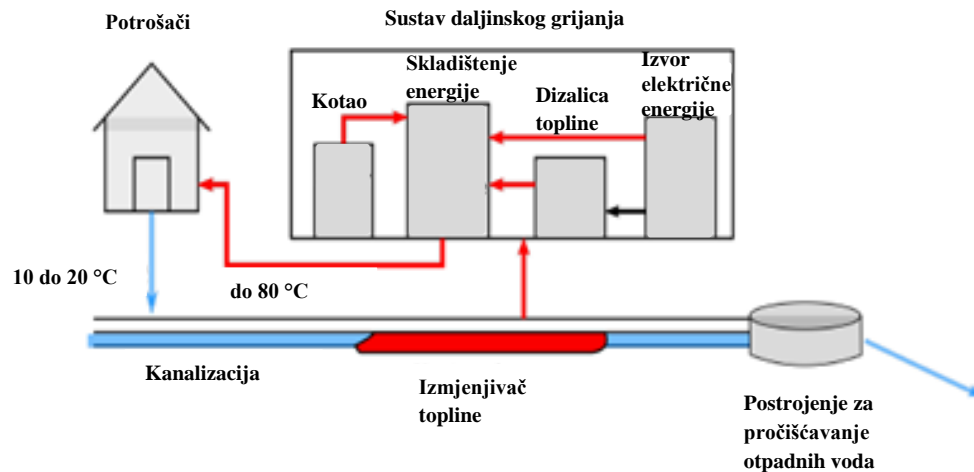


Slika 6. Shema kanalizacijske mreže u Belmontu, Massachusetts [26]

Prema [12] najvažniji preduvjet za korištenje energije iz neobrađenih otpadnih voda je odobrenje operatera kanalizacijskih sustava i postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda. Rad ovih sustava ni na koji način ne smije biti narušen. Posebno osjetljivo pitanje za operatere postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda je hlađenje neobrađenih otpadnih voda prilikom iskorištavanja njihove topline, budući da je učinkovitost biološkog pročišćavanja (nitrifikacije) ovisna o temperaturi. Ako temperatura otpadnih voda previše padne, granične vrijednosti za koncentraciju zagađivača u pročišćenim otpadnim vodama više se ne mogu jamčiti. Stoga će operateri postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda pristati na korištenje neobrađenih otpadnih voda samo pod određenim uvjetima. U slučajevima gdje su temperature otpadnih voda prirodno već relativno niske, korištenje otpadnih voda za grijanje može biti potpuno odbijeno. Iz tog je razloga, Udruga švicarskih stručnjaka za otpadne vode i zaštitu voda (VSA), zajedno sa SwissEnergy, definirala sljedeće preporučene vrijednosti za toplinsku upotrebu neobrađenih otpadnih voda: dnevna prosječna temperatura otpadnih voda pri ulasku u postrojenje za pročišćavanje ne smije biti niža od 10°C.

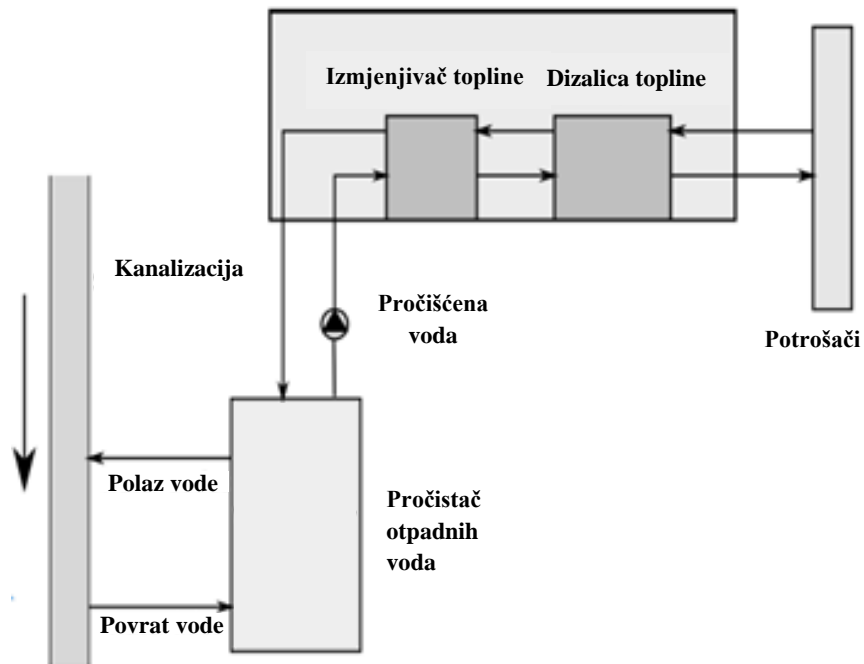
U stranoj literaturi tehnologija iskorištenja toplinske energije iz neobrađenih otpadnih voda uz korištenje dizalica topline poznata je pod nazivom „untreated-sewage-source heat pump (USSHP) system.“ Radi jednostavnosti dalje u radu će se koristiti skraćeni naziv USSHP sustav. Postoje dva različita načina za povrat energije iz kanalizacije, a to su instalacija izmjenjivača topline unutar same kanalizacije (Slika 7) ili vanjski izmjenjivač

topline s instalacijom pumpe i filtera uzvodno (Slika 8). Ovaj potonji sustav može se podijeliti na direktne i indirektne sustave [12].



Slika 7. Izmjenjivač topline unutar kanalizacije [13]

Kod direktnih sustava otpadna voda ulazi direktno u isparivač/kondenzator (ovisno o režimu rada dizalice topline) i tamo izmjenjuje toplinu s radnom tvari. Ti sustavi uglavnom nisu primjenjivi kad se radi o USSHP sustavima jer neobrađene otpadne vode sadrže velik broj nečistoća i uzrokovale bi često zaprljanje i začepljenje izmjenjivača topline. Primjena ovih sustava je češća uz upotrebu već obrađenih otpadnih voda nakon postrojenja za pročišćavanje. Za razliku od direktnih, indirektni sustavi, imaju jedan međuzmjenjivač topline na kojem otpadne vode izmjenjuju toplinu s posrednim prijenosnikom energije (PPE) koji zatim prenosi tu energiju do radne tvari. Međuzmjenjivač topline bi trebao biti što otporniji na zaprljanje te se mora osigurati mogućnost lakog i redovitog čišćenja izmjenjivačkih površina radi što boljeg prijenosa topline. Osim međuzmjenjivača indirektni sustav može još sadržavati i neku vrstu odvajača nečistoće koji bi smanjio vremenski period između potrebnih servisa za čišćenje izmjenjivačkih površina.



Slika 8. Indirektni sustav dizalice topline s dodatnim međuzmjenjivačem topline [13]

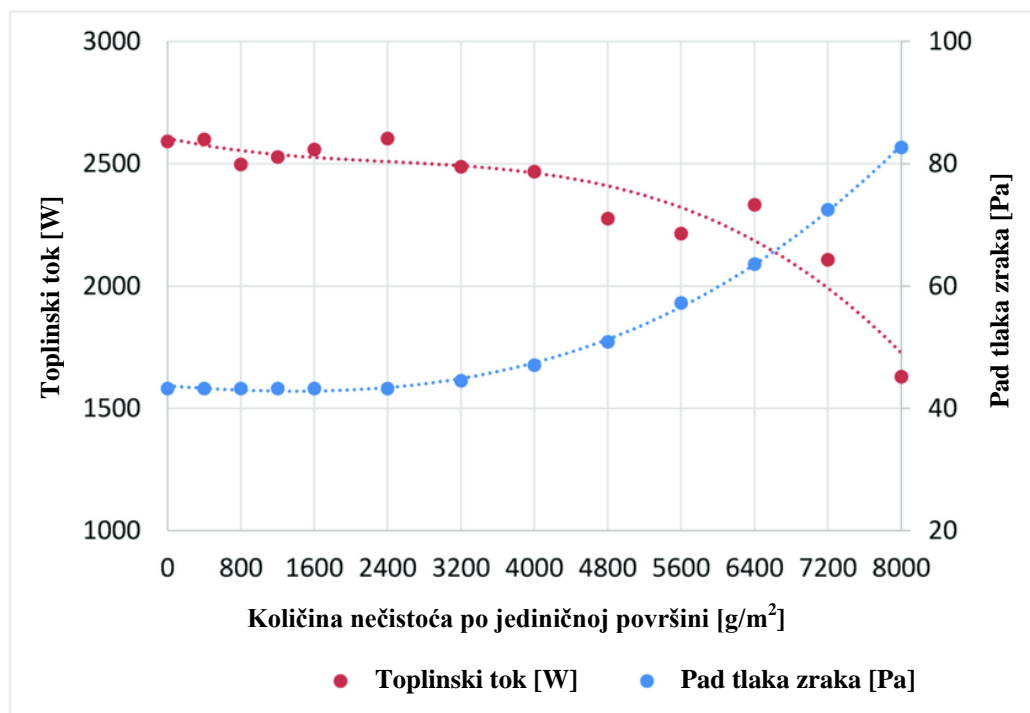
4.3.1. Iskorištavanje topline otpadnih voda izmjenjivačem unutar kanalizacije

Kod ovakvih sustava izmjenjivač topline može se naknadno postaviti u već postojeće kanalizacijske cijevi ili se kanalizacijska cijev može proizvesti s integriranim izmjenjivačem topline unutar same cijevi. Prednost ovih sustava je u tome što nije potreban dodatni prostor za instalaciju, a otpadna voda ne mora napuštati kanalizaciju jer se sva izmjena topline između otpadnih voda i posrednog prijenosnika energije odvija u kanalizacijskim cijevima. No, održavanje takvog sustava nije jednostavno, što može zahtijevati posebne dozvole jer se tijekom održavanja privremeno obustavlja rad kanalizacijskog sustava. Osim toga, potrebno je zadovoljiti određene projektne uvjete, poput minimalnog promjera kanalizacije od 800 mm, minimalnog protoka otpadne vode od 30 L/s i vodom oplakivane površine od minimalno 0,8 m² po metru duljine kanalizacijske cijevi [13]. U literaturi definirano je pet vrsta onečišćenja povezanih s izmjenjivačima topline u ovim sustavima, a to su kristalno, korozivno, kemijsko, čestično (ili fizičko), i biološko onečišćenje (Slika 9).



Slika 9. Biološko onečišćenje izmjenjivača topline [27]

Kod izmjenjivača topline u sustavima s dizalicama topline koje koriste otpadne vode, posljednje spomenute vrste imaju važnu ulogu [5]. Fizičko onečišćenje uzrokovano je čvrstim česticama u otpadnoj vodi, uglavnom dugim vlaknima. Ovi elementi smanjuju protok i površinu za prijenos topline. Biološko onečišćenje nastaje kada tekućina degradira površinu za prijenos topline čvrstim naslagama, a mikroorganizmi koriste hranjive tvari u kanalizaciji te se nastanjuju u vodenom mediju na čvrstim površinama. Stvaranje biofilma i taloga na strani otpadnih voda dovodi do povećanja toplinskog otpora i smanjuje učinkovitost prijena topline izmjenjivača do 50%. Stoga su potrebni česti postupci održavanja i čišćenja kako bi se uklonilo nakupljanje biofilma. Prema tipu izmjenjivača topline koji se koristi u sustavu moguće je napraviti podjelu na modularnu i integriranu izvedbu.

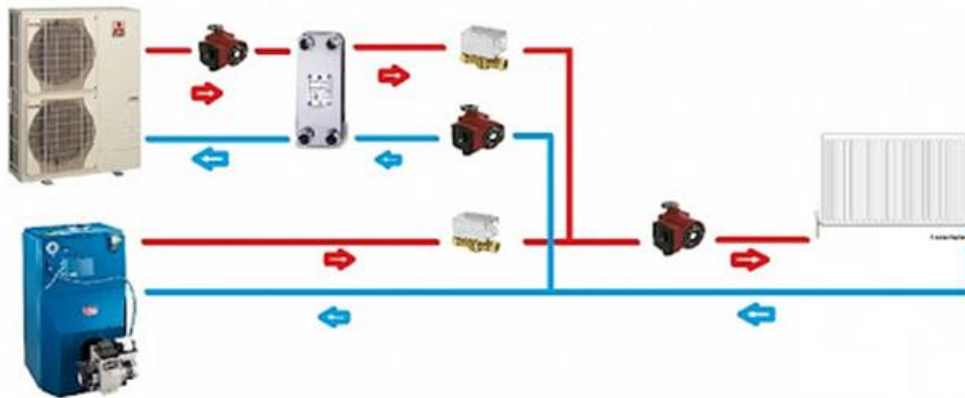


Slika 10. Pad iznosa koeficijenta prijelaza topline i porast iznosa pada tlaka medija uslijed onečišćavanja površine izmjenjivača topline [29]

Slika 10 prikazuje pad iznosa koeficijenta prijelaza topline i porast iznosa pada tlaka zraka kao medija uslijed onečišćavanja površine izmjenjivača topline i slično vrijedi za slučaj kad je voda korištena kao ogrjevn/rashladni medij. Posljedično, što je površina izmjenjivača topline onečišćenija, odnosno što je deblji sloj naslaga na njoj, kod sustava dizalice topline potrebno je uložiti veće količine energije na pumpi i kompresoru da se ostvari isti toplinski učinak, čime pada učinkovitost sustava i rastu ukupni financijski troškovi.

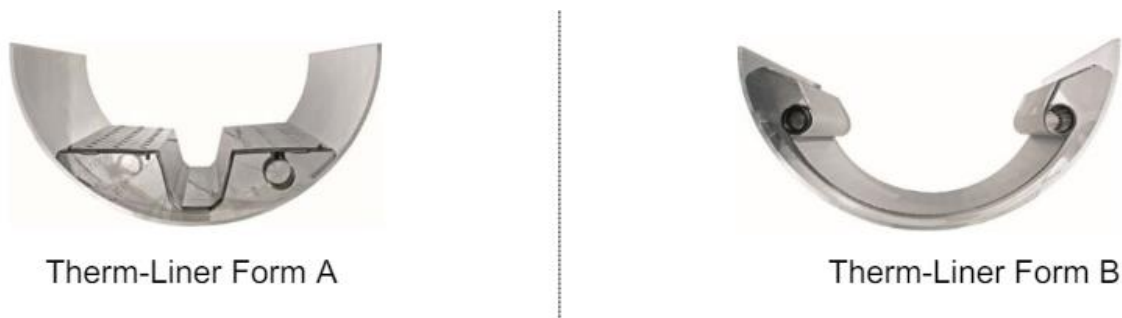
Modularna izvedba sustava (Slika 13) uz ugradnju u nove kanalizacijske sustave omogućuje i ugradnju izmjenjivača topline unutar već postojeće kanalizacijske instalacije. Time se i lokacije koje već imaju funkcionalnu kanalizacijsku mrežu mogu služiti toplinom otpadnih voda, bez potrebe za većim građevinskim radovima kao što je polaganje novog cjevovoda. Izmjenjivači tipa Therm-Liner Form A i Therm-Liner Form B tvrtke Uhrig pogodni su za grijanje pojedinačnih zgrada, cijelih susjedstava ili za daljinsko grijanje. Ovisno o vrsti uporabe, kao i lokalnim, ekonomskim i ekološkim aspektima, sustav Therm-Liner može se integrirati u različite sustave grijanja. Moguće je monovalentno, bivalentno

(Slika 11) ili multivalentno projektiranje sustava grijanja, tj. otpadne vode mogu služiti kao jedini izvor topline, ali je također izvediva i kombinacija s drugim oblicima grijanja [14].



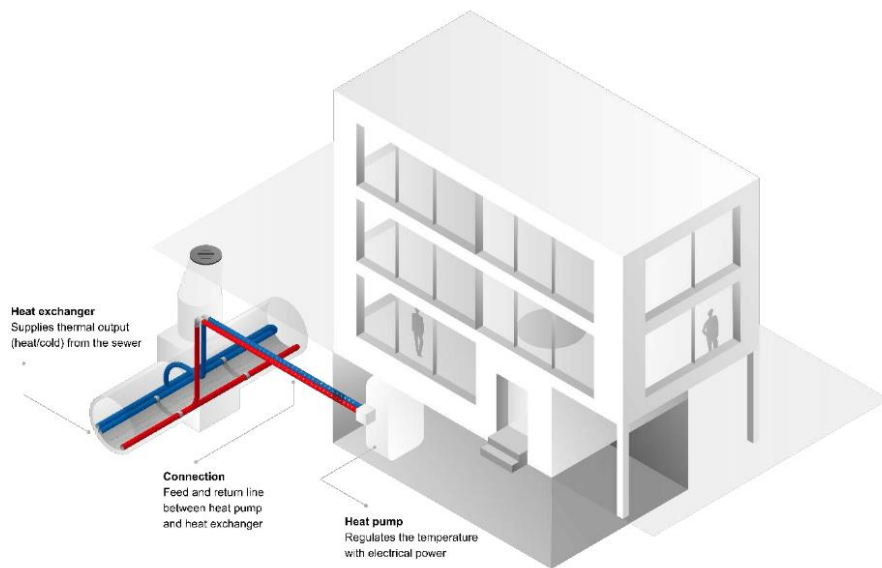
Slika 11. Bivalentni sustav grijanja [28]

Izmjenjivači topline prikazani na Slika 12 izrađeni su od austenitnog nehrđajućeg čelika, koji je, zbog svoje izvrsne otpornosti na opću koroziju i rupičastu koroziju, idealan za upotrebu u otpadnim vodama. Struktura površine osigurava turbulentan protok otpadnih voda, smanjujući stvaranje biofilma i poboljšavajući izmjenu topline.



Slika 12. Izmjenjivači topline tipa Therm-Liner A i B [14]

Neke od prednosti ovih sustava su to da otpadna voda ostaje u kanalizaciji i teče preko ugrađenog izmjenjivača topline te zbog toga nije potrebno provoditi dodatno pumpanje i filtriranje otpadne vode. Budući da mjere čišćenja i pumpanja otpadne vode nisu potrebne, operativni troškovi su gotovo nepostojeći, sustavi ne zahtijevaju održavanje, ali ih treba redovito pregledavati. Još jedna od prednosti ovih sustava modularni je dizajn pa se kapacitet sustava može proširiti dodavanjem dodatnih sekcija, ako je potrebno.



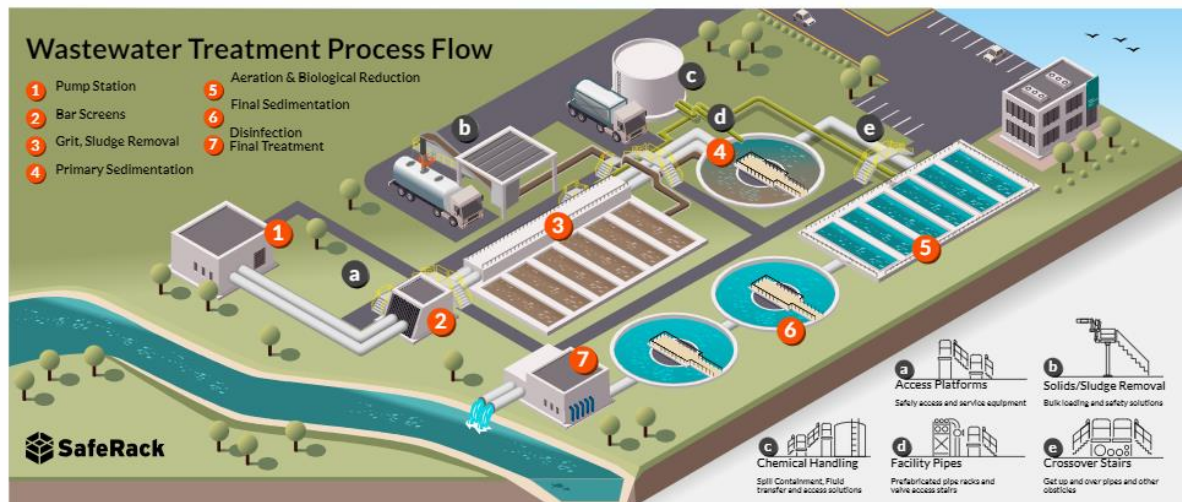
Slika 13. Primjer spajanja modularnog izmjenjivača topline s dizalicom topline [14]

4.4. Povrat energije iz obrađenih otpadnih voda

Energetski potencijal pročišćene otpadne vode puno je veći od potencijala sirove otpadne vode. Glavni razlog tomu je što u slučaju korištenja pročišćene vode neće dolaziti do nakupljanja krutih čestica na površinama cijevi izmjenjivača topline čime će se osigurati viši koeficijenti prolaza topline i volumni protoci. Također, neće biti potrebno ulagati tolika dodatna sredstva i napore u održavanje čistoće izmjenjivača topline čime će se osigurati nesmetan rad sustava dizalice topline cijelo vrijeme. Osnovni problem ipak kod korištenja ovakvih sustava je u tome što su velika postrojenja za obradu otpadnih voda smještena izvan naseljenih područja, gdje i nema korisnika kojima bi se isporučila energija za grijanje i hlađenje.

4.4.1. Postrojenje za obradu otpadnih voda

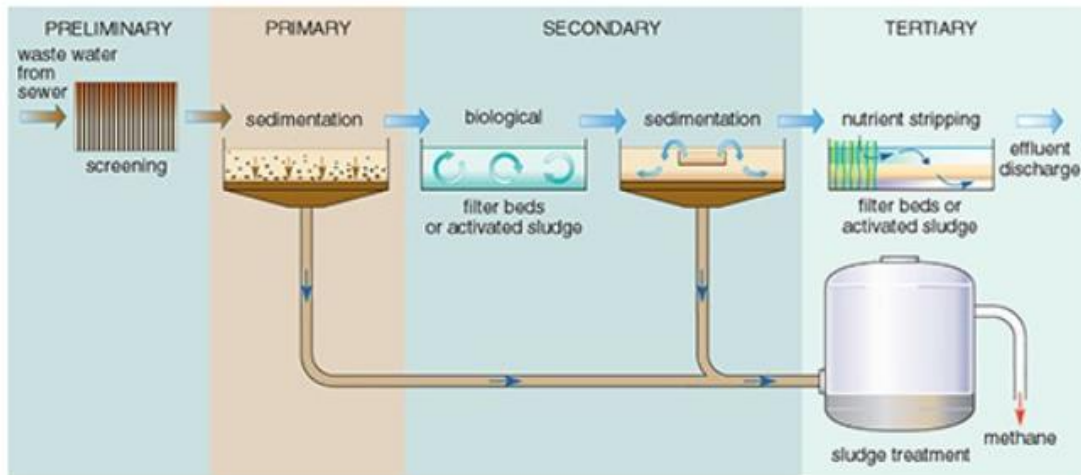
Postrojenje za obradu (filtraciju) otpadnih voda (Slika 14) prima i obrađuje lokalne i industrijske otpadne vode. Osnovna ideja takvih sustava je da se iz vode izdvoje sav otpad, masti, plutajuća ulja, pijesak i bilo kakvi krupni ostatci. Tretmani izdvajaju organske i anorganske materijale pomoću procesa taloženja, kao i biorazgradivi organski materijal rastopljen u vodi.



Slika 14. Postrojenje za obradu otpadnih voda [16]

Postrojenje za obradu otpadnih voda koristi četiri stadija tretiranja (Slika 15):

- Preliminarni tretman: uključuje izdvajanja velikih krutina (boce, tkanine, plastiku) koje se nalaze u vodi pomoću sita i pregrada
- Primarni tretman: fizikalno-kemijske obrade sedimentacije i taloženja krutina i smanjenja biokemijskih potreba organskih čvrstih tvari za kisikom. Tretman neutralizira vodu na način da eliminira hlapljive zagađivače, izdvaja masti i ulja
- Sekundarni tretman: biološki tretmani koji smanjuju količinu organske tvari u otpadnoj vodi. Uključuje aerobne procese koji razgrađuju organski materijal uz prisustvo kisika, kao i anaerobne procese koji oksidiraju organske tvari bez kisika, praćeno sekundarnim taloženjem
- Tercijarni tretman: napredni fizički, kemijski i biološki koji izdvajaju teške metale, dušik, fosfor i patogene. U nekim postrojenjima voda prolazi kroz daljnje tretmane kako bi bila korištena za navodnjavanje parkova i zelenih površina za pranje ulice ili za industrijske potrebe



Slika 15. Dijagram toka razina čišćenja u postrojenju za obradu otpadnih voda

Kao nusprodukt ovog procesa tretiranja nastaje kanalizacijski mulj (Slika 16). Kanalizacijski mulj je talog poput blata koji može sadržavati teške metale i patogene kao što su virusi i bakterije. Također sadrži i vrijednu organsku tvar i nutrijente kao što su dušik i fosfor i kao takav može biti korišten kao gnojivo ili poboljšivač tla.



Slika 16. Kanalizacijski mulj korišten kao gnojivo u poljoprivredi

Tri glavne metode za odlaganje mulja:

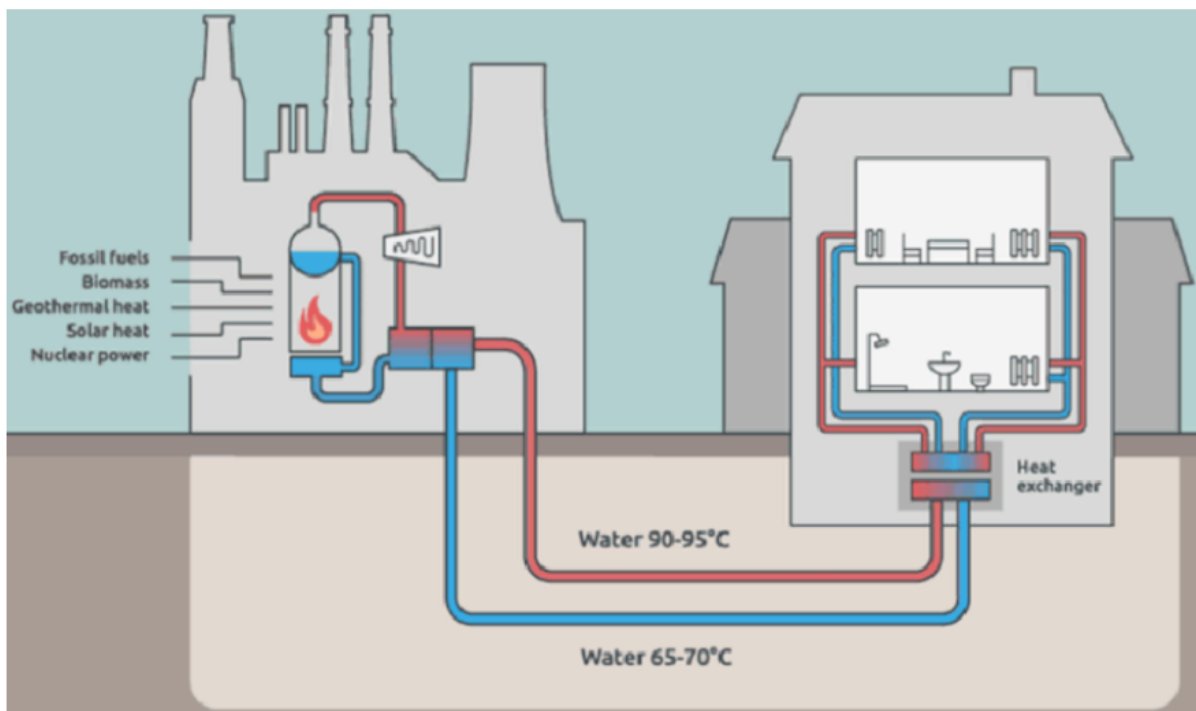
- Na poljoprivrednom zemljištu: kao gnojivo i poboljšivač tla

- Na odlagalištu otpada: nije sav kanalizacijski mulj pogodan za poljoprivredna zemljišta, neki mogu sadržavati toksičan otad koji se ne smije rasipati po poljima. Umjesto toga, odlaže sa u prirodno ili umjetno stvorenim udubljenjima u zemlji ili u rovovima, gdje se prekriveno tlom suši i polako razgrađuje
- Spaljivanje: mulj može biti osušen i spaljen, čime se ostavlja inertni pepeo. Ovo najčešće predstavlja najskuplju opciju

5. SUSTAVI DALJINSKOG GRIJANJA I HLAĐENJA

5.1. Općenito o daljinskom grijanju i hlađenju

Daljinsko grijanje (Slika 17) predstavlja sustav distribucije toplinske energije proizvedene na centralnoj lokaciji kućanskim i poslovnim prostorima kroz sustav izoliranih cijevi i to za namjenu grijanja prostora ili potrošne tople vode. Toplinska energija može biti proizvedena na razne načine, primjerice izgaranjem fosilnih goriva, biomase, prikupljanjem Sunčeve energije i na mnoge druge. Ideja je da se u režimu grijanja voda na centralnoj lokaciji zagrije, sustavom izoliranih cijevi dopremi do ciljne destinacije gdje će predati svoj toplinski tok prostoru (ili vodi) preko sustava ogrjevnih tijela i onda rashlađena se vratiti nazad na centralnu lokaciju, ponovno se zagrijati i ponoviti isti proces. Kod procesa hlađenja vrijediti će ista stvar, samo s razlikom da se prostoru isporučuje hladna voda kojoj se onda na centralnoj lokaciji treba spustiti temperatura.

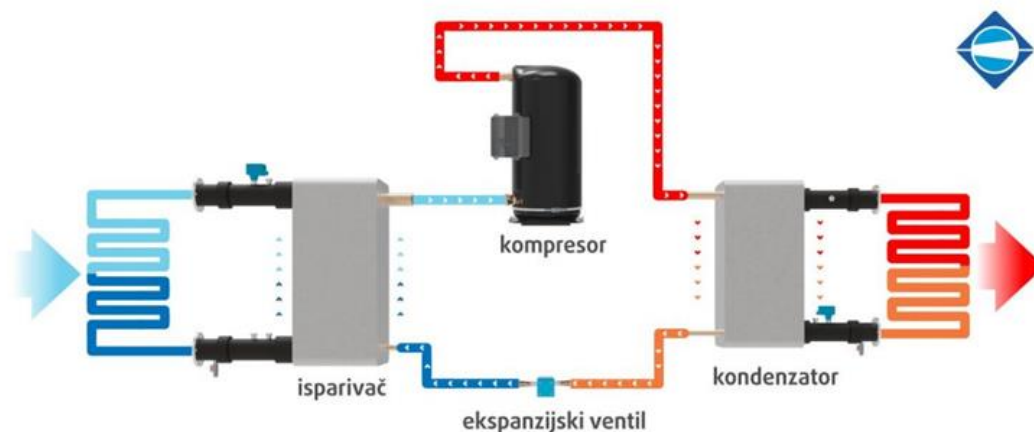


Slika 17. Pojednostavljeni prikaz sustava daljinskog grijanja [17]

Tema ovog rada isporuka je toplinske i rashladne energije stambenim prostorima s namjenom grijanja prostora i potrošne tople vode kao i za hlađenje prostora da bi se ostvarila što viša razina toplinske ugodnosti. Riječ je o daljinskom grijanju (i hlađenju) četvrte i pete

generacije gdje će se energija za grijanje isporučivati u niskotemperaturnom režimu preko sustava dizalice topline čime će se osigurati veća energetska učinkovitost.

Unutar sustava dizalice topline (Slika 18) nalazi se radna tvar kojoj će se u procesu dovesti ili od nje odvesti energija, mijenjati tlak i temperatura. Primjerice, u sustavu daljinskog grijanja preko dizalice topline i otpadne vode kao toplinskog medija, otpadna voda zagrijava radnu tvar na isparivaču, radna tvar ide prema kompresoru gdje joj se povisuje tlak i temperatura i onda ona zagrijava vodu koja će sustavom izoliranih cijevi biti dopremana do kućanstava gdje će zagrijevati prostor i potrošnu toplu vodu.



Slika 18. Pojednostavljen prikaz voda-voda sustava dizalice topline

Ovakav sustav puno je učinkovitiji od primjerice onoga gdje bi se toplinska energija zgradama i kućama dostavljala iz toplana jer se kod dizalica toplina veliki dio energije može primiti od okolišnjeg zraka, tla ili vode, ovisno o tome koji medij se koristi.

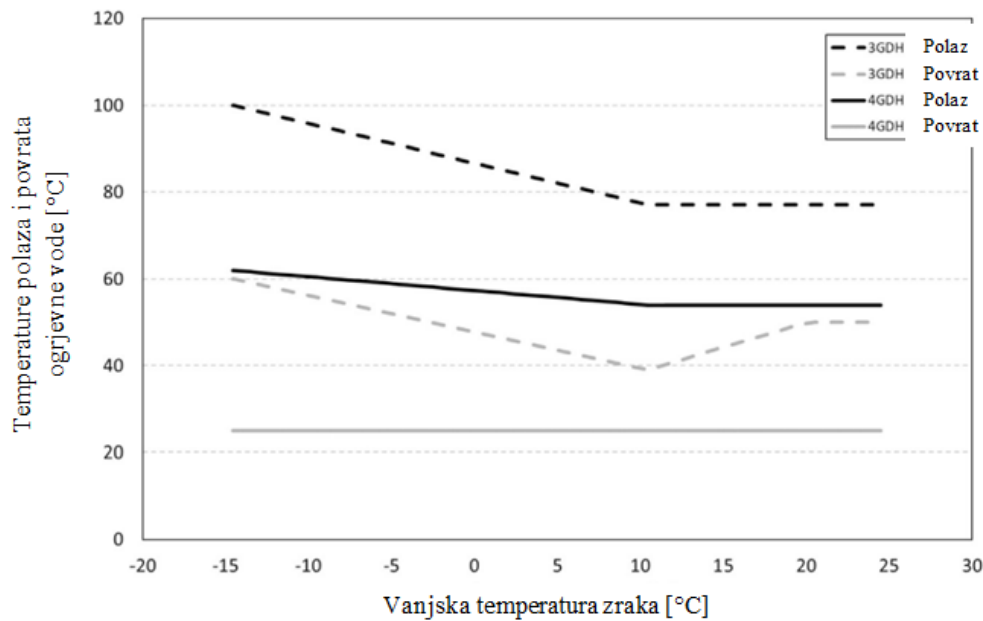
5.2. Pregled sustava daljinskog grijanja i hlađenja

Rast emisija stakleničkih plinova pokazuje snažnu povezanost s globalnim energetskim proizvodnim aktivnostima. Procjenjuje se da sektor energetike čini više od dvije trećine ukupnih emisija stakleničkih plinova u svijetu. Kako bi se postigao klimatski cilj iz Pariškog sporazuma, dekarbonizacija energetskog sektora je ključna. Globalno, grijanje i hlađenje u kućanstvima čini značajan udio u ukupnoj potrošnji energije. Podaci Međunarodne agencije

za energiju (IEA) otkrivaju da se gotovo polovica energije potrošene u zgradama koristi za grijanje prostora i vode, dok gotovo 9 % konačne potrošnje električne energije odlazi na usluge hlađenja prostora [33]. S obzirom na ove brojke, problem dekarbonizacije daljinskog grijanja dobiva sve više pažnje.

Tijekom proteklog desetljeća, inovativni sustavi daljinskog grijanja pokretani obnovljivim izvorima energije i otpadnom toplinom brzo su se razvili. Sustavi daljinskog grijanja prve generacije koji datiraju iz 1880-ih, karakterizira uporaba pare kao nositelja topline. Ovi sustavi isporučuje toplinu putem kondenzacije vodene pare u radiatorima smještenim kod potrošača. Temperatura ogrjevnog medija je visoka i kreće se od 120 °C do čak 200 °C. Tipične komponente bili su parovodi u betonskim kanalima, parne klopke i kompenzatori. Danas se takvi sustavi koji koriste paru mogu smatrati zastarjelom tehnologijom, jer visoke temperature pare stvaraju značajne gubitke topline, a ozbiljne nesreće uzrokovane eksplozijama pare čak su uzrokovale smrt pješaka [4]. Cijevi za povrat kondenzata često su korodirale, što je dovelo do manjeg povrata kondenzata i niže energetske učinkovitosti.

Sustavi daljinskog grijanja druge generacije, koji su se pojavili 1930-ih godina, koristili su toplu odnosno vrelu vodu, temperature uglavnom iznad 100 °C za distribuciju topline. Tipične komponente bili su vrelovodnevodne cijevi u betonskim kanalima, veliki cjevasti izmjenjivači topline te materijalno intenzivni, veliki i teški ventili. Motivacija za usvajanje ove tehnologije razlikovala se od zemlje do zemlje, ali je općenito bila usmjerena na uštedu goriva kroz korištenje kombinirane proizvodnje topline i električne energije. Sustavi daljinskog grijanja treće generacije, uvedeni su 1970-ih kao odgovor na naftnu krizu. Do poboljšanja energetske učinkovitosti ovih sustava dolazi zbog upotrebe vode temperature niže od 100 °C kao nosioca topline. Tipične komponente su unaprijed izrađene, predizolirane cijevi zakopane izravno u zemlju, kompaktne podstanice koje koriste pločaste izmjenjivače topline od nehrđajućeg čelika te materijalno štedljive komponente.

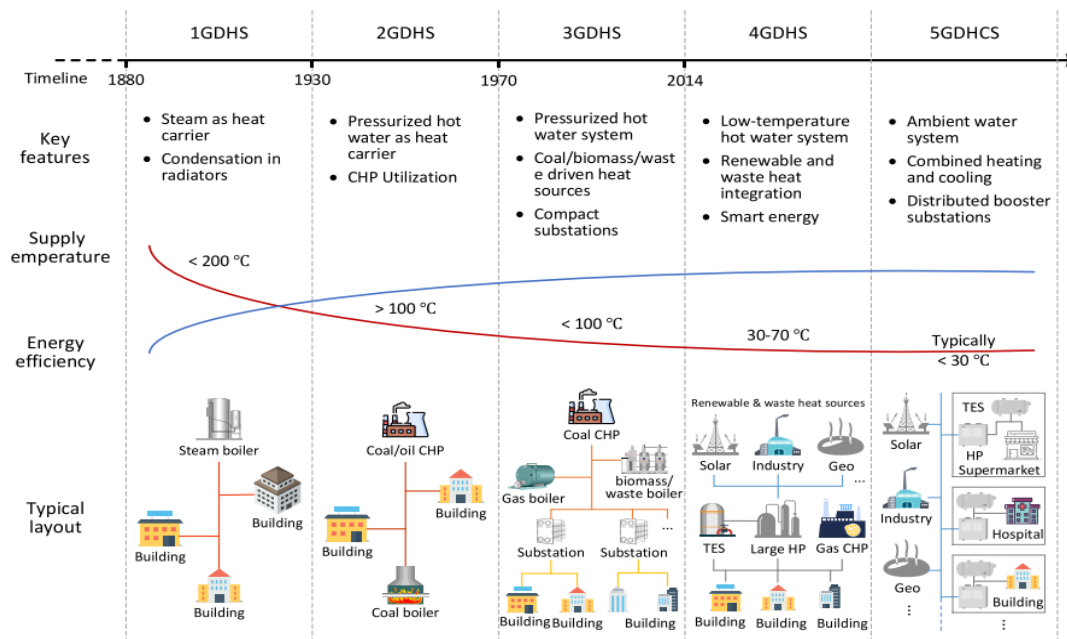


Slika 19. Usporedba temperatura polaza i povrata ogrjevnog medija u trećoj i četvrtoj generaciji sustava daljinskog grijanja [34]

Napredak prema sustavima daljinskog grijanja četvrte generacije potaknut je pojačanim naglaskom na energetska učinkovitost, pametnu regulaciju i iskorištavanje lokalno dostupnih obnovljivih izvora energije. Značajna karakteristika je održavanje temperature koja je usklađena sa stvarnim potrebama priključenih korisnika, s maksimalnim dostizanjem od 60 do 70 °C. Ova niža temperatura isporuke smanjuje gubitke u mreži i omogućuje ekonomski isplativu integraciju dodatnih obnovljivih i otpadnih izvora topline, uključujući solarne toplinske kolektore, geotermalne izvore i industrijski višak topline (Slika 19).

S očekivanjem nastavka trenda nižih temperatura polaza, povećane energetske učinkovitosti i integracije revolucionarnih tehnologija, razvijeni su sustavi daljinskog grijanja i hlađenja pete generacije. U posljednjih nekoliko godina, ovi sustavi dobivaju sve više pažnje, a nekoliko desetaka praktičnih sustava pokrenuto je diljem Europe, uglavnom kao pilot-projekti. Slično kao sustavi četvrte generacije i sustavi pete generacije također koriste energiju iz širokog spektra obnovljivih i otpadnih izvora topline. Temperatura polaza blizu je temperature okoliša, obično ispod 30 °C kako bi se minimizirali gubici topline kroz cijevi. Ovaj dizajn omogućuje korištenje neizoliranih cjevovodnih mreža, ali potencijalno rezultira većim protokom u mreži i povećanim troškovima energije za rad pumpi zbog manje razlike

temperature između polaza i povrata [33]. Pregled generacija sustava daljinskog grijanja i hlađenja s osnovnim karakteristikama prikazuje **Error! Reference source not found.**



Slika 20. Pregled generacija sustava daljinskog grijanja i hlađenja [33]

5.3. Četvrta generacija sustava

Primjenjujući gore izloženu podjelu sustava daljinskog grijanja i hlađenja, sustav koji je tema ovoga rada pripadao bi četvrtoj generaciji.

Kako bi moglo ispuniti svoju ulogu u budućim održivim energetske sustavima, daljinsko grijanje morat će se suočiti sa sljedećim izazovima:

1. Sposobnost isporuke niskotemperaturnog daljinskog grijanja za grijanje prostora i potrošnu toplu vodu za postojeće zgrade, energetske renovirane zgrade i nove niskoenergetske zgrade.
2. Sposobnost distribucije topline u mrežama s niskim gubicima u mreži.
3. Sposobnost recikliranja topline iz niskotemperaturnih izvora i integracija obnovljivih izvora topline poput solarne i geotermalne topline.
4. Sposobnost da bude integrirani dio pametnih energetske sustava (tj. integrirane pametne električne, plinske, vodovodne i toplinske mreže), uključujući integraciju u sustave daljinskog hlađenja četvrte generacije.

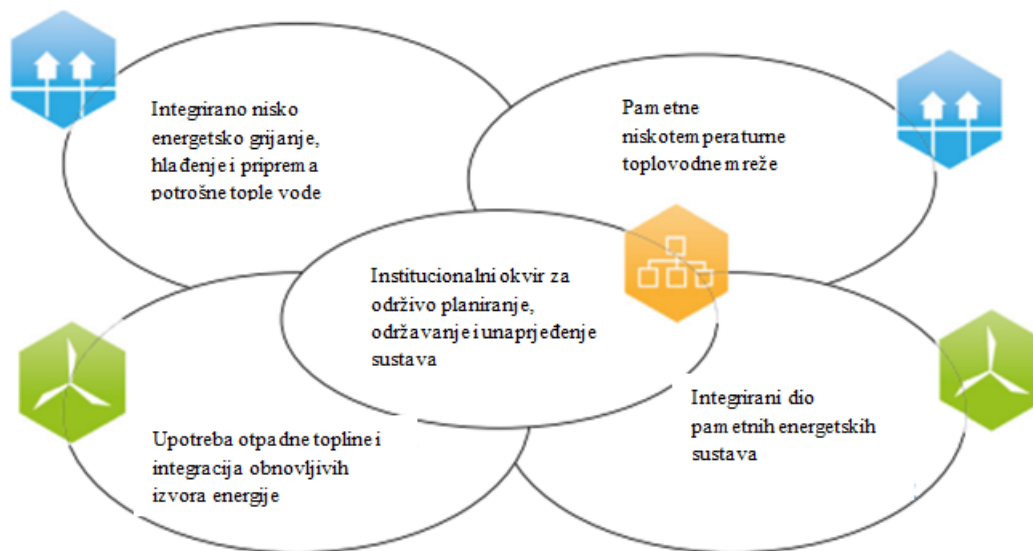
5. Sposobnost osiguranja odgovarajućeg planiranja, troškova i motivacijskih struktura u vezi s radom te strateškim ulaganjima povezanima s transformacijom u buduće održive energetske sustave [4].

Promjena u zahtjevu za temperaturom ogrjevnog medija može se dodatno poboljšati uvođenjem sustava grijanja koji mogu koristiti temperature polaza od 40 °C i ohladiti vodu iz daljinskog grijanja do gotovo sobne temperature (20–22 °C). Podno grijanje ili zidno grijanje s prosječnom temperaturom vode tek nekoliko stupnjeva višom od sobne temperature je jedna od mogućnosti. Dalje, korištenjem podstanica bez spremnika potrošne tople vode kod krajnjeg korisnika i cijevi s malim volumenom vode između izmjenjivača topline i slavina, volumen tople vode je toliko mali da se potencijalni problem s bakterijom legionelom minimizira. Stoga bi moglo biti moguće koristiti potrošnu toplu vodu temperature od 40 do 50 °C. Na taj način, temperatura polaza daljinskog grijanja za zgrade može biti niska od 45 do 55 °C.

U velikim zgradama koriste se lokalni izmjenjivači topline za potrošnu toplu vodu kako bi se osigurao vrlo mali volumen cijevi za opskrbu toplom vodom. Pametne termalne mreže definirane su kao mreža cijevi koje povezuju zgrade u nekom susjedstvu, središtu grada ili cijelom gradu, kako bi se mogle opskrbljivati iz centraliziranih postrojenja, kao i iz brojnih distribuiranih jedinica za proizvodnju grijanja ili hlađenja, uključujući pojedinačne doprinose povezanih zgrada [4]. Fokus je na smanjenju troškova i gubitaka toplinske mreže poboljšanjem komponenti i stvaranjem sinergije smanjenjem potreba zgrada za grijanjem ili hlađenjem. To otvara put za bolju iskorištenost niskotemperaturne obnovljive topline i povećava učinkovitost kogeneracijskih postrojenja i velikih dizalica topline, također kroz integraciju toplinskih spremnika.

Implementacija sustava daljinskog grijanja četvrte generacije sastavni je dio transformacije u održive energetske sustave. Tehnološka promjena s nuklearnih i fosilnih goriva na obnovljive energetske sustave podrazumijeva ekonomsku preraspodjelu, jer se ulaganja u velike elektrane zamjenjuju ulaganjima u očuvanje energije i distribuirana kogeneracijska postrojenja. Nadalje, vađenje fosilnih goriva (npr. eksploatacija ugljena) zamjenjuje se iskorištavanjem biomase i ulaganjem u vjetroturbine i solarne termalne elektrane [4]. Postojeći sustav opskrbe energijom karakteriziraju poduzeća s jedinstvenom namjenom, tj. poduzeća koja imaju proizvodnju i/ili prodaju energetske usluge kao jedinu svrhu. Često su segmentirana u sustave opskrbe toplinom, električnom energijom ili

prirodnim plinom. Ulaganja su kapitalno intenzivna, imaju vrlo dug tehnički vijek trajanja, često od 20 do 40 godina, i gotovo su 100 posto specifična za imovinu. Specifičnost imovine znači da se imovina, poput sustava daljinskog grijanja, opskrbnih stanica i elektroenergetskih mreža, može koristiti samo za svoje sadašnje svrhe. Organizacije povezane s postojećim tehnologijama konsolidirane su s ekonomskog, ali i političkog stajališta. Za razliku od nuklearnih i tehnologija fosilnih goriva koje se temelje na velikim elektranama, tehnologije obnovljivih energetske sustava obično će imati koristi od široke distribucije po geografskim područjima potrošnje. Tehnološka rješenja razlikuju se od jednog mjesta do drugog, a ponekad se moraju primijeniti nove, nedovoljno dokazane tehnologije. Održavanje takvih novih tehnologija ovisi o vlasništvu i organizaciji. Uz implementaciju novih tehnologija, vjerojatno će se razviti i novi tipovi organizacija [4].



Slika 21. Koncept četvrte generacije sustava daljinskog grijanja [4]

Sustav daljinskog grijanja četvrte generacije stoga je definiran kao koherentan tehnološki i institucionalni koncept koji pomoću pametnih termalnih mreža pomaže odgovarajućem razvoju održivih energetske sustava. Sustavi daljinskog grijanja četvrte generacije omogućuju opskrbu toplinom zgrada s niskom energetske potrošnjom uz male gubitke u mreži, na način koji integrira korištenje niskotemperaturnih izvora topline s radom pametnih energetske sustava. Koncept (Slika 21) uključuje razvoj institucionalnog i organizacijskog okvira kako bi se olakšale prikladne strukture troškova i motivacije [4].

6. PROČISTAČ OTPADNIH VODA GRADA ZAGREBA

6.1. Osnovne informacije

Pročistač otpadnih voda u gradu Zagrebu (Slika 2222) ključan je infrastrukturni objekt za očuvanje okoliša i zaštitu vodnih resursa. Zagrebački pročistač, poznat i kao Centralni uređaj za pročišćavanje otpadnih voda (CUPOVZ), nalazi se u naselju Žitnjak.



Slika 22. Centralni pročistač otpadnih voda grada Zagreba [21]

Glavne karakteristike pročistača:

1. **Kapacitet:** Pročistač je dizajniran da može pročišćavati otpadne vode za približno 1,2 milijuna stanovnika s mogućnošću proširenja pogona za kapacitet od 1,5 milijuna stanovnika.
2. **Funkcija:** Glavna funkcija je mehaničko i biološko pročišćavanje otpadnih voda koje dolaze iz domaćinstava, industrijskih objekata i oborinskih voda.
3. **Tehnologija:** Pročistač koristi napredne tehnologije za uklanjanje suspendiranih tvari, organskih zagađivača i nutrijenata kao što su dušik i fosfor.

4. **Ekološki aspekti:** Pročistač doprinosi smanjenju zagađenja rijeke Save i drugih lokalnih vodotokova, čime se štiti biljni i životinjski svijet te poboljšava kvaliteta života građana Zagreba.
5. **Energetska učinkovitost:** Neki uređaji u sklopu pročistača koriste bioplin, koji se dobiva kao nusprodukt procesa pročišćavanja, za proizvodnju električne energije i topline, čime se smanjuje energetska potrošnja i emisija stakleničkih plinova [19].

CUPOVZ provodi tri stupnja pročišćavanja: prvi stupanj uključuje mehaničko uklanjanje nečistoća poput pijeska i smeća, drugi stupanj biološko pročišćavanje otpadne vode uključuje korištenje mikroorganizama za razgradnju organske tvari, dok treći stupanj podrazumijeva uklanjanje dušika i fosfora iz vode. Treći stupanj pročišćavanja je trenutno u fazi nadogradnje kako bi se zadovoljili standardi EU za zaštitu okoliša. Trenutno se pročisti više od 12 milijuna kubika otpadne vode mjesečno, a sustav je jedan od najmodernijih u Europi. Planirana nadogradnja, trebala bi dodatno poboljšati kvalitetu pročišćavanja [20].

Iako pročistač predstavlja veliki korak naprijed u zaštiti okoliša, postoje izazovi povezani s održavanjem, modernizacijom tehnologije i upravljanjem otpadom. Kontinuirana ulaganja i unapređenja su nužna kako bi pročistač nastavio učinkovito funkcionirati i odgovarao rastućim potrebama grada. Centralni uređaj za pročišćavanje otpadnih voda je vitalan za održivi razvoj Zagreba, osiguravajući da se otpadne vode tretiraju na način koji minimalizira negativan utjecaj na okoliš.

Za tehnološki proces mehaničkog pročišćavanja, za koji je potrebna visinska razina otpadnih voda kako bi cjelokupni proces pročišćavanja mogao protjecati u slobodnom padu, izgrađene su sljedeće građevine i infrastrukturni objekti: razdjelna/preljevna građevina i spojno okno u koje se dovode otpadne vode iz sjevernog i južnog Zagreba; pužna crpka za izdvajanje krupnih tvari pomoću automatske grube rešetke te za podizanje otpadne vode na otprilike sedam metara, tako da otpadna voda u nastavku može protjecati u slobodnom padu; zgrada s grubim i finim rešetkama za odvajanje krupnog i sitnog otpada; pjeskolov i mastolov gdje se izdvajaju pijesak i masti te strojarnica u kojoj je i klasifikator za obradu pijeska te turbo-puhala za ozračivanje pjeskolova [20].

U biološkom dijelu uređaja pročišćava se otpadna voda do propisane učinkovitosti 2. stupnja pročišćavanja. U tehnološkom smislu predviđen je konvencionalni postupak s aktivnim muljem koji se odvija u osam biobazena, 12 naknadnih taložnika i s recirkulacijom

mulja. Nakon naknadnih taložnika, pročišćena voda odvodi se do izlazne crpne stanice i ispušta u glavni odvodni kanal - GOK te u rijeku Savu [20].

Dana 21.8.2024. prof.dr.sc. Vladimir Soldo i student Marko Riljin posjetili su Centralni pročištač otpadnih voda grada Zagreba. Domaćin posjeta bio je glavni tehnolog ZOV-a, dr. sc. Marin Ganjto, koji je detaljno pojasnio sve faze procesa koje se odvijaju na pročištaču (Slika 223, Slika 23, Slika 24, Slika 256, Slika 26, Slika 27).



Slika 223. Sustav za mehaničko čišćenje otpadnih voda



Slika 23. Mastolov i pjeskolov za izdvajanje masti i pijeska



Slika 24. Sustav za dodavanje kisika i bakterija za razgradnju



Slika 256. Digestori za bioplin



Slika 26. Sustav za uklanjanje najsitnijih nečistoća

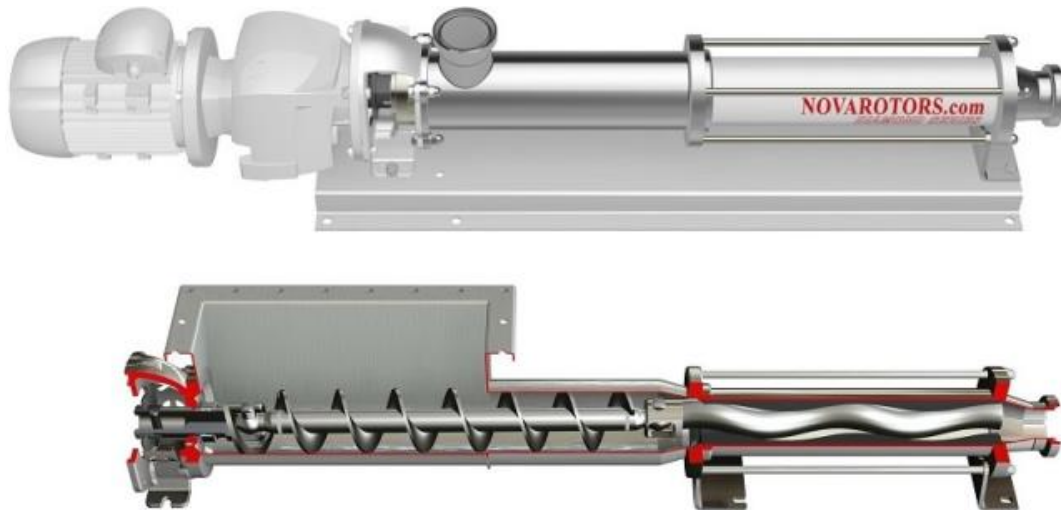


Slika 27. Izlaz pročišćene otpadne vode prema rijeci Savi

6.2. Opis rada pogona

6.2.1. Prvi stupanj čišćenja

Otpadne vode koje dotječu na uređaj za pročišćivanje podižu se putem ulazne crpne stanice u dovodni kanal i zatim teku kroz čitav uređaj. Radi prijenosa neprerađenih otpadnih voda, ovaj se koncept osniva na pužnoj crpki (Slika 28) budući da takva tehnologija prijenosa ne postiže samo visoku učinkovitost, već i najveću sigurnost rada.



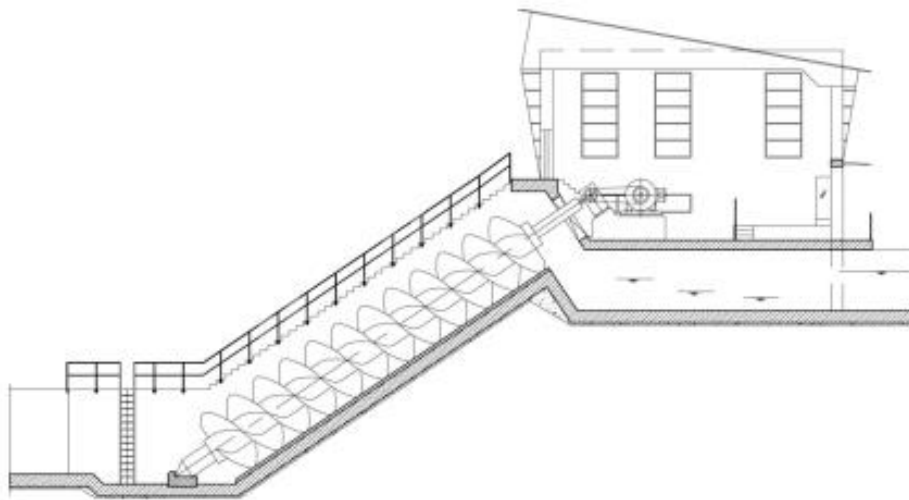
Slika 28. Pužna crpka [30]

Radi zaštite pužnih crpki, crpna je stanica opremljena krupnom rešetkom koja ima ulogu zaustavljanja krupnog šljunka, a može se čistiti ručno. Na rešetkama iz otpadnih voda uklanjaju se krupne i vlaknaste tvari radi zaštite ostalih dijelova uređaja od preranog trošenja (Slika 29) i zastoja.



Slika 29. Trošenje materijala [31]

Distribucijskim kanalom neprerađene otpadne vode istovremeno se ravnomjerno usmjeravaju u tri kanala s rešetkama. Svaka pojedina rešetka predviđena je za 20% najvećega ulaznog volumena vode. Sadržaj skupljen u rešetkama uklanja se spiralnim transporterima. Preše za pranje ugrađene su u vijak transportera otpadaka. Voda za pranje vraća se kanalima natrag u otpadne vode iza rešetke. Isprani i protisnuti otpaci zatim se odbacuju i prenose radi daljeg zbrinjavanja u skladu s propisima, u kontejnere na tračnicama. Aerirane komore za pjeskolov služe za uklanjanje pijeska radi zaštite narednih jedinica na vodnom putu i procesa pročišćavanja mulja. U komorama za isplivavanje, koje se nalaze s jedne strane, odvajaju se masti i ulja iz otpadnih voda. Nakon mjerenja volumena, otpadna voda koja dotječe iz pjeskolova distribuira se preko distribucijskog okna u dva prethodna taložnika te se ravnomjerno raspoređuje po površini spremnika. Prethodni taložnici služe za taloženje teškog, ponajprije organskog sadržaja otpadnih voda koji se odvaja iz otpadnih voda kao takozvani primarni mulj i odvodi na obradu mulja [22]. Slika 30 prikazuje presjek kroz crpnu stanicu u Zagrebu.

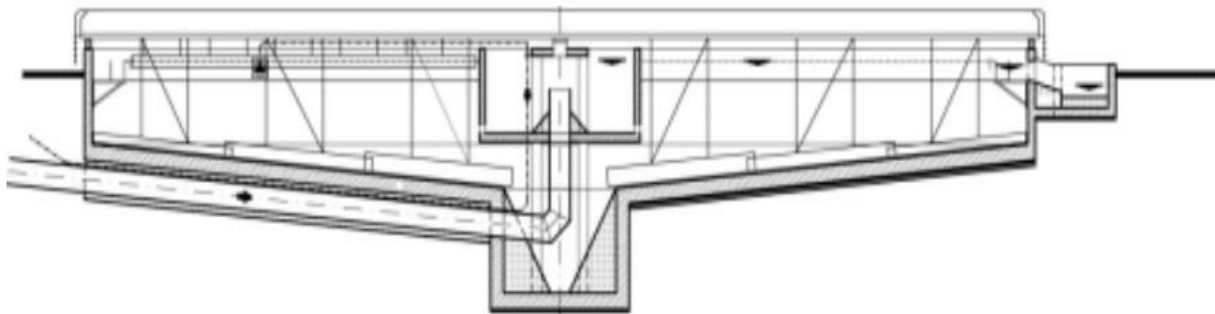


Slika 30. Presjek kroz crpnu stanicu [22]

6.2.2. Drugi stupanj čišćenja

U aeriranim spremnicima dolazi do mikrobiološke razgradnje organskih ugljikovih spojeva u aerobnom okruženju čime završava značajna faza procesa pročišćavanja otpadnih voda. Kisik potreban za razgradnju organske tvari dovodi se u spremnike preko obuhvatnog, fino dovedenog stlačivanja s aeratorima s gumenom membranom kojima se ostvaruje

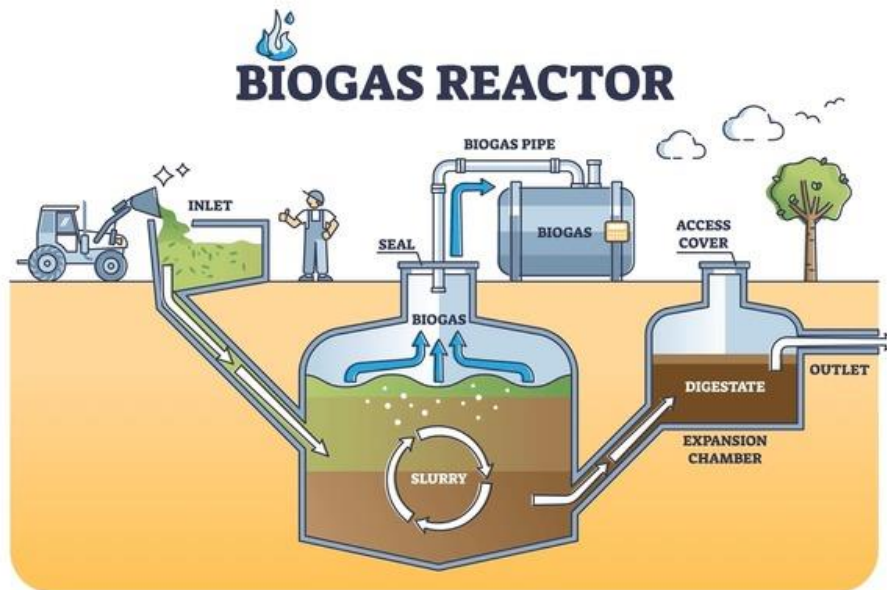
optimalni dovod kisika u spremnike s pomoću izabrane dubine protoka zraka od 5,2 m u spremnicima. Mješavina mulja iz aeriranih spremnika odvaja se uz pomoć taloženja iz pročišćene otpadne vode u naknadnim taložnicima (Slika 31). Pročišćena otpadna voda prenosi se preljevnim pragovima u izlaz uređaja za pročišćavanje. Biološki mulj na dnu naknadnih taložnika neprekinuto se provodi crpkom za povratni mulj u biološki proces gdje se dio viška mulja izvlači iz sustava. Pred izlazom spremnika predviđena je podvodna pregača, tako da plivajući mulj ne može prijeći u izlaz uređaja za pročišćavanje. Plivajući se mulj prenosi radi pročišćavanja, odnosno obrade zajedno s viškom mulja [22].



Slika 31. Presjek taložnika [22]

6.2.3. Obrada mulja

Projekt obrade mulja osniva se na sedmodnevnom radu uz svakodnevni rad od 24 sata dnevno. Kod standardnog rada planira se odvojeni proces ispusta za primarni mulj i višak mulja. Odvođenje primarnog mulja izvodi se u preliminarnim zgušnjivačima, a odvođenje viška mulja teče preliminarnim strojevima za odvod. Nakon zgušnjavanja, s pomoću centrifuga provodi se digestija mulja i naknadno odvodnjavanje stabiliziranog mulja. Prethodno mehaničko zgušnjavanje viška mulja služi za smanjivanje volumena generiranog viška mulja. Smanjivanje volumena stvara značajno smanjivanje potražnje za grijanje i digestiju, ali i stabilniji proces digestije. Generirana muljna voda kanalima se provodi gravitacijskom linijom do prihvata prethodnih taložnika. Zgusnuti primarni mulj odvodi se suho instaliranim pozitivnim istisnim crpkama u postupak za digestiju mulja. Digestija mulja ima ulogu stabiliziranja primarnog mulja i viška mulja generiranog na temperaturi od približno 35°C u anaerobnom okruženju na onaj stupanj na kojem se ispušteni mulj pretvara u higijenski bezopasno stanje. Tijekom postupka digestije oko polovica organske tvari u potpunosti se pretvara u vodu, ugljikov dioksid i plin metan koji se reciklira za stvaranje energije (Slika 32).



Slika 32. Proizvodnja bioplina iz kanalizacijskog mulja kao početne sirovine [32]

Grijanje tornjeva za digestiju postiže se susjednim izmjenjivačem topline kroz koji se novi mulj koji dolazi zajedno s recirkuliranim dijelom digestiranog mulja zagrijava na temperaturu od oko 35°C. Plin digestora koji nastaje tijekom digestije koristi se za proizvodnju interne energije s pomoću energana s kombiniranim ciklusom. Odvodnjavanje digestiranog mulja služi za značajno smanjivanje volumena mulja iz naknadnih zgušnjivača, čime se omogućuje konačno zbrinjavanje ili odlaganje u zemljane nasipe [22].

6.3. Obrada podataka

Na Slika 33 ispod prikazan je dijagram dnevne količine zahvaćene otpadne vode u Postrojenju za pročišćavanje otpadnih voda u Zagrebu na dnevnoj razini u 2023.godini. Minimalna količina izmjerena je u mjesecu rujnu i iznosila je 225 462 m³/dan, a maksimalna na početku mjeseca kolovoza i bila iznosila je 732 240 m³/dan. Prosječna količina otpadne vode koja je prošla kroz pročištač u jednom danu iznosila je 423 451 m³, a ukupna količina na razini 2023. godine iznosila je 154 681 351 kubni metar. Osnovni podaci dani su u Tablica 1.

Tablica 1. Volumni protoci otpadne vode u Postrojenju za pročišćavanje otpadnih voda u Zagrebu

Postrojenje za pročišćavanje otpadnih voda u Zagrebu	Volumni protok otpadne vode
Najmanja vrijednost	225 461 m ³ /dan
Najveća vrijednost	732 240 m ³ /dan
Prosječna vrijednost	423 451 m ³ /dan
Ukupna godišnja količina	154 681 350 m ³ /god



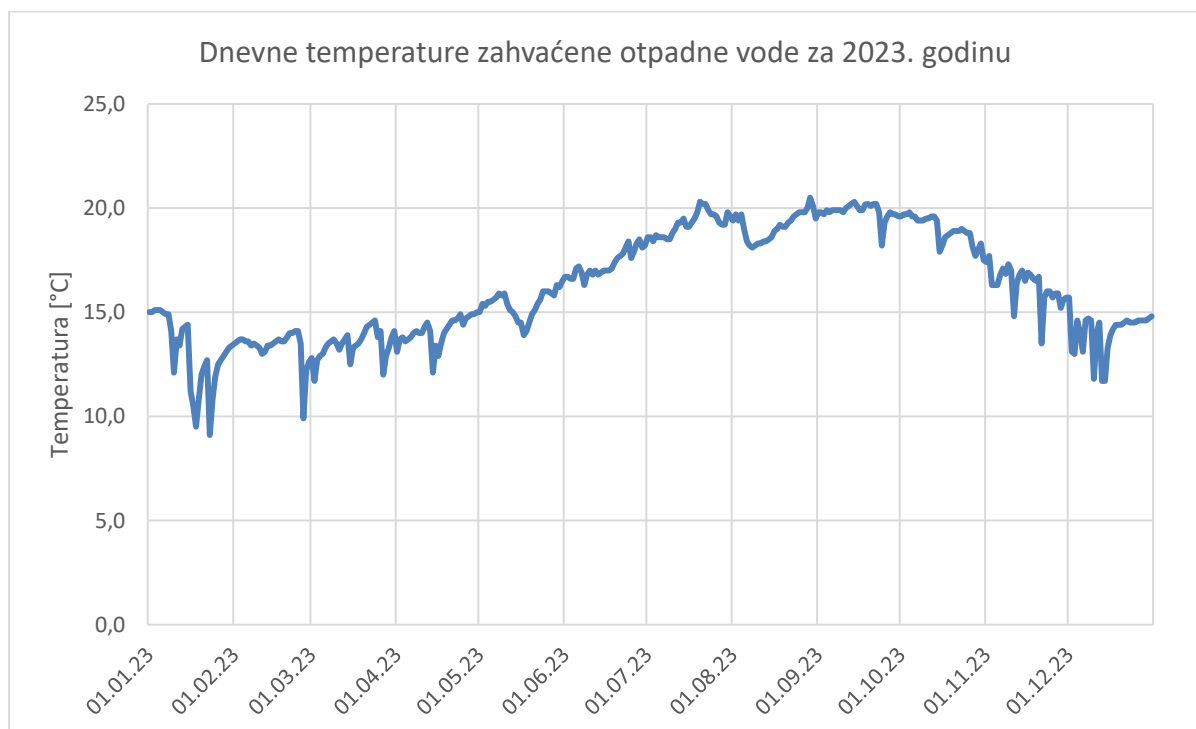
Slika 33. Grafikon protoka vode [m³/dan] kroz zagrebački pročistač otpadnih voda

Na Slika 34 ispod prikazana je godišnja raspodjela temperatura otpadne vode koja je prošla kroz Postrojenje za pročišćavanje otpadnih voda u Zagrebu u 2023. godini. Minimalno izmjerena temperatura iznosila je 11,3°C, maksimalna 22,1°C, a prosječna na razini cijele godine 17,2°C (Tablica 2). Razlika između maksimalne i minimalne vrijednosti otpadne vode nešto je viša od 10°C, što u usporedbi s godišnjim razdiobama temperatura vanjskog zraka i

njegovim razlikama je malog iznosa. Samim time otpadne vode predstavljaju stabilniji medij koji se može iskoristiti kao toplinski izvor ili ponor na sustavu dizalice topline i osigurati manji zahtjev za dovođenje dodatne količine energije na kompresorski uređaj i posljedično višu razinu učinkovitosti.

Tablica 2. Temperatura otpadne vode u Postrojenju za pročišćavanje otpadnih voda u Zagrebu

Postrojenje za pročišćavanje otpadnih voda u Zagrebu	Temperatura otpadne vode, [°C]
Najmanja vrijednost	11,3
Najveća vrijednost	22,1
Prosječna vrijednost	17,2



Slika 34. Grafikon temperature vode [°C] na izlazu iz pročištača otpadnih voda

7. POTENCIJAL KORIŠTENJA IZVORA/PONORA TOPLINE OTPADNIH VODA GRADA ZAGREBA ZA DIZALICU TOPLINE

Jedan od osnovnih ciljeva projekta bio je proračunati potencijal grijanja stanova u gradu Zagrebu korištenjem vode koja se obradila na Centralnom uređaju za pročišćavanje otpadnih voda (CUPOVZ-u) kao toplinskog medija na sustavu dizalica toplina. To znači da je glavna ideja bila proračunati koje količine toplinske energije se mogu prikupiti u karakterističnom zimskom danu te u cijeloj godini i kolikom broju stanova bi bila osigurana najviša moguća razina toplinske ugodnosti u vidu isporuke toplinske energije za grijanja prostora i potrošne tople vode. Predstavnicima Zagrebačkih otpadnih voda (ZOV) bili su voljni podijeliti podatke o vodi koja se obradila na Centralnom uređaju za pročišćavanje otpadnih voda (CUPOVZ-u) kao što su karakteristični protoci vode u određenom dijelu godine i njezine temperature. Također su podijeljeni podaci kao što su električna vodljivost vode i sadržaj otopljenog kisika koji jasno mogu pokazati je li dominantno riječ o kanalizacijskoj ili oborinskoj vodi.

Potencijal grijanja proračunat je za karakterističan dan mjeseca siječnja te za cijelu godinu općenito. Zagrebačke otpadne vode (ZOV) podijelile su podatke o protocima i temperaturama vode na dnevnoj razini, ali za nekoliko dana i detaljnije, odnosno na satnoj razini.

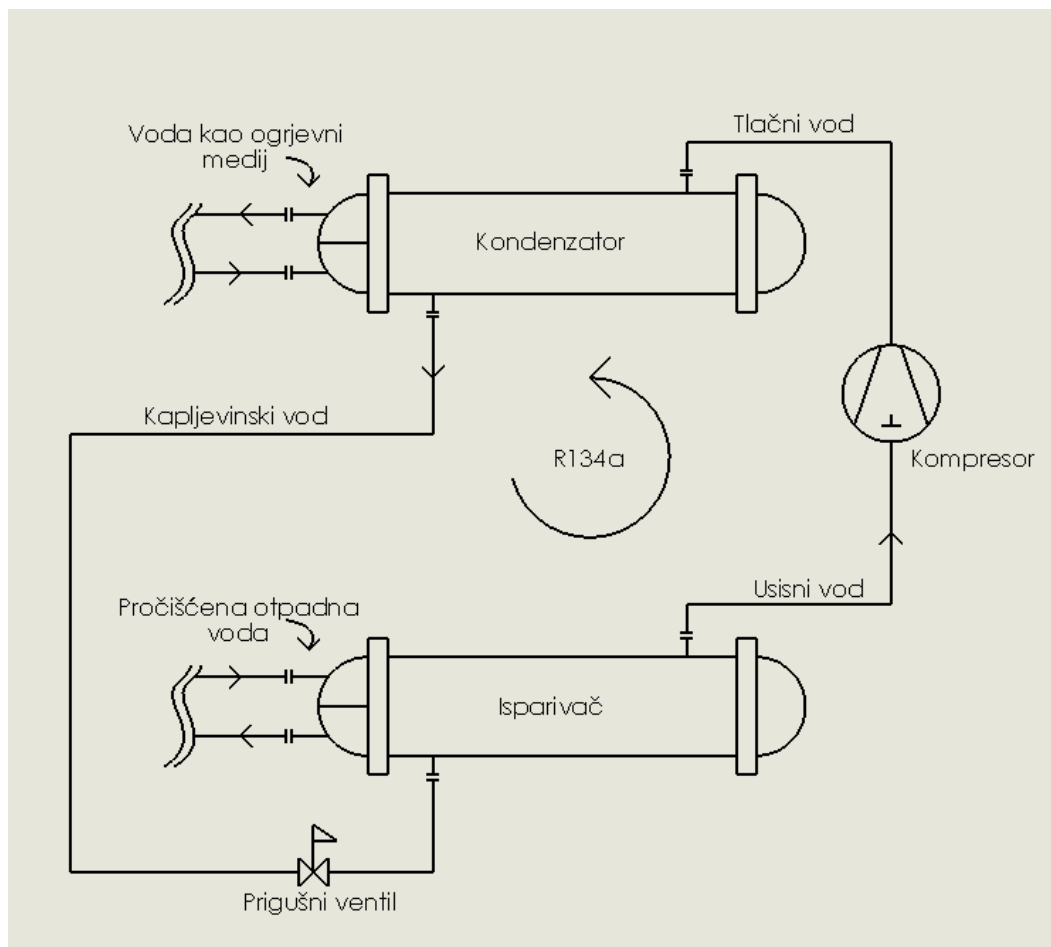
7.1. Sustav dizalica topline

Osnovne komponente sustava dizalice topline jesu isparivač, kompresor, kondenzator i prigušni ventil. Za radnu tvar koja će se nalaziti unutar svih komponenti i cjevovoda koja ih povezuje odabrana je R134a kojoj će se mijenjati tlak i temperatura na način koji je opisan u nastavku.

R134a radna je tvar koja spada u grupu hidrofluorouglijika. Njezina poželjna termodinamička svojstva (kao što su na primjer ne previsok iznos tlaka pri visokim temperaturama i mogućnost isporuke velikih količina energetske tokova) čine ju sve popularnijim izborom u rashladnim i klimatizacijskim sustavima.

Tri medija od značaja za izračun toplinskih svojstava dizalice topline jesu pročišćena otpadna voda, radna tvar i voda u ogrjevnom sustavu grijanja. Cjevovodi koji povezuju komponente sustava dizalice topline pretpostavljeni su s idealnom izolacijom, što znači da je

u proračunu uzeto da kroz njih nema nikakvih toplinskih gubitaka i time promjene temperature medija (Slika 35).



Slika 35. Shema sustava dizalice topline

Isparivač je izmjenjivač topline na kojem toplinski tok prelazi s otpadne vode kao medija više temperature na radnu tvar R134a kao medija niže temperature. Dana 29. siječnja 2023. godine temperature otpadne vode mijenjale su se kako je prikazano u Tablica 3.

Tablica 3. Satna raspodjela temperature otpadne vode na izlaznom presjeku CUPOVZ-a

Satna raspodjela temperature otpadne vode na izlaznom kanalu CUPOVZ-a, [°C]	
0:00 – 1:00	12,9
1:00 – 2:00	12,9
2:00 – 3:00	13

3:00 – 4:00	13
4:00 – 5:00	13
5:00 – 6:00	13
6:00 – 7:00	13,1
7:00 – 8:00	13
8:00 – 9:00	13,1
9:00 – 10:00	13
10:00 – 11:00	13
11:00 – 12:00	13
12:00 – 13:00	12,9
13:00 – 14:00	12,9
14:00 – 15:00	12,9
15:00 – 16:00	12,9
16:00 – 17:00	12,9
17:00 – 18:00	12,9
18:00 – 19:00	12,9
19:00 – 20:00	12,9
20:00 – 21:00	13
21:00 – 22:00	13,1
22:00 – 23:00	13,1
23:00 – 24:00	13,1

Tablica 4. Satna raspodjela volumnog protoka otpadne vode na izlaznom presjeku CUPOVZ-a

Satna raspodjela volumnog protoka otpadne vode na izlaznom kanalu CUPOVZ-u, [m ³ /h]	
0:00 – 1:00	11034
1:00 – 2:00	11014,8
2:00 – 3:00	11095,8
3:00 – 4:00	11085,3
4:00 – 5:00	11114
5:00 – 6:00	11266,9

6:00 – 7:00	9869,7
7:00 – 8:00	8911,8
8:00 – 9:00	9675,1
9:00 – 10:00	8684,3
10:00 – 11:00	11102,3
11:00 – 12:00	7968,7
12:00 – 13:00	11194,4
13:00 – 14:00	11195,3
14:00 – 15:00	11131,4
15:00 – 16:00	11160,2
16:00 – 17:00	11106,9
17:00 – 18:00	11027,8
18:00 – 19:00	11062,3
19:00 – 20:00	11061,2
20:00 – 21:00	11005,3
21:00 – 22:00	11009,9
22:00 – 23:00	11032
23:00 – 24:00	13776,4

Gustoća otpadne vode: $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

Maseni protok otpadne vode jednak je umnošku volumnog protoka i gustoće:

$$q_m = q_v \cdot \rho \quad (1)$$

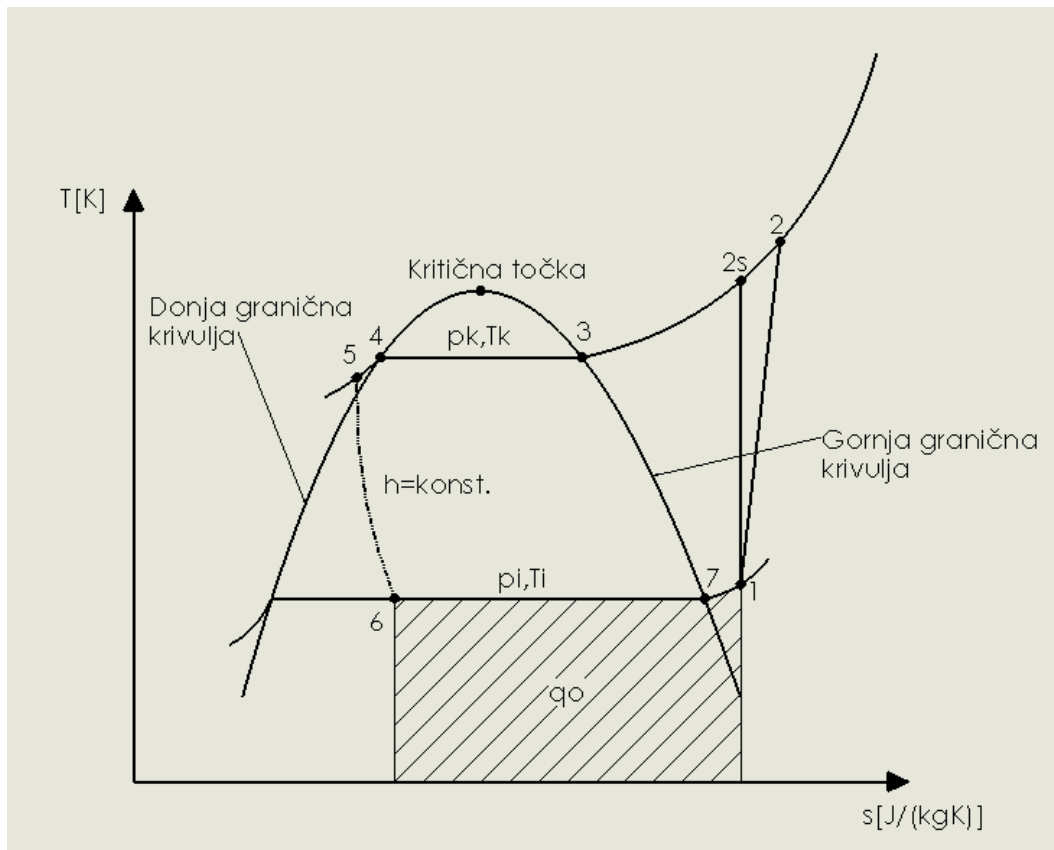
Specifični toplinski kapacitet otpadne vode: $c_p = 4187 \text{ J/(kgK)}$

Temperaturna promjena otpadne vode (za koliko se ohladila izmjenjivanjem topline na isparivaču): $\Delta T = 4,5 \text{ K}$

Toplinski tok koji je otpadna voda predala radnoj tvari na isparivaču:

$$\Phi_o = q_m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2)$$

Radna tvar R134a u radu sustava dizalice topline biti će podvrgnuta ljevokretnom kružnom ciklusu i njezina termodinamička svojstva mijenjat će se u skladu s dijagramom (Slika 36).



Slika 36. T-s dijagram s karakterističnim točkama procesa

Područje lijevo od donje granične krivulje prikazuje radnu tvar u kapljevitom stanju, između donje i gornje granične krivulje R134a nalazi se u stanju mokre pare. Mokra para mješavina je između kapljevine i pare. Desno od granične krivulje u T-s dijagramu prikazana je radna tvar R134a u stanju čiste, odnosno pregrijane pare.

Na T-s dijagramu od točke stanja 6 do točke stanja 1 radna tvar prolazi kroz isparivač. U točki procesa 6 R134a je pod stanjem mokre pare i daljnjim zagrijavanjem (toplinski tok prelazi s otpadne vode na radnu tvar uslijed više temperature otpadne vode) dolazi u stanje 1 gdje postaje pregrijana para nešto više temperature nego li je u stanju 6, ali s istim tlakom. Od 1 do 2 radna tvar prolazi kroz kompresor gdje joj se povisuju i tlak i temperatura (2s je stanje pod kojim bi radna tvar izašla iz kompresora u kojem ne bi bilo nikakvih toplinskih i mehaničkih gubitaka – idealni proces). Od točke procesa 2 do točke procesa 5 radna tvar

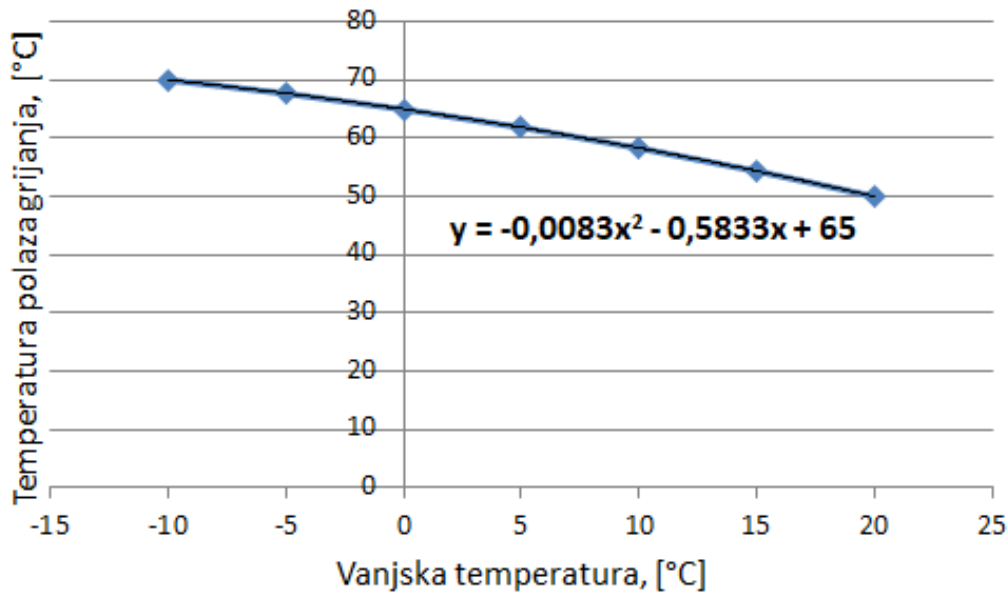
prolazi kroz kondenzator gdje svoj toplinski tok predaje vodi kao ogrjevnom mediju i pritom joj se snižava temperatura, mijenja agregatno stanje u čisto kapljevito na kraju i sve pod istim tlakom. I naposljetku, od točke stanja 5 do točke stanja 6 radna tvar R134a prolazi kroz prigušni ventil gdje joj se uveliko snižava tlak, a time i temperatura. Joule-Thompsonov efekt objašnjava da se realnim tvarima s naglim padom tlaka, snižava i temperatura što predstavlja osnovu svih rashladnih sustava i dizalica topline.

Tablica 5 prikazuje osnovne pretpostavke za proračun.

Tablica 5. Temperature i osnovne pretpostavke proračuna

Razlika između temperature otpadne vode i temperature isparivanja (točka procesa 1), [°C]	7
Pregrijanje na isparivaču, [°C]	5
Razlika između temperature kondenzacije i temperature vode kao ogrjevnog medija (točka procesa 1), [°C]	5
Pothlađenje na kondenzatoru, [°C]	3
Izentropski stupanj djelovanja kompresora	67%

Temperatura otpadnih voda dana 29 siječnja 2023. godine kretala se oko 13°C. Za temperaturu isparivanja radne tvari R134a (točka procesa 6) pretpostavljeno je da će biti 7°C niža od temperature otpadne vode, a iz isparivača će izlaziti pod stanjem pregrijane pare temperature 5°C više od temperature isparivanja. Jako je bitno da radna tvar u točki procesa 1 bude pod stanjem pregrijane pare, jer ako je kapljevina na izlazu iz isparivača, kompresoru prijete hidraulični udar. Temperatura kondenzacije radne tvari (točke procesa 3 i 4) biti će za 5°C viša od temperature vode kao ogrjevnog medija (temperatura polaza grijanja), a ta će se temperatura odrediti preko krivulje grijanja (Slika 37).



Slika 37. Dijagram krivulje grijanja

Krivulja grijanja prikazuje ovisnost temperature polaza grijanja (vode kao ogrjevnog medija koja će grijati unutarnje prostore i potrošnu toplu vodu stanovima) o vanjskoj temperaturi zraka. Pri zimskoj projektnoj temperaturi zraka, polazna temperatura vode sustava grijanja iznosi 70 °C (daljinjski sustav grijanja četvrte generacije). Pri vanjskoj temperaturi od 20°C temperatura polaza grijanja iznosi 50°C. U tom slučaju postoji samo potreba za grijanjem potrošne tople vode, ne i unutarnjih prostora stanova. Što je vanjski zrak hladniji, temperatura polaza grijanja biti će viša, samim time i temperatura kondenzacije. Time će i učinkovitost sustava dizalice topline biti niža, jer općenito vrijedi da čime je veća razlika između temperature kondenzacije i isparivanja, potrebno je uložiti veće količine energije na kompresoru i posljedično efikasnost takvog sustava nešto je manja. No, i takva manja razina učinkovitosti opet je mnogo veća nego što bi se postigla u konvencionalnim načinima grijanja, kao što su preko toplane ili individualno postavljenih kotlova u zgradama. Podaci o vanjskoj temperaturi, izvađeni su iz godišnjih meteoroloških podataka u gradu Zagrebu na satnoj razini (Tablica 6).

Tablica 6. Karakteristična satna raspodjela vanjske temperature zraka u gradu Zagrebu u mjesecu siječnju

Karakteristična satna raspodjela vanjske temperature zraka u gradu Zagrebu u mjesecu
--

siječnju , [°C]	
0:00 – 1:00	-2
1:00 – 2:00	-2,6
2:00 – 3:00	-2,7
3:00 – 4:00	-2,6
4:00 – 5:00	-3
5:00 – 6:00	-3,1
6:00 – 7:00	-3,1
7:00 – 8:00	-3,2
8:00 – 9:00	-1,9
9:00 – 10:00	-0,5
10:00 – 11:00	2,1
11:00 – 12:00	3,2
12:00 – 13:00	4,1
13:00 – 14:00	5
14:00 – 15:00	5,2
15:00 – 16:00	4,1
16:00 – 17:00	1,9
17:00 – 18:00	0,2
18:00 – 19:00	-0,5
19:00 – 20:00	-0,7
20:00 – 21:00	-1,4
21:00 – 22:00	-2,2
22:00 – 23:00	-2,9
23:00 – 24:00	-3,4

Primjerice, od 12 do 13 sati vanjska temperatura zraka u gradu Zagrebu iznosila je 4,1°C.

Jednadžba krivulje grijanja:

$$y = -0,0083 \cdot x^2 - 0,5833 \cdot x + 65 \quad (3)$$

Po jednadžbi krivulje grijanja temperatura polaza grijanja iznosi 53,9°C, a temperatura kondenzacije 58,9°C. U nastavku su dane detaljne termodinamičke vrijednosti svih točaka

procesa u određenom trenutku rada dizalice topline (između 12 i 13 sati u ovom slučaju). Iste ponajviše ovise o temperaturama otpadnih voda i o vanjskoj temperaturi zraka u gradu Zagrebu.

Tablica 7. Termodinamičke vrijednosti točaka kružnog procesa u određenom trenutku rada (između 12 i 13 sati u karakterističnom danu mjeseca siječnja) sustava dizalice topline

12:00 - 13:00	Radna tvar - R134a	Temperatura, [°C]	Tlak, [bar]	Specifična entalpija, [kJ/kg]	Specifična entropija, [kJ/(kgK)]
	1	10,9	3,6	406,6	1,74
	2s	68,7	16,41	438,94	1,74
	2	82	16,41	454,86	
	3	58,9	16,41	426,35	
	4	58,9	16,41	285,84	
	5	55,9	16,41	280,95	
	6	5,9	3,6	280,95	
	7	5,9	3,6	402,01	

7.2. Rezultati proračuna na dnevnoj razini

U osnovnim rezultatima proračuna prikazani su dijagrami promjene faktora grijanja (pokazatelj efikasnosti), toplinskog učinka kondenzatora i snage privedene kompresoru u ovisnosti o dobu dana u karakterističnom danu mjeseca siječnja i o svim vanjskim čimbenicima. Također, izračunata je i ušteda energije u odnosu na konvencionalni način grijanja preko topline i smanjenje emisije ugljikova dioksida (CO₂) u atmosferu, ali to će biti prikazano u godišnjoj bilanci.

U nastavku su dane jednadžbe na strani radne tvari koje se koriste za proračun procesa s dizalicom topline:

- Maseni protok radne tvari:

$$q_m = \frac{\Phi_o}{h_1 - h_6}, \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (4)$$

- Toplinski učinak kondenzatora:

$$\Phi_{kond} = q_m \cdot (h_2 - h_5), [kW] \quad (5)$$

- Privedena snaga kompresoru:

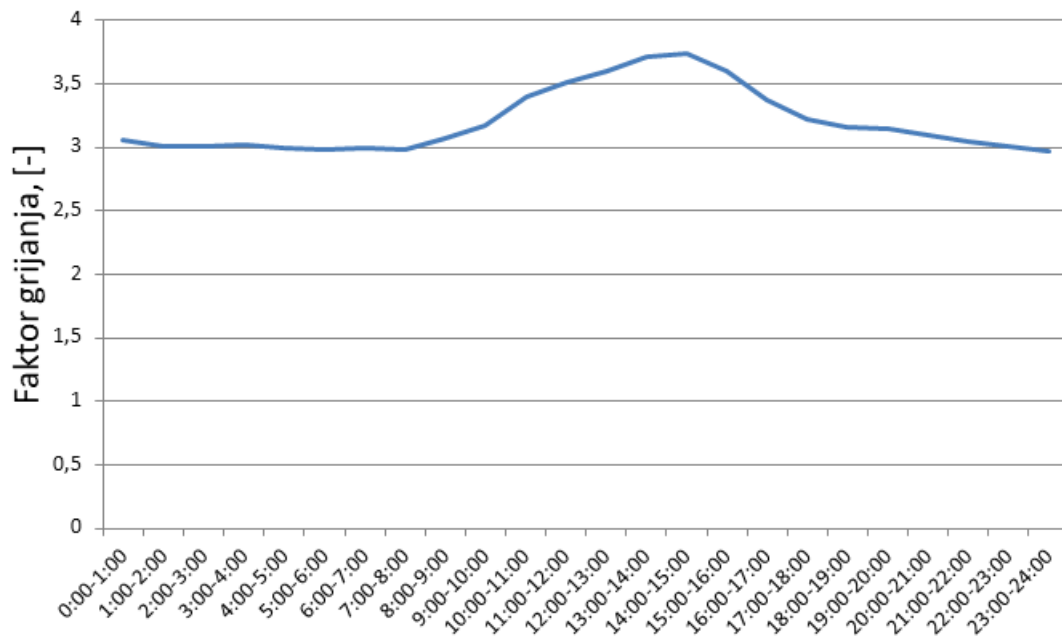
$$P_k = q_m \cdot (h_2 - h_1), [kW] \quad (6)$$

U proračunu omjer između najviše i najniže vrijednosti tlaka nije bio veći od 6 i time je potvrđen nesmetan rad kompresora. U nastavku su dane vrijednosti snaga i faktora grijanja kao prikaza učinkovitosti sustava u određenom trenutku rada dizalice topline (između 12 i 13 sati u ovom slučaju).

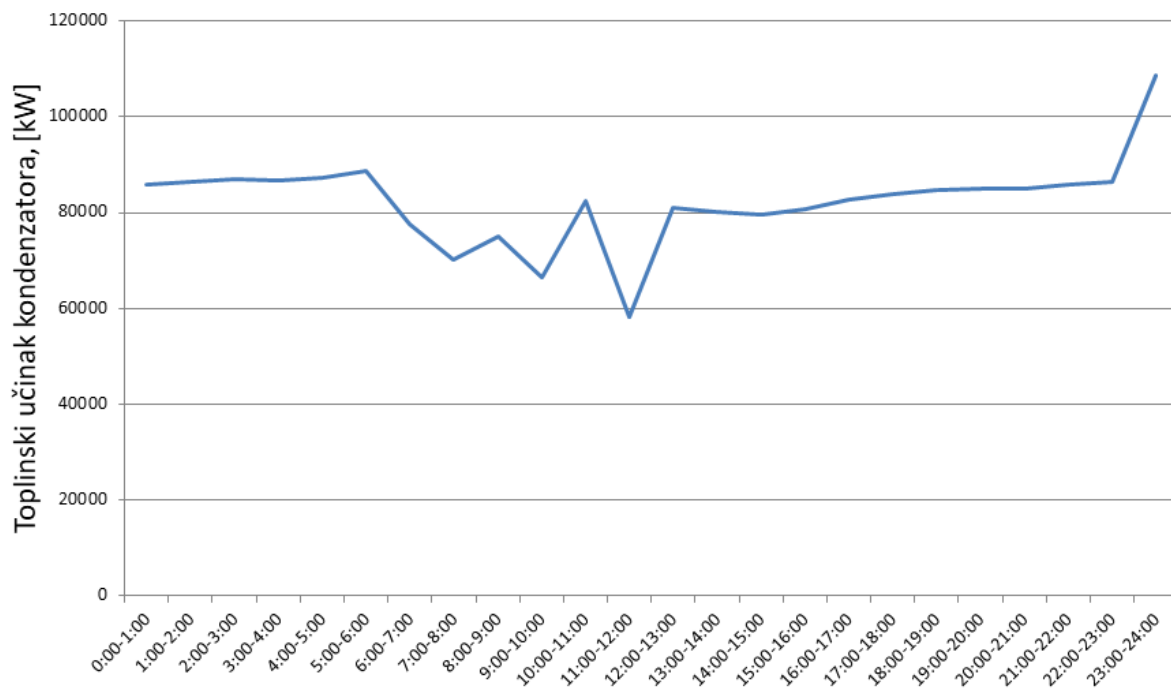
Tablica 8. Vrijednosti snaga i faktora grijanja u određenom trenutku rada (između 12 i 13 sati u karakterističnom danu mjeseca siječnja) sustava dizalice topline

Maseni protok radne tvari, [kg/s]	466,26
Faktor grijanja, [-]	3,6
Toplinski učinak kondenzatora, [kW]	81 088
Privedena snaga kompresoru, [kW]	22 500

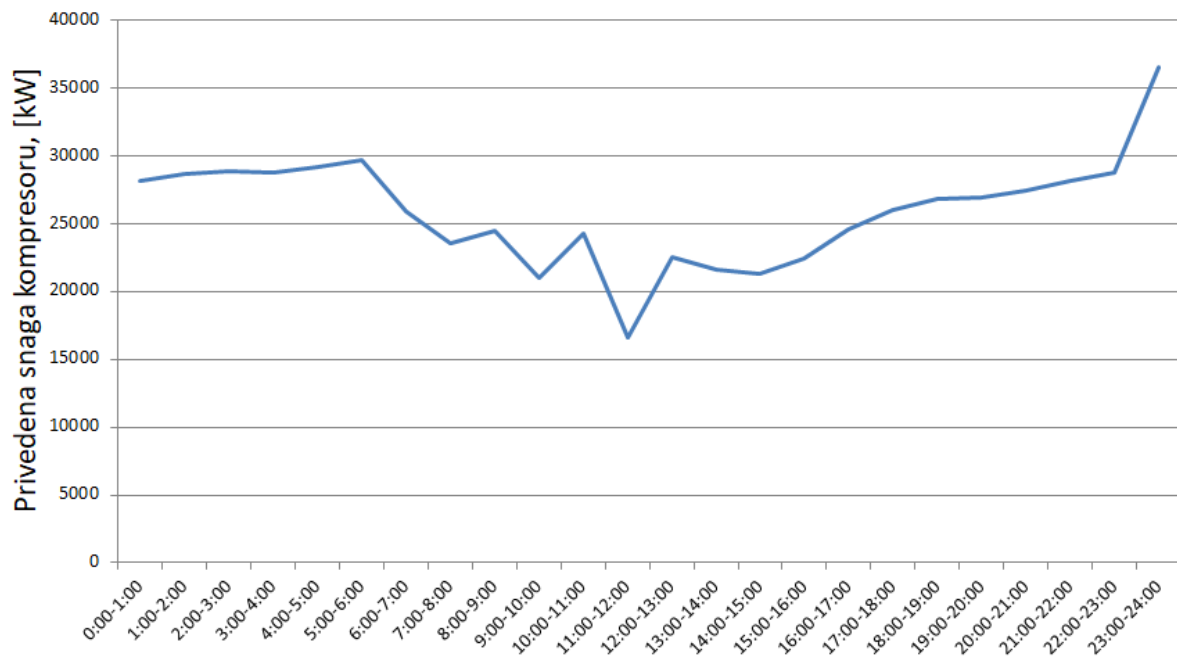
Vrijednosti snaga i toplinskih tokova kao i faktora grijanja neće biti konstantni tijekom dana i način kako se isti mijenjaju u karakterističnom danu mjeseca siječnja prikazani su na dijagramima u nastavku (Slika 38, Slika 39 i Slika 40).



Slika 38. Dijagram promjene faktora grijanja u karakterističnom danu mjeseca siječnja



Slika 39. Dijagram promjene vrijednosti toplinskog učinka kondenzatora u karakterističnom danu mjeseca siječnja



Slika 40. Dijagram promjene privedene snage kompresoru u karakterističnom danu mjeseca siječnja

U karakterističnom danu mjeseca siječnja faktor grijanja varirao je između vrijednosti 3 i 3,7, a vrijednost toplinskog učinka kondenzatora između 60 MW pa skoro sve do 110 MW.

7.3. Rezultati proračuna na godišnjoj razini

U proračunu temeljenom na godišnjoj bilanci (godina 2023.) izračunat je broj stanova kojima će se moći isporučivati toplinska energija za grijanje unutarnjih prostora i potrošne tople vode opisanom po koracima u nastavku. Zagrebačke otpadne vode (ZOV) podijelile su podatke o prosječnim dnevnim temperaturama pročišćene otpadne vode kao i o njezinim protocima, a prosječna dnevna vanjska temperatura uzeta je iz podataka Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ). Za proračun broja stanova od izrazite važnosti je specifična toplinska potreba stanova na mjesečnoj razini dana u Tablica 9. Sve pretpostavke o sustavu dizalice topline koje su korištene u proračunu na dnevnoj razini vrijede i u proračunu temeljenom na godišnjoj razini.

Tablica 9. Specifična toplinska potreba stanova prikazana na mjesečnoj razini

Mjesec	Specifična toplinska potreba na mjesečnoj razini, [kWh/(m ² ·mjesec)]
1	15
2	12
3	10
4	8
5	3
6	2
7	2
8	2
9	6
10	8
11	12
12	15

U ljetnim mjesecima specifična toplinska potreba stanova iznosi 2 kWh/m² - zbog visoke vanjske temperature ne postoji potreba za grijanjem unutarnjih prostora stanova, već samo za grijanjem potrošne tople vode (PTV). Ukupna specifična toplinska potreba stanova na godišnjoj razini pretpostavljena je na vrijednost od 95 kWh/(m²a).

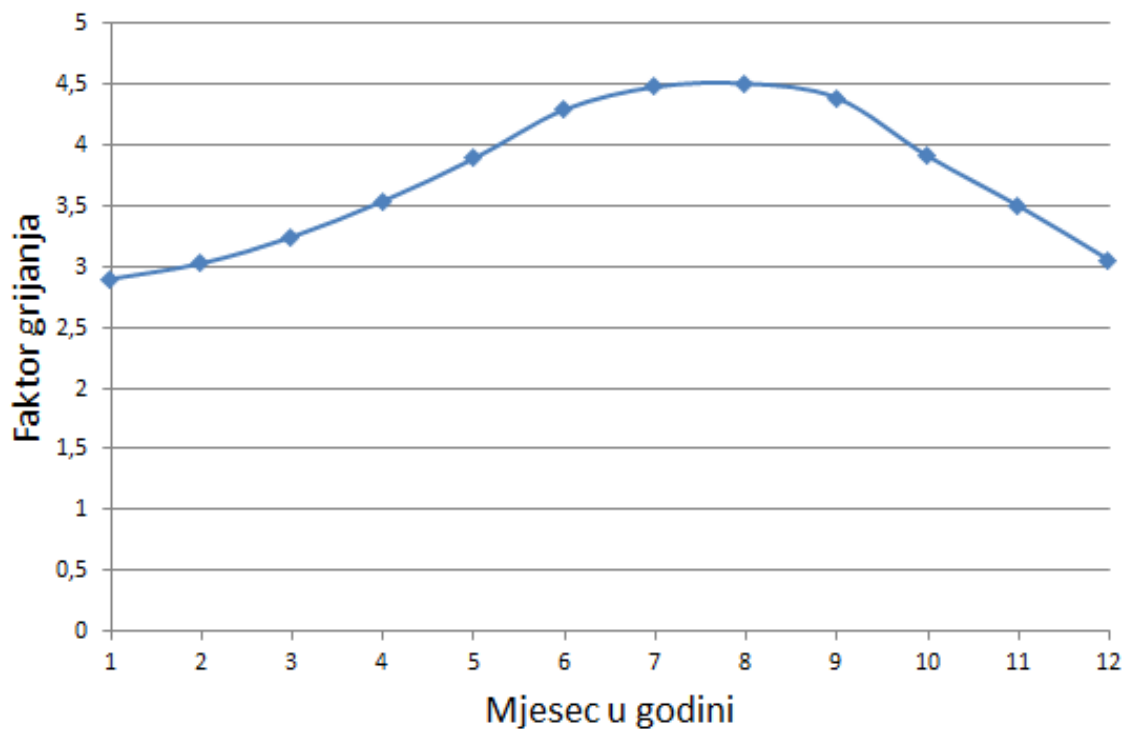
Prosječna površina stana u gradu Zagrebu = 74,2 m²

Koraci u proračunu broja stanova kojima će se isporučivati toplinska energija:

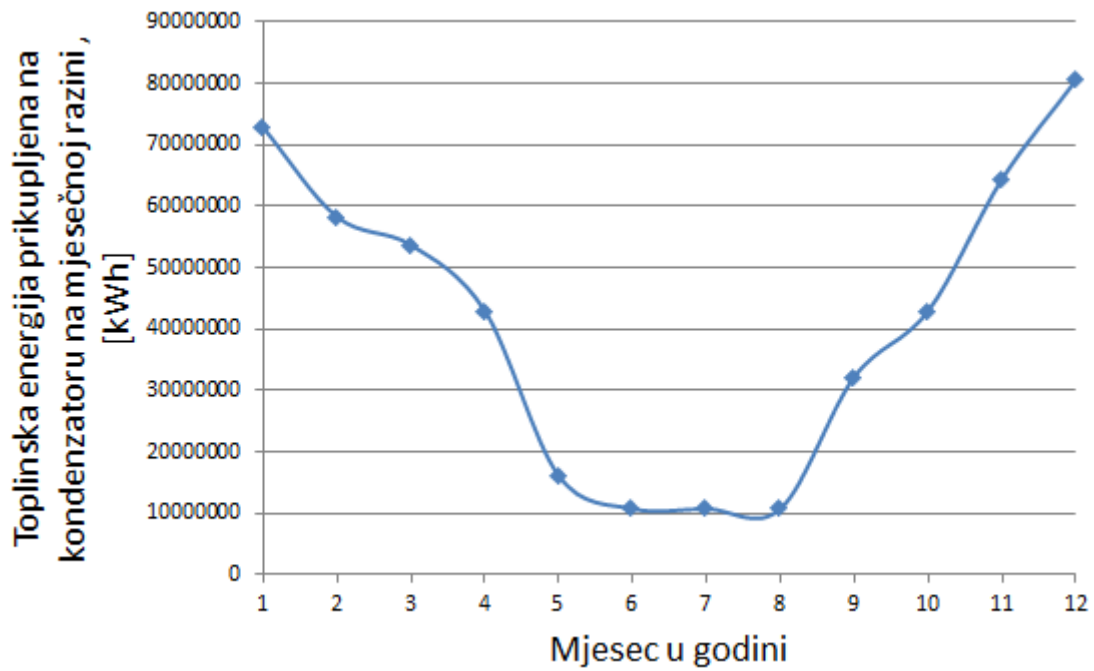
1. Proračunati koliko se ukupno toplinske energije može prikupiti u svakom mjesecu (pretpostavljeno da svaki dan sustav dizalica toplina radi 16 sati – prekid opskrbe energije noću)
2. Dijeljenjem ukupne mjesečne količine toplinske energije s toplinskom potrebom i prosječne površine stana u gradu Zagrebu dobije se iznos broja stanova – za svaki mjesec drukčiji iznos
3. Mjesec za kojeg će se pretpostaviti da sustav dizalica topline radi u punom opterećenju je onaj u kojem će se najmanjem broju stanova moći osigurati toplinska energija

4. Broj stanova u koraku broj 3 uzet je kao referenca u smislu da se i u najnepovoljnijim uvjetima može osigurati toplinska ugodnost u svakom dijelu godine
5. U svim ostalim mjesecima smanjen je toplinski učinak kondenzatora na način da se referentnom broju stanova osigura dovoljno količine toplinske energije – parcijalno opterećenje

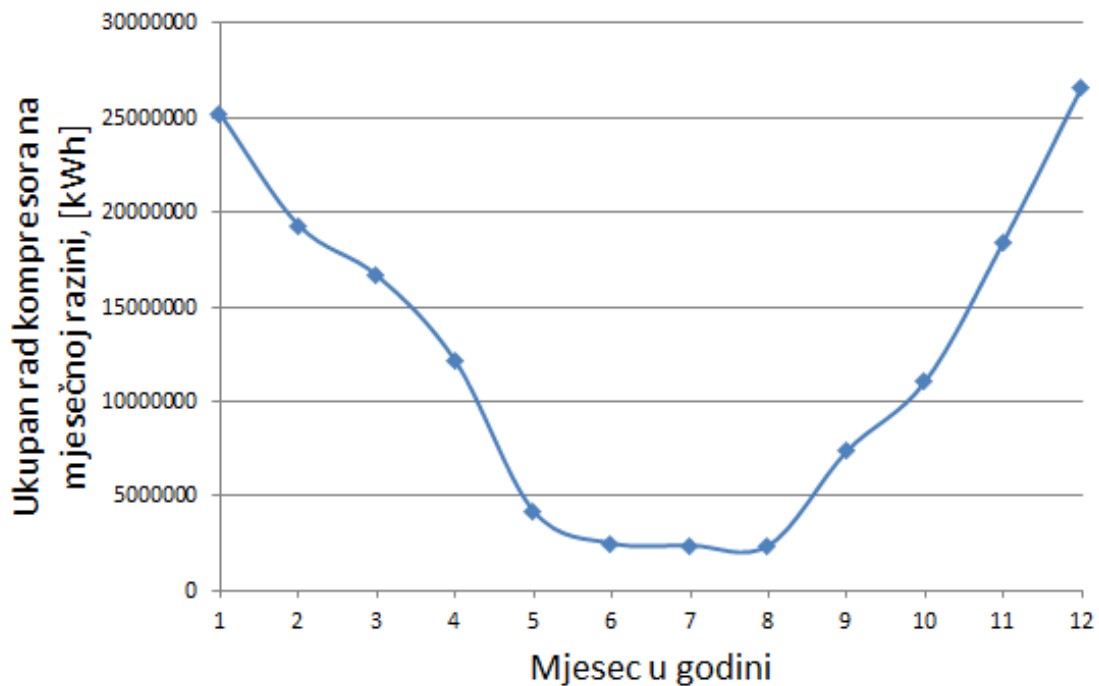
Nakon obavljenih proračuna mjesec prosinac je bio onaj u kojem se najmanjem broju stanova mogla isporučiti toplinska energija za podmirenje svih toplinskih bilanci potrebnih u tom mjesecu. Broj stanova kojima bi se tada mogla isporučiti toplinska energija iznosio je 72 361, odnosno više od 250 000 ljudi grada Zagreba moglo bi se grijati daljinskim sustavom grijanja koji koristi dizalicu topline otpadna voda – voda.



Slika 41. Faktor grijanja – prosječni po mjesecu u 2023. godini



Slika 42. Toplinska energija preuzeta na kondenzatoru na mjesečnoj razini u 2023. godini



Slika 43. Ukupan rad kompresora na mjesečnoj razini u 2023. godini

Za godinu 2023. proračunate su promjene faktora grijanja kao pokazatelja učinkovitosti sustava (Slika 41), toplinske energije preuzete na kondenzatoru (Slika 42) i privedene električne energije za pogon kompresora (Slika 43) na mjesečnoj razini. Najveće količine toplinske energije potrebno je bilo isporučiti u zimskim mjesecima (tada je ujedno bilo

potrebno uložiti i najveće količine energije za pogon kompresora). Usporedbe radi, u mjesecu prosincu isporučeno je oko 80 000 MWh toplinske energije, a u lipnju 10 000 MWh, što znači da je zimi bilo potrebno isporučiti 8 puta više toplinske energije nego li ljeti. Upravo u zimskim mjesecima faktor grijanja je najmanji zbog toga što su temperature otpadnih voda najniže, a temperature polaza grijanja najviše - time su veće razlike između temperature kondenzacije i isparivanja (što je veća razlika između tih temperatura, učinkovitost sustava je niža). Faktor grijanja kretao se između vrijednosti 2,9 i 4,5.

7.3.1. Ušteda energije i smanjenje emisije ugljikova dioksida u atmosferu

Za izračun uštede energije u samoj proizvodnji potrebno je definirati proizvedenu toplinsku energiju, isporučenu i primarnu energiju [36]. Proizvedena toplinska energija je energija predana sustavu grijanja na ulazu u cijevni razvod koja se predaje ili oduzima od prostora da bi se u njemu postigla određena temperatura. Isporučena energija je energija, izražena po nositelju energije, koja se dovodi u tehnički sustav u zgradi kroz granicu sustava kako bi se zadovoljile promatrane potrebe za grijanjem, hlađenjem, ventilacijom i klimatizacijom, potrošnom toplom vodom i rasvjetom. I naposljetku, primarna energija je energija iz obnovljivih i neobnovljivih izvora koja nije podvrgnuta niti jednom postupku pretvorbe (kemijska energija goriva, energija vjetra, itd.).

Iznosi primarne energije u slučaju grijanja pomoću toplane i pomoću dizalice topline izračunati su na način da se isporučena energija zgradi pomnoži s faktorom primarne energije. Faktori primarne energije [35] definirani su od strane Ministarstva prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine (MGIPU) te su javno dostupni na web stranici Ministarstva. Isporučena energija za dizalicu topline razmatranu u ovom radu je električna energija za pogon sustava. Isporučena energija za grijanje na toplanu je toplinska energija predana sustavu na ulazu u toplinsku podstanicu.

$$\text{Primarna energija} = \text{Isporučena energija} \cdot \text{Faktor primarne energije}, [kWh] \quad (7)$$

U nastavku su dani iznosi isporučenih energija za godinu 2023. kao i uvriježeni faktori primarne energije. Ulazni podatak u proračun isporučene energije i ušteda u emisijama CO₂ oba sustava je godišnji potencijal proizvodnje toplinske energije dizalicom topline otpadna voda – voda.

Isporučena energija u 2023. godini kod sustava grijanja pomoću toplane iznosi 496 184 MWh.

Isporučena energija u 2023. godini kod sustava grijanja s dizalicom topline iznosi 148 305

Faktor primarne energije za hrvatski prosjek daljinskog sustava grijanja na toplanu iznosi 1,494.

Faktor primarne energije za električnu energiju preuzetu iz mreže (kompresor na sustavu dizalice topline koristi električnu energiju za svoj rad) iznosi 1,614.

Uz pretpostavku da postoji prekid grijanja noću od 8 sati (između 22:00 i 6:00 sati ujutro) korištenjem dizalice topline za grijanje u 2023. godini na primarnoj energiji bi se uštedilo 502 242 MWh, odnosno 67,8 % na primarnoj energiji.

Smanjenje emisije ugljikova dioksida u atmosferu također je izračunato pomoću faktora danih od Ministarstva prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine (MGIPU).

Emisija ugljikova dioksida

$$= \text{Isporučena energija} \cdot \text{Faktor emisije ugljikova dioksida, [kg]} \quad (8)$$

Faktor emisije ugljikova dioksida za hrvatski prosjek daljinskog sustava grijanja toplanom iznosi 362,49 kg CO₂/MWh.

Faktor emisije ugljikova dioksida za električnu energiju preuzetu iz mreže iznosi 234,81 kg CO₂/MWh.

Korištenjem dizalice topline za grijanje, emisija ugljikova dioksida u atmosferu smanjila bi se za 145 083 tona odnosno za 80,7 % u odnosu na grijanje na toplanu.

Tablica 10. Energetska i ekološka usporedba dva različita sustava grijanja

	Toplana	Dizalica topline
Toplinska energija predana sustavu grijanja $Q_{\text{gen. out}}$, MWh/god	496 184	496 184
Sezonska učinkovitost	-	3,35
Isporučena energija, E_{del} , MWh/god	496 184	148 115
Primarna energija, E_{prim} , MWh/god	741 300	239 057
Emisija CO ₂ , tona/god	179 862	34 779
UŠTEDE, tona CO ₂ /god	145 083	

8.RASPRAVA

U sklopu ovoga rada napravljena je analiza toplinskog potencijala otpadnih voda grada Zagreba. Pretpostavljeno je da se otpadne vode koriste kao toplinski spremnik za dizalice topline u sustavu daljinskog grijanja. Podaci o temperaturi i protoku otpadnih voda dobiveni od osoblja CUPOVZ-a odgovaraju podacima iz literature [12], tj. vidljivo je da vrijednosti ne variraju značajno tijekom godine (Slika 34 i Slika 35). Napravljen je godišnji proračun isporuke toplinske energije za grijanje i za zagrijavanje PTV-a. Rezultati proračuna pokazali su da bi se korištenjem otpadnih voda kao toplinskog spremnika za dizalice topline moglo grijati približno 72 000 stanova/kućanstava u Zagrebu. Ta brojka nikako nije zanemariva i potvrđuje da otpadne vode kriju značajan toplinski potencijal kad bi se koristile u sustavu s dizalicama topline. Upotreba takvog sustava doprinijela bi i do uštede primarne energije za visoki iznos od približno 68 % i do smanjenja emisija ugljikovog dioksida približno 81 %.

Ovakav sustav bio bi novost na tlu Hrvatske jer do sad nema primjene navedene tehnologije u praksi kod nas. Ovaj rad pokazuje potencijal koji otpadne vode kriju i može poslužiti kao motivacija za daljnja istraživanja na ovom području koja bi mogla dovesti i do realizacije i projektiranja takvog sustava kod nas u budućnosti. Sličan sustav postoji u Budimpešti te je u [9] obrađena problematika onečišćenja izmjenjivača topline kao jednog od vodećih problema u sustavima s otpadnom vodom kao i ekonomska analiza sustava. Osim samim tehničkim dijelom, buduća istraživanja trebala bi uključiti i analize troškova te procjene ekonomske održivosti ovakvog sustava, uzimajući u obzir specifične lokalne uvjete. Neki od izazova s kojima bi se mogli sresti u buduću projektanti i operateri ovakvog sustava su lokacija pročistača otpadnih voda koji je udaljen od naselja, integracija u postojeću infrastrukturu i proširenje infrastrukture, upoznavanje i održavanje nove kod nas nedovoljno istražene tehnologije. Stoga se nadamo da će ovaj rad potaknuti akademsku i stručnu zajednicu na zanimanje i daljnje istraživanje ovog područja tehnike.

9.ZAKLJUČAK

Ovim radom analizirane su mogućnosti korištenja toplinskog potencijala otpadnih voda u Zagrebu kao obnovljivog, ali i na našem prostoru nedovoljno istraženog oblika energije. Rezultati cjelogodišnje analize rada dizalice topline koja bi kao toplinski izvor koristila pročišćene vode s Centralnog pročišćivača otpadnih voda grada Zagreba, daju jednostavan uvid u veliki potencijal otpadnih voda kao toplinskog spremnika u sustavima daljinskog grijanja i hlađenja. Otpadne vode koje su danas često smatrane problemom, mogu se preobraziti u vrijedan resurs unutar urbanih sredina. Implementacija te nove tehnologije u gradu Zagrebu osigurala bi dovoljno toplinske energije za grijanje oko 72 000 stanova, smanjujući ovisnost o fosilnim gorivima te tako doprinijeti poboljšanju kvalitete zraka. Također, korištenje nove tehnologije doprinijelo bi smanjenju emisija ugljikovog dioksida za približno 81 % u odnosu na sadašnje stanje tehnike daljinskog grijanja u Zagrebu, sve svedeno na istu isporučenu primarnu energiju.

Naravno, postoje i određeni izazovi koje je potrebno uzeti u analizu. Za realizaciju ovih tehničkih rješenja potrebna su znatna financijska ulaganja kako u postrojenje tako i u infrastrukturu. Iskustva iz gradova koja koriste navedenu tehnologiju ističu osnovni nedostatak centralnih pročišćivača koji se odnosi na udaljenost postrojenja za obradu otpadnih voda od potencijalnih potrošača toplinske energije. Postrojenja su obično na periferijama gradova čime se povećavaju toplinski gubitci mreže, infrastrukturni troškovi te potrošnja električne energije za rad cirkulacijskih pumpi. Problem toplinskih gubitaka može se umanjiti izoliranjem cijevi, a potrebna energija za rad pumpi može se smanjiti izvedbom mreže sa što manjim padom tlaka. Dobivena rješenja proračuna mogu poslužiti kao primjer i motivacija za daljnja i detaljnija istraživanja koja bi dovela do izgradnje i korištenja ovakvog postrojenja, osiguravajući uštedu primarne energije i smanjene emisije ugljikovog dioksida prateći direktive Europske unije.

ZAHVALA

Veliko hvala mentoru prof.dr.sc. Vladimiru Soldi na pruženoj prilici za rad, prijedlogu zanimljive i aktualne teme i svim pruženim savjetima tijekom pisanja rada.

Također hvala i dr. sc. Marinu Ganjti, glavnom tehnologu Zagrebačkih otpadnih voda, koji je uz sve obaveze oko preuzimanja pročistača od koncesionara, uspio organizirati posjet Centralnom pročistaču grada Zagreba i podijeliti s nama vrijedne podatke potrebne za proračun.

SAŽETAK

Andre Biloglav, Marko Riljin

Energetski potencijal korištenja topline otpadnih voda grada Zagreba

Slijedeći direktive Europske unije nastoji se postići neovisnost o fosilnim gorivima i klimatska neutralnost Europe. Jedan od ključnih koraka u postizanju tog cilja je i dekarbonizacija sektora energetike i zgradarstva. Sustavi daljinskog grijanja jedan su od najisplativijih i po okoliš najmanje štetnih sustava grijanja. Upravo zato treba ulagati u napredak i daljnju dekarbonizaciju tih sustava. Koristeći otpadne vode kao toplinski spremnik za dizalice topline u sustavima daljinskog grijanja moguće je postići „čišće“ grijanje pritom ne gubeći na kvaliteti isporučene topline.

U radu je napravljen pregled literature te su prikazane dostupne tehnologije korištenja otpadnih voda kao izvora topline za dizalice topline. Također, raspravljani su osnovni izazovi u implementaciji ovog obnovljivog tipa energije u praksi.

Za stvarne podatke o protocima i temperaturama otpadnih voda na izlazu iz Centralnog pročištača otpadnih voda grada Zagreba razvijen je cjelogodišnji model rada dizalice topline otpadna voda – voda priključkom na daljinski sustav grijanja četvrte generacije. Rezultati proračuna dali su procjenu godišnjeg potencijala proizvodnje toplinske energije. Navedeni podatci projicirani su na broj kućanstava koji bi se mogao spojiti na daljinski sustav grijanja dizalicom topline voda-voda. Proračunate su uštede u emisijama ugljikovog dioksida u atmosferu. Ukazano je na osnovne izazove u implementaciji tehnologije.

Ključne riječi: energetska tranzicija, obnovljive tehnologije s dizalicama topline, energetski potencijal otpadnih voda, uštede u emisijama CO₂

SUMMARY

Andre Biloglav, Marko Riljin

Energy potential of using the waste water heat in the city of Zagreb

Following the European Union directives, efforts are being made to achieve independence from fossil fuels and climate neutrality in Europe. One of the key steps in achieving this goal is the decarbonization of the energy and building sectors. District heating systems are among the most cost-effective and environmentally friendly heating systems. Therefore, it is essential to invest in the advancement and further decarbonization of these systems. By using wastewater as a thermal reservoir for heat pumps in district heating systems, it is possible to achieve "cleaner" heating without compromising the quality of the delivered heat.

This paper provides a literature review and presents available technologies for using wastewater as a heat source for heat pumps. Additionally, the fundamental challenges in implementing this renewable energy type in practice are discussed.

For actual data on the flow rates and temperatures of wastewater at the outlet of the Central Wastewater Treatment Plant of the City of Zagreb, a year-round model of the operation of a water-to-water heat pump system connected to a fourth-generation district heating system was developed. The calculation results provided an estimate of the annual potential for thermal energy production. These data were projected onto the number of households that could be connected to the district heating system using a water-to-water heat pump. The savings in carbon dioxide emissions into the atmosphere were calculated, and the main challenges in implementing the technology were highlighted.

Key words: energy transition, renewable technologies with heat pumps, energy potential of wastewater, CO₂ emission savings

POPIS LITERATURE

- [1] <https://eur-lex.europa.eu/HR/legal-content/summary/renewable-energy.html>
- [2] <https://www.fzoeu.hr/hr/enu-u-zgradarstvu/7571>
- [3] Baek, N. C., Shin, U. C. and Yoon, J. H. (2005) „A study on the design and analysis of a heat pump heating system using wastewater as a heat source,“ Solar, Vol 78, pp 427 - 440.
- [4] H. Lund et al. „4th Generation District Heating (4GDH) Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems,“ Energy 68 (2014) 1-11
- [5] Balint Schön, „Developing performance of waste water source heat pump systems by heat transport investigation,“
- [6] Y. Togano et al. „Advanced Heat Pump Systems Using Urban Waste Heat “Sewage Heat”,“ Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 52 No. 4 (December 2015)
- [7] A. Hepbasli et al. „A key review of wastewater source heat pump (WWSHP) systems,“ Energy Conversion and Management 88 (2014) 700–722
- [8] Sara Simona Cipolla and Marco Maglionico, „Heat recovery from urban wastewater: analysis of the variability of flow rate and temperature in the sewer of Bologna, Italy,“ Energy Procedia 45 (2014) 288 – 297
- [9] M. Aprile et al. „District Power-To-Heat/Cool Complemented by Sewage Heat Recovery,“ Energies 2019, 12, 364
- [10] <https://regea.org/zelena-energija-u-otpadnim-vodama/>
- [11] <https://www.enciklopedija.hr/clanak/otpadne-vode>
- [12] Schmid, F. „Sewage water: Interesting heat source for heat pumps and chillers,“ 9th International IEA Heat Pump Conference, 2008, Zürich, Switzerland
- [13] H. Nagpal et al. „Heat recovery from wastewater – A review of available resource,“ Water 2021, 13, 1274. <https://doi.org/10.3390/w13091274>
- [14] <https://www.uhrig-bau.eu/wp-content/uploads/2021/04/en-system-description-uhrig-energy-from-wastewater-eu-211210-1.pdf>

- [15] <https://smartwatermagazine.com/q-a/what-a-wwtp>
- [16] <https://www.saferack.com/wastewater-treatment-plant/wastewater-treatment-process-illustrationv2/>
- [17] https://www.researchgate.net/figure/How-the-district-heating-system-works_fig1_369659650
- [18] https://www.researchgate.net/figure/A-typical-diagram-of-a-water-source-heat-pump_fig2_286358619
- [19] <http://zov-zagreb.hr/hr/o-nama/nasa-postrojenja.html>
- [20] <https://www.zagreb.hr/gospodarenje-otpadom-u-gradu-zagrebu/153627>
- [21] <https://www.energetika-net.com/izdvajamo/vec-15-godina-u-sluzbi-prociscavanja-otpadnih-voda-zagreba-34732>
- [22] R. Schröder et al. „Centralni uređaj za pročišćavanje otpadnih voda grada Zagreba,“ GRAĐEVINAR 53 (2001) 4, 211-232 <https://hrcak.srce.hr/file/18641>
- [23] <https://www.hep.hr/projekti/obnovljivi-izvori-energije/3406>
- [24] <https://www.bordgaisenergy.ie/home/heat-pump-guide>
- [25] <https://www.alfalaval.com.au/products/heat-transfer/tubular-heat-exchangers/tube-in-tube-heat-exchangers/>
- [26] https://www.researchgate.net/figure/Map-of-a-portion-of-the-underground-sewer-pipeline-network-of-Belmont-Massachusetts_fig1_350745033
- [27] <https://klarenbv.com/what-is-fouling-and-scaling-in-heat-exchanger/>
- [28] http://www.theworksmb.com/bivalent_heat_pump_system.html
- [29] https://www.researchgate.net/figure/Influence-of-fouling-evolution-on-heat-transfer-and-pressure-drops_fig10_346622801
- [30] <https://vitan.hr/ekcentricno-vijcasta-pumpa/>
- [31] <https://www.tribonet.org/wiki/wear-of-materials/>

[32] <https://www.shutterstock.com/search/biogas-process>

[33] Shuai Yao, Jianzhong Wu , Meysam Qadrdan „A state-of-the-art analysis and perspectives on the 4th/5th generation district heating and cooling systems“

[34] Helge Averfalk , Sven Werner „Economic benefits of fourth generation district heating,“ Energy 193 (2020)

[35]https://mpgi.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/EnergetskaUcinkovitost/meteoroloski_podaci/FAKTORI_primarne_energije.pdf

[36] <http://thoriumaplus.com/wp-content/uploads/2020/09/Tehnicki-propis-o-racionlanoj-uporabi-energije-i-toplinskoj-zastiti-u-zgradama-procisceni-tekst-NN-102-20.pdf>